dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.233434.3029

Original Paper

Journal of Water and Wastewater, Vol. 32, No.2, pp: 80-90

Developing a Novel Method for Friction Factor Calibration in Water Distribution Networks

A. Nasirian[1], M. Mollazadeh[2], A. Valavi [3]

1. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
(Corresponding Author) a.nasirian@birjand.ac.ir
2. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
3. MSc Student, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

(Received May 31, 2020 Accepted Oct. 5, 2020)

To cite this article:
Nasirian, A., Mollazadeh, M., Valavi, A. 2021. "Developing a novel method for friction factor calibration in water distribution networks" Journal of Water and Wastewater, 32(2), 80-90.
Doi: 10.22093/wwj.2020.233434.3029. (In Persian)

Abstract

The friction factor of pipes in water distribution networks is different from the laboratory values due to the connections, installation method and created bights. Passing of time, erosion and sedimentation in pipes are also factors affecting roughness. Therefore, the roughness of pipes should be calibrated during network modeling. In this research, a new optimization method, called sensitivity analysis method was introduced for roughness calibration. In this method, first the pipes are grouped based on the material and diameter of pipes. Then, using sensitivity analysis it is determined what the effect of changing the roughness of different groups on node pressures is. In the following, roughness calibration is performed according to the importance of the groups respectively. This method was investigated on a real network with assumed changes. In order to compare the efficiency of the present method, the results obtained were compared with the results obtained from the calibration tool of WaterGEMS software. Fitness that is obtained by present study method and output of WaterGEMS in studied network are 0.02 and 8.11 centimeters, respectively. Obtained results show the high ability of this method in pipes network roughness calibration.

Keywords: Calibration, Nodal Pressures, Water Distribution Networks, Pipes Roughness, Optimization.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.233434.3029

مجله آب و فاضلاب، دوره 32، شماره 2، صفحه: 90-80

معرفی روشی جدید برای کالیبراسیون زبری لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب

علی نصیریان[۱]، مهدی ملازاده[۲]، علی ولوی[۳]

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
(نویسنده مسئول) a.nasirian@birjand.ac.ir
۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت ۹۹/۳/۱۱ پذیرش ۹۹/۷/۱٤)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
نصیریان، ع.، ملازاده، م.، ولوی، ع.، ۱۴۰۰، " معرفی روشی جدید برای کالیبراسیون زبری لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب "
مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۲)، ۹۰-۸۰. **Doi: 10.22093/wwj.2020.233434.3029**

چکیده

زبری لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب به‌دلیل وجود اتصالات، نحوه نصب و پیچ‌وخم‌های ایجاد شده، با مقدار آزمایشگاهی متفاوت است. گذشت زمان و فرسوده شدن لوله‌ها و رسوب‌گیری نیز از عوامل مؤثر بر زبری هستند. ازاین‌رو باید در زمان مدل‌سازی شبکه، زبری لوله‌ها کالیبره شود. در این پژوهش، به‌منظور کالیبراسیون زبری، یک روش بهینه‌یابی جدید با نام روش تحلیل حساسیت، معرفی شد. در این روش ابتدا گروه‌بندی لوله‌ها بر اساس جنس و قطر لوله‌ها انجام می‌شود. سپس با استفاده از تحلیل حساسیت مشخص می‌شود که تأثیر تغییر زبری گروه‌های مختلف بر روی فشارهای گره‌ای چه مقدار است. در ادامه، کالیبراسیون زبری به‌ترتیب اهمیت گروه‌ها انجام می‌شود. این روش بر روی یک شبکه واقعی با تغییرات فرضی بررسی شد. به‌منظور مقایسه کارایی این روش، جواب‌های به‌دست آمده با نتایج به‌دست آمده از ابزار کالیبراسیون نرم‌افزار WaterGEMS مقایسه شد. برازندگی به‌دست آمده از روش این پژوهش با ۱۱۰ تکرار و خروجی نرم‌افزار WaterGEMS با ۲۰۰۰ تکرار در شبکه بررسی شده به ترتیب ۰/۰۲ و ۱/۱۵ سانتی‌متر است. نتایج به‌دست آمده، توانایی زیاد روش مورد استفاده در کالیبراسیون زبری شبکه لوله‌ها را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کالیبراسیون، فشارهای گره‌ای، شبکه‌های توزیع آب، زبری لوله‌ها، بهینه‌سازی

۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع آب به منظور انتقال آب با کیفیت و سالم از منابع آب به مشترکان، ساخته می‌شوند. این شبکه‌ها شامل اجزای مختلفی از قبیل پمپ‌ها، لوله‌ها، شیرها، مخازن، اتصالات و سایر اجزا هستند و شناخت عملکرد و طراحی آنها در فرایندی به نام مدل‌سازی انجام می‌شود. این فرایند برای شناسایی و اطمینان از عملکرد سیستم در شرایط گوناگون مصرف مانند شرایط مصرف نرمال، حداکثر مصرف و حالات بحرانی مانند آتش‌نشانی است (Sumer et al., 2004). امروزه شبیه‌سازی هیدرولیکی رفتار آب در شبکه‌های توزیع تحت سناریوهای مختلف به‌صورت گسترده انجام می‌شود، اما پیش‌بینی‌های دقیق و معتبر فقط از یک مدل کالیبره شده به‌دست می‌آید (Nicolini et al., 2011).

الویسی و فرانکینی در سال ۲۰۱۰ به کالیبراسیون و تحلیل

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.233434.3029

حساسیت یک شبکه واقعی بر اساس الگوریتم SCE-UA پرداختند (Alvisi and Franchini, 2010). آنها پس از کالیبراسیون شبکه به بررسی تأثیر هر پارامتر شبکه کالیبره شده بر متغیرهای خروجی با استفاده از تحلیل حساسیت پرداختند.

کانگ و لنسی در سال ۲۰۱۱ یک روش دو مرحله‌ای ترتیبی برای تخمین هم‌زمان زبری و مصرف بر اساس روش حداقل مربعات پیشنهاد دادند (Kang and Lansey, 2011). نتایج پژوهش آنها نشان داد که روش مرحله‌ای جواب‌های دقیق‌تری از روش تخمین هم‌زمان دو پارامتر تولید می‌کند.

نیکولینی و همکاران در سال ۲۰۱۱ دو روش بهینه‌یابی بر اساس الگوریتم ژنتیک ارائه کرده و آن را برای یک شبکه واقعی به کار برده‌اند (Nicolini et al., 2011). این روش برای کالیبراسیون ضرایب زبری لوله‌ها، مدیریت نشت‌ها و تعیین موقعیت بهینه شیرها استفاده شد.

دینی و تابش در سال ۲۰۱۴ روشی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها برای کالیبراسیون هم‌زمان زبری و الگوی مصرف معرفی کردند (Dini and Tabesh, 2014). آنها با گروه‌بندی لوله‌ها و گره‌ها با خصوصیات مشترک، روشی مرحله‌ای برای کالیبراسیون زبری ارائه کردند. آنها ابتدا ضریب زبری لوله‌ها را با روش کلونی مورچه‌ها در شرایط دائمی کالیبره کرده و در مرحله بعد با مقدار به‌دست آمده، ضرایب الگوی مصرف را تعیین کردند. این فرایند تا رسیدن به هم‌گرایی با داده‌های مشاهداتی ادامه یافت.

سوفلیوس و همکاران در سال ۲۰۱۷ با روش دو مرحله‌ای به کالیبراسیون مدل یک شبکه با هدف نهایی تعیین نقاط دارای نشت پرداختند. سپس نتایج این روش را با روش یک مرحله‌ای مقایسه کردند. الگوریم ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌یابی با هدف حداقل‌سازی اختلاف مقدار محاسباتی و مشاهداتی به‌کار گرفته شد. در این پژوهش وضعیت شیرها، تصحیح زبری لوله‌ها و اصلاح نشت در گره‌ها به‌عنوان پارامترهای بهینه‌یابی موردنظر بود. همچنین آنها از روش کاهش فضای جستجو به‌منظور افزایش سرعت هم‌گرایی استفاده کردند. علاوه بر این، آنها کالیبراسیون وضعیت شیرها و تعیین نشت با کاهش فضای جستجو به‌وسیله الگوریتم ژنتیک را انجام دادند (Sophocleous et al., 2017).

ژی و همکاران در سال ۲۰۱۷ از روش بیزی[1] برای تخمین زبری و مصرف استفاده کردند (Xie et al., 2017).

میرلز و همکاران در سال ۲۰۱۷ روشی بر اساس شبکه عصبی مصنوعی و بهینه‌سازی توده ذرات ارائه دادند و این روش را برای هر دو شرایط دائمی و شبیه‌سازی دوره زمانی گسترده در یک شبکه واقعی به‌کار گرفتند (Meirelles et al., 2017).

تیاجی و همکاران در سال ۲۰۱۸ روشی را بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات و شبکه عصبی GMDH برای تخمین ضرایب هیزن-ویلیامز در شبکه‌های توزیع ارائه کردند (Tyagi et al., 2018). به‌این منظور از داده‌های مؤثر بر ضریب هیزن-ویلیامز مانند قطر لوله، جنس لوله و سرعت جریان در لوله استفاده شد.

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ روشی عددی برای تعیین هم‌زمان زبری لوله‌ها و مصارف ارائه دادند (Zhang et al., 2018). به‌این منظور معادله حداقل مربعات خطا به‌عنوان تابع هدف انتخاب شد. سپس استخراج معادلات مبتنی بر تکرار بر اساس تحلیل حساسیت محلی انجام شد. این روابط به پارامترهای زبری و مصرف اجازه به‌روزرسانی کارآمد به‌طور مکرر تا رسیدن به هم‌گرایی موردنظر را می‌دهد. به‌منظور افزایش کارایی روش، لوله‌ها و مصارف بر اساس مشخصات فیزیکی‌شان گروه‌بندی شدند تا ابعاد مسئله کوچکتر شود.

فرایند کالیبراسیون معمولاً شامل تنظیم مقدار زبری، مصرف و وضعیت باز و بسته بودن شیرها است. برخی از پژوهش‌ها بر روی تنظیم یکی از پارامترهای زبری و یا مصرف تمرکز دارند و برخی به کالیبراسیون هم‌زمان هر دو پرداخته‌اند. برخی از پژوهش‌ها نیز نشان داده‌اند که کالیبراسیون زبری و مصرف به‌صورت جداگانه می‌تواند به نتایج مناسب‌تری منتهی شود. پژوهش‌های انجام شده در زمینه کالیبراسیون زبری بر یافتن روش‌های بهینه‌یابی بهتر برای زبری و به‌خصوص با استفاده روش‌های ابتکاری و فراابتکاری و نحوه تعامل کالیبراسیون زبری با کالیبراسیون سایر پارامترها تمرکز دارند.

در این پژوهش روشی ابتکاری ارائه شد که می‌تواند به خوبی پارامتر زبری را باسرعت و دقت زیاد کالیبره کند. این روش

[1] Bayesian

می‌تواند برای بهینه‌یابی از هر روش بهینه‌یابی دیگری استفاده کند و نتایج آن می‌تواند در یک روش دو مرحله‌ای با سایر روش‌های کالیبراسیون شبکه ادغام شود و سرعت آنها را بهبود بخشد. این روش بر روی یک شبکه توزیع آب واقعی بررسی شد و دقت و سرعت همگرایی زیادی از خود نشان داد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش روشی جدید برای کالیبراسیون زبری لوله‌ها ارائه شد. این روش بر روی یک شبکه واقعی با زبری‌های فرضی استفاده شد. با توجه به فرضی بودن مقدار زبری و معلوم بودن آنها، صحت‌سنجی نتایج روش با مقدار صحیح زبری انجام شد. برای بررسی تأثیر این روش بر دقت نتایج و سرعت همگرایی آن، با سه روش دیگر مقایسه شد. ۱- تحلیل شبکه با حالت جستجوی کاملاً تصادفی، ۲- حالتی که جستجو در هر گروه زبری با این روش انجام شد، اما در انتخاب ترتیب گروه‌ها از آنالیز حساسیت استفاده نشود و به صورت تصادفی انجام شود. ۳- استفاده از ابزار واسنجی‌گر داروین نرم‌افزار WaterGEMS.

۲-۱- روش مورد استفاده

در این روش ابتدا لوله‌های شبکه بر اساس جنس و قطر گروه‌بندی شد. سپس با انجام تحلیل حساسیت، تأثیر گروه‌های مختلف بر فشارهای گره‌ای مشخص می‌شود. در نهایت کالیبراسیون زبری با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل حساسیت انجام می‌شود. مدل‌سازی و تحلیل هیدرولیکی در نرم‌افزار EPANET2 و تحلیل بهینه‌یابی در نرم‌افزار MATLAB انجام شد. برای بررسی اعتبار روش، نتایج به‌دست آمده از مدل کالیبره شده با مقدار فرضی اولیه (نتایج دقیق) و نتایج نرم‌افزار WaterGEMS مقایسه شدند. تابع هدف مورد استفاده در این پژوهش، تابع حداقل مربعات خطا بر اساس معادله (۱) است

(۱)

$$X_i = (f_{i,1}, f_{i,2}, \ldots f_{i,k}, \ldots f_{i,Nf}) \qquad (X_i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{NH}(Hs_{i,j} - Ho_j)^2}{NH}}$$

که در آن

Nf تعداد گروه‌بندی‌های زبری لوله‌های شبکه است. X_i مجموعه پارامترهای تنظیمی مدل در جواب شماره i است. $f_{i,k}$ زبری لوله‌های گروه شماره k در جواب شماره i است. F(X) تابع هدف برحسب هد آب برحسب سانتی‌متر است که متوسط خطای نتایج مدل را در محل فشارسنجی‌ها برحسب سانتی‌متر نشان می‌دهد و با کمینه شدن آن، مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل منطبق می‌شوند. $Hs_{i,j}$ تراز هیدرولیکی محاسبه شده در گره مشاهداتی شماره j و برای جواب شماره i برحسب سانتی‌متر است. Ho_j تراز هیدرولیکی اندازه‌گیری شده برای گره j برحسب سانتی‌متر و NH تعداد فشارسنجی‌های شبکه هستند. واحد سانتی‌متر اختلاف بین مقدار را بهتر نشان می‌دهد و ازاین‌رو استفاده شد.

تحلیل حساسیت فشارهای گره‌ای نسبت به تغییر زبری یک گروه از لوله‌ها بر اساس معادله ۲ انجام می‌شود

$$SA(k,e) = \frac{F(f_1,f_2,\ldots,f_k-e,\ldots,f_{Nf}) - F(f_1,f_2,\ldots,f_k+e,\ldots,f_{Nf})}{2e} \qquad (۲)$$

که در آن

$SA(k,e)$ ضریب حساسیت تابع برازندگی به ایجاد تغییری به میزان e در گروه‌بندی شماره k است. F نیز تابع برازندگی است که بر اساس معادله ۱ محاسبه می‌شود. f_k نیز زبری لوله‌های گروه شماره k است.

پس از محاسبه حساسیت زبری لوله‌ها در هر گروه، ابتدا زبری گروهی از لوله‌ها که بیشترین تأثیر در تغییرات فشار شبکه را دارند، تنظیم شد. برای تنظیم این پارامتر می‌توان از روش‌های بهینه‌یابی استفاده کرد. با توجه به تعداد محدود انتخاب برای زبری یک گروه، در این پژوهش تمامی مقادیر بازه جستجو کنترل شد. در ادامه زبری که بهترین برازندگی را نتیجه داده، به‌عنوان زبری جدید برای این دسته در مدل وارد می‌شود. این فرایند به ترتیب بر اساس تابع حساسیت آنها برای سایر گروه‌ها نیز تکرار می‌شود. پس از اتمام دور اول، این فرایند مجدداً تکرار می‌شود تا مقدار برازندگی از مقدار موردنظر کمتر شود و یا تعداد تکرارها به اندازه تعداد تعیین شده برسد.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.233434.3029

۲-۲- مقایسه و صحت‌سنجی

صحت‌سنجی نتایج این روش، با مقایسه مقدار زبری محاسبه شده با مقدار فرض شده برای شبکه است. بررسی سرعت و دقت نتایج به‌دست آمده از مقایسه این روش با سه روش دیگر انجام شده است.

برای مقایسه روش یک کد نوشته شد که بر اساس روش کاملاً تصادفی به جستجو می‌پردازد. در این کد در هر مرحله تعدادی زبری را در محدوده جستجو به‌صورت تصادفی انتخاب و پس از تحلیل توسط EPANET، برازندگی پاسخ‌ها را محاسبه می‌کند و همواره بهترین جواب را به‌عنوان پاسخ نهایی ذخیره می‌کند.

برنامه دیگری نیز نوشته شد که روش جستجوی آن، مشابه روش معرفی شده است و تفاوت این دو در این است که این روش برای انتخاب گروه، از آنالیز حساسیت استفاده نمی‌کند و ترتیب کالیبره شدن گروه‌ها به‌صورت تصادفی است. اما در جستجو در هر گروه روش شرح داده شده استفاده می‌شود.

کالیبراسیون زبری شبکه توسط واسنجی‌گر داروین نرم‌افزار WaterGEMS نیز انجام شد. نرم‌افزار WaterGEMS از محبوب‌ترین نرم‌افزارهای تحلیل و طراحی شبکه‌های توزیع آب است. یکی از ابزارهای در نظر گرفته شده در این نرم افزار، واسنجی‌گر داروین است که بر اساس نوعی از الگوریتم ژنتیک در هم ریخته، واسنجی مقدار زبری و مصرف را انجام می دهد. این نرم‌افزار در پژوهش‌های زیادی استفاده شده است (Walski et al., 2008, Wu et al., 2004).

۲-۳- معرفی منطقه مورد بررسی

شبکه مورد بررسی، بخشی از شبکه توزیع آب شهر بیرجند در استان خراسان جنوبی بود. شبکه توزیع آب این شهر به چند منطقه مجزا تقسیم می‌شود که در این پژوهش منطقه D بررسی شد. این شبکه شامل ۱۱۴۱ گره و ۱۱۹۱ لوله است. جنس لوله‌های منطقه D شهر بیرجند، بیشتر آزبست سیمان[1] یا پلی‌اتیلن[2] است. در حال حاضر ضریب هیزن-ویلیامز مورد استفاده برای شبیه‌سازی شبکه توزیع بر اساس تجربیات کارشناسان اداره آب و فاضلاب و داده‌های مشاهداتی برای لوله‌های آزبست ۱۱۵ و برای لوله‌های پلی‌اتیلن ۱۳۰ در نظر گرفته شد.

مصارف بر اساس برداشت داده‌های کنتور مشترکان در یک دوره ۶۰ روزه تعیین شد. بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده، متوسط مصارف مشترکان در این شبکه ۱۱۵/۶۵ لیتر بر ثانیه است که بر اساس موقعیت مصرف‌کنندگان به مدل اعمال شد. همچنین در دوره مذکور، متوسط جریان خروجی از مخزن L/s ۲۰۴/۵۲ است. این تفاوت فاحش که آب بدون درآمد ۴۳ درصد را نشان می‌دهد، ناشی از شرایط زیرساختی نامناسب و تلفات ظاهری و واقعی زیاد شبکه است و مقدار و موقعیت تلفات آب در شبکه نامعلوم است. در این پژوهش که هدف اصلی آن بررسی دقت یک روش پیشنهادی است، با توجه به محدودیت‌ها، شبکه واقعی با نشت‌ها و زبری های فرضی بررسی شد. به‌منظور ورود نشت به مدل با استفاده از گزینه ضریب امیتر[3]، ضریب نشت فرضی به مقدار $L/min/(mH_2On)$ ۰/۰۱۳ به هر گره در شبکه اعمال شده است تا مقدار مصرف شبکه با مقدار ورودی اندازه‌گیری شده برابر شود. همچنین توان نشت بر اساس روش فاواد[4] ۱/۱۵ لحاظ شد.

زبری یک لوله در شبکه به عواملی مانند جنس، عمر، تعداد اتصالات و انشعابات، رسوب و کیفیت آب بستگی دارد. تعیین مقدار زبری لوله‌ها با روش‌هایی مانند اندازه‌گیری در آزمایشگاه، اندازه‌گیری مستقیم در داخل شبکه و کالیبراسیون امکان‌پذیر است. در یک شبکه، هر لوله دارای یک زبری منحصربه‌فرد است ولی با توجه به سایر خطاهای موجود در مدل‌سازی و محدودیت‌های کالیبراسیون، معمولاً لوله‌های دارای زبری‌های نزدیک به یکدیگر، در دسته‌هایی گروه‌بندی می‌شوند. این دسته‌بندی‌ها می‌تواند بر اساس قطر، جنس و عمر لوله‌ها باشد. می‌تواند در کالیبراسیون یک شبکه چندین گروه‌بندی انجام شود تا بهترین نتیجه حاصل شود.

جنس لوله‌های مورد استفاده دو نوع آزبست سیمان و پلی‌اتیلن است. لوله‌های پلی‌اتیلن استفاده شده در شبکه دارای ۱۵ قطر مختلف در بازه ۲۱ تا ۱۹۳ میلی متر و لوله‌های آزبست سیمان در ۹ قطر مختلف در بازه ۹۳ تا ۶۰۰ میلی‌متر قرار دارند. لوله‌های شبکه توزیع آب شهر بیرجند به ۵ گروه، شامل ۳ گروه لوله پلی اتیلن و ۲ گروه لوله آزبست، تقسیم شده است. با بررسی‌های انجام شده روی عمر لوله‌ها در این شبکه، در تقسیم‌بندی انجام شده، گروه‌بندی بر اساس عمر لوله‌ها نیز تا حدودی رعایت می شود. به هر حال این

[1] Asbestos Cement (AC)
[2] Poly Ethylene (PE)
[3] Emitter Coefficient
[4] Fixed and Variable Area Discharge (FAVAD)

پژوهش بر تعیین زبری های شبکه واقعی تمرکز ندارد و به دنبال ارزیابی روشی جدید در مقایسه با روش‌های فعلی در شرایط یکسان است. چگونگی گروه‌بندی لوله‌ها و مشخصات هر گروه در جدول ۱ نشان داده شده است. گروه‌های ضریب زبری لوله‌ها در شبکه بیرجند در شکل ۱ مشخص شده است. شبکه با مقدار ستون چهارم جدول ۱ به‌عنوان زبری واقعی و مقدار مصرف و نشت بیان شده تحلیل شد و این نتایج به‌عنوان شبکه مشاهداتی در نظر گرفته شد. به‌منظور کالیبراسیون زبری، ۱۰ گره به‌عنوان گره مشاهداتی در نظر گرفته شد. موقعیت گره‌های مشاهداتی به کار گرفته شده برای کالیبراسیون زبری در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- گروه‌بندی لوله‌ها در منطقه D شبکه بیرجند

Table 1. Pipe grouping in zone D of Birjand city network

Group No.	Pipe material	Elementary friction factor	Real friction factor	Pipe diameter (mm)	Pipe number	Pipe length (m)
1	PE	130	135	Less than 80	423	40446
2	PE	130	125	80-140	136	12279
3	AC	115	120	80-140	243	22309
4	AC	115	110	Larger than 140	323	38330
5	PE	130	125	Larger than 140	66	7090

Fig. 1. Presentation of pipe grouping in zone D of Birjand city network

شکل ۱- نمایش گروه‌بندی لوله‌ها در منطقه D شبکه شهر بیرجند

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.233434.3029

Fig. 2. Location of pressure sensors used in roughness calibration
شکل ۲- موقعیت فشارسنج‌های مشاهداتی به کار گرفته شده برای کالیبراسیون زبری

جدول ۲- تحلیل حساسیت گروه‌های ضریب زبری
Table 2. Sensitivity analysis of group's friction factor

Group number	1	2	3	4	5
Sensitivity of fitness function to friction factor	0.55	0.93	1.24	11.72	1.09

شبکه برای مصرف متوسط جریان در شبکه که متناظر با دبی ۲۰۴ لیتر بر ثانیه است، بررسی شد. بدیهی است که استفاده از این روش برای کالیبراسیون در حالت حداکثر جریان و یا تحلیل در دوره زمانی گسترده[1] قابل‌کاربرد است و حالت مصرف انتخاب شده، شرایط دشوارتری را برای کالیبراسیون ایجاد می‌کنند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین ضریب حساسیت

به‌منظور کالیبراسیون زبری به روش تحلیل حساسیت، نخست باید تحلیل حساسیت بر روی گروه‌های مختلف لوله‌ها انجام شود تا اهمیت هر دسته از لوله‌ها و میزان تأثیرگذاری آنها بر فشارهای گره‌ای مشخص شود. به‌این منظور با استفاده از معادله ۲ ضریب حساسیت گروه‌ها محاسبه می‌شود. مقدار ضریب زبری در معادله ۲ بر اساس مقدار زبری واقعی (ستون چهارم جدول ۱) و e برابر ۱ است. نتیجه محاسبات در جدول ۲ نشان داده شده است. هر گروه از لوله‌ها که مقدار ضریب حساسیت در آن بزرگتر باشد، تأثیر بیشتری بر فشارهای گره‌ای دارد.

نتایج این جدول نشان می‌دهد که یک واحد تغییر ضریب زبری هر گروه، به‌طور متوسط چند سانتی‌متر مقدار فشار را در نقاط فشارسنجی تغییر می‌دهد، یعنی یک واحد تغییر ضریب زبری گروه ۱ می‌تواند ۰/۵۵ سانتی‌متر فشار متوسط گره‌های فشارسنجی را تغییر دهد در حالی که با تغییر یک واحد در گروه ۴، به‌طور متوسط فشار در نقاط مشاهداتی ۱۱/۷۲ سانتی‌متر تغییر خواهد کرد.

[1] Extended Period Series (EPS)

این نتایج نشان می‌دهد گروه ۴ لوله‌ها دارای بیشترین تأثیر بر روی فشار شبکه است. به‌گونه‌ای که تأثیر مقدار زبری این گروه بر فشارهای گره‌ای تا ۲۵ برابر گروه ۱ است. همچنین گروه ۱ دارای کمترین تأثیر در شبکه مورد بررسی است. این در حالی است که گروه ۱ دارای بیشترین طول و تعداد لوله در منطقه D شبکه بیرجند است.

از نتایج تحلیل حساسیت می‌توان دریافت که در این شبکه زبری لوله‌های اصلی با قطر زیاد تأثیر بیشتری بر فشارهای گره‌ای و به‌طور کلی مشخصات جریان در شبکه دارد و در مقابل، لوله‌های فرعی با قطر کم که در انشعابات قرار دارند تأثیر ناچیزی بر جریان در شبکه توزیع دارند. افت هیدرولیکی در مسیر جریان از مخزن تا نقطه مصرف، به مشخصات جریان، خصوصیات لوله‌ها و طول آنها بستگی دارد. لوله‌های با قطر کم که در آخر مسیر قرار می‌گیرد، در هر مسیر از مخزن تا نقطه مصرف، طولی کوتاهی از مسیر را تشکیل می‌دهند در حالی که لوله‌های با قطر بزرگ بخش زیادی از مسیر را تشکیل می‌دهند. این مسئله باعث تأثیر زیاد خطا در تعیین مشخصات لوله‌های با قطر زیاد بر روی فشار در شبکه دارد.

۳-۲- کالیبراسیون به روش تحلیل حساسیت و مقایسه با سایر روش‌ها

پس از انجام تحلیل حساسیت، عملیات کالیبراسیون بر اساس اهمیت گروه‌ها بر روی شبکه کالیبره نشده مورد بررسی انجام می‌شود. با مشخص شدن اهمیت گروه‌ها، عملیات کالیبراسیون از گروهی که بیشترین اهمیت را بر اساس تحلیل حساسیت دارد، یعنی گروه ۴ آغاز می‌شود. به‌این منظور تمامی مقادیر زبری که در بازه جستجو قرار دارند، به‌عنوان ضریب زبری گروه ۴ کنترل می‌شوند. به‌عبارت دیگر تمام اعداد در بازه ۱۱۰ تا ۱۲۰ به‌عنوان ضریب زبری گروه ۴ اختصاص می‌یابند و زبری سایر گروه‌ها همان مقدار اولیه زبری در نظر گرفته می‌شود. سپس به‌ازای هریک از این مقادیر، فشارهای گره‌ای شبکه به‌دست می‌آید و تابع برازندگی محاسبه می‌شود. مطابق روش بیان شده، بهترین مقدار زبری برای این گروه در مدل جایگزین می‌شود و تحلیل برای دسته بعدی که در اینجا دسته شماره ۳ است، انجام می‌شود. تعداد کل تکرارها در تحلیل این شبکه ۲ تکرار بوده است و مجموع تحلیل‌های انجام شده ۱۱۰ تحلیل است. نتایج نشان دادند که جواب‌های به‌دست آمده از کالیبراسیون شبکه با مقدار واقعی مطابقت کامل دارند و در این حالت برازندگی برابر با ۰/۰۲ سانتی‌متر محاسبه شده است.

برای تنظیمات کالیبراسیون شبکه در نرم‌افزار WaterGEMS بازه مورد بررسی برای ضریب زبری لوله‌ها در تمام گروه‌ها مطابق مرحله قبل در نظر گرفته شد. تعداد تکرارها متفاوت و بین ۵۰ تا ۱۰۰۰۰ انتخاب شد. این شبکه با دو روش کاملاً تصادفی و استفاده از روش تحلیل حساسیت بدون توجه به اولویت‌بندی گروه‌ها نیز انجام شد. برای روش تصادفی و روش عدم‌استفاده از اولویت‌بندی گروه‌ها تعداد تکرارها بین ۳۰ تا ۱۰۰۰۰ متغیر بود. نتایج تغییرات برازندگی در برابر تعداد تکرار در روش‌های مختلف در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده از کالیبراسیون شبکه با استفاده روش‌های مورد استفاده در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که بهترین برازندگی در WaterGEMS حدود ۱/۱۵ سانتی‌متر و در روش تحلیل حساسیت بدون اولویت‌بندی حدود ۷/۵ سانتی‌متر به‌دست آمده است. این نتایج تا تکرار ۱۰۰۰۰ نیز بدون تغییر باقی مانده است. همچنین در روش تصادفی کامل در تکرار ۱۰۰۰، برازندگی ۴ سانتی‌متر شده و در ۱۰۰۰۰ به ۲/۰۴ سانتی‌متر کاهش یافته است. همان گونه که قبلاً بیان شد، روش تحلیل حساسیت در تکرار ۱۱۰ به جواب دقیق رسیده است و برازندگی آن ۰/۰۲ سانتی‌متر شده است.

شکل ۴ نتایج به‌دست آمده برای زبری هر گروه در روش‌های تحلیل مختلف و همچنین مقدار واقعی آن نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که برای گروه ۴ به‌جز در روش عدم

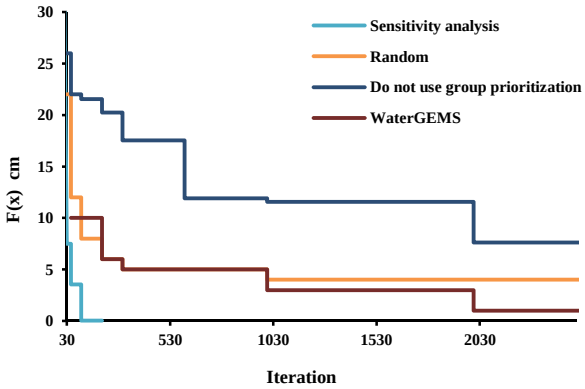

Fig. 3. Fitness variation for 30-2000 iterations in different methods

شکل ۳- تغییرات برازندگی برای تکرار های از ۳۰ تا ۲۰۰۰ تکرار در روش‌های مختلف

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.233434.3029

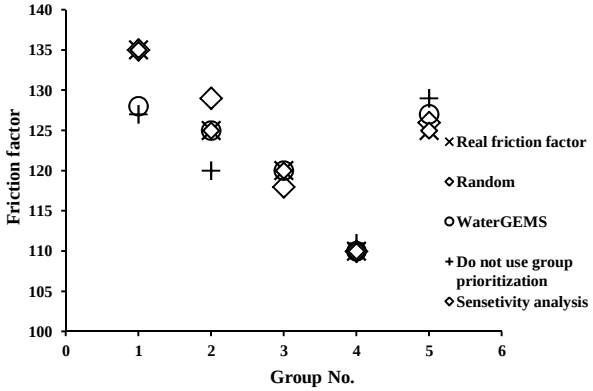

Fig. 4. Comparison between friction factors obtained for each group with various analysis methods

شکل ۴- مقایسه زبری به‌دست آمده برای هر گروه با روش‌های تحلیل مختلف

اولویت‌بندی گروه‌ها، در سایر روش‌ها نتایج کاملاً صحیح است. WaterGEMS در گروه‌های ۵ و ۱ جواب‌های نزدیک به مقدار واقعی و در سایر گروه‌ها مقدار واقعی را شناسایی کرده است. همچنین نتایج روش آنالیز حساسیت در تمام گروه‌ها با نتایج واقعی منطبق هستند. در روش تصادفی علی‌رغم مقدار اندک برازندگی، در ۳ گروه مقدار اشتباه شناسایی شد.

برای تفسیر نتایج باید به این نکته توجه شود که وقتی به‌صورت تصادفی اعدادی برای هر گروه انتخاب می‌شود، در هر گروه امکان انتخاب عدد از ۱ تا ۱۱ وجود دارد. بر این اساس، با وجود ۵ گروه زبری و امکان انتخاب ۱۱ عدد در هر گروه به عنوان زبری، 5^{11} حالت مختلف (۴۸/۸ میلیون حالت) امکان انتخاب دارند. به‌همین دلیل روش تصادفی خیلی سریع عدد صحیح گروه چهارم را که تأثیر زیادی دارد پیدا می‌کند. در ادامه برای تنظیم مقدار صحیح همه گروه‌ها دچار مشکل می‌شود و در نهایت با ۱۰ هزار تکرار، فقط در ۲ گروه به عدد درست می‌رسد. باید توجه کرد که با ۱۰ هزار تکرار، از هر ۴۸۸ هزار حالت محتمل فقط یک مورد بررسی شده است.

در روش تحلیل حساسیت و عدم‌توجه به اولویت‌بندی گروه‌ها، از آنجایی که ابتدا گروهی با اهمیت کمتر بررسی شده است و مقدار آن برای مراحل بعد قطعی فرض شده، عملاً مسئله در یک حداقل محلی گرفتار شده است و با تعداد تکرار بیشتر به پاسخ بهتری نرسید. WaterGEMS با توجه به ماهیت تصادفی و همزمان استفاده از پاسخ‌های برتر برای هدایت به سمت جواب، توانسته موفق‌تر عمل کند و به نتایج بهتری برسد.

روش تحلیل حساسیت با توجه به اختلاف فاحش حساسیت فشار شبکه نسبت به زبری گروه‌های مختلف توانسته به سرعت به پاسخ صحیح دست یابد. باید توجه شود که یکی از دلایل موفقیت این روش در شبکه مورد بررسی، اختلاف زیاد در ضریب حساسیت بین گروه‌های مختلف است. هر چند در اکثر شبکه‌های توزیع آب، احتمالاً وضعیت مشابه این شبکه است، ولی باید برای کاربرد این روش برای شبکه‌های واقعی، به مواردی مانند نوع گروه‌بندی‌ها، عمر لوله‌ها و ضریب حساسیت گروه‌ها نیز توجه کرد و حتی گروه‌بندی‌های مختلف را بررسی و نتایج را با مشاهدات میدانی و سایر روش‌ها مقایسه کرد.

با بررسی جدول ۳ مشاهده می‌شود که این امکان وجود دارد که با افزایش زبری یک گروه و کاهش آن در گروه دیگر، به برازندگی‌های اندک دست یافت. بر این اساس اگر برازندگی

جدول ۳- نتایج به‌دست آمده برای زبری گروه‌ها در روش‌های مختلف

Table 3. Obtained results for roughness of groups in different methods

Group No.	Elementary friction factor	Real friction factor	Search range	Sensitivity analysis method	WaterGEMS (2000 iterations)	Random (10000 iterations)	No group prioritization (2000 iterations)
1	130	135	125-135	135	128	135	127
2	130	125	125-135	125	125	130	120
3	115	120	110-120	120	120	118	120
4	115	110	110-120	110	110	110	111
5	130	125	125-135	125	125	126	123

کمی بزرگتر از صفر باشد، پاسخ‌های زیادی می‌توانند وجود داشته باشند. با توجه به خطاهای دیگر موجود در کالیبراسیون یک شبکه واقعی مانند خطای مشاهدات و تعیین الگوی مصرف عملاً تعیین زبری دقیق گروه‌هایی که فشار شبکه نسبت به آنها حساسیت اندکی دارند، با کالیبراسیون غیرممکن و البته بی‌اهمیت به‌نظر می‌رسد. بر این اساس می‌توان برای شبکه‌های توزیع مشابه شبکه مورد بررسی، توصیه کرد که برای این گروه‌های زبری، زبری بر اساس مشاهدات میدانی و یا روش‌های آزمایشگاهی تعیین شود و از اضافه کردن آنها به‌عنوان یک متغیر در کالیبراسیون خودداری کرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی جدید برای کالیبراسیون زبری ارائه شد. این روش بر روی یک شبکه واقعی با مقدار زبری فرضی ارزیابی شد و نتایج آن با نرم‌افزار WaterGEMS مقایسه شد. نتایج نشان دادند که در کالیبراسیون زبری، نرم‌افزار WaterGEMS توانست با ۲۰۰۰ تکرار فشارها را به مقدار مشاهداتی نزدیک کند و زبری لوله را با دقت خوبی تعیین کند. این روش توانست در ۳ گروه از ۵ گروه لوله‌ها مقدار دقیق زبری را تعیین کند.

روش پیشنهادی در ۱۱۰ تکرار توانست مقدار دقیق زبری را در تمامی گروه‌ها را شناسایی کند. مقایسه برازندگی جواب‌های به‌دست آمده از دو روش کالیبراسیون بیانگر آن است که روش پیشنهادی، سرعت و دقت بسیار زیادی در تعیین زبری‌ها در شبکه مورد بررسی دارد.

۵- قدردانی

از مدیران و کارشناسان محترم شرکت آب و فاضلاب استان خراسان جنوبی، به‌خصوص جناب آقای مهندس مرادی که در اجرای این پژوهش همکاری کردند، تقدیر و تشکر می‌شود.

References

Alvisi, S. & Franchini, M. 2010. Calibration and sensitivity analysis of the C-Town pipe network model. *In Water Distribution Systems Analysis, 2010*, 1573-1584.

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.

Kang, D. & Lansey, K. 2011. Demand and roughness estimation in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 137, 20-30.

Meirelles, G., Manzi, D., Brentan, B., Goulart, T. & Luvizotto, E. 2017. Calibration model for water distribution network using pressures estimated by artificial neural networks. *Water Resources Management,* 31, 4339-4351.

Nicolini, M., Giacomello, C. & Deb, K. 2011. Calibration and optimal leakage management for a real water distribution network. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 137, 134-142.

Sophocleous, S., Savić, D. A., Kapelan, Z. & Giustolisi, O. 2017. A two-stage calibration for detection of leakage hotspots in a real water distribution network. *Procedia Engineering,* 186, 168-176.

Sumer, D. Y., Sier, D. A., Roach, J., Schladweiler, S., Yenal, U. & Lansey, K. 2004. Impact of data collection and calibration of water distribution models on model-based decisions. *Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*, 1-7.

Tyagi, D. K., Majumder, M., Kant, C. & Singh, A. P. 2018. Estimation of Hazen Williams's constant for a residential water distribution network; GMDH and PSO approach. *International Journal of Engineering and Technology,* 7, 92-99.

Walski, T. M., Defrank, N., Voglino, T., Wood, R. & Whitman, B. E. 2008. Determining the accuracy of automated calibration of pipe network models. *In Water Distribution Systems Analysis Symposium, 2006*, 1-18. Cincinnati, Ohio, USA.

Wu, Z. Y., Arniella, E. F. & Gianella, E. 2004. Darwin calibrator-improving project productivity and model quality for large water systems. *Journal of AWWA,* 96**,** 27-34.

Xie, X., Zhang, H. & Hou, D. 2017. Bayesian approach for joint estimation of demand and roughness in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 143**,** 04017034.

Zhang, Q., Zheng, F., Duan, H. F., Jia, Y., Zhang, T. & Guo, X. 2018. Efficient numerical approach for simultaneous calibration of pipe roughness coefficients and nodal demands for water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 144**,** 04018063.