Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال هفدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰
Volume 17, No. 2, Summer 2021 (IR-WRR)
۱۴۲-۱۵۳

ایجاد خودکار نواحی اندازه‌گیری مجزا در شبکه‌های توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم ساختار جامعه و الگوریتم ژنتیک با هدف توزیع عادلانه فشار شبکه

علیرضا صادقی[۱]، محمدمهدی جوادیان‌زاده[۲*] و هادی پوردارا[۳]

چکیده

ناحیه اندازه‌گیری مجزا (DMA) یک منطقه مشخص شده است که امکان اندازه‌گیری میزان آب ورودی و خروجی آن منطقه در هر لحظه از زمان مهیا است. روند کلی تشکیل نواحی اندازه‌گیری مجزا عموماً به مرحله خوشه‌بندی برای تشخیص خودکار بهترین جوامع و مرحله ناحیه‌بندی فیزیکی برای بهینه‌سازی محل قرارگیری شیرهای دروازه‌ای و فلومترها در لوله‌های مرزی با توجه به تابع هدف صورت می‌گیرد. در این تحقیق ابتدا شبکه شهر تفت در استان یزد در نرم‌افزار EPANET مدل شد و با اتصال EPANET به نرم‌افزار MATLAB و بارگذاری مشخصات شبکه، با استفاده از الگوریتم ساختار جامعه، شبکه به صورت خودکار خوشه‌بندی شد. در مرحله ناحیه‌بندی فیزیکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک محل‌های بهینه قرارگیری شیرهای دروازه‌ای و فلومترها با هدف کاهش واریانس میانگین فشار نواحی اندازه‌گیری مجزا مشخص شد. نتایج نشان داد که الگوریتم تشخیص ساختار جامعه با وزن میانگین فشار روزانه به خوبی توانایی ایجاد خودکار خوشه‌بندی مناسب با توجه به شاخص پیمانگی و فشار یکنواخت داخل خوشه‌ها را دارد و بهینه‌سازی لوله‌های مرزی منجر به کاهش فشار بخش‌های مختلف شبکه از جمله نواحی با فشار بالاتر از میانگین کل شبکه شد و با کاهش واریانس میانگین فشار نواحی اندازه‌گیری مجزا، باعث توزیع عادلانه فشار شبکه شد.

کلمات کلیدی: الگوریتم ساختار جامعه، تئوری گراف، شبکه توزیع آب، مدیریت فشار، نواحی اندازه‌گیری مجزا.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۵/۲۵

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه یزد.
۲- شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد، دکتری عمران- آب دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی.
۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

Automatic Creation of District Metered Areas in Urban Water Distribution Networks Using Community Structure Algorithm and Genetic Algorithm aiming at Equitable Distribution of Network Pressure

A. Sadeghi [1], M.M. Javadianzade [2], and H. Pourdara[3]*

Abstract

A District Metered Area (DMA) is a specified area in which inlet and outlet water at any time is measured. The procedure of forming District Metered Areas is generally comprised of two phases: The clustering phase for automatic detection of the best communities and the physical partitioning phase to optimize the location of gate valves and flowmeters according to the objective function. In this study, the network of Taft city in Yazd province was modeled in Epanet software and by linking EPANET and MATLAB and loading the network configurations, the network was automatically clustered using community structure. In the physical partitioning phase, using the genetic algorithm, the optimal locations of the gate valves and flowmeters was determined by considering the objective function of reduction of standard deviation of DMAs average pressure. The results showed that the community structure algorithm with average daily pressure weight can automatically create appropriate clustering according to the modularity index and uniform pressure in clusters. The optimization of boundary pipes resulted in the reduction of the pressure in different parts of the network, such as areas with pressure higher than the average pressure of the network, and due to the reduced standard deviation of DMAs average pressure caused equitable distribution of network pressure.

Keywords: Community Structure Algorithm, Graph Theory, Water Distribution Network, Pressure Management, District Metered Area (DMA).

Received: May 16, 2021
Accepted: August 16, 2021

1- M.Sc. Graduate of Civil Engineering-Water and Hydraulic Structure Engineering, Yazd University.
2- Yazd Regional Water Authority, Ph.D. of Civil Engineering, K.N.Toosi University of Technology. Email: m.javadian@gmail.com
3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University.
*- Corresponding Author
Dor: 20.1001.1.17352347.1400.17.2.10.3

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

سیستم آبرسانی شبکه‌ای بهم پیوسته و پیچیده است که با برنامه‌ریزی و بهره‌برداری مناسب می‌توان از کمیت و کیفیت آب برای رساندن به همه مشترکان اطمینان حاصل کرد. با توسعه شهرها و بزرگتر شدن شبکه‌های توزیع آب مدیریت و بهره‌برداری از آن‌ها دشوارتر شده است؛ زیرا شبکه‌های توزیع آب از هزاران اجزاء تشکیل شده‌اند و اکثر آن‌ها مدفون در خاک هستند. همچنین، در سال‌های اخیر یکی از نگرانی‌های اصلی مدیران آب کاهش میزان هدر رفت واقعی آب[۱] است که اغلب بیش از ۳۰ درصد یا حتی ۴۰ درصد حجم ورودی سیستم است (Araujo et al., 2006). یک هدف مهم برای مدیران آب، تأمین آب برای یک تقاضای مشخص آب با کمترین هزینه است، کنترل نشت مؤثرترین راه برای کاهش قیمت آب است (Khoa Bui et al., 2020). هدر رفت واقعی آب شامل سه بخش هدر رفت آب ناشی از نشت و شکستگی‌های گزارش شده، هدر رفت آب ناشی از نشت و شکستگی‌های گزارش نشده و نشت زمینه آب در شبکه توزیع است. با توجه به ماهیت هدر رفت‌های گزارش شده، تعیین آن‌ها ساده است. اما تعیین محل و رفع هدر رفت آب ناشی از شکستگی گزارش نشده و نشت زمینه پیچیده و زمان‌بر است.

برای شناسایی بهتر نشت در شبکه‌های توزیع آب، می‌توان با ایجاد یک سیستم کنترل هدر رفت ثابت، به صورت تقسیم‌بندی شبکه به تعدادی مناطق مجزا تحت عنوان DMA[۲]، به گونه‌ای عمل نمود که بتوان هدر رفت هر منطقه را به صورت کمی بیان کرده و فعالیت‌های تشخیص نشت را بر روی قسمتی از شبکه که بیشترین مقدار نشت را دارد متمرکز نمود (Shekofteh et al., 2020). مدیریت فشار[۳] یکی از کارآترین و مقرون به صرفه‌ترین روش‌های کاهش نشت می‌باشد (Tabesh & Vaseti, 2006). یک ناحیه اندازه‌گیری مجزا[۴]، یک منطقه مشخص شده از شبکه توزیع است که امکان اندازه گیری میزان آب ورودی و خروجی به آن منطقه به وسیله فلومتر[۵] وجود دارد (Farley, 2001).

تقسیم‌بندی و مدیریت در شبکه‌های توزیع آب در دهه ۱۹۸۰ میلادی در کشور انگلستان معرفی شد، تا مکان‌یابی محل‌های هدر رفتن آب و تکنیک‌های مدیریت فشار را ساده‌تر کند (Di Nardo et al., 2014a, 2016). هدف اصلی از ناحیه‌بندی شبکه، دستیابی به کنترل بهتر در توزیع آب است؛ اما مزایای بیشتری برای ناحیه‌بندی شبکه توزیع آب بر شمرده می‌شود که افزایش قدرت تشخیص و مدیریت نشت و ترکیدگی‌ها، فراهم کردن ظرفیتی برای ایجاد سطوح مختلف فشار که کمک می‌کند تا یک سیستم کنترل فشار دائمی ایجاد شود و بهبود نوسازی و برنامه‌ریزی عملکرد شبکه، از جمله آن هستند (Di Nardo et al., 2016). با این حال، خود عمل ناحیه‌بندی را می‌توان به عنوان یک روش مدیریت فشار درنظر گرفت (De Paola et al., 2014). بسته به طرح نواحی اندازه‌گیری مجزا ترکیدن لوله‌ها می‌تواند به میزان ۵۳ تا ۶۰ درصد کاهش یابد (Ferrari & Savic, 2015). همچنین، نواحی اندازه‌گیری مجزا معمولاً برای دائمی بودن طراحی می‌شوند، ولی شیرهای مرزی می‌توانند در مواقع اورژانسی و خاص به طور دستی یا با سیستم کنترل باز شوند و دوباره شبکه حلقه‌ای ایجاد شود (Di Nardo et al., 2014b). بطور کلی روند تشکیل نواحی اندازه‌گیری مجزا طی دو مرحله زیر انجام می‌شود (Di Nardo et al., 2016):

۱. خوشه‌بندی[۶]: با هدف تعیین شکل و اندازه زیرمجموعه‌های شبکه براساس روش‌های مختلف، تا تعداد یال‌های قطع شده را کمینه کند و تعداد گره‌های در هر ناحیه را متعادل سازد، این کار اغلب با استفاده از تئوری گراف[۷] (Tzatchkov et al., 2008; Perelman & Ostfeld, 2011; Gomes et al., 2012; Alvisi & Franchini, 2014; Di Nardo et al., 2014b; Campbell et al., 2015, 2016; Scarpa et al., 2016; Lifshitz & Ostfeld, 2018)، ناحیه‌بندی چند مرحله‌ای[۸] (Sempewo et al., 2008; Di Nardo et al., 2013; Alvisi, 2015; Perelman et al., 2015)، ساختار جامعه[۹]، رویکرد طیفی[۱۰] (Herrera et al., 2010; Di Nardo et al., 2017, 2018; Liu & Han, 2018; Giudicianni et al., 2020a, 2020b) و رویکرد چند عاملی[۱۱] (Izquierdo et al., 2009; Herrera et al., 2012; Hajebi et al., 2013) انجام می‌شود؛

۲. ناحیه‌بندی فیزیکی[۱۲]: شامل انتخاب لوله‌های مناسب جهت نصب فلومترها یا شیرهای دروازه‌ای[۱۳] با استفاده از روش‌های سعی و خطا یا الگوریتم‌های بهینه‌سازی با هدف کمینه‌سازی هزینه و تلفات هیدرولیکی می‌باشد؛

Diao et al. (2013) برای یافتن خوشه‌ها به صورت خودکار الگوریتم ساختار جامعه را در شبکه توزیع آب به کار بردند. در این مطالعه شبکه توزیع آب به صورت یک گراف بی‌سو[۱۴] شکل گرفت و کشف ساختار جامعه به کار برده شد تا ماتریس پیمانگی را بیشینه سازد. برای ارزیابی این روش یک شبکه توزیع واقعی مورد آزمایش قرار گرفت و نتیجه با طرح نواحی اندازه‌گیری مجزا مقایسه شد. روش مورد اشاره یک نوآوری در روش‌های خودکار با هدف تکمیل و جایگزینی روش تجربی آزمون و خطاست که لوله‌های تغذیه مرزی با روش تکرار و بر پایه تجزیه و تحلیل حساسیت مشخص می‌شوند. Campbell et al. (2014) روشی را براساس این ایده که خطوط تغذیه (شبکه بدنه) نباید در طرح‌های تقسیم‌بندی درنظر گرفته شوند به جای مشخص کردن

www.SID.ir

Archive of SID

جامعه‌های شبکه با بیشینه کردن شاخص پیمانگی[15] ارائه دادند. این روش با استفاده از ارتباطات بین یال‌ها، جریان و تجزیه و تحلیل قطر مشخص شد. Giustolisi & Ridolfi (2014) یک روش مبتنی بر پیمانگی را برای تقسیم‌بندی شبکه توزیع آب پیشنهاد کردند که خواص هیدرولیکی شبکه را برای تعریف پیمانگی بودن شبکه توزیع آب ارائه می‌دهد. روش پیشنهادی برای به حداقل رساندن تعداد لوله‌های مرزی بر تقسیم‌بندی مفهومی شبکه نزدیک به گره‌های انتهایی متمرکز شده است، با توجه به تحقیقات Fortunato & Barthélemy (2007) در این روش محدودیت ذاتی از الگوریتم تشخیص جامعه کلاسیک به جا مانده است و برای جوامع کوچک که تعداد یال‌های آن کمتر از $\sqrt{2m}$ (m: تعداد کل یال‌ها در کل شبکه) ممکن است جوابگو نباشد. Perelman et al. (2015) سه شاخه از تئوری گراف خوشه‌بندی کلی[16]، ساختار جامعه و ناحیه‌بندی گراف را برای ارزیابی کارآیی هر روش، به دو شبکه توزیع آب در سنگاپور به کار بردند. در این تحقیق نشان داده شد که این روش‌ها برای شبکه‌های بزرگ سازگار و قابل اجرا هستند، اما عملکرد هر روش کاملاً متفاوت است و به تعداد خوشه‌ها و پارامترهای انتخاب شده برای ارزیابی بستگی دارد. Ciaponi et al. (2016) روشی پیشنهاد کردند که شناسایی خودکار نواحی اندازه‌گیری مجزا با شناسایی لوله‌های انتقال اصلی در بخش‌بندی شبکه توزیع آب اجرا می‌شود و سپس هر ناحیه اندازه‌گیری مجزا با لوله‌های توزیع باقیمانده به طوری که مستقیما با لوله‌های انتقال اصلی در ارتباط باشد تعیین می‌شود، نواحی به دست آمده از این روش به طور کامل از یکدیگر مستقل هستند. Simone et al. (2016) برای دستیابی به تعداد و توزیع بهینه فشارسنج مورد نیاز شبکه با استفاده از شاخص پیمانگی و یک روش بهینه‌سازی چندهدفه ارائه کردند تا هزینه فشارسنج‌ها را با درنظر گرفتن شاخص پیمانگی به حداقل برسانند. Zhang et al. (2017) با ترکیبی از فشار گره با تشخیص جامعه مبتنی بر پیمانگی یک روش ترکیبی ایجاد کردند تا یک شبکه را از نظر فشار به نواحی اندازه‌گیری مجزا مشابه تقسیم‌بندی کند. با این حال برای بهبود محدودیت‌های رزولوشن پیمانگی کلاسیک، آن‌ها از یک نظریه پیاده‌روی تصادفی استفاده کردند. برای نشان دادن برتری این روش نسبت به روش‌های قبلی با نتایج ارائه شده توسط Diao et al. (2013) مقایسه شد و نشان داده شد روش مورد استفاده در تعداد نواحی اندازه‌گیری مجزای برابر به نتایج بهتری در ایجاد خوشه‌های با فشار یکنواخت منجر می‌شود. Shekofteh et al. (2020) با استفاده از تئوری گراف و شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه موجود با کمک شبکه‌ی عصبی مصنوعی[17]، بدون اینکه تغییری در شبکه ایجاد شود و با تشکیل نواحی اندازه‌گیری مجزای مجازی نواحی دارای نشت در شبکه را شناسایی کردند. نتایج نشان داد روش ارائه شده نشت در هر ناحیه را به درستی شناسایی می‌کند و می‌توان تعداد نواحی مجزای بهینه برای شبکه را تعیین کرد. همچنین، بر اساس تحلیل تعداد فشارسنج‌ها نشان داده شد کاهش دقت نتایج در زمان کاهش تعداد فشارسنج‌ها چشمگیر نیست و مکان فشارسنج‌ها در شبکه تأثیر بیشتری بر دقت نتایج پیش‌بینی دارد. Shekofteh & Ghazizadeh (2020) برای دستیابی به نواحی اندازه‌گیری مجزا با به حداقل رساندن تعداد لوله‌های رابط بین نواحی برای کاهش هزینه اندازه‌گیری جریان (استفاده از تعداد فلومتر کمتر)، با استفاده از تئوری گراف و الگوریتم یال‌های میانی[18] یک شبکه واقعی را به نواحی اندازه‌گیری مجزا تقسیم‌بندی کردند. همچنین، برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین جوامع از الگوریتم جستجوی اول سطح[19] استفاده شد. نتایج نشان داد الگوریتم مورد استفاده قادر است انواع گراف‌های بزرگ را مورد تحلیل قرار دهد و برای تبدیل شبکه‌های قدیمی و پیچیده به نواحی مجزا استفاده شود. Dahrazma & Hessami Kermani (2020) بر مبنای تئوری گراف چند روش پر کاربرد ایجاد نواحی اندازه‌گیری مجزا را بیان کردند و به منظور ارزیابی روش‌ها و انتخاب طراحی بهینه شبکه توزیع آب از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی[20] با اهداف مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد روش ساختار جامعه الگوریتم یال میانی برای گراف وزن‌دار و الگوریتم خوشه‌بندی طیفی برای گراف بی‌وزن در رتبه نخست قرار گرفتند.

در برخی شبکه‌های توزیع آب ثقلی اختلاف ارتفاع زیادی در سطح آن‌ها وجود دارد و باعث می‌شود تا بین محدوده‌های فشار اختلاف زیادی ایجاد شود، با توجه به تحقیقات انجام گرفته، می‌توان دریافت منافع زیادی از ایجاد نواحی اندازه‌گیری مجزا به دست می‌آید، یکی از مواردی که به آن در تحقیقات پرداخته نشده اصلاح توزیع فشار شبکه‌های پیچیده موجود برای توزیع عادلانه فشار با استفاده از نواحی اندازه‌گیری مجزا است، به گونه‌ای که در مرحله بهینه‌سازی لوله‌های مرزی با کمترین هزینه و فقط انتخاب بهینه محل قرارگیری شیرهای دروازه‌ای و فلومترها واریانس فشار میانگین نواحی اندازه‌گیری مجزا کاهش یابد. در نتیجه به کار بردن این روش انتظار می‌رود فشار نواحی مختلف شبکه از جمله نواحی اندازه‌گیری مجزای با میانگین فشار بالاتر از فشار میانگین کل شبکه کاهش یابد. برای این منظور در این تحقیق برای مرحله خوشه‌بندی خودکار از روش ساختار جامعه با درنظر گرفتن فشار متوسط روزانه به عنوان وزن به کار برده شد تا خوشه‌هایی با یکنواختی فشار داخلی بیشتری ایجاد شود، در نتیجه پس از بهینه‌سای لوله‌های مرزی به نتایج بهتری در کاهش واریانس فشار میانگین نواحی اندازه‌گیری مجزا می‌توان دست یافت.

www.SID.ir

Archive of SID

۲- روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا با استفاده از الگوریتم تشخیص ساختار جامعه شبکه خوشه‌بندی خودکار می‌شود، سپس در مرحله ناحیه‌بندی فیزیکی تلاش شد با هدف کمینه کردن واریانس میانگین فشار نواحی اندازه‌گیری مجزا محل‌های بهینه قرارگیری شیرهای دروازه‌ای و فلومترها با استفاده از الگوریتم ژنتیک مشخص شود. در انتها نیز با استفاده از شاخص ارزیابی سن آب تغییرات کیفی ایجاد شده در شبکه توزیع آب پس از ایجاد نواحی اندازه‌گیری مجزا ارزیابی می‌شود.

۲-۱- الگوریتم تشخیص ساختار جامعه

ساختار شبکه‌های توزیع آب به صورت یک گراف بدون جهت $G(V,E)$ ترسیم می‌شود، به طوری‌که $V=\{v_1,v_2,...,v_n\}$ گره‌ها (نقاط اتصال، مخازن و تانک‌ها) است و $E=\{e_1,e_2,...,e_m\}$ یال‌ها (لوله‌ها، شیرها و پمپ‌ها) است و $e_k=(v_i,v_j)$ $(k=1,2,...,m)$، یک یال از v_i به v_j است. $n=|V|$ تعداد کل گره‌ها است و $m=|E|$ تعداد کل یال‌ها می‌باشد. Newman & Girvan (2004) و Clauset et al. (2004) براساس تئوری گراف الگوریتم تشخیص ساختار جامعه را پیشنهاد کرده‌اند. این الگوریتم از بهینه‌سازی حریصانه[۲۱] از یک مقدار معروف به پیمانگی (Q) استفاده می‌کند. آن‌ها از معیار کیفیت چگالی شبکه برای تعریف خوشه‌ها استفاده کردند، با این فرض که چگالی یک تقسیم شبکه زمانی مناسب است که یال‌های زیادی در داخل خوشه‌ها وجود داشته باشد و فقط تعداد معدودی در بین خوشه‌ها باشد. شاخص پیمانگی یک ویژگی شبکه است که به عنوان شاخصی برای تعیین مقدار کیفیت خوشه‌بندی گراف در جامعه استفاده می‌شود. روش خوشه‌بندی مبتنی بر بیشینه‌سازی شاخص پیمانگی است.

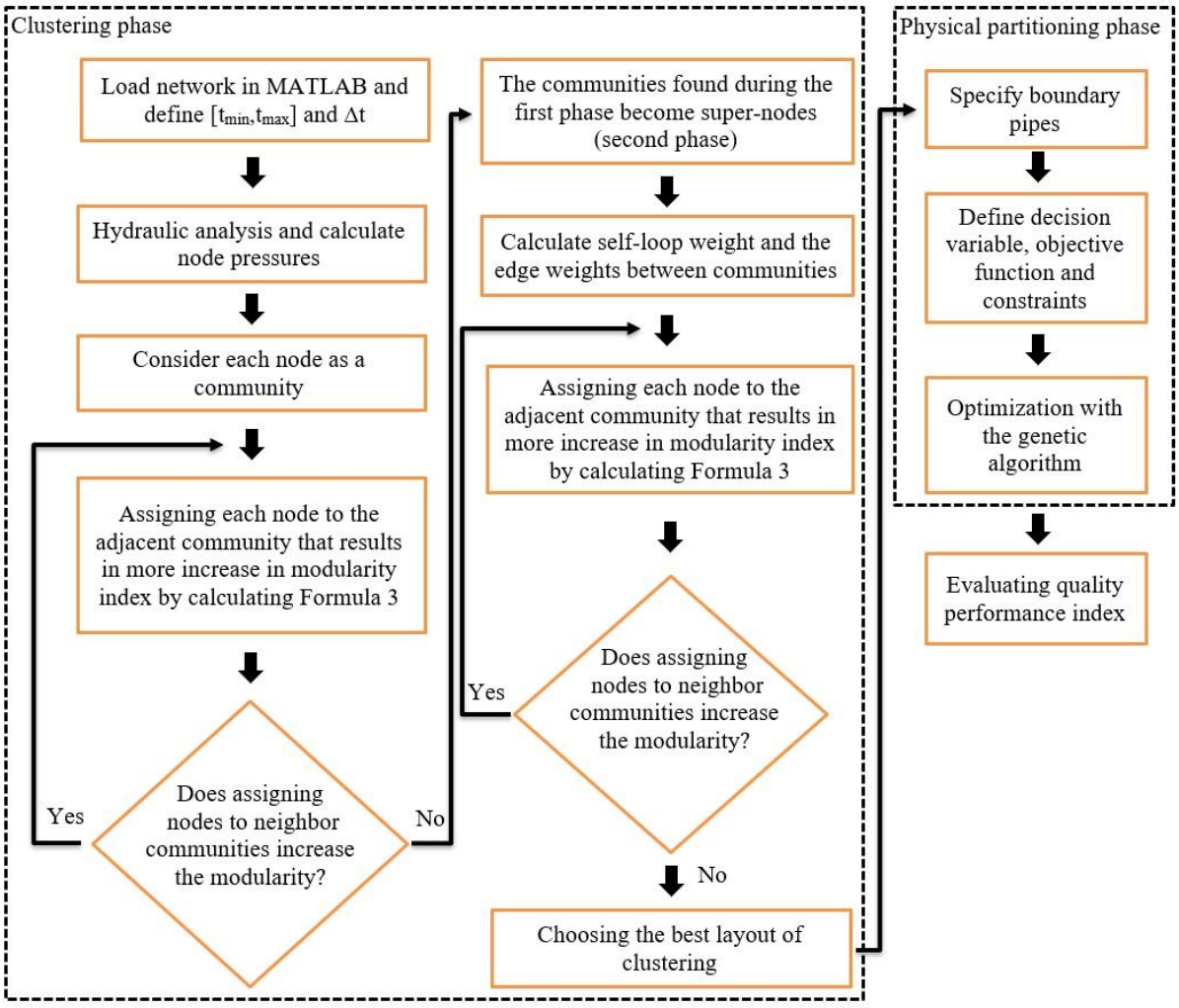

Fig. 1- Flowchart of research process

شکل ۱- فلوچارت روند تحقیق

www.SID.ir

Archive of SID

در این تحقیق از الگوریتم لووین[۲۲] (Blondel et al., 2008) بر پایه شاخص پیمانگی برای تشخیص جامعه استفاده شده است. این الگوریتم اساسا دو مرحله دارد که تکرار می‌شوند. مرحله اول یافتن جامعه‌های محلی به وسیله بهینه‌سازی پیمانگی در سه گام است (Zhang et al., 2017). در گام اول هر گره به صورت یک جامعه مستقل درنظر گرفته می‌شود یعنی تعداد جامعه‌ها برابر با تعداد گره‌ها است. در گام دوم همه گره‌ها، به ترتیب به جامعه‌های در همسایگی آن متصل و افزایش پیمانگی سیستم محاسبه می‌شود. سپس گره انتخاب می‌شود و به جامعه‌ای که بیشترین افزایش پیمانگی مثبت را دارد اضافه می‌شود و در گام سوم تا زمانی که جابه‌جایی هر گره به تنهایی باعث افزایش مقدار پیمانگی سیستم می‌شود گام دوم تکرار می‌گردد. پس از اینکه جامعه‌های محلی تشکیل شد، مرحله دوم بازسازی یک شبکه جدید با فشرده‌سازی جامعه‌های بدست آمده از مرحله اول است. تمام گره‌های با جامعه یکسان به یک گره معادل بزرگ[۲۳] فشرده می‌شوند. مجموع وزن‌های یال‌های موجود در یک جامعه به عنوان وزن خود گره معادل بزرگ درنظر گرفته می‌شود و وزن یال‌های بین گره‌های معادل بزرگ برابر با وزن یال‌های بین گره‌های دو جامعه متناظر است. پس از اجرای دوباره گام اول و دوم بر روی شبکه معادل جدید جامعه‌های نهایی مشخص می‌شوند.

۲-۲- گام‌برداری تصادفی[۲۴]

یکی از موانع در معیارهای ارزیابی جامعه، شناسایی ساختار جامعه منطقی است. پیمانگی گیروان نیومن دارای محدودیت رزولوشن است. محققان دریافتند که الگوریتم‌های تشخیص جامعه مبتنی بر پیمانگی گیروان نیومن ممکن است در شناسایی جوامع کوچکتر که تعداد یال‌های آن‌ها کمتر از $\sqrt{2m}$(m: تعداد کل یال‌ها در کل شبکه) است (از جمله ناحیه اندازه‌گیری مجزایی که در آن تعداد یال‌ها کمتر از $\sqrt{2m}$ باشد) ناتوان باشد. از این رو پیمانگی گیروان نیومن برای ارزیابی شبکه‌هایی که دارای جامعه‌های با اندازه‌های مشابه هستند مناسب است، در حالی که برای جوامع پیچیده و با اختلاف بیشتر در اندازه، نتایج تقسیم‌بندی مطلوب نیست (Fortunato & Barthélemy, 2007).

گام تصادفی بر روی شبکه یک فرآیند پویا است یعنی اگر شبکه مورد نظر هیچ ساختار جامعه مشخصی نداشته باشد، گام بردار به صورت ایزوتروپیک[۲۵] در شبکه گام بر می‌دارد، در غیر اینصورت گام‌بردار برای مدتی در برخی از اجتماعات خاص به دام می‌افتد. فرآیند گام‌برداری تصادفی شامل سه مرحله می‌شود: در ابتدا هر گره یک پیشرو[۲۶] دارد سپس هر پیشرو از گره‌های ابتدایی شروع کرده و در مرحله آخر گره همسایگی را برای نقطه شروع گام بعدی به صورت تصادفی انتخاب می‌کنند و گام دوم تا به زمان مشخص شده برسد تکرار می‌شود (Lambiotte et al., 2014; Zhang et al., 2017).

۲-۳- پیمانگی

الگوریتم تشخیص جامعه از پیمانگی برای ارزیابی ناحیه‌بندی شبکه استفاده می‌کند. بیشترین الگوریتم مورد استفاده در مقالات مختلف پیمانگی گیروان و نیومن (Girvan & Newman, 2002) است که به صورت زیر تعریف می‌شود (Zhang et al., 2017):

$$Q_{GN}=\sum_{s=1}^{c}\left[\frac{l_s}{m}-\left(\frac{d_s}{2m}\right)^2\right] \qquad (۱)$$

در این فرمول c نشان‌دهنده تعداد جامعه‌ها، l_sبرابر با تعداد یال‌های موجود در جامعه s، d_s برابر با مجموع درجه‌های کلیه گره‌های موجود در جامعه s و m برابر با تعداد کل یال‌ها است. هرچه مقدار Q_{GN} بیشتر باشد ناحیه‌بندی ما ناحیه‌بندی بهتری است.

پیمانگی گیروان نیومن (Q_{GN}) یک مورد خاص از Q_t برای زمان گسسته در زمان t=1 است. با درنظر گرفتن Q_t، زمان پیوسته تقریباً برابر زمان گسسته است، بنابراین Q_t برای راحتی در محاسبات زمان پیوسته می‌تواند استفاده شود (Lambiotte et al., 2014). Q_t پیمانگی چند رزولوشنی نامیده می‌شود، که در آن t زمان گام‌برداری تصادفی است. در این تحقیق متوسط فشار گره‌ای به عنوان وزن به معادله اضافه شده است. ماتریس مجاورت وزن ($W_{ij}=(H_i^{avg}+H_j^{avg})/2$) بیانگر میزان قدرت ارتباط بین گره i و j است (W_{ij} برابر است با وزن (v_i,v_j)، اگر v_i در اتصال با v_j باشد، در غیر اینصورت $W_{ij}=0$ است)، که در آن $H_i^{avg}=\sum_{t=1}^{TD}H_i^t/TD$ متوسط فشار در گره i در شبکه قبل از ناحیه‌بندی است، H_i^t نیز فشار در گره i در زمان t در شبکه قبل از ناحیه‌بندی است و TD کل زمان مدل‌سازی است. برای شبکه وزن‌دار، با درنظر گرفتن گام‌برداری تصادفی معادله (۱) به صورت زیر اصلاح می‌گردد (Zhang et al., 2017):

$$Q_t^P=Tr\left\{H^T\left[\Phi e^{-t\Psi^{-1}Y}-\eta^T\eta\right]H\right\} \qquad (۲)$$

که در آن Q_t^P پیمانگی چند رزولوشنی براساس توزیع فشار است، t نیز زمان گام تصادفی است، $\eta=w^T/2M$ ضریبی از ثابت‌ها در فرآیند گام تصادفی است و $\Phi=diag(\eta)$ ماتریس قطری n×n از η است. $w=[w_1,w_2,...,w_n]^T$ بردار n×1 وزن گره‌ها است. $w_i=\sum_j W_{ij}$ مجموع وزن یال‌های در ارتباط با گره i است. $\psi=diag(w)$ ماتریس n×n قطری w است و $Y=\psi-W$ لاپلاسین گراف ترکیبی وزن‌دار است. در نتیجه معادله (۲) به عنوان پیمانگی چند رزولوشنی وزن‌دار برای ارزیابی تعداد ناحیه‌بندی شبکه استفاده می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

با فرض این که گره i متعلق به جامعه C_j است و C_k یکی از جامعه‌های در همسایگی C_j است. با اختصاص دادن i از C_j به C_k پیمانگی سیستم را به مقدار زیر افزایش می‌دهد (Zhang et al., 2017):

$$\Delta Q_{i\in C_k}=Q_t^p\big|_{i\in C_k}-Q_t^p\big|_{i\in C_j} \quad (۳)$$

که در آن $Q_t^p\big|_{i\in C_k}$ پیمانگی سیستم برای زمانی که گره i از جامعه C_j به جامعه C_k اختصاص یافته است و $Q_t^p\big|_{i\in C_j}$ پیمانگی سیستم در زمانی که گره i به جامعه C_j تعلق دارد.

طبق تئوری گام‌برداری تصادفی (Lambiotte et al., 2014) استفاده از الگوریتم لووین معمولا منجر به طرح‌های مختلف در گام‌های زمانی تصادفی مختلف می‌شود و به طور کلی مقیاس و پیچیدگی سیستم‌های توزیع آب شهرهای مختلف بسیار متفاوت است، از این‌رو منطقی است که مهندسان با توجه به شرایط محلی شهرها، طرح ناحیه‌بندی مناسب با تعداد نواحی اندازه‌گیری مجزای مناسب را از این طرح‌ها انتخاب کنند. همچنین برای تعیین بازه گام‌برداری تصادفی و گام افزایش آن (Δt) هیچ معیار خاصی وجود ندارد. پارامترهای مربوطه بسته به مقیاس و پیچیدگی سیستم‌های توزیع آب تنظیم می‌شوند، برای سیستم‌های بزرگ مقیاس با حلقه‌های زیاد، بازه و گام افزایش زمان گام‌برداری تصادفی (Δt) باید بیشتر از سیستم‌های کوچک باشد (Zhang et al., 2017).

۲-۴- بهینه‌سازی لوله‌های مرزی (ناحیه‌بندی فیزیکی)

متغیر تصمیم وضعیت آن لوله‌هایی است که ناحیه‌های ایجاد شده را به هم وصل می‌کند، یعنی وضعیت باز یا بسته بودن لوله‌های مرزی است و می‌تواند ۰ و یا ۱ باشد (x_i). پس $X=(x_1,x_2,x_3,...,x_n)$ که در آن $x_i=\text{linkstatus},i\in\text{Links}$ است. علاوه بر آن معادله (۴) با هدف کمینه کردن واریانس میانگین فشار نواحی اندازه‌گیری مجزا درنظر گرفته می‌شود. این عمل موجب کاهش نشت آب در شبکه و همچنین رعایت عدالت در زمینه توزیع فشار در کل شبکه می‌گردد.

$$\text{Minimize } \sigma_p=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(P_i-\bar{P})^2}{n-1}} \quad (۴)$$

که در آن P_i میانگین فشار هر ناحیه، $\bar{P}$ میانگین فشار کل شبکه و n تعداد ناحیه‌ها است. همچنین، علاوه بر قید حالت‌های لوله‌های مرزی، میانگین فشار هر ناحیه باید در محدوده خاصی باشد تا فشار تأمین شده در محدوده استاندارد باشد. این محدوده بر اساس محدوده استاندارد و همچنین با در نظر گرفتن توپوگرافی و وضعیت فشار موجود شبکه توزیع شهر تفت انتخاب شده است (معادله ۵):

$$x_i\in\{0,1\}\ ,\quad \bar{p}_{min}\le\bar{p}_i\le\bar{p}_{max} \quad (۵)$$

که در آن $\bar{P}_{max}$، حداکثر میانگین فشار در هر ناحیه (۶۵ متر آب)، $\bar{P}_{min}$، حداقل میانگین فشار در هر ناحیه (۱۵ متر آب) و $\bar{P}_i$، میانگین فشار ناحیه است. در این تحقیق برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. الگوریتم‌های ژنتیک یکی از قوی‌ترین روش‌های برگرفته از طبیعت است که به جستجوی فضای مسأله به طور تصادفی و هدایت شده پرداخته که در این جستجو در قالب تلاش جهت ایجاد جواب‌هایی بهتر، در هر نسل نسبت به جواب‌های نسل قبل صورت می‌گیرد و یکی از بهترین اشکال بهینه‌سازی عددی در مسائل علوم و مهندسی را ارائه می‌کند.

۲-۵- شاخص‌های ارزیابی

تقسیم‌بندی شبکه آب به نواحی اندازه‌گیری مجزا منافع زیادی دارد، با این حال در برخی موارد ممکن است عملکرد هیدرولیکی شبکه نیز کاهش یابد. برای اندازه‌گیری چگونگی تأثیر این تغییر بر رفتار هیدرولیکی شبکه، شاخص‌های ارزیابی عملکردی می‌توانند مزایا و معایب ایجاد نواحی اندازه‌گیری مجزا را نشان دهند. یکی از معایب، امکان کاهش کیفیت آب ناشی از افزایش سن آب به دلیل کاهش مسیرهای جریان است (Grayman et al., 2009). در این تحقیق برای برآورد تغییر در کیفیت آب ناشی از ایجاد نواحی اندازه‌گیری مجزا تغییرات سن آب تعیین شد. برای این منظور یک تجزیه و تحلیل هیدرولیکی و کیفی (سن آب) ۲۴۰ ساعته برابر با ده روز کامل، برای پایدار شدن شبکه در آبرسانی بر روی شبکه پیش و پس از ایجاد نواحی اندازه‌گیری مجزا انجام شد، سپس برای مقایسه نتایج از میانگین سن آب ۲۴ ساعت آخر یعنی روز دهم استفاده شد، علاوه بر آن میانگین وزنی سن آب با درنظر گرفتن تقاضای آب در هر گره به عنوان وزن نیز محاسبه شد.

۳- مطالعه موردی

شهر تفت با قرار گرفتن در دامنه شمالی شیرکوه یکی از شهرهای خوش آب و هوای استان یزد است. شبکه توزیع آب شهری تفت به صورت ثقلی و اختلاف ارتفاع مابین بالاترین و پایین‌ترین نقطه شبکه توزیع آب شهر تفت ۲۲۵ متر است و دلیل انتخاب شبکه توزیع آب شهر تفت اختلاف ارتفاع زیاد و پیچیده بودن آن برای ارزیابی روش موردنظر است. ابتدا به وسیله جعبه‌ابزار Epanet (Eliades et al., 2016)، که براساس یک کلاس متلب ساخته شده است، مشخصات مدل شبکه توزیع آب شهر تفت در Epanet در متلب بارگذاری می‌شود سپس با استفاده از کدی که در متلب نوشته شده است الگوریتم شرح داده شده در بخش قبل برای تشکیل نواحی اندازه‌گیری مجزا بر روی آن پیاده می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

Fig. 2- Taft water distribution network model
شکل ۲- مدل شبکه توزیع آب شهر تفت

۴- نتایج

در مرحله خوشه‌بندی و بهینه‌سازی لوله‌های مرزی، مدل هیدرولیکی براساس بحرانی‌ترین روز مصرف آب در شبکه برای محاسبه فشار برای هر متغیر تصمیم در عمل بهینه‌سازی در بازه یک روز کامل (۲۴ساعته) پردازش شد و سپس میانگین فشار روزانه به عنوان فشار هر گره قرار گرفت. همانطور که در بخش ۲-۳ بیان شد، برای انتخاب تعداد نواحی، بازه و گام مناسب مهندسان باید با توجه به وسعت و پیچیدگی شبکه با دید مهندسی این موارد را تعیین کنند و هیچ معیار خاصی تا کنون برای آن تعریف نشده است. در این تحقیق با توجه به شبکه توزیع آب شهر تفت، تعداد ۳۰ تا ۳۵ ناحیه اندازه‌گیری مجزا درنظر گرفته می‌شود بدین منظور برای خوشه‌بندی بازه [0.1,13.1] با گام ۱ (Δt) به عنوان زمان‌های گام‌برداری تصادفی در نظر گرفته شده است. روند ارائه شده در بخش قبل بر روی مـــدل شهر تفت پیاده شـد. این‌کار بـــا استفاده از Matlab2018b و Epanet 2.0 (Rossman, 2000) انجام شد و نتایج آن به شرح جدول ۱ می‌باشد. با توجه به تعداد نواحی درنظر گرفته شـده و تعداد لوله‌های مرزی، t = ۱۱,۱ با ۳۳ عدد خوشه و ۵۴ لوله مرزی برای انجام مرحله بعدی درنظر گرفته می‌شود (شکل ۳).

پس از انجام بهینه‌سازی نتایج نشان داد که تعداد ۱۱ لوله از ۵۴ لوله مرزی باید بسته شود تا واریانس میانگین فشار نواحی کمترین باشد و در بقیه لوله‌ها فلومتر نصب شود، در شکل ۳ لوله‌های مرزی بسته شده و لوله‌هایی که محل قرار دادن فلومترها هستند نشان داده شده‌اند. در شکل ۵ مقایسه میانگین فشار هر ناحیه اندازه‌گیری مجزا قبل و بعد از بهینه‌سازی نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

Table 1- Taft water distribution network clustering results with different time steps
جدول ۱- نتایج خوشه‌بندی شبکه توزیع آب تفت با زمان‌های گام‌برداری مختلف

t	Number of communities	Number of boundary pipes	t	Number of communities	Number of boundary pipes
0.1	301	408	7.1	38	64
1.1	85	135	8.1	37	67
2.1	66	110	9.1	34	57
3.1	57	88	10.1	31	55
4.1	56	95	11.1	33	54
5.1	49	82	12.1	30	49
6.1	46	76	13.1	29	48

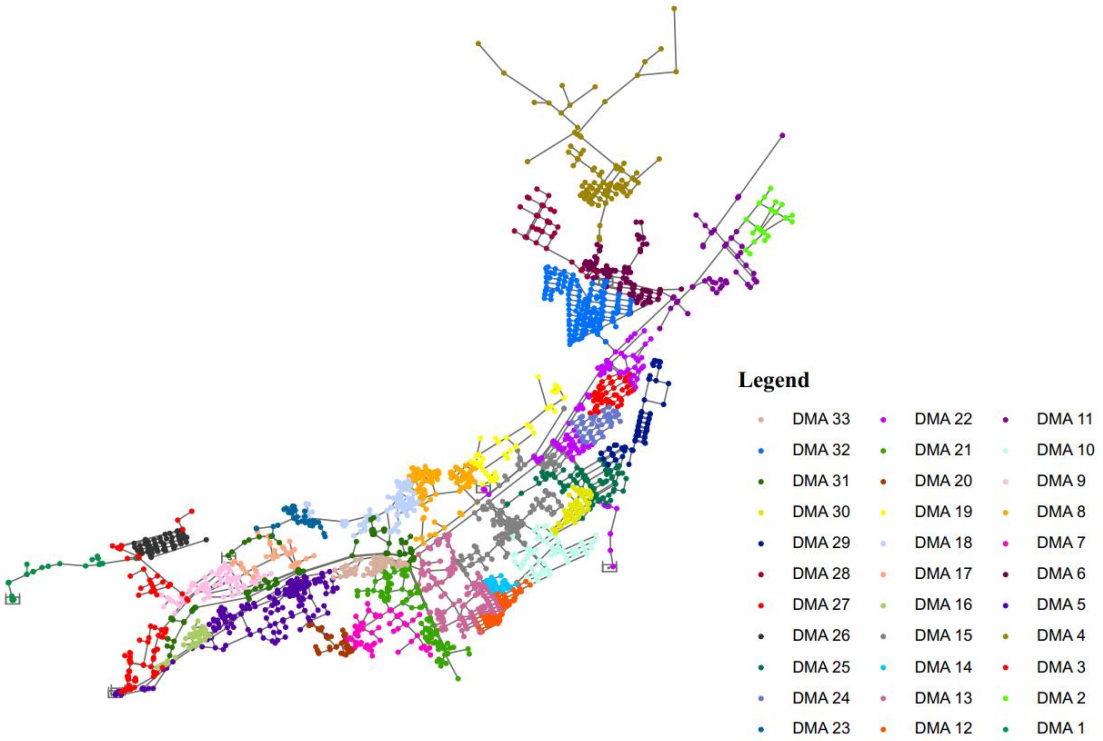

Fig. 3- Taft water distribution network final clustering
شکل ۳- خوشه‌بندی نهایی شبکه توزیع آب تفت

همانطور که مشخص است تا حد امکان فشار میانگین هر ناحیه اندازه‌گیری مجزا در محدوده استاندارد کمتر شده است و می‌تواند باعث کاهش مقدار آب بدون درآمد[۲۷] شود. همچنین، از این نمودار می‌توان دریافت بیشترین درصد کاهش میانگین فشار ناحیه اندازه‌گیری مجزا مربوط به ناحیه شماره ۳۰ با حدود ۲۷ درصد است. در جدول ۲ مشخصات هیدرولیکی کل شبکه با نواحی اندازه‌گیری مجزا با حالت عادی شبکه مقایسه شده است. با توجه به هدف درنظر گرفته شده نتیجه نشان می‌دهد که انحراف معیار پس از بهینه‌سازی ۱۳/۵درصد کاهش یافته است که نشان دهنده عدالت بیشتر در توزیع فشار در شبکه است. همانطور که مشاهده می‌شود هیچ تفاوت سیستماتیکی در سن آب محاسبه شده در گره‌ها و همچنین سن آب وزن داده شده با تقاضای آب هر گره بین طرح جایگزین و اصلی وجود ندارد.

۵- خلاصه و جمع‌بندی

در این تحقیق از الگوریتم تشخیص ساختار جامعه با وزن میانگین فشار روزانه استفاده شد، که در نهایت جواب قابل قبول و مناسبی از خوشه‌بندی شبکه شد. هدف اصلی از ایجاد نواحی اندازه‌گیری مجزا مدیریت بهتر در شبکه از جمله مدیریت فشار، نظارت و کنترل بیلان آب در شبکه و نشت‌یابی هر چه سریع‌تر است. در این تحقیق علاوه

www.SID.ir

Archive of SID

بر دستیابی به موارد یاد شده، در بخش بهینه‌سازی فشار، با توجه به یکنواخت بودن فشار داخل خوشه‌ها به دلیل استفاده از وزن متوسط فشار روزانه با استفاده از تابع هدف در نظر گرفته شده موثر واقع شده است و واریانس فشار میانگین نواحی اندازه‌گیری مجزا شبکه کاهش یافته است تا عدالت بیشتری در توزیع فشار باشد و علاوه بر این، بهینه‌سازی، میانگین فشار کل شبکه را حدود ۸ درصد کاهش داد و در بعضی نواحی با میانگین فشار نسبتاً بالا با پیاده‌سازی نتایج بدست آمده از بهینه‌سازی بر روی مدل حتی تا حدود ۲۷ درصد میانگین فشار در آن ناحیه کاهش یافته است که کاهش فشار میانگین شبکه خود باعث کاهش در میزان آب بدون درآمد می‌شود.

Fig. 4- Boundary pipes optimization results
شکل ۴- نتیجه بهینه‌سازی لوله‌های مرزی

Table 2- Impacts of optimization on Taft water distribution network
جدول ۲- تأثیرات بهینه‌سازی بر روی شبکه توزیع آب تفت

	Before optimization	After optimization
Average pressure (mH2O)	33.69	30.87
Weighted average pressure (mH2O)	34.45	31.62
DMAs average pressure standard deviation	10.14	8.77
Average water age (hour)	12.06	12.32
Weighted average water age (hour)	19.18	19.17

www.SID.ir

Archive of SID

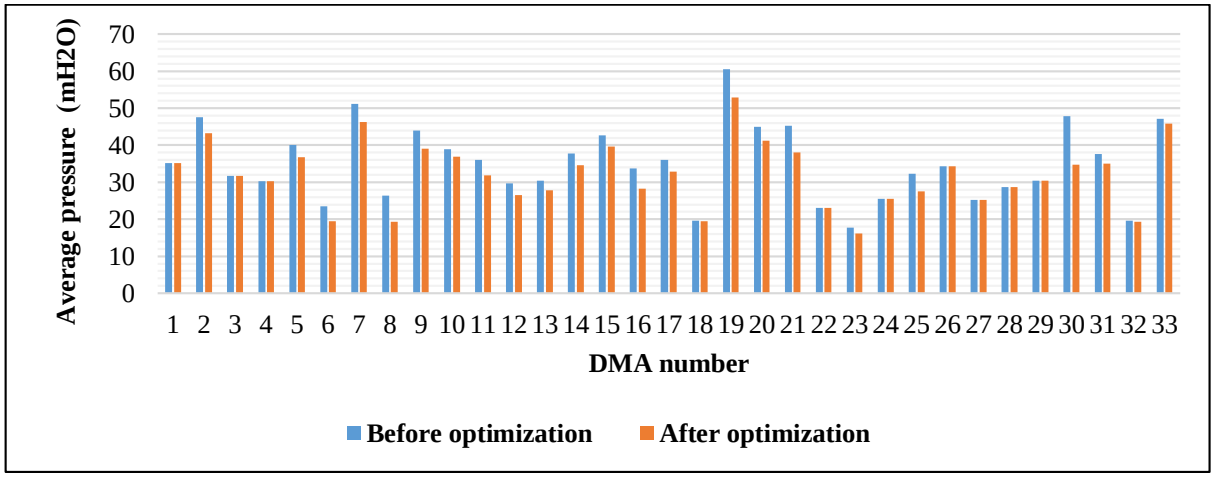

Fig. 5- Average pressure of DMAs before and after optimization

شکل ۵- فشار میانگین هر DMA پیش و پس از بهینه‌سازی

ارزیابی ناحیه‌بندی با بررسی تغییرات سن آب به عنوان شاخص کیفی انجام شد. نتایج نشان داد پس از بهینه‌سازی فشار در شبکه جدید که نواحی اندازه‌گیری مجزا آرایش یافته و تعدادی از لوله‌های مرزی بسته شده‌اند، تغییر محسوسی در میانگین سن آب گره‌های مصرف شبکه ایجاد نشده است.

۶- تشکر و قدردانی

در پایان لازم می‌دانم از همکاری‌های صورت گرفته در انجام این تحقیق از شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد و شرکت آب و فاضلاب استان یزد قدردانی نمایم.

پی‌نوشت‌ها

1- Real Loss Water
2- District Metered Areas
3- Pressure Management
4- District Metered Areas (DMA)
5- Flow Meters
6- Clustering
7- Graph Theory
8- Multilevel Partitioning
9- Community Structure
10- Spectral Approaches
11- Multi-Agent Approach
12- Physical Partitioning
13- Gate Valves
14- Undirected Graph
15- Modularity
16- Global Clustering
17- Artificial Neural Network
18- Edge Betweenness
19- Breadth-First Search (BFS)
20- Analytical Hierarchy Process (AHP)
21- Greedy Optimization
22- Louvain
23- Super Node
24- Random Walk
25- Isotropic
26- Walker
27- Non-Revenue Water

۷- مراجع

Alvisi S (2015) A new procedure for optimal design of district metered areas based on the multilevel balancing and refinement algorithm. Journal of Water Resources Management 29(12):4397–4409

Alvisi S, Franchini M (2014) A heuristic procedure for the automatic creation of district metered areas in water distribution systems. Journal of Urban Water 11(2):137–159

Araujo LS, Ramos H, Coelho ST (2006) Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. Journal of Water Resources Management 20(1):133–149

Blondel VD, Guillaume JL, Lambiotte R, Lefebvre E (2008) Fast unfolding of communities in large networks. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment 2008(10):1-12

Campbell E, Ayala-Cabrera D, Izquierdo J, Pérez-García R, Tavera M (2014) Water supply network sectorization based on social networks community detection algorithms. Journal of Procedia Engineering 89:1208–1215

Campbell E, Izquierdo J, Montalvo I, Ilaya-Ayza A, Pérez-García R, Tavera M (2015) A flexible methodology to sectorize water supply networks based on social network theory concepts and multi-

www.SID.ir

Archive of SID

Di Nardo A, Di Natale M, Santonastaso GF, Venticinque S (2013) An automated tool for smart water network partitioning. Journal of Water Resources Management 27(13):4493–4508

Di Nardo A, Giudicianni C, Greco R, Herrera M, Santonastaso GF (2018) Applications of graph spectral techniques to water distribution network management. Journal of Water 10(1):45

Eliades DG, Kyriakou M, Vrachimis SG, Polycarpou MM (2016) EPANET-MATLAB Toolkit: An open-source software for interfacing EPANET with MATLAB. In: Computing and Control for the Water Industry CCWI 2016

Farley M (2001) Leakage management and control: A best practice training manual. Who. World Health Organization, 163p

Ferrari G, Savic D (2015) Economic performance of DMAs in water distribution systems. Journal of Procedia Engineering 119(1):189–195

Fortunato S, Barthélemy M (2007) Resolution limit in community detection. Journal of Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 104(1):36–41

Girvan M, Newman MEJ (2002) Community structure in social and biological networks. Journal of Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 99(12):7821–7826

Giudicianni C, Herrera M, Di Nardo A, Adeyeye K (2020a) Automatic multiscale approach for water networks partitioning into dynamic district metered areas. Journal of Water Resources Management 34(2):835–848

Giudicianni C, Herrera M, Di Nardo A, Carravetta A, Ramos HM, Adeyeye K (2020b) Zero-net energy management for the monitoring and control of dynamically-partitioned smart water systems. Journal of Cleaner Production 252:119745

Giustolisi O, Ridolfi L (2014) New modularity-based approach to segmentation of water distribution networks. Journal of Hydraulic Engineering 140(10)

Gomes R, Marques AS, Sousa J (2012) Decision support system to divide a large network into suitable district metered areas. Journal of Water Science And Technology 65(9):1667–1675

Grayman WM, Murray R, Savic DA (2009) Effects of redesign of water systems for security and water quality factors. In: World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers,1–11

Hajebi S, Barrett S, Clarke A, Clarke S (2013) Multi-agent simulation to support water distribution network partitioning. In: 27th European Simulation objective optimization. Journal of Hydroinformatics 18(1):62-76

Campbell E, Izquierdo J, Montalvo I, Pérez-García R (2016) A novel water supply network sectorization methodology based on a complete economic analysis, including uncertainties. Journal of Water 8(5):179

Ciaponi C, Murari E, Todeschini S (2016) Modularity-based procedure for partitioning water distribution systems into independent districts. Journal of Water Resources Management 30(6):2021–2036

Clauset A, Newman MEJ, Moore C (2004) Finding community structure in very large networks. Journal of Physical Review E-Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics 70(6):6

Dahrazma V, Hessami Kermani MRH (2020) Evaluation of water distribution network partitioning methods based on graph theory using AHP. Journal of Water and Wastewater 31(5):11–24 (In Persian)

Diao K, Zhou Y, Rauch W (2013) Automated creation of district metered area boundaries in water distribution systems. Journal of Water Resources Planning and Management 139(2):184–190

Di Nardo A, Cavallo A, Di Natale M, Greco R, Santonastaso GF (2016) Dynamic control of water distribution system based on network partitioning. Journal of Procedia Engineering 154:1275–1282

Di Nardo A, Di Natale M, Giudicianni C, Greco R, Santonastaso GF (2017) Weighted spectral clustering for water distribution network partitioning. Journal of Appl Netw Sci 2(1):19

Di Nardo A, Di Natale M, Giudicianni C, Musmarra D, Santonastaso GF, Simone A (2015) Water distribution system clustering and partitioning based on social network algorithms. Journal of Procedia Engineering 119(1):196–205

Di Nardo A, Di Natale M, Giudicianni C, Santonastaso GF, Tzatchkov V, Varela JMR, Yamanaka VHA (2016) Water supply network partitioning based on simultaneous cost and energy optimization. Journal of Procedia Engineering 162:238–245

Di Nardo A, Di Natale M, Santonastaso GF, Tzatchkov V, Yamanaka VHA (2014a) Divide and conquer partitioning techniques for smart water networks. Journal of Procedia Engineering 89:1176–1183

Di Nardo A, Di Natale M, Santonastaso GF, Tzatchkov VG, Alcocer-Yamanaka VH (2014b) Water network sectorization based on graph theory and energy performance indices. Journal of Water Resources Planning and Management 140(5):620–629

www.SID.ir

Archive of SID

Environmental Modelling & Software 26(7):969–972

Perelman LS, Allen M, Preis A, Iqbal M, Whittle AJ (2015) Automated sub-zoning of water distribution systems. Journal of Environmental Modelling & Software 65:1–14

Rossman LA (2000) EPANET 2: Users manual.

Scarpa F, Lobba A, Becciu G (2016) Elementary DMA design of looped water distribution networks with multiple sources. Journal of Water Resources Planning and Management 142(6):4016011

Sempewo J, Pathirana A, Vairavamoorthy K (2008) Spatial analysis tool for development of leakage control zones from the analogy of distributed computing. In: Water Distribution Systems Analysis, 1–15

Shekofteh MR, Ghazizadeh MRJ (2020) The optimized implementation of the district metered areas in the water distribution networks using graph theory. Journal of Water and Wastewater 31(1):12–24 (In Persian)

Shekofteh MR, Jalili Ghazizadeh M, Yazdi J (2020) Theoretical identification of leakage areas in virtual district metered areas of water distribution networks using the artificial neural network. Journal of Iran-Water Resources Research 16(3):47-62 (In Persian)

Simone A, Giustolisi O, Laucelli DB (2016) A proposal of optimal sampling design using a modularity strategy. Journal of Water Resources Research 52(8):6171–6185

Tabesh M, Vaseti MM (2006) Leakage reduction in water distribution networks by minimizing the excess pressure. Journal of Water Resources Research 2(2):53-66 (In Persian)

Tzatchkov VG, Alcocer-Yamanaka VH, Bourguett Ortíz V (2006) Graph theory based algorithms for water distribution network sectorization projects. In: 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium. Cincinnati, Ohio, USA. 2006,1–15

Zhang Q, Wu ZY, Zhao M, Qi J, Huang Y, Zhao H (2017) Automatic partitioning of water distribution networks using multiscale community detection and multiobjective optimization. Journal of Water Resources Planning and Management 143(9):04017057

and Modelling Conference–ESM'2013, 23–25 October, Eurosis, Lancaster, UK.

Herrera M, Canu S, Karatzoglou A, Pérez-García R, Izquierdo J (2010) An approach to water supply clusters by semi-supervised learning. In: Proceedings of the 9th International Congress on Environmental Modelling and Software, Ottawa, ON, Canada, 1 July 2010

Herrera M, Izquierdo J, Pérez-García R, Montalvo I (2012) Multi-agent adaptive boosting on semi-supervised water supply clusters. Journal of Advances in Engineering Software 50:131–136

Izquierdo J, Herrera M, Montalvo I, Pérez-García R (2009) Agent-based division of water distribution systems into district metered areas. In: ICSOFT (2), 2009 Jul 26-29, 83–90

Khoa Bui X, S Marlim M, Kang D, Bui XK, Marlim MS, Kang D (2020) Water network partitioning into district metered areas: a state-of-the-art review. Journal of Water (Switzerland)12(4):1002

Lambiotte R, Delvenne JC, Barahona M (2014) Random walks, Markov processes and the multiscale modular organization of complex networks. Journal of IEEE Transactions on Network Science and Engineering 1(2):76–90

Lifshitz R, Ostfeld A (2018) Clustering for analysis of water distribution systems. Journal of Water Resources Planning and Management 144(5):4018016

Liu J, Han R (2018) Spectral clustering and multicriteria decision for design of district metered areas. Journal of Water Resources Planning and Management 144(5):4018013

Newman MEJ, Girvan M (2004) Finding and evaluating community structure in networks. Journal of Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics 69(2):26113

Paola F De, Fontana N, Galdiero E, Giugni M, Savic D, Sorgenti Degli Uberti G (2014) Automatic multi-objective sectorization of a water distribution network. Journal of Procedia Engineering 89:1200–1207

Perelman L, Ostfeld A (2011) Topological clustering for water distribution systems analysis. Journal of

www.SID.ir