

کاربرد سامانه مدیریت بهینه شبکه‌های توزیع آب در فرآیند کالیبراسیون

علیرضا مقدم^{۱*}، حسین رضایی^۲، علی نقی ضیایی^۳، کوروش بهزادیان^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۲

چکیده

مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب زمانی موفق و قابل استناد است که بتواند شرایط واقعی شبکه را با دقت بالا شبیه‌سازی نماید که جهت دستیابی به این هدف انجام فرآیند کالیبراسیون مدل امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در این تحقیق یک سامانه جدید به نام سامانه مدیریت بهینه شبکه‌های توزیع آب شهری جهت کالیبراسیون شبکه توزیع آب بر مبنای نسخه ساده اصلاحی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (SMPSO) به شکلی ساده و کاربرپسند برای استفاده کارشناسان شرکت آب و فاضلاب معرفی گردید. فرآیند کالیبراسیون موجود در این سامانه با هدف کمینه کردن معیار میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) بین فشارهای مشاهداتی و شبیه‌سازی و بر مبنای استفاده از ضرایب زبری هیزن ویلیامز لوله‌ها به عنوان متغیرهای تصمیم عمل می‌کند. بدین منظور در این مقاله ابتدا توانایی روش SMPSO جهت کالیبراسیون شبکه مرجع از پژوهش قبلی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد مقادیر متوسط MAPE در شرایط تقاضای حداکثر، حداقل و جریان آتش‌نشانی به ترتیب به میزان ۰/۴۲۵، ۲/۸۵۷ و ۰/۳۰۶ درصد کاهش و فقط در شرایط نرمال به میزان ۰/۱۸۶ درصد افزایش یافت که نشان از برتری این روش نسبت به الگوریتم ژنتیک (GA) می‌باشد. سپس یک شبکه واقعی در شرایط نرمال، حداکثر، حداقل و مصرف متغیر در طی ۲۴ ساعت بررسی گردید که در تمامی این شرایط میزان MAPE نسبت به کالیبراسیون انجام شده توسط شرکت مشاور به ترتیب ۵/۸۲، ۶/۲۰، ۵/۲۱ و ۵/۹۵ درصد کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم اصلاحی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات کالیبراسیون، سامانه مدیریت بهینه، شبکه‌های توزیع آب

مقدمه^۱

کالیبراسیون که شامل تنظیم پارامترهای ورودی به مدل هیدرولیکی با هدف کاهش اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی باشد، کاهش یابد (Ormsbee., 1989). به طور معمول پارامترهایی که برای فرآیند کالیبراسیون مدل هیدرولیکی یک شبکه توزیع آب دست‌خوش تغییر قرار می‌گیرند ضریب زبری لوله‌ها و دبی گره‌ها باشد (Dini and Tabesh., 2014; Alvisi and Franchini., 2010;) (Cheng and He., 2010).

الویسی و فرانچی بیان نمودند که فرآیند کالیبراسیون شبکه توزیع آب به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در آن درجه آزادی بسیار زیادی دارد زیرا نسبت بین تعداد نقاط مشاهداتی فشار و دبی و تعداد متغیرها بسیار کم می‌باشد و دقت مدل می‌تواند با افزایش تعداد نقاط مشاهداتی افزایش یابد (Alvisi and Franchini., 2010). یک مدل زمانی کالیبره است که اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و واقعی در سطح قابل قبولی از خطا باشد. بنابراین مساله کالیبراسیون را نمی‌توان با رویکرد قطعی مورد بررسی قرار داد و بایستی ترجیحا با رویکرد احتمالاتی که روش‌های بهینه‌سازی فراکوشی کاربرد زیادی در حل آن‌ها دارد، ارزیابی نمود. روش‌های بهینه‌سازی الهام گرفته از محیط زیست مانند الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکوشی و بالاکس الگوریتم

مدل‌های هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب ابزاری کارآمد برای بررسی عملکرد این سیستم‌ها از قبیل مطالعات اصلاح و توسعه (Tsakiris and Spiliotis., 2012)، تخمین پارامترهای کیفیت آب (Sunela and Puust., 2015)، طراحی بهینه (Mora-Melia et al., 2015)، تشخیص نشت (Roma et al., 2015)، بهره‌برداری بهینه (Melo Brentan et al., 2013) و... می‌باشد. دقت این مدل‌ها وابسته به داده ورودی است و با وجود این که بسیاری از داده‌ها به طور مستقیم از بهره‌برداران شبکه به دست می‌آید اما بعضی از آن‌ها بایستی به طور غیرمستقیم جمع‌آوری و یا تخمین زده شوند. در نتیجه سبب می‌شود تا عدم قطعیت‌هایی به مدل اضافه شده که باعث ایجاد خطا در نتایج شبیه‌سازی شود. این خطاها می‌تواند توسط فرآیند

۱- دانش آموخته دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- دانشیار دانشکده مهندسی و کامپیوتر، دانشگاه لندن غرب انگلستان

(* - نویسنده مسئول: Email: alireza.moghaddam@yahoo.com)

مشاهداتی باشد آن گاه ممکن است مقدار تابع هدف کمینه شود اما مدل توانایی یافتن مقادیر صحیح ضریب زبری را ندارد و گروه‌بندی هوشمند لوله‌ها می‌تواند کلیدی برای حل این مشکل باشد (Walski et al., 2008).

اعتبار و دقت فرآیند کالیبراسیون می‌تواند با افزایش تعداد نقاط مشاهداتی، کمینه کردن خطاهای ممکن و در نتیجه کاهش درجه آزادی مساله افزایش یابد که مدل‌های کالیبراسیون در مدت زمان گسترده یا با تعداد نقاط مشاهداتی کافی بیانگر این مهم است. نظیف و همکاران مدل بهینه‌سازی برای دوره‌های گسترده بر اساس الگوریتم GA با هدف کاهش تلفات آب از طریق کنترل فشار در بخشی از شبکه توزیع آب تهران توسعه دادند. نتایج شبیه‌سازی، سطح مخزن، ارتفاع و تقاضای گره‌ها برای آموزش یک شبکه عصبی که داده‌های ورودی به GA به همراه فشار برای سناریوهای مختلف می‌باشند، استفاده گردید. آن‌ها سپس GA را به منظور تخمین سطح بهینه تانک‌های ذخیره و پیش‌بینی فشار و تلفات در گره‌های شبکه بر اساس سطح مخزن، ارتفاع و مصارف گره‌ها بکار بردند (Nazif et al., 2010).

دینی و تابش از روش جدیدی برای کالیبراسیون هم‌زمان الگوی مصرف و ضرایب هیزن ویلیامز در شبکه توزیع آب بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان (ACO) استفاده نمودند. داده‌های مشاهداتی در این پژوهش جریان در لوله‌ها و فشار گره‌ها بود و نتایج حاصل از بکارگیری این روش بر روی شبکه مرجع دولحله ای و شبکه واقعی شهر اهر نشان از دقت بالای مدل کالیبراسیون پیشنهادی داشت (Dini and Tabesh., 2014).

در این مقاله برای اولین بار فرآیند کالیبراسیون شبکه توزیع آب توسط سامانه تحت وب به نام سامانه مدیریت بهینه شبکه‌های توزیع آب مورد بررسی قرار گرفت. این سامانه از مدل بهینه‌سازی ازدحام ذرات اصلاح شده (SMPSO) استفاده می‌کند و هدف از پیاده‌سازی فرآیند کالیبراسیون شبکه در این سامانه ایجاد مدل‌های پیشرفته بهینه‌سازی با کاربری بسیار آسان جهت استفاده کارشناسان شرکت آب و فاضلاب می‌باشد. بدین منظور در این مقاله ابتدا توانایی روش بهینه‌سازی SMPSO جهت کالیبراسیون شبکه مرجع از پژوهش قبلی مورد بررسی قرار گرفت و سپس از سامانه برای کالیبراسیون شبکه توزیع آب واقعی در ایران استفاده شد.

مواد و روش‌ها

مدل بهینه‌سازی کالیبراسیون شبکه توزیع آب

کالیبراسیون نقش مهمی در مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب دارد و توسعه روش‌های کالیبراسیون کارا برای ساخت مدل‌های هیدرولیکی واقعی برای شبکه‌ها ضروری است. در یک

PSO و GA^۱ در مسایل مربوط به سیستم‌های توزیع آب بطور وسیعی مورد استفاده قرار گرفت (Haghighi and Ramos., 2012; Seyoum et al., 2016; Nazif et al., 2010; Christodoulou and Ellinas., 2011; Liberatore and Sechi., 2009; Moghaddam et al., 2018).

جانگ و کارنی دو روش بهینه‌سازی PSO و GA را برای حل آنالیز گذرای معکوس به‌منظور یافتن نشت و فاکتور اصطکاک در شبکه توزیع آب بکاربردند. در این پژوهش سه ترکیب مختلف از فشار مشاهداتی گره‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با تعداد کم‌تری از نقاط مشاهداتی سرعت هم‌گرایی تابع هدف افزایش یافته اما مقدار آن کاهش می‌یابد که در نتیجه سبب کاهش دقت نتایج کالیبراسیون می‌گردد. آن‌ها به این جمع‌بندی رسیدند که اگرچه هم‌گرایی حاصل شد اما مجموعه‌ای از راه حل‌ها صحیح نمی‌باشد و در آن‌ها فاکتور اصطکاک دقت کم‌تری از نتایج تشخیص نشت دارد. آن‌ها دو روش PSO و GA را جهت کمینه کردن اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی بکار بردند که در نهایت PSO دقت و سرعت هم‌گرایی بیش‌تری نسبت به GA داشت (Jung and Karney., 2008).

اوستفلد و همکاران نشان دادند در نتیجه فرآیند کالیبراسیون شبکه توزیع آب راه حل‌هایی وجود دارند که تقریب خوبی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی برقرار می‌کنند. هم‌چنین این امکان وجود دارد که پارامترهای ورودی یکسان دو راه حل مختلف تولید نمایند آن‌گاه نمی‌توان ادعا نمود که شبکه بدرستی کالیبره شده است. محققین دیگری تاثیر داده‌های مشاهداتی از قبیل پارامترها و تعداد سنسورها را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مانیتورینگ جریان به‌منظور پیش‌بینی دبی و مانیتورینگ فشار برای تخمین ضریب زبری اهمیت بیش‌تری دارد (Ostfeld et al., 2011). دو همکاران اخیراً فرآیند کالیبراسیون را با بکارگیری GA برای فاکتورهای ضریب تقاضا بر اساس اطلاعات بیش‌تری از نقاط مشاهداتی برای سه شبکه انجام دادند. نتایج نشان داد GA عملکرد خوبی در جهت ارایه راه حل‌های مختلف به‌منظور تخمین تقاضاهای گرهی با استفاده از نقاط مشاهداتی دارد، هم‌چنین اثبات گردید که نتایج به مکان و نوع سنسورهای بکار رفته در تحقیق حساسیت بالایی دارند. در این تحقیق تخمین جریان در لوله‌ها نیز با دقت بسیار بالایی انجام شد (Do et al., 2016).

والکسی و همکاران مدلی کاهش‌ی از شبکه توزیع آب را برای صحت‌سنجی مدل‌های کالیبراسیون ایجاد نمودند که نتایج برای پارامترهای فشار و جریان رضایت‌بخش بود و هنگامی که تعداد نقاط مشاهداتی کافی باشد مقادیر زبری با دقت بالایی بدست می‌آید. زمانی که تعداد متغیرهای ناشناخته بیش‌تر از مقادیر داده‌های

مشتی هستند که به ترتیب ضریب یادگیری شخصی^۳ و ضریب یادگیری جهانی^۴ (جمعی) نامیده می‌شوند؛ rand() تابعی است که اعداد تصادفی بین صفر تا یک تولید می‌کند؛ Y_* بهترین راه حل کنونی در میان Y_i ها است. w فاکتور اینرسی است که برای کنترل تاثیر سرعت‌های قبلی روی سرعت‌های کنونی معرفی شد و مقدار مجاز آن در الگوریتم PSO استاندارد در بازه $(0/4-0/9)$ تغییر می‌کند. مقدار w در ابتدای استفاده از این الگوریتم ثابت فرض شد اما نتایج تجربی نشان داد که بهتر است در ابتدای فرآیند جستجو، جهت بهبود جستجوی فراگیر در فضای تصمیم، مقدار زیادتری برای این پارامتر در نظر گرفته شده و بتدریج برای کنترل تعادل بین جستجوی جهانی و جستجوی محلی در طی تکرارهای متوالی، بصورت خطی با زمان کاهش یابد (Shi and Eberhart., 1998a; Shi and Eberhart., 1998b).

SMPSO از یک ضریب کاهشی به نام w_{damp} استفاده می‌کند که در افزایش یا کاهش سرعت همگرایی الگوریتم در یافتن جواب بهینه بسیار موثر است. البته تعیین مقدار مناسب w_{damp} بسیار اهمیت دارد و بر اساس رابطه ۳ باعث کاهش خطی w در هر تکرار می‌شود.

$$w^{iter+1} = w^{iter} \times w_{damp} \quad (۴)$$

مقادیر w_{damp} بر اساس تحقیقات قبلی در بازه $(0/9-1)$ تغییر نمود و در نهایت بهترین مقدار آن بر اساس سعی و خطا انتخاب گردید (Moghaddam et al., 2018).

کد الگوریتم SMPSO در محیط نرم‌افزار MATLAB R2017a پیاده‌سازی شده و سپس ارتباط آن با نرم‌افزار شبیه‌سازی هیدرولیکی EPANET 2.0 به صورت پویا برقرار گردید.

سامانه مدیریت بهینه شبکه‌های توزیع آب شهری

سامانه مدیریت بهینه شبکه‌های توزیع آب شهری سامانه‌ای تحت وب می‌باشد که برای اولین بار با هدف یک‌پارچه‌سازی و ارتباط متقابل بین حوزه‌های مهندسی، بهره‌برداری و مشترکین در شرکت‌های آب و فاضلاب طراحی شده است. این سامانه شامل بخش‌های شبکه پایش، مدل هیدرولیکی، مدیریت، هشدارها، استانداردها و مدیریت کاربران بوده و از یک موتور هیدرولیکی دقیق و قدرتمند جهت انجام پردازش‌های هیدرولیکی بهره می‌گیرد.

این سامانه امکاناتی از قبیل نمایش داده‌های سنجنده‌های فشار، جریان و... در شبکه، مشاهده نقشه مدل هیدرولیکی شبکه در بستر نقشه‌های Google Earth و Google Map، تحلیل تحت وب مدل هیدرولیکی، مشاهده تغییرات فشار و تقاضا در شبکه طی ۲۴ ساعت

مساله کالیبراسیون هدف تنظیم پارامترهای ورودی مدل به گونه‌ای است که تفاوت بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی حاصل از مدل هیدرولیکی کمینه شود. در این تحقیق از معیار میانگین درصد خطای مطلق^۱ (MAPE) بر اساس رابطه ۱ به‌عنوان تابع هدف استفاده شد و ضرایب زبری هیزن ویلیامز لوله‌ها به‌عنوان متغیر تصمیم بود، که بایستی بگونه‌ای در شبکه اصلاح شود تا راه حل بهینه بدست آید (Jamash et al., 2008):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T \frac{|P_{observed_{tj}} - P_{simulated_{tj}}|}{P_{observed_{tj}}} \times 100 \quad (۱)$$

که در این رابطه n : تعداد نقاط مشاهداتی، T : تعداد زمان‌هایی که داده‌های میدانی جمع‌آوری شده است، $P_{observed_{tj}}$: فشار مشاهداتی و $P_{simulated_{tj}}$: فشار شبیه‌سازی برای گره j در مدت زمان t می‌باشد.

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات اصلاح شده^۲

در این پژوهش از یک نسخه بهبود یافته ساده از PSO با نام SMPSO که توسط مقدم و همکاران در سال ۲۰۱۸ توسعه یافته است استفاده شد. در الگوریتم SMPSO همانند PSO فرآیند از یک مجموعه ذرات شروع می‌شود که هر یک از آن‌ها یک راه حل برای مساله هیدرولیکی را شامل می‌شود که بطور تصادفی تولید شده است و سپس جستجوها برای تعیین راه حل بهینه در طی تکرارهای متوالی صورت می‌گیرد. i -امین ذره در ارتباط با یک موقعیت در فضای s بعدی است، که s تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری مساله را نشان می‌دهد. مقادیر متغیرهای s که موقعیت ذرات را تعیین می‌کنند. یک راه حل ممکن از مساله بهینه‌سازی است. هر ذره i به طور کامل توسط سه بردار مشخص می‌شود؛ بردار $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{is})$ که موقعیت کنونی ذره است، بردار $Y_i = (Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{is})$ بهترین موقعیتی است که ذره در تکرار قبلی به آن رسیده است و بردار سرعت ذره که با $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{is})$ نشان داده می‌شود. در هر چرخه، هدف شناسایی ذره‌ای است که بهترین موقعیت لحظه‌ای را در مساله دارد؛ سپس موقعیت این ذره به عنوان موقعیت جدید (X_i^{iter+1}) در محاسبات برای هر ذره در اجتماع وارد می‌شود. این محاسبات بر اساس رابطه‌های ۲ و ۳ بدست خواهد آمد.

$$V_i^{iter+1} = wV_i^{iter} + c_1 \text{rand}() (Y_i^{iter} - X_i^{iter}) + c_2 \text{rand}() (Y_i^* - X_i^{iter}) \quad (۲)$$

$$X_i^{iter+1} = X_i^{iter} + V_i^{iter+1} \quad (۳)$$

که V_i^{iter+1} سرعت جدید ذره تعریف می‌شود؛ c_1 و c_2 دو قید

1- Mean Absolute Percentage Error

2- Simple Modified Particle Swarm Optimization Algorithm

3- Personal Learning Coefficient

4- Global Learning Coefficient

این سامانه در محیط Visual Studio پیاده‌سازی گردیده و بانک داده آن نرم‌افزار SQL Server Management Studio می‌باشد که جهت اجرای مدل کالیبراسیون خود بر مبنای برنامه بهینه‌سازی SMPSO با نرم‌افزار MATLAB نسخه R2017a ارتباط برقرار می‌کند و در نهایت نتایج حاصل جهت مشاهده کاربران در پایگاه داده SQL Server سامانه ذخیره می‌شود.

نتایج و بحث

در این بخش ابتدا عملکرد الگوریتم SMPSO پیاده‌سازی شده در سامانه، برای کالیبراسیون شبکه مرجع مورد ارزیابی قرار گرفت و در ادامه به کاربرد این الگوریتم در فرآیند کالیبراسیون سامانه جامع مدیریت شبکه‌های توزیع آب برای یک شبکه واقعی پرداخته شد.

شبکه لنسی و همکاران

این شبکه اولین بار توسط لنسی و همکاران در سال ۲۰۰۱ معرفی گردید و شامل ۱۶ لوله، ۱۲ گره و یک مخزن با هد ثابت ۱۱۵/۸ متر می‌باشد (شکل ۷). داده‌های لوله‌های شبکه و اطلاعات گره‌های شبکه در شرایط مختلف مصرف به ترتیب در جداول ۱ و ۲ مشخص شده است. مصرف کل این شبکه در شرایط تقاضای نرمال برابر $0/267 \text{ m}^3/\text{s}$ می‌باشد و برای چهار گره ۲، ۵، ۹ و ۱۱ در شرایط مختلف تقاضا از قبیل نرمال، حداکثر، حداقل و آتش‌نشانی فشار مشاهداتی وجود دارد (جدول ۲). شرایط حداکثر و حداقل تقاضا با افزایش و کاهش تقاضای نرمال به میزان ۴۰ و ۶۰ درصد حاصل می‌شود. در صورت اعمال شرایط آتش‌نشانی در گره‌های ۳ و ۸، تقاضای ثابت $0/127 \text{ m}^3/\text{s}$ و در سایر گره‌ها ۸۰ درصد تقاضای نرمال تامین خواهد شد (Lansley et al., 2001).

این شبکه ابتدا تحت هر یک از شرایط پایه تقاضای نرمال، حداکثر، حداقل و آتش‌نشانی بر اساس داده‌های مشاهداتی در این شرایط کالیبراسیون گردید و سپس با اعمال ضرایب هیزن ویلیامز حاصل از کالیبراسیون، در مدل EPANET سایر شرایط تقاضا، مقادیر شبیه‌سازی شده فشار محاسبه و با مقادیر فشار مشاهداتی مقایسه گردید. در این شبکه محدوده ضرایب زبری لوله‌ها بر اساس پیشنهاد اورسبی (Ormsbee., 1989)، (۱۹۸۹)، (۱۵۰-۵۰) تعیین گردید (Ormsbee., 1989). جدول ۳ میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) حاصل از مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی فشار در گره‌های ۲، ۵، ۹ و ۱۱ در نتیجه پیاده‌سازی الگوریتم SMPSO برای کالیبراسیون شبکه لنسی و همکاران (۲۰۰۱) در شرایط تقاضای متفاوت را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود میانگین معیار MAPE حاصل با روش SMPSO در شرایط تقاضای آتش‌نشانی با مقدار $1/004$ درصد از سایر شرایط تقاضا کمتر می‌باشد و بیانگر آن

گذشته، مدیریت فشار شبکه بر اساس تهیه الگوی زمانی فشار خروجی بهینه شیرهای فشارشکن و مشاهده نتایج هیدرولیکی شبکه مانند فشار گره‌ها و سرعت لوله‌ها با استفاده از ترکیب‌های رنگی را برای کاربر فراهم می‌سازد.

از مزایای مهم این سامانه قابلیت انجام کالیبراسیون شبکه توزیع آب در هر دو شرایط هیدرولیکی شبیه‌سازی دوره گسترده (EPS) و تک زمانه (SP) بر اساس دریافت داده‌های مشاهداتی فشار از سنجنده‌های موجود در شبکه می‌باشد. فرآیند کالیبراسیون توسط این سامانه پس از انتخاب گزینه کالیبراسیون از منوی مدل هیدرولیکی در مرحله ۴ به شرح شکل (۱) انجام گرفت.

ورود داده‌های مشاهداتی به سامانه برای نقاط مختلف بر اساس نام ایستگاه نمونه‌برداری، تاریخ، زمان و مقدار فشار برداشت شده. لازم به ذکر است که در این سامانه قابلیت افزودن داده‌های مشاهداتی گذشته بر اساس فرمت‌های استاندارد .xls، .xlsx و .txt وجود دارد (شکل ۲).

تعیین محدوده ضریب زبری برای جنس لوله‌های مختلف در شبکه: این بخش برای کاربر این امکان را فراهم می‌کند تا کمینه و بیشینه ضریب زبری هیزن ویلیامز را بر اساس جنس و سن لوله‌های استفاده شده در شبکه تعریف نماید (شکل ۳).

اجرای فرآیند کالیبراسیون: در این مرحله با انتخاب گزینه "اجرای مدل" فرمان اجرای فرآیند کالیبراسیون برای سرور سامانه ارسال می‌شود و سپس کد الگوریتم SMPSO تهیه شده در محیط برنامه-نویسی MATLAB اجرا می‌شود (شکل ۴). این سامانه به گونه‌ای طراحی شده است که اگر کاربران متفاوت تصمیم به اجرای فرآیند کالیبراسیون نمایند فرمان اجرای این فرآیند بصورت ترتیبی برای سرور ارسال شده و سپس نتایج هر فرمان ذخیره و نمایش داده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است هر فرمان کالیبراسیون شامل نام، تاریخ، زمان اجرای فرمان کالیبراسیون، ابزار، نام شبکه‌ای که برای آن فرآیند کالیبراسیون اجرا می‌شود و وضعیت اجرا شامل دو پیام "کالیبراسیون در حال انجام است" و "کالیبراسیون با موفقیت انجام شد" می‌باشد.

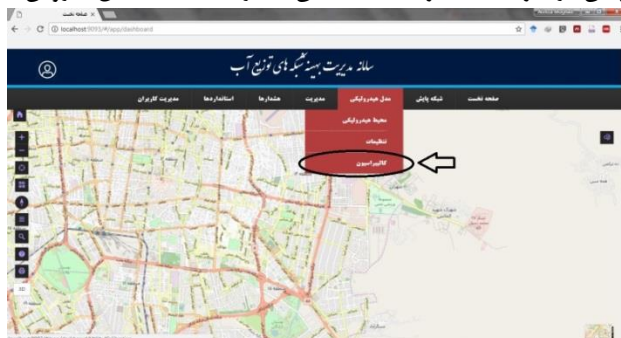
مشاهده نتایج. پس از اتمام فرآیند کالیبراسیون شبکه و مشاهده پیام "کالیبراسیون با موفقیت انجام شد" با انتخاب گزینه "مشاهده نتایج" از پنجره ابزار می‌توان مقادیر بهینه انتخابی برای ضرایب زبری هیزن ویلیامز لوله‌ها با استفاده از الگوریتم SMPSO را مشاهده نمود (شکل ۵). هم‌چنین گزینه "نمودار معیار خطای کالیبراسیون" نمودار همگرایی تابع هدف کالیبراسیون را طی تکرارهای مختلف نشان می‌دهد (شکل ۶).

است که استفاده از مقادیر ضرایب هیزن ویلیامز تعیین شده در این شرایط سبب افزایش دقت در پیش‌بینی فشار شبیه‌سازی می‌شود. علت این کاهش خطا را می‌توان بدلیل افزایش تقاضا در شرایط آتش‌نشانی نسبت به سایر شرایط بیان نمود که سبب افزایش افت فشار در شبکه و در نتیجه نقش موثرتر ضرایب زبری می‌شود. هم-چنین در شرایط حداکثر تقاضا میانگین مقدار MAPE حاصل با روش

است که استفاده از مقادیر ضرایب هیزن ویلیامز تعیین شده در این شرایط سبب افزایش دقت در پیش‌بینی فشار شبیه‌سازی می‌شود. علت این کاهش خطا را می‌توان بدلیل افزایش تقاضا در شرایط آتش‌نشانی نسبت به سایر شرایط بیان نمود که سبب افزایش افت فشار در شبکه و در نتیجه نقش موثرتر ضرایب زبری می‌شود. هم-چنین در شرایط حداکثر تقاضا میانگین مقدار MAPE حاصل با روش

مقدار	زمان	تاریخ	کد شبکه	مدل	ردیف
4.582	23:00	1394-10-25	PRV-Haghighi	PRV-Haghighi	1
4.485	22:00	1394-10-25	PRV-Haghighi	PRV-Haghighi	2
4.582	21:00	1394-10-25	PRV-Haghighi	PRV-Haghighi	3
4.323	20:00	1394-10-25	PRV-Haghighi	PRV-Haghighi	4
4.504	19:00	1394-10-25	PRV-Haghighi	PRV-Haghighi	5

شکل ۲- سربرج انتخاب داده‌های مشاهده‌ای در نمونه پنجره کالیبراسیون سامانه



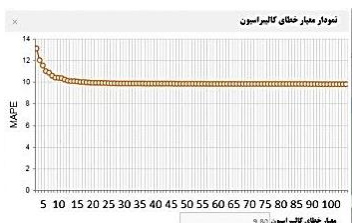
شکل ۱- گزینه کالیبراسیون شبکه در منوی هیدرولیکی شبکه

ردیف	کالیبراسیون	تاریخ	تاریخ	تاریخ	تاریخ
15	کالیبراسیون	1397/01/30	12213	test	انجام پذیرفته
16	کالیبراسیون	1397/02/13	22203	test	آماده انجام
17	کالیبراسیون	1397/02/13	22202	test	آماده انجام
18	کالیبراسیون	1397/02/13	22203	test	آماده انجام
19	کالیبراسیون	1397/02/13	22206	test	آماده انجام

شکل ۴- سربرج اجرای مدل کالیبراسیون در نمونه پنجره کالیبراسیون سامانه

Pipe-Label	HW-Maximum	HW-Minimum	Pipe-Material
AC 1	150	142	AC
DI 2	138	130	DI
FE 3	153	147	FE
ST 4	150	148	ST

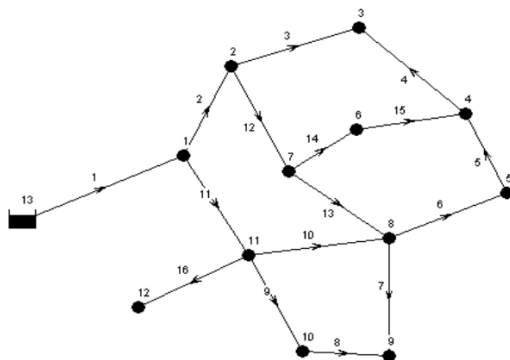
شکل ۳- سربرج تعیین محدوده ضریب زبری در نمونه پنجره کالیبراسیون سامانه



شکل ۶- پنجره نمودار معیار خطای کالیبراسیون طی اجرای مدل کالیبراسیون

Pipe Label	Hazen Williams Coefficient
P-1	50
P-10	150
P-100	150
P-101	50
P-102	50
P-103	150
P-104	50
P-105	50
P-106	129.827316

شکل ۵- پنجره مقادیر محاسبه شده ضرایب زبری هیزن ویلیامز حاصل از اجرای مدل کالیبراسیون سامانه



شکل ۷- شبکه توزیع آب لنسی و همکاران ۲۰۰۱

جدول ۱- اطلاعات مربوط به لوله‌های شبکه لنسی و همکاران (۲۰۰۱)

شماره لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
طول (m)	۳۰۴۸	۱۵۲۴	۱۵۲۴	۱۶۷۶	۱۰۶۶	۱۶۷۶	۱۳۷۱	۷۶۲
قطر (mm)	۶۱۰	۴۵۷	۴۰۶	۳۵۶	۳۰۵	۳۵۶	۳۰۵	۱۵۲
ضریب زبری (C_{HW})	۱۱۰	۱۱۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۲۰	۹۰	۹۰
شماره لوله	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
طول (m)	۱۰۶۶	۶۷۰	۱۹۸۱	۱۵۲۴	۱۶۷۶	۹۱۴	۱۲۱۹	۱۲۱۹
قطر (mm)	۳۰۵	۳۸۱	۴۵۷	۳۵۶	۳۰۵	۳۵۶	۳۰۵	۴۰۶
ضریب زبری (C_{HW})	۹۰	۹۰	۱۱۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۰

جدول ۲- اطلاعات مربوط به گره‌های شبکه لنسی و همکاران (۲۰۰۱)

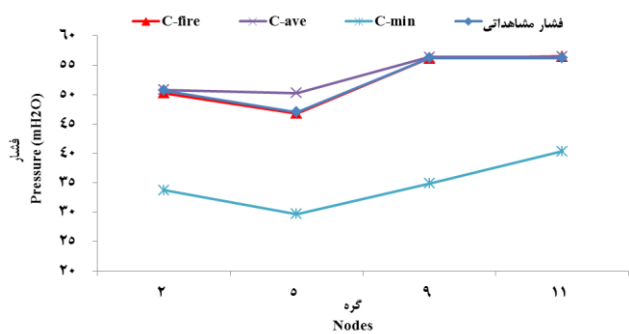
شماره گره	ارتفاع (m)	تقاضای نرمال (lit/s)	فشار اندازه‌گیری شده (m) در شرایط تقاضای متفاوت			
			شماره گره	نرمال	حداکثر	حداقل
۱	۴۵/۷	۰	۲	۵۸/۳	۵۰/۷	۶۳/۷
۲	۴۸/۷	۴۴	۲	۵۸/۳	۵۰/۷	۶۳/۷
۳	۵۰/۳	۴۱	۲	۵۸/۳	۵۰/۷	۶۳/۷
۴	۴۸/۷	۳۷	۲	۵۸/۳	۵۰/۷	۶۳/۷
۵	۴۵/۷	۳۱	۵	۵۹/۴	۴۷	۶۶
۶	۴۷/۲	۲۴	۵	۵۹/۴	۴۷	۶۶
۷	۴۴/۲	۲۴	۵	۵۹/۴	۴۷	۶۶
۸	۴۲/۷	۰	۹	۶۵/۵	۵۶/۲	۷۲
۹	۳۹/۶	۲۷	۹	۶۵/۵	۵۶/۲	۷۲
۱۰	۴۱/۱	۲۲	۹	۶۵/۵	۵۶/۲	۷۲
۱۱	۴۴/۲	۰	۱۱	۶۳/۴	۵۶/۲	۶۸/۴
۱۲	۳۹/۶	۱۷	۱۱	۶۳/۴	۵۶/۲	۶۸/۴

جدول ۳- مقادیر MAPE حاصل از نتایج کالیبراسیون در شرایط تقاضای متفاوت برای شبکه لنسی و همکاران (۲۰۰۱)

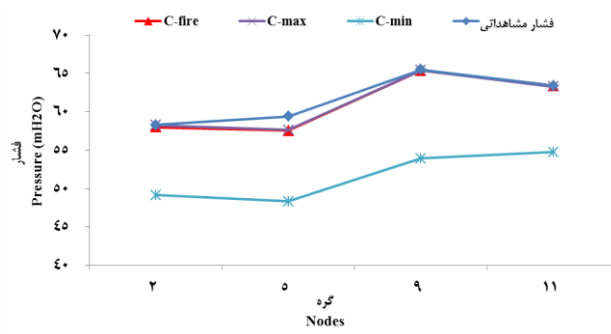
شرایط تقاضای پایه در فرآیند کالیبراسیون											
شرایط مدل‌سازی	نرمال		حداکثر		حداقل		جریان آتش‌نشانی				
	قبل از کالیبراسیون	بعد از کالیبراسیون	قبل از کالیبراسیون	بعد از کالیبراسیون	قبل از کالیبراسیون	بعد از کالیبراسیون	قبل از کالیبراسیون	بعد از کالیبراسیون	SMPSO	GA	
نرمال	۰/۱۹۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۷۵۰	۰/۸۴۸	۰/۷۵۰	۰/۸۴۸	۰/۷۵۰	۰/۸۴۸	۰/۷۵۰	۰/۸۴۸
حداکثر	---	۱/۷۵۱	۱/۹۷۴	۱/۷۲۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
حداقل	---	۲/۹۱۲	۲/۷۳۸	---	۲/۵۹۷	۲/۷۸۷	---	۲/۵۹۷	۲/۷۸۷	---	۲/۵۹۷
جریان آتش‌نشانی	---	۲/۱۶۹	۲/۸۶۵	---	۱/۰۲۸	۲/۶۳۹	---	۱/۰۲۸	۲/۶۳۹	---	۱/۰۲۸
میانگین MAPE (%)	---	۱/۷۰۸	۱/۸۹۴	---	۱/۵۴۴	---	---	۱/۵۴۴	---	---	۱/۵۴۴

مقادیر متوسط MAPE بدست آمده در نتیجه کالیبراسیون شبکه با استفاده از الگوریتم SMPSO نسبت به GA (Jamasp et al., 2008) در شرایط تقاضای حداکثر، حداقل و جریان آتش‌نشانی به ترتیب به میزان ۰/۴۲۵، ۲/۸۵۷ و ۰/۳۰۶ درصد کاهش و فقط در شرایط نرمال به میزان ۰/۱۸۶ درصد افزایش یافته است که نشان از برتری این روش نسبت به GA می‌باشد. هم‌چنین مقادیر MAPE قبل از کالیبراسیون در شرایط مدل‌سازی به ترتیب ۰/۱۹۳، ۱/۷۲۲،

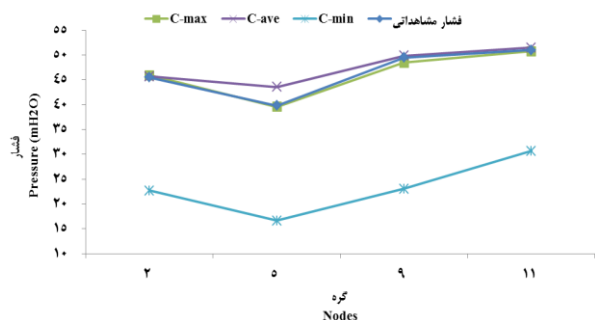
۲/۷۰۵ و ۲/۰۴۶ درصد می‌باشد که این مقادیر بعد از کالیبراسیون به صفر بهبود یافت. شکل ۸ نیز نمودار فشار مشاهداتی گره‌های ۲، ۵، ۹ و ۱۱ در برابر فشار شبیه‌سازی توسط مدل هیدرولیکی کالیبره شده در نتیجه پیاده‌سازی الگوریتم SMPSO برای کالیبراسیون شبکه مورد مطالعه در شرایط تقاضای متفاوت را نشان داد.



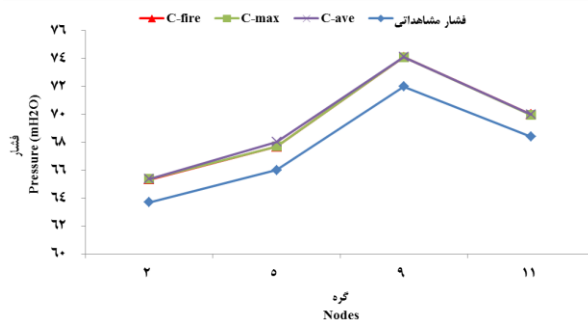
(ب)



(الف)



(د)

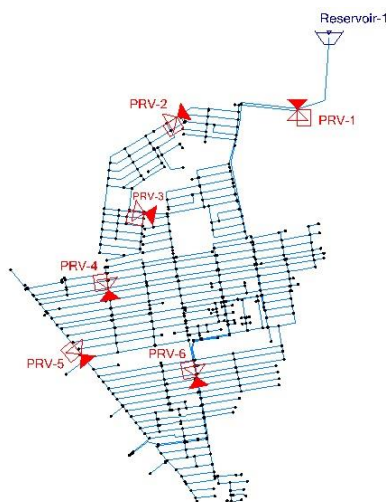


(ج)

شکل ۸- نمودار فشار مشاهده‌ای در برابر فشار شبیه‌سازی توسط مدل هیدرولیکی کالیبره شده برای هر یک از شرایط تقاضا بر مبنای ضرایب زبری کالیبره شده در شرایط دیگر تقاضا برای شبکه لنسی و همکاران (۲۰۰۱). الف) شرایط نرمال، ب) شرایط حداکثر، ج) شرایط حداقل و د) شرایط آتش‌نشانی. C-fire و C-min، C-max، C-ave به ترتیب ضرایب زبری کالیبره شده در هر یک از شرایط پایه تقاضای نرمال، حداکثر، حداقل و آتش‌نشانی می‌باشد.

فشارهای مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شد. جدول ۴ مقادیر نهایی ضرایب زبری هیزن ویلیامز حاصل در نتیجه پیاده‌سازی الگوریتم SMPSO برای کالیبراسیون شبکه لنسی و همکاران (۲۰۰۱) در شرایط پایه تقاضای نرمال، حداکثر، حداقل و آتش‌نشانی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود نمودارهای C-fire و C-max بسیار نزدیک به همدیگر می‌باشند و کم‌ترین اختلاف را با نمودارهای فشارهای مشاهده‌ای دارند که نشان می‌دهد استفاده از ضرایب زبری کالیبره شده در شرایط تقاضای آتش‌نشانی و حداکثر جهت محاسبه فشار در سایر شرایط تقاضا باعث کاهش خطای بین



شکل ۹- نقشه شبکه توزیع آب واقعی مورد مطالعه

جدول ۴- مقادیر نهایی ضرایب زبری ویلیامز در نتیجه کالیبراسیون شبکه لنسی و همکاران (۲۰۰۱) در شرایط پایه تقاضای نرمال، حداکثر، حداقل و آتش‌نشانی

شماره لوله	شرایط تقاضا		
	نرمال	حداکثر	حداقل
۱	۱۰۰/۰۶	۱۱۰/۷۱	۸۱/۹۵
۲	۱۳۲/۵۶	۱۱۰/۱۶	۶۴/۵۸
۳	۹۴/۱۵	۷۱/۴۷	۵۵/۹۲
۴	۶۴/۶۰	۷۹/۱۵	۱۰۴/۳۶
۵	۱۴۳/۳۷	۱۴۹/۵۵	۱۰۰/۰۸
۶	۱۳۳/۵۶	۶۹/۶۴	۱۴۶/۵۱
۷	۷۱/۰۴	۱۳۱/۵۸	۷۰/۳۲
۸	۱۰۱/۹۸	۱۱۸/۹۷	۵۰/۲۹
۹	۱۴۹/۳۲	۵۳/۲۳	۱۲۹/۶۴
۱۰	۹۳/۸۳	۸۳/۳۲	۵۶/۳۸
۱۱	۱۴۳/۵۹	۱۰۸/۶۵	۶۹/۶۶
۱۲	۱۴۹/۲۱	۹۰/۶۹	۶۳/۰۷
۱۳	۱۲۹/۷۰	۱۱۲/۸۰	۱۱۹/۱۲
۱۴	۵۰/۱۷	۶۰/۷۸	۶۹/۲۸
۱۵	۸۶/۸۸	۵۰/۰۲	۱۰۱/۵۱
۱۶	۱۳۲/۸۰	۸۸/۵۹	۸۲/۷۱

شبکه واقعی

این شبکه بخشی از شبکه توزیع آب شهر تهران و واقع در شمال غرب این شهر می‌باشد که شامل ۶۸۱ لوله، ۵۲۶ گره و ۶ عدد شیر فشارشکن می‌باشد که نقشه آن در شکل ۹ ارائه شده است. برای این شبکه الگوی مصرف ۲۴ ساعته بر اساس داده‌های خروجی مخزن استخراج گردیده است که سبب شده مدل هیدرولیکی این شبکه طی ۲۴ ساعت متغیر باشد. بیش‌ترین و کم‌ترین مصرف این شبکه به ترتیب با مقادیر ۳۵۸/۲۴ و ۱۳۹/۴۵ لیتر بر ثانیه در ساعت‌های ۱۸ بعدازظهر و ۴ صبح است. در این شبکه در نقاط قبل از شیرهای فشارشکن فشارهای مشاهداتی بطور لحظه‌ای با استفاده از فشارسنج-های دیجیتالی دریافت شد که جهت انجام فرآیند کالیبراسیون مقادیر آن‌ها بطور متوسط طی ۲۴ ساعت استخراج گردید.

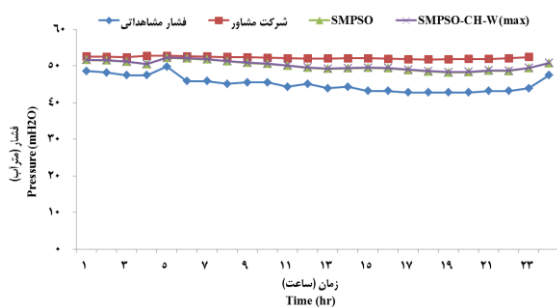
این شبکه ابتدا در شرایط هیدرولیکی شبیه‌سازی دوره گسترده (EPS) طی ۲۴ ساعت و سپس وضعیت هیدرولیکی شبیه‌سازی تک زمانه (SP) تحت هر یک از شرایط پایه تقاضای نرمال، حداکثر و حداقل بر اساس داده‌های مشاهداتی در این شرایط، بر مبنای محدوده ضرایب زبری (۱۵۰-۵۰) (Ormsbee., 1989) کالیبراسیون گردید. تمامی مراحل کالیبراسیون این شبکه طبق گام‌های ذکر شده در بخش ۳-۲ در زیر منوی کالیبراسیون سامانه مدیریت بهینه شبکه-های توزیع آب شهری انجام گرفت و در این قسمت جهت اختصار فقط به تحلیل نتایج پرداخته شد. در جدول ۵ میانگین معیار MAPE حاصل از کالیبراسیون شبکه واقعی مورد مطالعه تحت شرایط مختلف با استفاده از روش SMPSO موجود در سامانه در مقایسه با کالیبراسیون انجام شده توسط شرکت مشاور ارائه شده است.

جدول ۵- مقادیر MAPE حاصل از نتایج کالیبراسیون در شرایط تقاضای متفاوت برای شبکه واقعی

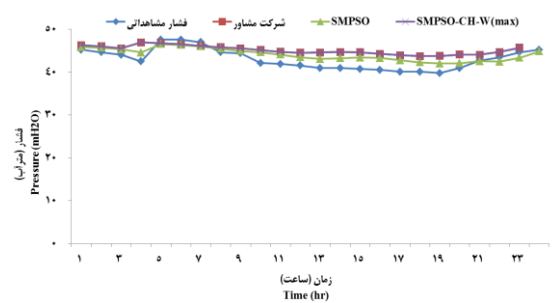
شرایط تقاضای پایه در فرآیند کالیبراسیون								
متغیر طی ۲۴ ساعت		حداقل		حداکثر		نرمال		شرایط مدل‌سازی
SMPSO-C _H -W(max)	SMPSO	شرکت مشاور	شرکت مشاور	SMPSO	شرکت مشاور	SMPSO	شرکت مشاور	
۹/۳۷	۹/۸۱	۱۵/۳۳	۱۴/۷۶	۱۴/۷۶	۸/۷۵	۱۴/۷۶	۹/۰۹	نرمال
			۱۹/۹۳	۱۹/۹۳	۸/۶۸	۱۹/۹۳	۹/۴۱	حداکثر
			۱۰	۱۰	۸/۶۷	۱۰	۸/۷۴	حداقل
۹/۳۷	۹/۸۱	۱۵/۳۳	۱۴/۹۰	۱۴/۹۰	۸/۷۰	۱۴/۹۰	۹/۰۸	میانگین MAPE (%)

تقاضای متغیر طی ۲۴ ساعت استفاده گردید که نتیجه آن با نام وضعیت SMPSO-CH-W(max) در جدول ۵ مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین معیار MAPE در این شرایط با ۰/۴۳ درصد کاهش نسبت به کالیبراسیون در شرایط پایه متغیر مصرف طی ۲۴ ساعت عملکرد بهتری داشت. لازم به ذکر است برای این شبکه به خاطر عدم امکان اندازه‌گیری فشار مشاهداتی در شرایط تقاضای آتش‌نشانی امکان کالیبراسیون مدل در این حالت وجود نداشت.

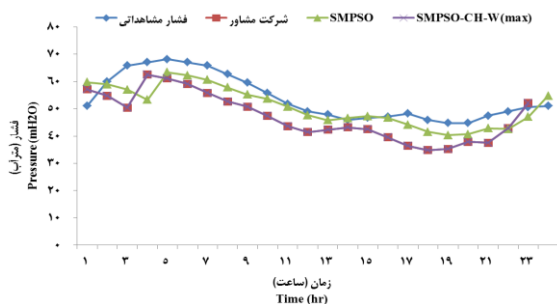
شکل ۱۰ نمودار فشار مشاهداتی در برابر فشار شبیه‌سازی توسط مدل هیدرولیکی کالیبراسیون شده با بکارگیری روش SMPSO و شرکت مشاور را در شرایط متغیر مصرف طی ۲۴ ساعت برای شبکه واقعی نشان می‌دهد.



(ب)



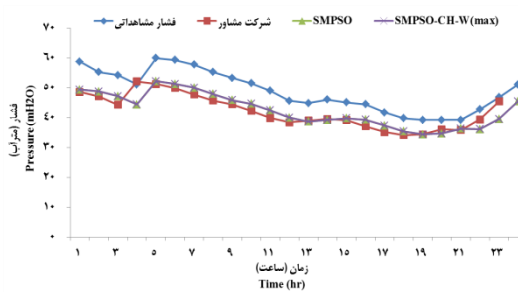
(ت)



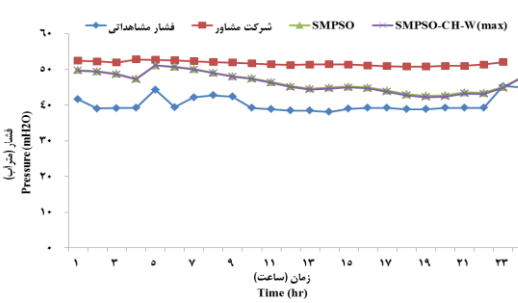
(د)

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود مقادیر میانگین MAPE محاسبه شده با استفاده از روش SMPSO در شرایط تقاضای نرمال، حداکثر و حداقل تقاضا به ترتیب برابر ۹/۷۰، ۸/۷۰ و ۹/۶۹ درصد و در شرایط تقاضای متغیر برابر ۹/۸۱ درصد می‌باشد که نسبت به مقدار میانگین MAPE برابر ۱۴/۹۰ درصد که حاصل کالیبراسیون انجام شده توسط شرکت مشاور می‌باشد بسیار کمتر است. همچنین میانگین معیار MAPE در شرایط حداکثر تقاضا نسبت به شرایط نرمال، حداقل و متغیر به ترتیب به میزان ۰/۳۸، ۰/۹۹ و ۱/۱۰ درصد کمتر می‌باشد که علت آن را می‌توان افزایش افت فشار شبکه ناشی از افزایش مصرف در این شرایط دانست که سبب تاثیر بیش‌تر ضرایب زبری می‌شود.

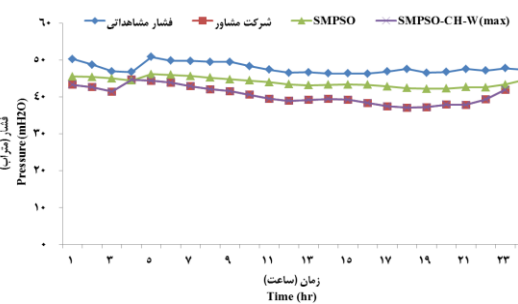
در ادامه از ضرایب زبری بدست آمده از کالیبراسیون شبکه در شرایط پایه حداکثر تقاضا نیز برای محاسبه معیار MAPE در شرایط



(الف)



(پ)



(ج)

شکل ۱۰- نمودار فشار مشاهداتی در برابر فشار شبیه‌سازی توسط مدل هیدرولیکی کالیبراسیون شده برای شرایط متغیر مصرف برای نقاط الف) گره ۱، ب) گره ۲، پ) گره ۳، ت) گره ۴، ج) گره ۵، د) گره ۶.

منابع

- Alvisi, S., Franchini, M. 2010. Pipe roughness calibration in water distribution systems using grey numbers. *Journal of hydroinformatics*. 12.4: 424-445.
- Cheng, W., He, Z. 2010. Calibration of nodal demand in water distribution systems. *Journal of water resources planning and management*. 137.1: 31-40.
- Christodoulou, S., Ellinas, G. 2011. Ant colony optimization for level of service improvements in piping networks. *European water*. 33: 3-10.
- 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*. 28.7: 2021-2034.
- Do, N.C., Simpson, A.R., Deuerlein, J.W., Piller, O. 2016. Calibration of water demand multipliers in water distribution systems using genetic algorithms. *Journal of water resources planning and management*. 142.11: 0401-6044.
- Haghighi, A., Ramos, H.M. 2012. Detection of leakage freshwater and friction factor calibration in drinking networks using central force optimization. *Water resources management*. 26.8: 2347-2363.
- Jamasb, M., Tabesh, M., Rahimi, M. 2008. Calibration of EPANET using genetic algorithm. *water distribution systems analysis*. 1-9.
- Jung, B., Karney, B. 2008. Systematic exploration of pipeline network calibration using transients. *Journal of hydraulic research*. 46(sup1), 129-137.
- Lansey, K., El-Shorbagy, W., Ahmed, I., Araujo, J., Haan, C. 2001. Calibration assessment and data collection for water distribution networks. *Journal of hydraulic engineering*. 127.4: 270-279.
- Melo Brentan, B., Luvizotto Jr, E., Ribeiro, L.C.L. 2013. PSO applied to reduce the cost of energy in water supply networks. *Applied mechanics and materials: trans tech publ*. pp. 409: 703-706.
- Moghaddam, A., Alizadeh, A., Faridhosseini, A., Ziaei, A.N., Heravi, D.F. 2018. Optimal design of water distribution networks using simple modified particle swarm optimization approach. *Desalination and water treatment*. 104: 99-110.
- Mora-Melia, D., Iglesias-Rey, P., Martinez-Solano, F.J., Ballesteros-Pérez, P. 2015. Efficiency of evolutionary algorithms in water network pipe sizing. *Water resources management*. 29.13: 4817-

همان طور که در شکل مشاهده می شود نمودارهای فشارهای شبیه سازی شده حاصل از کالیبراسیون در وضعیت های متغیر مصرف در مقایسه با نمودارهای حاصل از کالیبراسیون توسط شرکت مشاور، اختلاف کمتری با نمودارهای فشارهای مشاهداتی دارند.

نتیجه گیری

در این مقاله کاربرد سامانه نوین تحت وب به نام سامانه مدیریت بهینه شبکه های توزیع آب شهری جهت کالیبراسیون شبکه مورد بررسی قرار گرفت. از قابلیت های این سامانه می توان به یک پارچگی از لحاظ جمع آوری داده های سنجنده های شبکه، تحلیل هیدرولیکی تحت وب و مدیریت فشار شیرهای فشار شکن شبکه اشاره نمود که سعی در پاسخ گویی به تمامی نیازهای کارشناسان شرکت آب و فاضلاب در حوزه های متفاوت دارد. این سامانه جهت کالیبراسیون شبکه توزیع آب در شرایط هیدرولیکی EPS و SS بر مبنای روش بهینه سازی SMPSO و با هدف کمینه کردن معیار خطای MAPE بین فشارهای مشاهداتی و شبیه سازی با استفاده از ضرایب زبری هیزن ویلیامز لوله ها به عنوان متغیرهای تصمیم عمل می کند. هدف از پیاده سازی فرآیند کالیبراسیون شبکه در این سامانه ایجاد قابلیت استفاده از مدل پیشرفته بهینه سازی به شکلی ساده و کاربر پسند برای استفاده کارشناسان شرکت آب و فاضلاب می باشد. بدین منظور در این پژوهش ابتدا توانایی روش بهینه سازی SMPSO موجود در سامانه جهت کالیبراسیون شبکه مرجع از پژوهش قبلی در شرایط پایه تقاضای مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاکی از عملکرد بسیار رضایت بخش این روش در کاهش معیار MAPE نسبت به الگوریتم GA است. سپس از روش SMPSO برای کالیبراسیون شبکه واقعی در شرایط نرمال، حداکثر، حداقل و مصرف متغیر طی ۲۴ ساعت استفاده گردید که در تمامی این شرایط میزان خطای بین فشارهای مشاهداتی و شبیه سازی نسبت به کالیبراسیون انجام شده توسط شرکت مشاور بسیار کاهش یافت. در نهایت بر اساس نتایج حاصل از هر دو شبکه می توان بیان نمود که فرآیند کالیبراسیون شبکه به ترتیب در شرایط آتش نشانی و حداکثر تقاضا با خطای کمتری مواجه است.

سپاس گذاری

نویسندگان مقاله لازم می دانند از شرکت مهندسی مشاور هیدروتک توس به دلیل مساعدت و همکاری در انجام این پژوهش مراتب سپاس گذاری و قدردانی را به جا آورند.

- particle swarm optimization. International conference on evolutionary programming: Springer. 591-600.
- Shi, Y., Eberhart, R. 1998b. A modified particle swarm optimizer. Evolutionary computation proceedings. 1998. IEEE world congress on computational intelligence. The 1998 IEEE international conference on: IEEE. 69-73.
- Sunela, M.I., Puust, R. 2015. Real time water supply system hydraulic and quality modeling—a case study. *Procedia engineering*. 119: 744-752.
- Tsakiris, G., Spiliotis, M. 2012. Applying resilience indices for assessing the reliability of water distribution systems. *Water utility J*. 3: 19-27.
- Walski, T.M., DeFrank, N., Voglino, T., Wood, R., Whitman, B.E. 2008. Determining the accuracy of automated calibration of pipe network models. *Water distribution systems analysis symposium*. 1-18.
- 4831.
- Nazif, S., Karamouz, M., Tabesh, M., Moridi, A. 2010. Pressure management model for urban water distribution networks. *Water resources management*. 24.3: 437-458.
- Ormsbee, L.E. 1989. Implicit network calibration. *Journal of water resources planning and management*. 115.2: 243-257.
- Ostfeld, A., Salomons, E., Ormsbee, L., Uber, J.G., Bros, C.M., Kalungi, P., Burd, R., Zazula-Coetzee, B., Belrain, T., Kang, D. 2011. Battle of the water calibration networks. *Journal of water resources planning and management*. 138.5: 523-532.
- Roma, J., Perez, R., Sanz, G., Grau, S. 2015. Model calibration and leakage assessment applied to a real Water distribution network. *Procedia engineering*. 119: 603-612.
- Seyoum, A.G., Tanyimboh, T.T., Siew, C. 2016. Practical application of penalty-free evolutionary multi-objective optimisation of water distribution systems. *Water utility journal*. 12: 49-55.
- Shi, Y., Eberhart, R.C. 1998a. Parameter selection in

The Application of Optimal Management System of Water Distribution Networks in the Calibration Process

A. Moghaddam^{1*}, H. Rezaei², A.N. Ziaei³, K. Behzadian⁴

Received: Jul.01, 2018

Accepted: Sep.24, 2018

Abstract

A hydraulic model of water distribution network is successful and reliable if it can simulate real condition by high accuracy. In this paper introduces a new web-based system which called optimal management system of water distribution networks with the goal of calibration of water distribution network based on simple modified particle swarm optimization (SMPSO) in a simple and user friendly way for the experts of the water and wastewater companies. The calibration process in this web-based system is aimed to minimize Mean Absolute Percentage Error criterion (MAPE) between simulated and observed pressures with the Hazen- Williams roughness coefficients as the decision variables. To achieve this purpose, firstly the SMPSO method is investigated to calibrate a benchmark network which the results showed MAPE average has reduced to 0.425, 2.857 and 0.306 percent in the maximum, minimum and fire demand conditions respectively and has increased 0.186 percent just in the normal condition. It is verify that the SMPSO algorithm performs better than the GA. Then the system is used to calculate a real case water network in the normal, maximum, minimum and different demand conditions during the 24 hours which in these condition MAPE values have decreased 5.82,6.20,5.21 and 5.95 respectively, when compared with calibration obtained by consulting company.

Keywords: Calibration, Optimal management system, Simple modified particle swarm optimization, Water distribution networks

1- Ph.D. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Urmia University

2- Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Urmia University

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

4- Senior Lecturer, School of Computing and Engineering, University of West London, London W5 5RF, U.K.

(*-Corresponding Author Email: alireza.moghaddam@yahoo.com)