Jouranl of Water and Wastewater, Vol. 31, No.1, pp: 12-24

The Optimized Implementation of the District Metered Areas in the Water Distribution Networks Using Graph Theory

M. R. Shekofteh[1], M. R. Jalili Ghazizadeh[2]

1. MSc Student, Dept. of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Water and Wastewater Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
(Corresponding Author) m_jalili@sbu.ac.ir

(Received July 17, 2018 Accepted Feb. 4, 2019)

To cite this article:
Shekofteh, M. R., Jalili Ghazizadeh, M. R., 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. Doi: 10.22093/wwj.2019.140550.2718. (In Persian)

Abstract

For better utilization of water distribution networks (WDNs), it is recommended that the existing networks be converted into Distinct Metered Areas (DMAs). Due to the complexity of the old networks, the conversion of these networks into DMA is a costly and sensitive issue. In this paper, a model has been developed to optimize implementation of the old networks into DMA by using the graph theory and water distribution system modeling software (EPANET), while the minimum required standard pressure is met and the number of linked pipes between the proposed areas is minimum. The minimum number of linked pipes will minimize the cost of the needed flowmeters. The developed model has been successfully applied for Poulakis WDN with 30 nodes and 50 pipes in different statuses and for the actual Bushehr WDN with about 3740 nodes and 3980 pipes. The output result shows that the developed model, in a satisfactory way, converts water distribution networks into DMAs with respect to the hydraulic constrainsts.

Keywords: District Metered Area (DMA), Graph Theory, Leakage Management, Water Distribution Network (WDN).

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۱، صفحه: ۲۴-۱۲

استقرار بهینه نواحی مجزا در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تئوری گراف

محمدرضا شکفته[۱]، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی آب و فاضلاب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) m_jalili@sbu.ac.ir

(دریافت ۹۷/٤/۲٦ پذیرش ۹۷/۱۱/۱۵)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
شکفته، م. ر.، جلیلی قاضی‌زاده، م.، ر.، ۱۳۹۹، " استقرار بهینه نواحی مجزا در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تئوری گراف"
مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۱)، ۲۴-۱۲. Doi: 10.22093/wwj.2019.140550.2718

چکیده

برای بهره‌برداری بهتر از شبکه‌های توزیع آب توصیه می‌شود که شبکه‌های موجود به نواحی مجزا تبدیل شود. به‌دلیل پیچیدگی شبکه‌های قدیمی، تبدیل این شبکه‌ها به نواحی مجزا، پرهزینه و حساس است. در پژوهش حاضر مدلی ارائه شد که با استفاده از تئوری گراف و نرم‌افزار شبیه‌سازی هیدرولیکی EPANET، تبدیل شبکه‌های قدیمی به نواحی مجزا را به‌صورت بهینه انجام می‌دهد، به‌صورتی که ضمن رعایت حداقل فشار مورد نیاز گره‌ها، تعداد لوله‌های رابط بین نواحی مجزای پیشنهادی حداقل باشد. حداقل بودن تعداد لوله‌های رابط، باعث حداقل شدن هزینه برای دبی‌سنج‌های مورد نیاز می‌شود. مدل ارائه شده برای تعیین نواحی مجزا برای شبکه توزیع آب پولاکیس با ۵۰ لوله و ۳۰ گره در حالت‌های مختلف هیدرولیکی و همچنین برای شبکه واقعی آب شهر بوشهر با حدود ۳۷۴۰ گره و ۳۹۸۰ لوله به‌کار گرفته شد. نتایج خروجی نشان داد که مدل ارائه شده، توانایی طراحی شبکه‌های آب موجود به نواحی مجزا را با رعایت قیدهای هیدرولیکی به‌صورت بهینه دارد.

واژه‌های کلیدی: نواحی مجزا، تئوری گراف، مدیریت نشت، شبکه توزیع آب

۱- مقدمه

وجود نشت در شبکه‌های توزیع آب، مشکل تأمین آب را تشدید می‌کند. نشت در شبکه‌های آبرسانی علاوه بر اتلاف آب، باعث کاهش کیفیت آب به‌دلیل افزایش احتمال ورود آلودگی، افت فشار و اتلاف انرژی می‌شود. این تأثیرات در کشورهای در حال توسعه به‌دلیل کیفیت پایین طراحی و همچنین عمر زیاد شبکه‌های توزیع، بیشتر مشاهده می‌شود. هدررفت آب تقریباً در تمام شبکه‌های آب رخ می‌دهد و مقدار آن بستگی به وضعیت لوله‌ها، اتصالات شبکه و همچنین نوع طراحی شبکه دارد. به‌طور مثال در کشور هلند، مقدار هدررفت بین ۳ تا ۷ درصد است در حالی که در بعضی از کشورهای در حال توسعه این مقدار به بیش از ۵۰ درصد می‌رسد (Puust et al., 2010).

نشت آب لزوماً به‌صورت آشکار نیست و برای شناسایی مقدار و محل نشت‌های گزارش نشده (پنهان) به روش‌های خاصی نیاز است. یکی از راهکارهای مدیریت بهتر نشت در شبکه‌ها و همچنین

dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.140550.2718

ارائه خدمات کارآمدتر آب در یک شهر این است که شبکه‌های توزیع آب به چند ناحیه مجزای هیدرولیکی تقسیم شوند.

DMA[1]، ناحیه مجزای هیدرولیکی شبکه توزیع آب[2] با قابلیت پایش دبی ورودی و خروجی به هر ناحیه است که در ادامه به اختصار ناحیه مجزا خوانده می‌شود. در نواحی مجزا، جریان ورودی و خروجی هر ناحیه توسط دبی‌سنج قابل اندازه‌گیری است. متناسب با وضعیت شبکه، هر ناحیه مجزا ممکن است توسط یک یا چند ورودی تأمین شود و یا ممکن است از بخش‌های مجاور تغذیه شود (Farley and Trow, 2003).

با نصب دبی‌سنج در لوله‌های ورودی و خروجی هر ناحیه و اندازه‌گیری جریان شبانه[3]، یعنی زمانی که مصرف در طول شبانه روز در کمترین حالت ممکن است، می‌توان در هر ناحیه مقدار نشت را شناسایی و برای ردیابی نشت، هر ناحیه را اولویت‌بندی کرد. به این منظور حداقل جریان شبانه در یک دوره مشخص (معمولاً یک هفته) اندازه‌گیری می‌شود و از بین مقدار جریان‌های شبانه اندازه‌گیری شده، کمترین مقدار، انتخاب و حداقل جریان شبانه نامیده می‌شود. برای تخمین مقدار نشت در شبکه از حداقل جریان شبانه استفاده می‌شود (Hamilton and McKenzie, 2014).

با کسر مقدار مصرف شبانه مشترکان از مقدار حداقل جریان شبانه، مقدار نشت در هر ناحیه مجزا تعیین می‌شود. طراحی نواحی مجزا زمانی ایده‌ال است که علاوه بر رعایت مشخصات هیدرولیکی شبکه و تعادل جمعیتی (تعداد مشترکان)، ورودی و خروجی هر ناحیه توسط حداقل تعداد لوله (ترجیحاً یک لوله) بین نواحی تأمین شود تا بتوان با حداقل تغییرات در شبکه‌های قدیمی، پایش تعادل آب در هر ناحیه را با حداقل هزینه انجام داد. طراحی و استقرار نواحی مجزا برای شبکه‌های شاخه‌ای، ساده‌تر ولی برای شبکه‌های حلقوی مناطق شهری، پیچیده‌تر است. استقرار نواحی مجزا در شبکه‌های قدیمی ممکن است فشار آب شبکه را به‌خصوص در شرایط تقاضای اوج مصرف، کاهش دهد. اگرچه تبدیل شبکه‌های قدیمی به نواحی مجزا از لحاظ کاهش تلفات آب در طی جریان شبانه مثبت است، اما ممکن است به عرضه ناکافی نیاز مشترکان در طول ساعات اوج تقاضا منجر شود. به همین دلیل طراحی نواحی باید به گونه‌ای باشد که تأثیری بر مقدار آب مورد نیاز مشترکان نداشته باشد (Ferrari and Savic, 2015).

از مزایای کلی طراحی به‌صورت نواحی مجزا، علاوه بر مدیریت نشت، می‌توان به بهره‌برداری بهتر شبکه، مدیریت فشار، کاهش نواحی فشاری، برنامه‌ریزی امور تعمیرات، کاهش تعداد شیرهای فشارشکن و مدیریت بهتر مکان سنسور در شبکه‌های توزیع آب اشاره کرد (Hajebi et al., 2013, Di Nardo and Di Natale, 2011).

یکی از راهکارهای تبدیل شبکه‌های قدیمی به شبکه‌های دارای نواحی مجزا این است که یک متخصص، مرز بین هر نواحی را بر اساس تجربه مشخص کند. این روش به‌دلیل پیچیدگی زیاد شبکه‌های قدیمی از نظر تأمین نیاز مشترکان بسیار مشکل است، زیرا ممکن است با تبدیل یک شبکه حلقوی به نواحی مجزا، فشار مورد نیاز مشترکان به مقدار کمتر از استاندارد مورد نیاز برسد و طراحی با شکست مواجه شود.

تئوری گراف[4] در سال‌های اخیر برای تعیین نواحی مجزا یا زون‌های مدیریت فشار[5] در شبکه‌های توزیع آب به کار گرفته شده است. زاتکف و همکاران یک الگوریتم مشتق شده از نظریه گراف برای شناسایی بخش‌های عرضه مستقل یک شبکه بر اساس روش اولین صادره از آخرین وارده[6] پیشنهاد کرده‌اند (Tzatchkov et al., 2008).

گیوستولیسی و ساویچ یک الگوریتم برای شناسایی ارتباط بین شیرها و نواحی جدا شده را با استفاده از ماتریس‌های توپولوژیکی یک شبکه ارائه دادند تا با تغییر توپولوژی بتوانند محل شیرهای نواحی مجزا را تعیین کنند و سپس از الگوریتم ژنتیک برای به حداقل رساندن تعداد شیرهای مرزی نواحی جداسازی استفاده کردند (Giustolisi and Savic, 2010).

یک روش خوشه‌بندی طیفی توسط هررا و همکاران برای تعیین نواحی مجزای شبکه توزیع آب با استفاده از ماتریس‌های متمایز[7] و اطلاعات گرافیکی (لوله‌ها، گره‌های تقاضا و محدودیت‌های آب) پیشنهاد شد (Herrera et al., 2010).

[1] District Metered Areas (DMA)
[2] Water Distribtution Network (WDN)
[3] Night Flow
[4] Graph Theory
[5] Pressure Management Zones (PMZ)
[6] Last-In-First-Out (LIFO)
[7] Dissimilarity matrices

پرلمان و اوستفلد نیز بر اساس جهت جریان در لوله‌های شبکه و استفاده از تئوری گراف، شبکه را ناحیه‌بندی کردند (Perelman and Ostfeld, 2011).

دی ناردو و دی ناتال یک روش ابتکاری برای طراحی نواحی به‌وسیله تئوری گراف معرفی کردند. روش آنها بر اساس روش پشتیبانی طراحی DSM[1] و استفاده از شاخص‌های انرژی و تحقیق در مورد مسیرهای حداقل انرژی که از هر مخزن به هر گره در یک شبکه آب محاسبه می‌شود، بود که این روش امکان تعریف نواحی بهینه را فراهم می‌کند (Di Nardo and Di Natale, 2011).

روش دیگری با استفاده از روش پشتیبانی طراحی توسط گومز و همکاران معرفی شد. روش آنها بر اساس مفاهیم تئوری گراف و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده[2] بود که اجازه شناسایی محل نقاط ورودی و شیرهای مرزی و همچنین تعیین لوله‌های تقویتی مورد نیاز برای برآوردن نیازهای سرعت و فشار در آنها را می‌دهد (Gomes et al., 2012.a). روش پیشنهادی آنها برای مدیریت فشار نیز بهینه شد (Gomes et al., 2012.b).

حاجبی و همکاران نیز با شبیه‌سازی سامانه چند عاملی[3] و استفاده از خوشه‌بندی K-میانگین[4] به تقسیم‌بندی شبکه‌های توزیع آب پرداختند. پژوهش آنها در دو بخش طراحی نواحی مجزا و سپس استفاده از سامانه چند هدفه برای حل شبکه توزیع آب انجام شد (Hajebi et al., 2013).

سوفوکلئوس و همکاران از تقسیم‌بندی شبکه توزیع آب برای بهبود کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب استفاده کردند (Sophocleous et al., 2016).

در پژوهش حاضر با استفاده از تئوری‌های مبحث گراف و ارتباط آنها با نرم‌افزار شبیه‌سازی هیدرولیکی EPANET (Rossman, 2000)، روشی برای طراحی محدوده نواحی مجزا در شبکه‌های توزیع آب موجود، ارائه شد.

EPANET یک سیستم نرم‌افزاری متن باز[5]، برای تحلیل شبکه‌های توزیع آب است که توسط اداره تأمین منابع آب و آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده[6] طراحی شده است. از مزیت‌های مهم این نرم‌افزار شبیه‌ساز هیدرولیکی این است که علاوه بر نسخه‌های مستقل، می‌توان آن را با دیگر نرم‌افزارها مرتبط کرد و از نتایج هیدرولیکی آن بهره برد.

از جمله ویژگی‌های روش پیشنهادی می‌توان به ناحیه‌بندی و کنترل هیدرولیکی با استفاده از الگوریتم‌های شاخص تئوری گراف و شبیه‌سازی هیدرولیکی با هدف به‌حداقل رساندن تعداد لوله‌های رابط بین نواحی (به‌منظور کاهش تعداد دبی‌سنج‌ها) اشاره کرد. همچنین روش پیشنهادی برای شبکه‌های بزرگ و پیچیده شهری قابل استفاده است.

۲- روش کار

متأسفانه اکثر شبکه‌های قدیمی به‌صورت نواحی مجزا طراحی نشده‌اند. بنابراین مدیریت نشت و فشار در چنین شبکه‌هایی مشکل است و این موضوع از جمله دلیل‌های بالا بودن مقدار نشت در شبکه‌های قدیمی است. همانطور که اشاره شد یکی از مزیت‌های طراحی شبکه به‌صورت نواحی مجزا، کاهش نشت در شبکه‌ها است.

هدف از این پژوهش ارائه روش نرم‌افزاری برای ناحیه‌بندی بهینه شبکه‌های توزیع آب موجود و تبدیل آن به نواحی مجزا است. با توجه به اینکه شبکه توزیع آب، مجموعه‌ای از گره‌ها و لوله‌ها است، می‌توان آن را به‌عنوان یک گراف در نظر گرفت و سپس با استفاده از الگوریتم‌های تئوری گراف، شبکه را مورد تحلیل قرار داد.

۲-۱- تئوری گراف

گراف، ساختاری مجزا، متشکل از یال‌ها[7] و رأس‌ها[8] است که رأس‌ها از طریق یال‌ها به هم متصل می‌شوند. هر گراف به‌صورت زوج مرتبی مانند $G(V,E)$ نشان داده می‌شود. V زیرمجموعه‌ای از رأس‌ها و E زیرمجموعه‌ای ازیال‌ها به‌صورت اعضای دو عضوی V است؛ به این معنی که هر یال با دو رأس در ارتباط است. در شبیه‌سازی شبکه آب با استفاده از تئوری گراف، گره‌های مصرف و مخازن شبکه را رأس‌های گراف (V) و لوله‌ها، پمپ‌ها و شیرهای شبکه، یال‌های گراف (E) در نظر گرفته می‌شوند.

[1] Design Support Methodology (DSM)
[2] Simulated Annealing Algorithm (SAA)
[3] Multi-agent system
[4] K-means clustering
[5] Open source
[6] United States Environmental Protection Agency (USEPA)
[7] Edge
[8] Vertex

dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.140550.2718

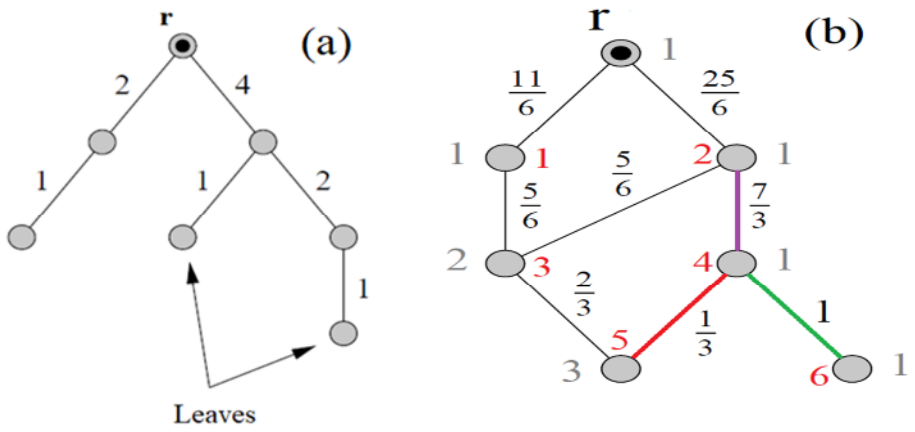

Fig. 1. Example of edges score for a (a) branched graph, (b) looped graph

شکل ۱- امتیاز یال‌ها (a) در گراف شاخه‌ای نمونه، (b) در یک گراف حلقوی نمونه

در این پژوهش برای تشکیل نواحی مجزا، از الگوریتم Edge Betweenness یا GN[1] در تئوری گراف که توسط نیومن و گیروان ارائه شده است، استفاده شد. برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین جوامع[2] (نواحی مجزا) از الگوریتم جستجوی اول سطح[3] استفاده شد. از این الگوریتم برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین یک گره مرجع (r) تا بقیه رأس‌های شبکه با جستجوی سطح به سطح یک گراف استفاده می‌شود (Newman and Girvan, 2004, Csardi and Nepusz, 2006).

در الگوریتم GN ابتدا به هر یک از یال‌ها یک امتیاز اختصاص داده می‌شود. سپس برای تشکیل فرم کلی جوامع، یال‌های دارای امتیاز بیشتر به تدریج از شبکه حذف می‌شوند. روند کلی الگوریتم پیشنهادی با استفاده از الگوریتم جستجوی اول سطح به‌صورت زیر است

گام اول- محاسبه امتیاز کل یال‌های شبکه؛

گام دوم- یافتن یالی که بیشترین امتیاز را دارد و حذف آن از شبکه؛

گام سوم- محاسبه مجدد امتیاز یال‌های باقیمانده؛

گام چهارم- تکرار مراحل از گام دوم.

در شکل ۱-a، یک گراف شاخه‌ای نمونه نشان داده شده است. هنگامی که فقط یک مسیر بین گره مرجع و سایر گره‌ها وجود داشته باشد، مجموعه حاصل از مسیرها یک درخت را تشکیل می‌دهند.

گره‌های انتهایی برگ‌های درخت نامیده می‌شود که امتیاز یال‌های متصل به آنها یک می‌شود. امتیاز یال‌های دیگر، متناسب با تعداد رأس‌هایی است که زیرمجموعه آن یال می‌باشد. به‌طور مثال، یال سمت راست متصل به گره مرجع (r) در شکل ۱-a، دارای چهار گره زیرمجموعه است و به همین دلیل امتیاز این یال ۴ می‌شود. این کار برای تمامی گره‌های مرجع انجام می‌شود و در نهایت تمامی امتیازها جمع می‌شوند. اعداد روی شکل ۱-a، امتیاز هر یک از یال‌های گراف را نشان می‌دهد.

در گراف حلقوی، امتیازدهی یال‌ها با وزن و فاصله گره‌ها متناسب است. شکل ۱-b یک گراف حلقوی نمونه را نشان می‌دهد. اعداد مشکی شکل ۱-b، وزن گره و امتیاز یال‌ها و اعداد قرمز شماره ترتیب هر گره متناسب با جدول ۱ را نشان می‌دهد. جدول ۱، نحوه محاسبه وزن و فاصله گره‌ها برای گراف شکل ۱-b را نشان می‌دهد. فلوچارت مراحل تعیین وزن و فاصله برای گره‌های گراف در شکل ۲ مشاهده می‌شود و مراحل آن به‌صورت زیر است (تحلیل از بالا به پایین صورت می‌گیرد):

۱- وزن اولیه گره r برابر با ۱ و فاصله آن (d_r) برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. فاصله، پارامتری برای تعیین وزن گره‌ها و امتیاز یال‌های گراف است.

۲- هر گره i در همسایگی r وزنی برابر با $w_i = w_r = ۱$ و فاصله‌ای برابر با $d_i = d_r + ۱$ خواهد داشت.

۳- برای گره j در همسایگی هر کدام از گره‌های i یکی از مراحل زیر انتخاب می‌شود:

[1] Girvan–Newman algorithm (GN)
[2] Community
[3] Breadth-First Search (BFS)

• اگر هنوز برای گره j هیچ فاصله‌ای تعیین نشده است، فاصله آن برابر با $d_j = d_i + ۱$ و وزن آن برابر با $w_j = w_i$ می‌شود.
• اگر برای گره j فاصله‌ای تعریف شده باشد و $d_j = d_i + ۱$ باشد، آنگاه وزن آن به اندازه w_i افزایش می‌یابد: $w_j = w_j + w_i$.
• اگر برای گره j فاصله‌ای تعیین شده باشد و $d_j < d_i + ۱$ باشد، وزن آن تغییری نمی‌کند.

۴- تکرار مرحله ۳ تا جایی که هیچ گرهی بدون فاصله و وزن نباشد.

پس از محاسبه وزن و فاصله برای تمامی گره‌ها، برای محاسبه امتیاز هر یال مراحل زیر طی می‌شود

۱- مشخص کردن گره‌های برگ (l) در گراف.

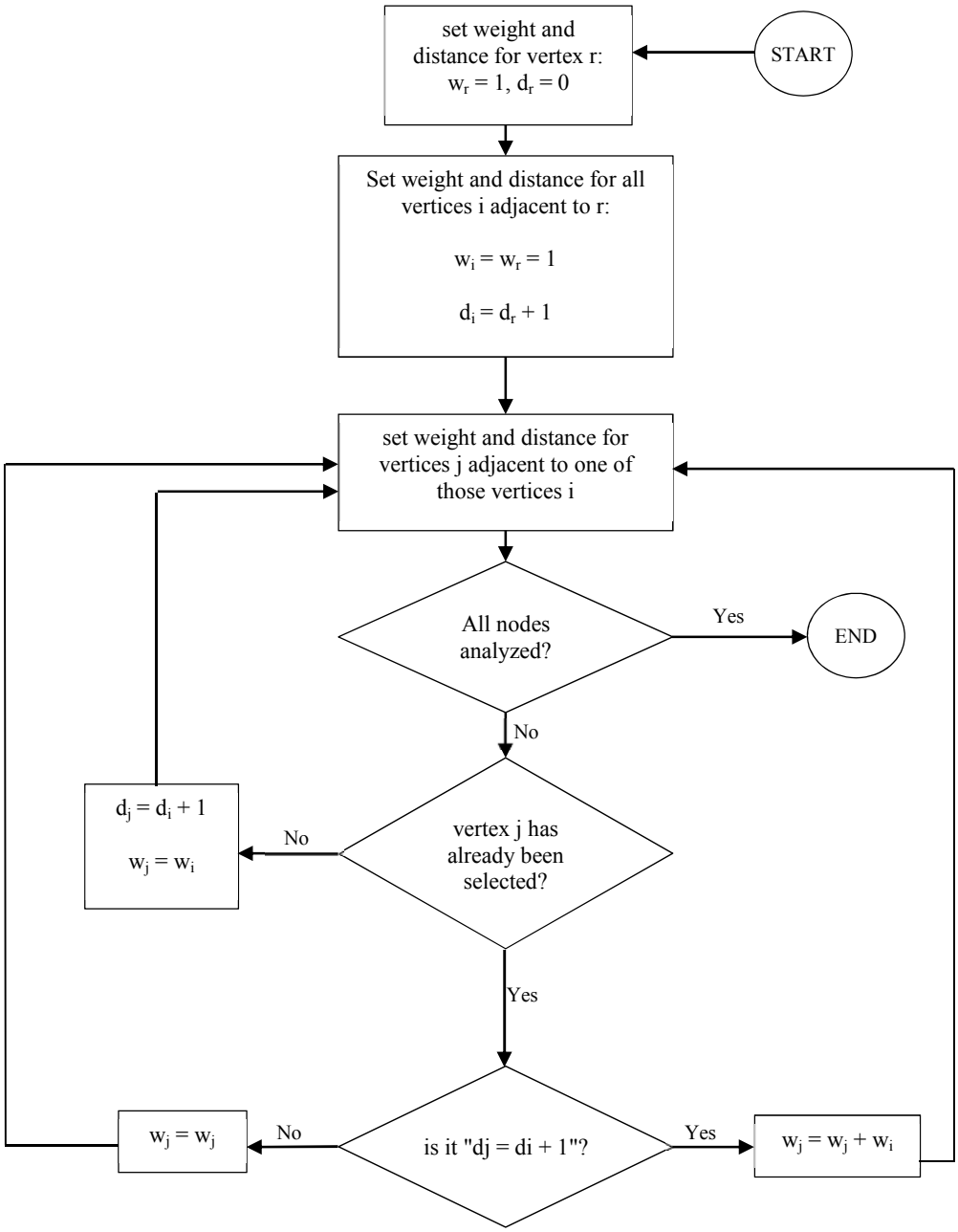

Fig. 2. The steps for calculating weight and distance for the vertices of a graph

شکل ۲- مراحل محاسبه وزن و فاصله برای گره‌های یک گراف

dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.140550.2718

۲- به یال متصل به گره برگ (l) و همسایگی آن (i)، امتیازی برابر با $\frac{w_i}{w_l}$ اختصاص داده می‌شود.

۳- ادامه امتیازدهی یال‌ها، از یال‌هایی که دورترین فاصله تا گره مرجع را دارند، شروع می‌شود (تحلیل از پایین به بالا انجام می‌شود). برای محاسبه امتیاز یال متصل به گره i و j (فاصله j به r بیشتر از فاصله i به r است) مجموع امتیاز یال‌هایی که گره j در آنها مشترک و نسبت به یال مذکور پایین‌تر قرار دارد، با ۱ جمع می‌شود و سپس جواب حاصل، در $\frac{w_i}{w_j}$ ضرب می‌شود.

۴- مرحله ۳ تا زمانی که به گره r برسد، تکرار می‌شود.

در ادامه امتیاز دو یال قرمز و بنفش در شکل ۱-b، برای نمونه محاسبه می‌شود. برای محاسبه امتیاز یال قرمز در شکل ۱-b طبق مراحل گفته شده، باید حاصل عبارت $(1+A)\times\frac{w_i}{w_j}$ به‌دست آورده شود. در اینجا w_i وزن گره ۴ و w_j وزن گره ۵ مطابق جدول ۱ است. حاصل $\frac{w_i}{w_j}$ برابر با $\frac{1}{3}$ است. مقدار A برابر با مجموع امتیاز یال‌های زیرین یال قرمز است که گره ۵ در آن مشترک است. همانطور که مشاهده می‌شود، یالی با این ویژگی در شبکه وجود ندارد بنابراین مقدار A برابر با صفر می‌شود. در نهایت امتیاز یال قرمز برابر با $\frac{1}{3}$ می‌شود. برای محاسبه امتیاز یال بنفش در شکل ۱-b، w_i وزن گره ۲ و w_j وزن گره ۴ مطابق جدول ۱ است.

حاصل $\frac{w_i}{w_j}$ برابر با ۱ است. مقدار A برابر با مجموع امتیاز یال‌های زیرین یال بنفش است که گره ۴ در آنها مشترک است.

جدول ۱- مقدار وزن و فاصله برای گره‌های گراف شکل ۱-b

Table 1. The weights and distance for vertices of the graph in Fig. 1-b

Nodes No.	Adjacent to	Already assigned	$d_j=d_i+1$	Distance	Weight
r	-	-	-	0	1
1	r	-	-	1+0	1
2	r	-	-	1+0	1
3	1	No	-	1+1=2	1
3	2	Yes	Yes	2	1+1=2
4	2	No	-	1+1=2	1
5	3	No	-	2+1=3	2
5	4	Yes	Yes	3	2+1=3
6	4	No	-	2	1

همانطور که مشاهده می‌شود، دو یال سبز و قرمز در همسایگی زیرین یال بنفش قرار دارند و گره ۴ در آنها مشترک است. بنابراین مقدار A برابر با مجموع امتیاز دو یال سبز و قرمز یعنی $\frac{4}{3}=\frac{1}{3}+1$ است که در نهایت امتیاز یال بنفش برابر با $\frac{7}{3}$ به‌دست می‌آید. با تکرار مراحل بالا برای تمامی گره‌های مرجع و به‌دست آوردن مجموع کل امتیازها، گام اول به اتمام می‌رسد و سپس گام دوم تا چهارم انجام می‌شود. بنابراین اگر به تدریج یال‌ها با بالاترین امتیاز حذف شوند، در نهایت شبکه به چندین جامعه تقسیم‌بندی شده، تبدیل می‌شود. در اینجا این جوامع تشکیل شده، همان نواحی مجزای مورد نظر است.

۲-۲- روش پیشنهادی برای تشکیل نواحی مجزا

فلوچارت کلی روش مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است. در گام اول، مدل پس از دریافت نقشه شبکه توزیع آب و دریافت تعداد نواحی مجزا از کاربر، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی بر مبنای حداقل کردن تعداد لوله‌های بین هر ناحیه، شبکه را به نواحی مجزا تقسیم می‌کند. تا این مرحله، شبکه فقط به‌عنوان یک گراف ساده مورد تحلیل قرار گرفته است و هنوز هیچ قید هیدرولیکی وارد مسئله نشده است. در ادامه با اضافه کردن قیدهای هیدرولیکی و کاهش تعداد لوله‌های رابط بین نواحی، شبکه بهینه‌تر می‌شود.

نواحی مجزا طبق الگوریتم GN، با حداقل لوله‌های رابط بین نواحی پیشنهاد می‌شود. با توجه به اینکه معمولاً شبکه‌های موجود به‌صورت سنتی و به مرور زمان گسترش یافته‌اند، کمتر اتفاق می‌افتد که بین دو ناحیه فقط یک لوله رابط قرار بگیرد و همانطور که قبلاً ذکر شد، به تعداد لوله‌های رابط بین هر ناحیه، به دبی‌سنج نیاز است. به‌همین دلیل با اضافه کردن قید هیدرولیکی به مسئله، سعی می‌شود لوله‌های پیشنهادی بین نواحی را کمتر کرد. کمتر کردن لوله‌ها به این معنی است که به وسیله شیرهای مرزی، ارتباط لوله‌ها را از شبکه قطع کرد. برای کاهش تعداد لوله‌های ارتباطی بین هر ناحیه، یا به‌عبارتی کاهش تعداد دبی‌سنج‌ها، طرح پیشنهاد شده نواحی توسط الگوریتم GN با نرم‌افزار EPANET ارتباط داده شد و به‌منظور کنترل و حفظ حداقل فشار در شبکه، شبیه‌سازی هیدرولیکی انجام شد (Eck, 2016). در این گام برای حذف

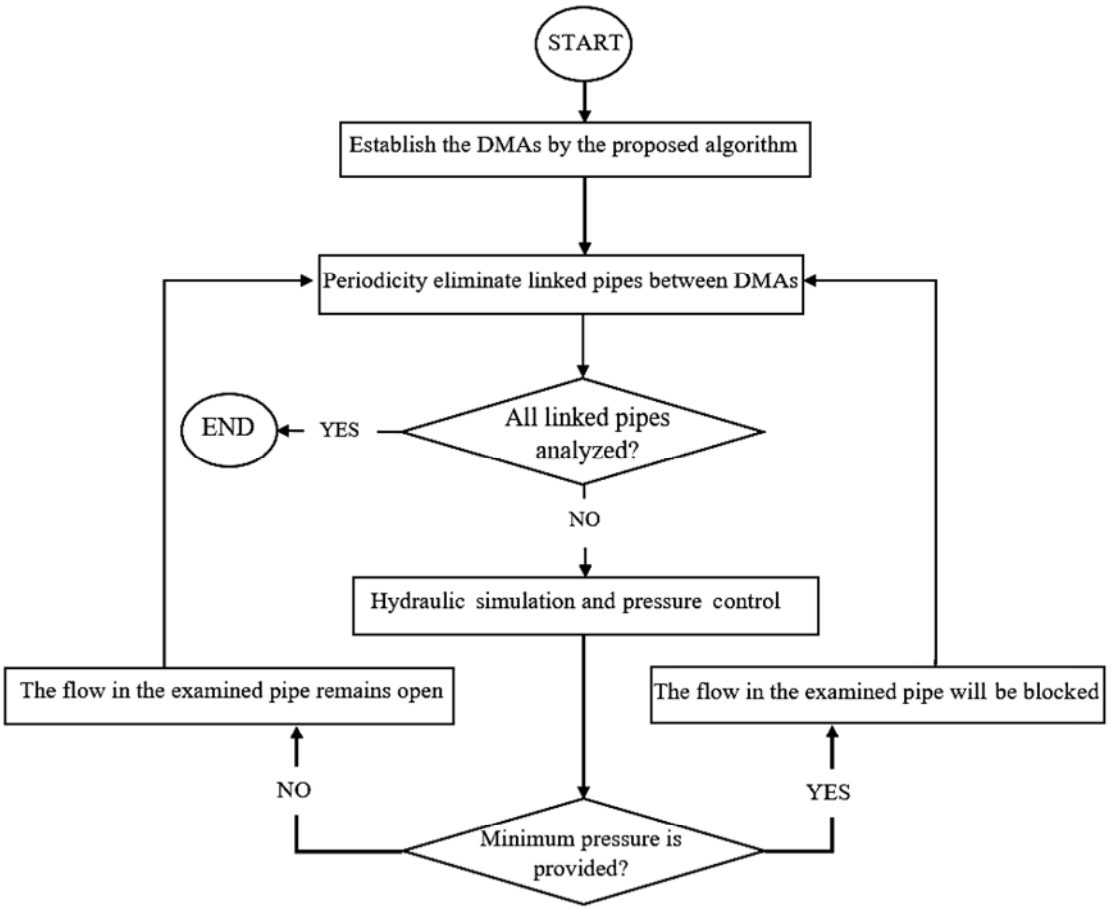

Fig. 3. The steps for definition of DMAs

شکل ۳- مراحل کلی تعریف نواحی مجزا

لوله‌های رابط، ارتباط یکی از این لوله‌ها با شبکه قطع شده و حداقل فشار مورد نیاز شبکه توسط EPANET کنترل شد. اگر حداقل فشار پس از حذف لوله مذکور همچنان رعایت شود، بررسی حذف لوله‌های دیگر تا آخرین لوله رابط تکرار می‌شود. اگر پس از قطع کردن ارتباط یکی از این لوله‌ها، حداقل فشار لازم در شبکه رعایت نشود، به این معنا است که نمی‌توان این لوله را از شبکه حذف کرد و فشار بعضی از نقاط شبکه به جریان عبوری از این لوله بستگی دارد. بنابراین مجدد ارتباط این لوله با شبکه وصل شده و امکان حذف دیگر لوله‌های رابط بررسی می‌شود. این مراحل مطابق شکل ۳ تا آخرین لوله رابط ادامه یافت.

۳- مطالعه موردی

برای به کارگیری الگوریتم پیشنهادی، در این بخش دو مطالعه موردی بررسی شد. مطالعه اول شبکه پولاکیس و مورد مطالعه دوم شبکه توزیع آب شهر بوشهر بود.

۳-۱- شبکه پولاکیس (Poulakis et al., 2003)

شبکه معروف پولاکیس که دارای ۳۰ گره، ۵۰ لوله و یک مخزن است در شکل ۴ نشان داده شده است. طول لوله‌های افقی و عمودی به‌ترتیب ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر است.

شبکه پولاکیس در حالت‌های مختلف به شرح زیر مورد تحلیل قرار گرفت

الف- تقسیم شبکه به سه ناحیه مجزا

مسئله در دو حالت حداقل فشار مورد نیاز شبکه برابر با ۱۴ و ۲۵ متر ستون آب در نظر گرفته شد. هشت لوله ارتباطی بر اساس الگوریتم GN مطابق شکل ۵، بین نواحی مجزا قرار گرفت. با توجه به شرایط هیدرولیکی و نتایج مدل در حالت فشار ۱۴ متر، می‌توان مطابق شکل ۵-a، شش لوله علامت‌گذاری شده را قطع کرد و با

dx.doi.org/10.22093/wwj.2019.140550.2718

رعایت حداقل فشار، وجود دو لوله دارای دبی‌سنج بین نواحی مجزا کافی است. اما در حالت فشار ۲۵ متر مطابق شکل ۵-b، فقط می‌توان پنج لوله از شبکه را حذف کرد و سه لوله بین نواحی مجزا برای تأمین فشار، مورد نیاز است. به‌عبارتی اگر ارتباط لوله اضافه شده در حالت b، قطع شود فشار بعضی از گره‌ها به کمتر از ۲۵ متر می‌رسد.

ب- در این بخش حداقل فشار مورد نیاز در شبکه ثابت و برابر با ۱۴ متر در نظر گرفته شد. در حالت اول شبکه به دو ناحیه و در حالت دوم به چهار ناحیه مجزا تبدیل شد. شکل ۶-a، شبکه را در حالت دو ناحیه مجزا نشان می‌دهد. از پنج لوله رابط پیشنهادی طبق الگوریتم GN بین دو ناحیه، چهار لوله علامت‌گذاری شده از شبکه

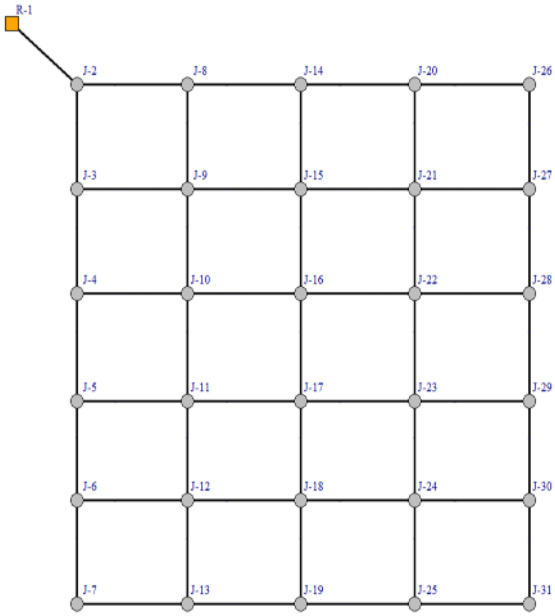

Fig. 4. Poulakis water distribution network

شکل ۴- شبکه توزیع آب پولاکیس

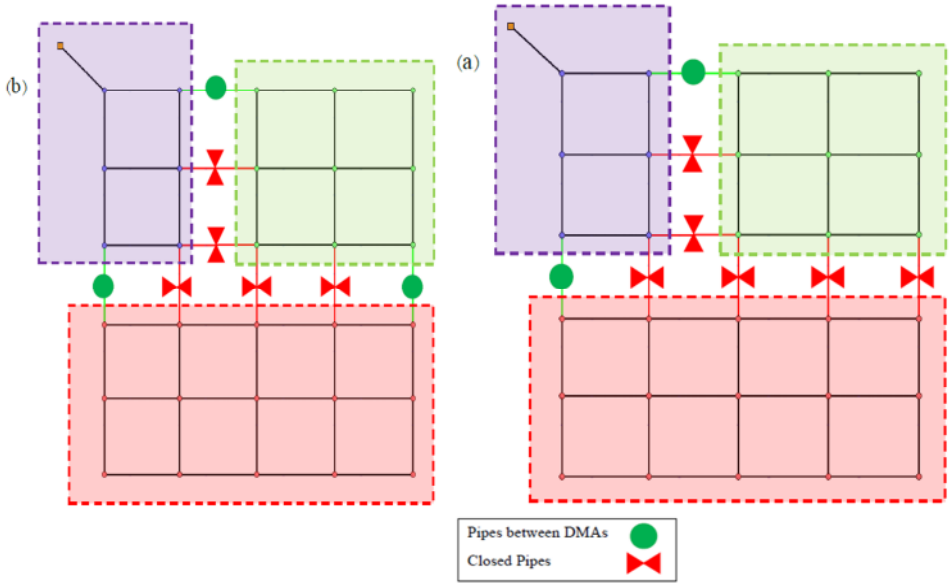

Fig. 5. Establish 3 DMAs in poulakis WDN with minimum pressure head equals: (a) 14m, (b) 25 m

شکل ۵- تبدیل شبکه پولاکیس به سه ناحیه مجزا با حداقل فشار: (a) ۱۴ متر، (b) ۲۵ متر

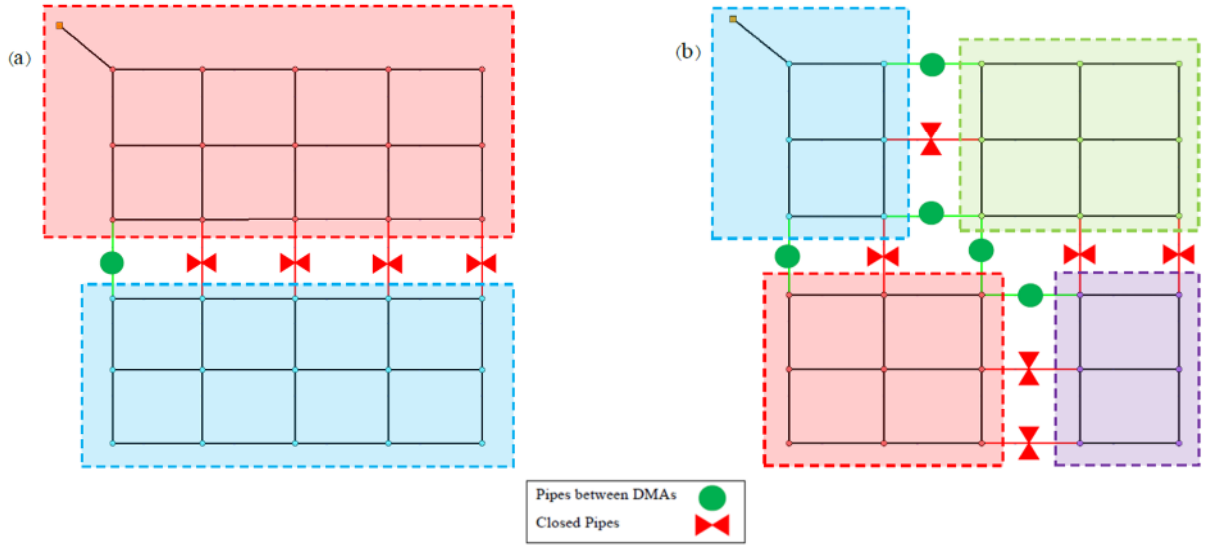

Fig. 6. Establish poulakis WDN with minimum pressure head 14 m into: (a) 2 DMAs, (b) 4 DMAs

شکل ۶- تبدیل شبکه پولاکیس با حداقل فشار ثابت ۱۴ متر به: (a) دو ناحیه مجزا ، (b) چهار ناحیه مجزا

را می‌توان قطع کرد و فقط یک لوله رابط بین نواحی مجزا کافی است. شکل ۶-b، شبکه را در حالت چهار ناحیه مجزا نشان می‌دهد که یازده لوله رابط بین چهار ناحیه مشخص شده طبق الگوریتم GN قرار می‌گیرد. نتایج هیدرولیکی مدل نشان داد که شش لوله از شبکه را می‌توان قطع کرد و پنج لوله باز دارای دبی‌سنج بین نواحی مجزا قرار می‌گیرد. به‌عبارت دیگر اگر یکی از پنج لوله رابط بین نواحی تشکیل شده در شکل ۶-b حذف شود، در این مثال با توجه به یکسان بودن ارتفاع نقاط، فشار گره ۳۱ که دورترین فاصله تا مخزن را دارد، به کمتر از ۱۴ متر ستون آب کاهش می‌یابد.

۳-۲- شبکه آب شهر بوشهر

شهر بوشهر مرکز استان بوشهر در جنوب ایران است. قسمتی از نقشه شبکه توزیع آب این شهر در شکل ۷ نشان داده شده است. این شبکه دارای حدود ۳۷۴۰ گره و ۳۹۸۰ لوله است. مصرف متوسط در زمان اوج برای بیشتر گره‌ها ۰/۳۸ لیتر بر ثانیه و حداقل فشار مجاز در شبکه برابر با ۱۴ متر در نظر گرفته شده است.

پس از انجام حالت‌های مختلف ناحیه‌بندی، در نهایت این شبکه بر اساس الگوریتم GN، به ۱۰ ناحیه مجزا طبق شکل ۸ تقسیم شد. جدول ۲، تعداد گره‌های شبکه در هر ناحیه مجزا را نشان می‌دهد.

به دلیل پیچیدگی این شبکه، مجموع تعداد لوله‌های رابط بین نواحی مجزا توسط الگوریتم GN، ۳۳ عدد است. پس از اضافه شدن قیدهای هیدرولیکی به مدل، نتایج خروجی نشان داد که می‌توان ارتباط ۱۴ لوله رابط از شبکه را مطابق شکل ۹، قطع کرد بدون اینکه فشار نقاط شبکه از حداقل مجاز کمتر شود. به عبارت دیگر برای تبدیل شبکه توزیع آب شهر بوشهر به ۱۰ ناحیه مجزا، به حداقل ۱۹ لوله ارتباطی بین نواحی نیاز است.

پس از تبدیل شبکه به نواحی مجزا به‌علت بستن تعدادی از لوله‌ها، فشار بعضی از نقاط شبکه کاهش و سرعت جریان در بعضی از لوله‌ها افزایش یافت. به‌عنوان مثال پس از تبدیل این شبکه به ۱۰ ناحیه مجزا، بیشترین فشار شبکه به مقدار ۱۱ درصد کاهش و بیشترین سرعت در لوله‌های شبکه به مقدار ۲۰ درصد افزایش داشت. ولی با توجه به فلوچارت شکل ۳، این تغییرات همچنان در محدوده مجاز است.

۴- نتایج و بحث

مدلی که در این پژوهش توسعه داده شد، بر اساس تعداد نواحی درخواستی از کاربر، از الگوریتم‌های شاخص تئوری گراف برای تقسیم شبکه‌های توزیع آب موجود به نواحی مجزا استفاده می‌کند. همان‌طور که اشاره شد پس از تقسیم شبکه به نواحی مجزا، کمتر اتفاق می‌افتد که یک لوله ارتباطی بین دو ناحیه قرار بگیرد؛ به‌همین دلیل برای کاهش تعداد لوله‌های رابط پیشنهادی بین نواحی توسط تئوری گراف، با اضافه کردن قید هیدرولیکی به مسئله سعی بر

Fig. 7. Simulated model of Bushehr WDN

شکل ۷- پلان و مدل شبیه‌سازی شبکه آب بوشهر

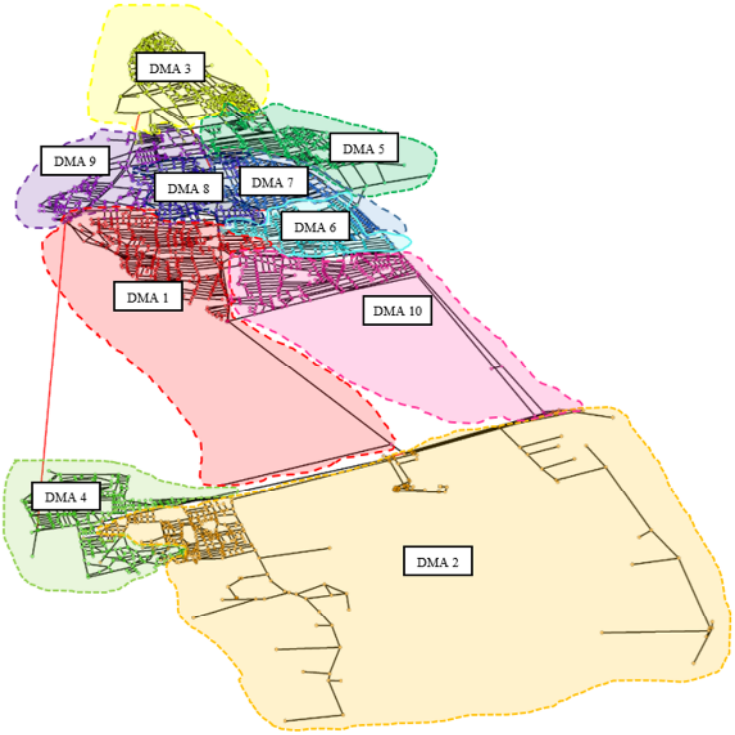

Fig. 8. Recommended DMAs for Bushehr WDN

شکل ۸- نواحی مجزای پیشنهاد شده برای شبکه آب شهر بوشهر

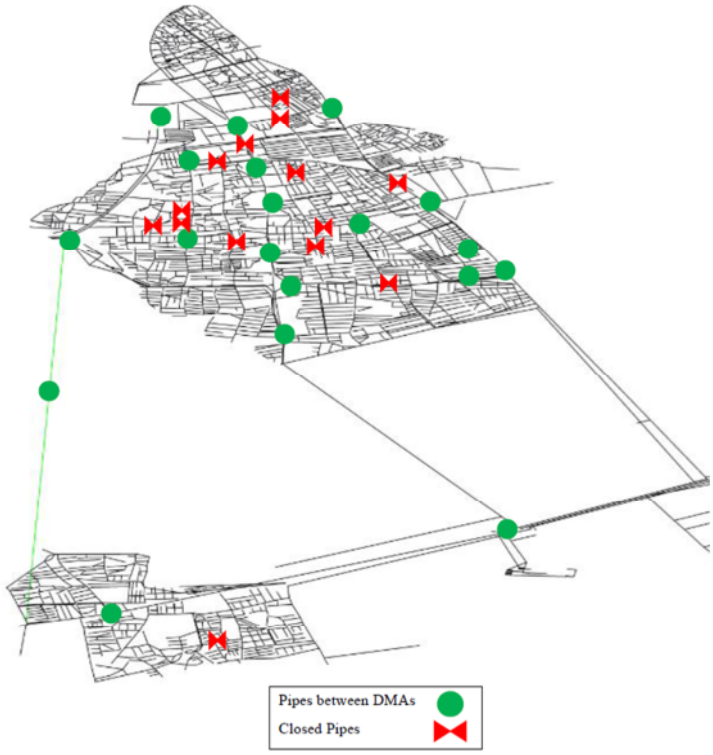

Fig. 9. The status of the closed pipes and the pipes with suggested flowmeter for Bushehr WDN

شکل ۹- وضعیت لوله‌های بسته و لوله‌های دارای فشارسنج پیشنهادی توسط مدل برای شبکه آب بوشهر

جدول ۲- تعداد گره‌ها در هر نواحی مجزا

Table 2. Number of nodes in each DMA

DMAs NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. of nodes in each DMA	498	428	565	367	363	287	299	328	269	337

کاهش تعداد لوله‌های رابط می‌شود. به این منظور پس از قطع کردن یکی از لوله‌های رابط، از نرم‌افزار EPANET برای کنترل فشار نقاط شبکه استفاده می‌شود.

خروجی مدل توسعه داده شده، شبکه مورد مطالعه را به‌صورت بهینه به نواحی مجزا تقسیم می‌کند، به‌صورتی که ضمن برقراری حداقل فشار مورد نیاز در گره‌های بحرانی (انتهایی یا مرتفع) شبکه، تعداد لوله‌های رابط بین نواحی مجزا نیز حداقل باشد. حداقل بودن تعداد لوله‌های رابط بین نواحی باعث می‌شود تا در زمان اندازه‌گیری جریان ورودی و خروجی هر ناحیه، تعداد دبی‌سنج مورد نیاز، حداقل باشد.

نتایج مدل برای تقسیم شبکه پولاکیس به نواحی مجزا در حالت‌های ۲، ۳ و ۴ ناحیه و برای حداقل فشار ۱۴ و ۲۵ متر ارائه شد. با توجه به اینکه این یک شبکه فرضی بوده است، مقدار فشار گره‌ها و همچنین سرعت در لوله‌ها پس از تبدیل شبکه به نواحی مجزا تغییر چشمگیری نداشت. شبکه دوم که مورد بررسی قرار گرفت، شبکه توزیع آب شهر بوشهر بود. نتایج برای این شبکه در حالت ۱۰ ناحیه مجزا با فشار ۱۴ متر ارائه شد. نتایج خروجی برای هر دو مثال نشان داد که این مدل توسعه داده شده قابلیت تبدیل انواع شبکه‌های توزیع در حالت‌های مختلف قید هیدرولیکی و حتی در اندازه‌های بزرگ و پیچیده را به نواحی مجزای بهینه دارا است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای اولین بار برای تبدیل شبکه‌های توزیع آب به نواحی مجزا به‌صورت بهینه از الگوریتم GN در تئوری گراف استفاده شد. این الگوریتم قادر است با سرعت زیاد، انواع گراف‌های بزرگ را مورد تحلیل قرار دهد. مدل توسعه داده شده برای یک شبکه در مقیاس و بزرگی شهر بوشهر با الگوریتم پیشنهادی تحلیل شد که توانایی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. از این مدل توسعه داده شده، برای تبدیل شبکه‌های قدیمی و پیچیده، به نواحی مجزا استفاده می‌شود. ناحیه‌بندی شبکه‌های قدیمی کمک شایانی به مدیریت شبکه و همچنین کاهش نشت در شبکه‌های توزیع می‌کند.

References

Csardi, G. & Nepusz, T. 2006. The igraph software package for complex network research. *International Journal of Complex Systems*, 1695(5), 1-9.

Di Nardo, A. & Di Natale, M. 2011. A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks. *Engineering Optimization*, 43, 193-211.

Eck, B. J. 2016. An R package for reading EPANET files. *Environmental Modelling and Software*, 84, 149-154.

Farley, M. & Trow, S. 2003. *Losses in water distribution networks*, IWA Pub., Tunbridge Wells, UK.

Ferrari, G. & Savic, D. 2015. Economic performance of DMAs in water distribution systems. *Procedia Engineering*, 119, 189-195.

Giustolisi, O. & Savic, D. 2010. Identification of segments and optimal isolation valve system design in water distribution networks. *Urban Water Journal*, 7, 1-15.

Gomes, R., Marques, A. S. & Sousa, J. 2012a. Decision support system to divide a large network into suitable district metered areas. *Water Science and Technology*, 65, 1667-1675.

Gomes, R., Marques, A. S. & Sousa, J. 2012b. Identification of the optimal entry points at district metered areas and implementation of pressure management. *Urban Water Journal*, 9, 365-384.

Hajebi, S., Barrett, S., Clarke, A. & Clarke, S. 2013. Multi-agent simulation to support water distribution network partitioning. *In 27th European Simulation and Modelling Conference - ESM'2013*, Lancaster, UK.

Hamilton, S. & Mckenzie, R. 2014. *Water management and water loss*, IWA Publishing.

Herrera, M., Canu, S., Karatzoglou, A., Pérez-García, R. & Izquierdo, J. 2010. An approach to water supply clusters by semi-supervised learning. *5th International Congress on Environmental Modeling and Software*, Ottawa, Ontario, Canada.

Newman, M. E. & Girvan, M. 2004. Finding and evaluating community structure in networks. *Physical Review E*, 69, 026113. Doi: 10.1103/PhyRevE.69.026113.

Perelman, L. & Ostfeld, A. 2011. Topological clustering for water distribution systems analysis. *Environmental Modelling and Software*, 26, 969-972.

Poulakis, Z., Valougeorgis, D. & Papadimitriou, C. 2003. Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 18, 315-327.

Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. & Koppel, T. 2010. A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7, 25-45.

Rossman, L. A. 2000. *Epanet 2: users manual*, USEPA, Cincinnati, Ohio, USA.

Sophocleous, S., Savic, D., Kapelan, Z., Shen, Y. & Sage, P. 2016. A graph-based analytical technique for the improvement of water network model calibration. *Procedia Engineering*, 154, 27-35.

Tzatchkov, V. G., Alcocer-Yamanaka, V. H. & Bourguett Ortíz, V. 2008. Graph theory based algorithms for water distribution network sectorization projects. *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006,* 2008, 1-15.