Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 9, No. 4, PP. 57-69, Winter 2025
DOI: 10.22112/jwwse.2023.378266.1341

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال نهم، شماره ۴، صفحات ۵۷-۶۹، زمستان ۱۴۰۳

Research Paper

Creating Districted Metered Areas in the Water Distribution Network Using Optimal Selection Indices

Mohammad Kakeshpour[1], Mohammadreza Jalili Ghazizadeh[2*], Seyed Abbas Hoseyni[3] and Ahmad Sharafati[3]

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2- Associate Professor, Department of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
* Corresponding Author, Email: m_jalili@sbu.ac.ir

Received: 27/12/2022
Revised: 02/06/2023
Accepted: 15/06/2023
© IWWA

Abstract

Estimation of leakage, pressure management, and emergency management are among the advantages of establishing DMA in the WDN. However, the unprincipled development of WDN in a traditional way has turned this issue into a complex problem in terms of essential indexes in creating DMA. In this study, a method is presented to design DMAs with optimal selection indicators. For this purpose, three water distribution networks of Balerma, Madena, and D-Town were used for clustering using the Girvan-Newman and Fast Newman methods, which are based on the modularity criterion. Then, with use of a genetic algorithm and EPANET software, to reduce the cost in physical zoning, it was determined by observing the condition of minimum nodal pressure, and with the help of cost, hydraulic, and quality indicators, the zoning results of the research were analyzed and their effectiveness was discussed. The results showed that the mentioned indicators could lead to the optimal selection of the best-proposed plan to modify existing traditional networks and stablish DMA in WDN. The cost and modularity criteria had more effect than other indicators in determining the optimal number of areas. The Girvan-Newman's method provided more relevant results in comparison with the Fast Newman's method.

Keywords: DMA, Water Distribution Network, Girvan-Newman, Fast Newman, Clustering.

مقاله پژوهشی

ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری در شبکه توزیع آب با استفاده از شاخص‌های انتخاب بهینه

محمد کاکش‌پور[۱]، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده[۲*]، سید عباس حسینی[۳] و احمد شرافتی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲- دانشیار، گروه عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۳- استادیار، گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: m_jalili@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۶
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۳/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۵
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

تخمین هدررفت، مدیریت فشار و مدیریت در شرایط اضطراری از مزایای ایجاد ناحیه‌های مجزای اندازه‌گیری (DMA[۱]) در شبکه‌های توزیع آب است. اما توسعه غیراصولی شبکه‌ها به‌صورت سنتی با لحاظ اهم شاخص‌ها در ایجاد DMA این موضوع را به یک مسئله پیچیده تبدیل کرده است. در این تحقیق یک روش برای ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری با شاخص‌های انتخاب بهینه ارائه شد. بدین منظور از سه شبکه توزیع آب بالرما[۲]، مدنا[۳] و دی تاون[۴] به دو روش گیروان-نیومن[۵] و فست نیومن[۶] که مبتنی بر معیار پیمانگی[۷] هستند، برای خوشه‌بندی[۸] استفاده شد. سپس به کمک الگوریتم ژنتیک[۹] و نرم‌افزار ایپنت[۱۰] باهدف کاهش هزینه در ناحیه بندی فیزیکی با رعایت قید حداقل فشار گره‌ای تعیین شد و به کمک شاخص‌های هزینه‌ای، هیدرولیکی و کیفی نتایج پهنه‌بندی حاصل تحقیق تحلیل شد و اثربخشی آن‌ها مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان داد که شاخص‌های مذکور می‌تواند منجر به انتخاب بهینه بهترین طرح پیشنهادی برای اصلاح شبکه‌های سنتی موجود و ایجاد DMA در شبکه‌های توزیع آب باشد. معیار هزینه و پیمانگی نسبت به سایر شاخص‌ها اثرگذاری بیشتری در تعیین تعداد بهینه نواحی داشتند. روش گیروان-نیومن نتایج مناسب‌تری را نسبت به روش فست نیومن ارائه کرد.

کلمات کلیدی: DMA، شبکه توزیع آب، گیروان-نیومن، فست نیومن، خوشه‌بندی.

۱- مقدمه

ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری در شبکه‌های توزیع آب دارای مزیت‌های زیادی است. از این جمله می‌توان به کنترل نشت به‌کمک روش‌های نشت‌یابی و اندازه‌گیری جریان شبانه، کنترل حوادث شبکه و تسریع در رسیدگی به آن‌ها، مدیریت فشار شبکه و کاهش تعداد شیرهای فشارشکن در شبکه، ایجاد بستر لازم به‌منظور هوشمند سازی شبکه توزیع آب، کنترل بهتر شبکه در شرایط ورود آلودگی به شبکه و یا در شرایط اضطراری اشاره کرد. توصیه انجمن بین‌المللی آب[۱۱] برای تخمین هدررفت واقعی استفاده از روش‌های نشت‌یابی و اندازه‌گیری جریان شبانه[۱۲] به‌کمک ناحیه‌های مجزای اندازه‌گیری است (OP310، ۱۴۰۰). در پهنه مجزا امکان اندازه‌گیری دبی در جریان ورودی و خروجی‌های پهنه وجود دارد. با اجرا و انجام پهنه‌بندی شبکه آبرسانی ضمن تأمین آب شرب مناسب از حیث کمی برای شهروندان، آمار خرابی‌ها، کمبود آب و سایر مشکلات مرتبط به‌صورت قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. به‌عبارتی دیگر، پهنه‌بندی شبکه آبرسانی شهرها با هدف توزیع مناسب آب شرب و مدیریت فشار شبکه، انجام می‌پذیرد. در شبکه‌های توزیع آب پهنه‌بندی‌های مختلفی ازجمله پهنه‌بندی فشاری، DMA، آبرسانی و بالانسینگ با اهداف متفاوت انجام می‌شود و روش انجام هرکدام از این پهنه‌بندی‌ها متفاوت است. اگرچه، ممکن است یک شبکه هم‌زمان دارای پهنه‌بندی‌های متفاوت باشد. لذا ضرورتی برای پهنه‌بندی فشاری برای ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری الزاماً وجود ندارد. به‌عنوان‌مثال اگر شبکه‌ای در یک شهر تقریباً مسطح قرارگرفته باشد لزوماً پهنه‌بندی فشاری نیاز نیست، درصورتی‌که مجزاسازی شبکه (DMA) لازم است (OP310، ۱۴۰۰).

از سوی دیگر با توجه به افزایش جمعیت شهرها، اکثر شبکه‌های توزیع به‌صورت مرحله‌ای و سنتی و بدون توجه به مفهوم DMA گسترش‌یافته و به یک شبکه پیچیده تبدیل‌شده‌اند. لذا پهنه‌بندی در این شبکه‌ها بسیار پیچیده، پرهزینه و مشکل بوده و سبب تغییر تعادل فشاری و آبرسانی در شبکه خواهد بود. ممکن است در شبکه‌های توزیع لوله‌های وجود داشته باشد که اگر از شبکه توزیع حذف شوند، شبکه توزیع آب شهری هم‌چنان با رعایت قیدهای هیدرولیکی ازجمله فشار در گره‌های شبکه در محدوده مجاز قرار داشته باشد. لذا اصلاح و بازطراحی شبکه‌های سنتی به شکلی که با تشکیل هم‌زمان DMA، فشار حداقل موردنیاز و سایر پارامترهای هیدرولیکی در شبکه ارضا شود از اهمیت زیادی برخوردار است.

هدررفت واقعی شامل سه جزء هدررفت آب ناشی از نشت و شکستگی‌های گزارش‌شده، هدررفت آب ناشی از نشت و شکستگی‌های گزارش نشده و نشت زمینه آب در شبکه توزیع آب شهری است. به‌منظور مدیریت ساده شبکه‌های توزیع آب شهری، کارگروه تلفات آب (WLTF)[۱۳] در IWA بیان می‌کنند که شبکه‌های تأمین آب به بخش‌هایی تقسیم شود که ناحیه مجزای اندازه‌گیری یا DMA نامیده می‌شود. این مناطق به‌عنوان بخش‌هایی از یک شبکه که شامل دبی‌سنج‌های جداگانه ناحیه‌ای بوده و ترجیحاً دارای یک نقطه ورودی و یک نقطه خروجی است، قابل‌تعریف خواهد بود. یک DMA، بخشی از یک شبکه توزیع دارای شیرهای قطع و وصل در حالت بسته مرزی است که مصرف آب آن ناحیه، توسط یک یا چند دبی‌سنج در ورودی و خروجی آن، با اهداف کنترل و کاهش هدررفت واقعی از طریق روش‌هایی نظیر جریان شبانه، مورد پایش قرار می‌گیرد. در این روش یکی از حیاتی‌ترین اقدامات، پهنه‌بندی صحیح شبکه است. ضابطه تائید شده‌ای در خصوص تشکیل DMA وجود ندارد، اما اگر این نواحی خیلی کوچک درنظر گرفته شود سبب افزایش هزینه‌های پایش نظیر دبی‌سنج‌ها، دیتالاگرها و شیرها و اگر خیلی بزرگ درنظر گرفته شود، عملیات نشت‌یابی و بهره‌برداری مشکل‌تر خواهد شد. توصیه می‌شود که DMA دارای ۴ تا ۳۰ کیلومتر لوله و یا ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ انشعاب باشد. می‌توان برای کاهش هزینه نصب تجهیزات کنترلی اضافه و تسهیل در بهره‌برداری، امکان مجزاسازی خطوط اصلی شبکه خارج از DMA را درنظر گرفت.

از دیگر ملاحظات مهم طراحی DMA توجه به کیفیت آب است. زیرا ممکن است پس از مجزا سازی، برخی از خطوط شبکه دچار ماندآب شود (Pearson, 2019). بنابراین درنظر گرفتن شاخص‌های هیدرولیکی نظیر فشار، شاخص‌های هزینه‌ای نظیر تهیه و نصب تجهیزات، شاخص‌های کیفی نظیر سن آب[۱۴] در انجام این مهم اجتناب‌ناپذیر است. Sadeghi et al. (2021) بر روی ایجاد خودکار DMA در شبکه‌های توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم ساختار جامعه[۱۵] و الگوریتم ژنتیک باهدف توزیع عادلانه فشار شبکه توزیع آب تحقیق کردند. در این تحقیق ابتدا شبکه شهر تفت در استان یزد در نرم‌افزار اپنت مدل شد و با اتصال اپنت به نرم‌افزار متلب و بارگذاری مشخصات شبکه، با استفاده از الگوریتم ساختار جامعه، شبکه به‌صورت خودکار خوشه‌بندی شد. در مرحله ناحیه‌بندی فیزیکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک محل‌های بهینه قرارگیری شیرهای دروازه‌ای و کنتور باهدف کاهش واریانس میانگین فشار نواحی اندازه‌گیری مجزا مشخص شد. نتایج نشان داد که الگوریتم تشخیص ساختار جامعه با وزن

میانگین فشار روزانه به‌خوبی توانایی ایجاد خودکار خوشه‌بندی مناسب با توجه به شاخص پیمانگی و فشار یکنواخت داخل خوشه‌ها را دارد. هم‌چنین بهینه‌سازی لوله‌های مرزی منجر به کاهش فشار بخش‌های مختلف شبکه ازجمله نواحی با فشار بالاتر از میانگین کل شبکه کاهش واریانس میانگین فشار DMA و سبب توزیع عادلانه فشار در شبکه شد.

Zhang et al. (2021) بر روی بهینه‌سازی DMA برای کاهش نرخ نشت زمینه در شبکه‌های توزیع آب مطالعه کردند. در ابتدا به‌طور بهینه بدنه اصلی یک شبکه با استفاده از ارزیابی پیشنهادی که شامل سه شاخص مرجع و ناحیه مجزا با تئوری گراف[۱۶] است، شناسایی و انتخاب شد. ضمناً الگوریتم یابنده اجتماع اصلاح‌شده برای زون بندی نواحی بزرگ با درنظر گرفتن یکنواختی ارتفاعی DMAها و یکنواختی تقاضای DMAها پذیرفته شد. سپس نقشه بهینه کنتورها در ورودی لوله‌ها و دریچه‌های دروازه‌ای با حل بهینه‌سازی دو هدفه برای کمینه‌سازی تعداد کنتورها و اختلاف فشار تجمعی در نقاط بحرانی هر DMA مقایسه و به‌دست آمد. درنهایت شیرهای فشارشکن در هر ورودی لوله نصب و برای کاهش نشت بهینه شدند. نتایج نشان داد که ترکیب مدیریت فشار و روش تحقیق ناحیه‌بندی می‌تواند با کنترل اضافه ظرفیت فشار بر کاهش میزان نشت مؤثر باشد.

Zeidan et al. (2021) بر روی تقسیم‌بندی DMA و بهینه‌سازی چندهدفه سن آب، اضافه فشار و هزینه عملیاتی پمپ در شبکه توزیع آب تحقیق کردند. در این تحقیق یک رویکرد ابتکاری چندهدفه برای تقسیم‌بندی و عملکرد شبکه‌های توزیع آب ارائه شد. روش تحقیق یک رویکرد دومنظوره به‌کار گرفت. ابتدا یک روش ابتکاری برای تقسیم‌بندی شبکه به چند DMA براساس تحلیل اتصال صورت‌گرفت. دومین رویکرد، روش بهینه‌سازی چندهدفه NSGAII[۱۷] برای کاهش هزینه‌های عملیاتی، اضافه فشار و سن آب در شبکه توزیع آب شهری را به‌کار برد. برای تعیین مرزها از الگوریتم ساختار جامعه استفاده شد. این تحقیق یک رویکرد ابتکاری نوین برای پیوند حل مسئله چندهدفه تحت یک سیستم تقسیم‌بندی داده را مورد استفاده قرار داد.

Bianchotti et al. (2021) ناحیه‌بندی شبکه توزیع آب شهری با چندین منبع با مقایسه چندین شاخص را بررسی کردند. در این تحقیق یک رویکرد دومرحله‌ای برای طراحی DMAها ارائه شد. در گام اول خوشه‌بندی سیستم براساس الگوریتم لوین از نوع حریصانه[۱۸] برای بیشینه‌سازی پیمانگی[۱۹] تعمیم یافت. در گام دوم تقسیم‌بندی فیزیکی سیستم براساس مسئله بهینه‌سازی دوهدفه که در نسخه SMOSA[۲۰] به‌کار برده و برای مدل‌سازی بهینه‌سازی چندهدفه استفاده‌شد. یک هدف تعیین تعداد شیرهای جداسازی بود. برای دومین هدف سه شاخص تحلیل و مقایسه شدند: ۱) یک انحراف معیار استاندارد؛ ۲) ضریب جینی و ۳) تاب‌آوری. روش تحقیق بر روی دو نمونه مطالعاتی و با دو شاخص عملکردی در شرایطی که تقاضا در DMA ها مشابه بودند به‌کار برده شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی برای زون بندی DMA های مستقل، با تقاضاهای مشابه مؤثر بوده است.

Mambretti et al. (2021) با استفاده از تئوری گراف و الگوریتم یافتن جامعه طراحی ابتدایی DMA را بررسی کردند. این تحقیق با هدف طراحی ابتدایی DMA ها و با استفاده از روش تئوری گراف و الگوریتم جامعه ساختاریافته بر روی شبکه توزیع آب میلانو به‌کار برده شد. این شبکه بسیار پیچیده و حلقه‌ای بوده و به حدود دو میلیون نفر خدمت‌رسانی می‌کند. در ابتدا شبکه به‌کمک الگوریتم ساختاریافته و تئوری گراف به ۲۷ عدد DMA تفکیک شد. برخلاف سایر روش‌های ناحیه‌بندی، بیشینه ابعاد هر DMA ابتدایی از قبل محدود نشده و لذا نواحی تولیدشده بزرگ‌تر خواهند بود. سپس یک الگوریتم ساده برای تبدیل DMAهای ابتدایی به DMAهای دینامیکی برای کاهش انرژی مصرفی و فشار سراسری در شبکه به‌کار برده‌شد. نتایج نشان‌داد که هر دوجنبه بهبود پیدا کرده است و لذا پژوهش، توجیه‌پذیر درنظر گرفته می‌شود. ضمناً برای به‌کارگیری تئوری گراف از الگوریتم جستجوی اولین پهنا (BFS[۳۱]) و الگوریتم دایجسترا[۳۲] استفاده شد. هم‌چنین برای خوشه‌بندی از الگوریتم‌های گیروان-نیومن و الگوریتم گیروان-نیومن اصلاح‌شده استفاده‌شد.

Bui et al. (2021) طراحی بهینه DMA در یک شبکه توزیع آب را با استفاده از نقشه خودسازمان‌ده یا SOM[۳۳] و الگوریتم ساختار اجتماع (CSA[۳۴]) انجام دادند. این تحقیق طراحی بهینه DMA در چهارچوب معیار تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA[۳۵]) را براساس خروجی مدل ترکیبی SOM و CSA بررسی کرد. در ابتدا اصل خوشه‌بندی الگوریتم SOM برای ساخت خوشه‌های همسان براساس فشار و ارتفاع به‌کاربرده شد. سپس CSA برای تصحیح SOM خوشه‌های اولیه برای ساخت خودکار چند مقیاسه و پویای طرح‌های DMA ترکیب‌شد. درنهایت، معیاری برای تعیین عملکرد هر طرح ارائه‌شده DMA در ساختار MCDA تعیین شد. صحت‌سنجی مدل براساس شبکه فرضی و مدل واقعی شبکه توزیع آب انجام و مشخص‌شد که این مدل می‌تواند طرح‌های DMAهای فرضی و پویای متناسب با تقاضاهای آبی متغیر را فراهم آورد.

Sharma et al. (2022) پهنه‌بندی DMA شبکه توزیع آب شهری را با استفاده از شیرهای موجود مطالعه کردند. روش تحقیق پیشنهادی برای یافتن خوشه‌ها و کاهش هزینه شیرها و ناحیه‌بندی DMAها با درنظر گرفتن شیرهای موجود عمل می‌کرد. روش یافتن DMAها به سه مرحله تقسیم می‌شود: ۱- شناسایی خوشه‌ها؛ ۲- ناحیه‌بندی یا بهینه‌سازی مرزها و ۳- ارزیابی عملکرد شبکه محدوده‌بندی شده. روش تحقیق پیشنهادی بر روی یک شبکه ساده و یک شبکه واقعی با یافتن و مقایسه DMAها ارزیابی شد. در این تحقیق از الگوریتم BFS برای ناحیه‌بندی و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مرزها استفاده شد.

در تحقیق حاضر یک روش برای ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری ارائه می‌شود. بدین منظور در مرحله خوشه‌بندی به‌کمک دو روش گیروان-نیومن و فست نیومن پهنه‌بندی شبکه توزیع آب شهری سه شبکه بالرما، مدنا و دی تاون انجام می‌شود. این خوشه‌بندی براساس معیار پیمانگی انجام می‌پذیرد. براساس این معیار میزان ارتباط بین گره‌های درون خوشه‌ای حداکثر و میزان ارتباط بین خوشه‌ها حداقل می‌شود. این موضوع سبب حداقل شدن لوله‌های رابط در هنگام ناحیه‌بندی می‌شود. در گام دوم، ناحیه‌بندی فیزیکی نیز برای تعیین تکلیف لوله‌های رابط با معیار حداقل‌سازی هزینه در هنگام انتخاب شیرهای مجزاسازی و همچنین کنتورهای آب درنظر گرفته‌شد. در واقع در هر دوگام پهنه‌بندی شبکه توزیع آب، حداقل‌سازی هزینه ایجاد DMA در دستور کار قرارگرفت. همچنین نتایج روش‌های گیروان-نیومن و فست نیومن با یکدیگر مقایسه شدند. لازم به توضیح است تحلیل مبتنی بر فشار PDD یا HDSM در شرایط کمبود فشار باعث افزایش دقت مدل‌های هیدرولیکی می‌شود. اما موضوع تحقیق حاضر غلبه بر پیچیدگی‌های پهنه‌بندی DMA در شبکه‌های قدیمی است. همچنین یکی از قیود الگوریتم پیشنهادی تأمین فشار همه گره‌ها در حالت پیک مصرف است. لذا نیازی به تحلیل PDD یا HDSM نیست. همچنین با توجه به محدودیت‌های ناشی از تهیه داده‌های مربوط به شبکه‌های واقعی از ۳ شبکه مرجع در تحقیق حاضر استفاده می‌شود.

نوآوری این تحقیق در ارائه یک روش برای ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری و همچنین ارزیابی کارایی شاخص‌های هیدرولیکی، کیفی و هزینه‌ای در انتخاب پهنه بهینه برای تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری است. بدین منظور شاخص‌هایی نظیر هزینه، تاب‌آوری، تشابه تقاضای گره‌ای و سن آب بر روی سه شبکه مورد مطالعه به ازای حالت‌های مختلف محاسبه و سپس تحلیل بر روی نتایج ناشی از آن مقادیر مورد محاسبه انجام پذیرفته و اثربخش‌ترین شاخص‌ها بین شاخص‌های مورد بررسی بر روی شبکه‌های موردمطالعه انتخاب می‌شود.

۲- مبانی نظری

به‌منظور تبدیل شبکه‌های سنتی موجود توزیع آب به شبکه‌های دارای نواحی مجزای اندازه‌گیری با رعایت فشار حداقل مورد نیاز و سایر پارامترهای هیدرولیکی در این تحقیق، یک مدل بهینه ارائه شد. ضرورت بازطراحی و تبدیل شبکه‌هایی که این رویکرد در آن‌ها نادیده گرفته‌شده است، در کاهش هزینه‌های آب بدون درآمد و همچنین نرخ حوادث و استهلاک سالانه شبکه مؤثر خواهد بود.

۲-۱- تئوری گراف

یکی از تحلیل‌های مهمی که روی گراف‌ها انجام می‌شود خوشه‌بندی گراف است. به مسئله خوشه‌بندی در گراف‌ها، تشخیص جوامع[۲۶] نیز گفته می‌شود. روش‌های خوشه‌بندی، کاربردهای مختلفی ازجمله ساده‌سازی داده‌ها، تحلیل داده‌ها، شباهت‌سنجی داده‌ها و همچنین یافتن الگوهای کاربرد دارند. اصطلاحات خوشه‌ها شامل گروه‌هایی بافاصله‌های کم بین اعضای خوشه، مناطق متراکم فضای داده، فواصل و یا توزیع‌های آماری خاص است. بنابراین خوشه‌بندی می‌تواند به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه صورت‌گیرد. گراف مجموعه‌ای از نقاط و خطوط متصل به‌هم است. گراف یک ساختاری مجزا از یال‌ها و رأس‌ها 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 از یال‌ها به‌صورت اعضای دو عضوی V است. با توجه به این‌که شبکه‌های توزیع آب مجموعه‌ای از گره‌ها و لوله‌ها است، می‌توان آن‌ها را به‌عنوان یک گراف درنظر گرفت. در شبیه‌سازی شبکه آب با استفاده از تئوری گراف می‌توان گره‌های مصرف و مخازن شبکه را رأس‌های گراف (V) و لوله‌ها، پمپ‌ها و شیرهای شبکه را همچون یال‌های گراف (E) درنظر گرفت. استفاده از تئوری گراف برای شبکه‌های توزیع باعث سرعت تحلیل شبکه‌های بزرگ و پیچیده توزیع آب می‌شود و این امکان را می‌دهد که بتوان از الگوریتم‌های خوشه‌بندی در شبکه‌های توزیع نیز استفاده کرد (Bader et al., 2013).

۲-۲- روش گیروان-نیومن و روش فست نیومن

الگوریتم گیروان-نیومن به موضوع خوشه‌بندی گراف‌ها بر

مبنای معیار پیمانگی می‌پردازد. از آن‌جایی‌که لزوماً الگوریتم‌های مختلف تعداد خوشه‌های یکسانی را تولید نمی‌کنند، بسیاری از معیارهای موجود جواب‌گوی مقایسه روش‌های مختلف خوشه‌بندی نیستند و امکان استفاده از آن‌ها برای ارزیابی این روش‌ها وجود ندارد. از طرفی، معیار پیمانگی، این امکان را می‌دهد که بتوان از آن برای تعیین تعداد خوشه‌ها نیز استفاده نمود. روند کلی الگوریتم پیشنهادی با استفاده از الگوریتم جستجوی اول سطح به‌صورت: ۱- محاسبه امتیاز کل یال‌های شبکه؛ ۲- یافتن یالی که بیشترین امتیاز را دارد و حذف آن از شبکه؛ ۳- محاسبه مجدد امتیاز یال‌های باقیمانده و ۴- تکرار مراحل از گام دوم. روش گیروان-نیومن از شاخص پیمانگی برای ارزیابی ناحیه بندی شبکه استفاده می‌کند. این شاخص به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$M = \sum_{S=1}^{C} [\frac{l_s}{m} - \left(\frac{d_s}{2m}\right)^2] \qquad (۱)$$

که M: پیمانگی، c: نشان‌دهنده تعداد خوشه‌ها، l_s: برابر با تعداد یال‌های موجود s، d_s: برابر با مجموع درجه‌های کلیه گره‌های موجود در جامعه s و m: برابر با تعداد کل یال‌ها هستند. هرچه مقدار Q بیشتر باشد ناحیه‌بندی بهتری صورت‌گرفته است. پیمانگی ابتدا به‌عنوان معیاری برای تعیین مرحله توقف الگوریتم گیروان-نیومن مورد توجه بود، ولی به‌سرعت جزء مهم‌ترین معیارهای الگوریتم‌های تشخیص جوامع تبدیل شد. حداکثر مقدار پیمانگی زمانی به‌دست می‌آید که تمامی رئوس خوشه به‌هم متصل باشند و یالی خوشه‌ها را به‌هم متصل نکند. یکی از ویژگی‌های اساسی پیمانگی، امکان مقایسه خوشه‌بندی‌های مختلف با تعداد خوشه‌های متفاوت که بسیاری از روش‌های دیگر این مهم امکان‌پذیر نیست. روش فست نیومن یک روش سریع برای یافتن جوامع در شبکه‌ها نسبت به سایر روش‌ها است. این موضوع اجازه می‌دهد که بر روی شبکه‌های بزرگ‌تر مطالعه انجام شود. این الگوریتم بر اساس پیمانگی است (Newman and Girvan, 2004).

۲-۳- شاخص‌های انتخاب بهینه تعداد نواحی مجزای اندازه‌گیری

۲-۳-۱- هزینه

هزینه کل برای ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری در شبکه مجموع هزینه نصب کنتور و شیرهای مجزاسازی در لوله‌های مرزی است. بنابراین هزینه کلی مطابق رابطه (۲) و جدول ۱ و براساس قطر لوله‌های مرزی میان پهنه‌ها محاسبه می‌شود.

$$Cost = \sum_{fm=1}^{N_{fm}} [C_{fm}(D_{fm})] + \sum_{gv=1}^{N_{gv}} [C_{gv}(D_{gv})] \qquad (۲)$$

که $Cost$: هزینه کلی ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری، N_{fm}: تعداد کنتورهای نصب‌شده در نواحی مرزی، $C_{fm}(D_{fm})$: هزینه کنتورهای نصب‌شده براساس قطر، N_{gv}: تعداد شیرهای مجزاساز نصب‌شده در نواحی مرزی، $C_{gv}(D_{gv})$: هزینه شیرهای مجزاساز نصب‌شده براساس قطر است. در جدول ۱ هزینه تهیه و نصب کنتورها و شیرهای مجزاساز براساس قطر نشان داده‌شده است.

جدول ۱- هزینه تهیه و نصب کنتورها و شیرهای مجزاساز براساس قطر (Yao et al., 2021)

قطر (mm)	شیر مجزاسازی (¥)	قیمت کنتور (¥)	قطر (mm)	شیر مجزاسازی (¥)	قیمت کنتور (¥)
۵۰	۲۲۵	۴۵۵	۴۰۰	۲۸۴۰	۶۳۰۰
۱۰۰	۴۰۰	۷۴۴	۵۰۰	۴۵۷۵	۱۰۲۰۰
۱۵۰	۶۷۵	۱۲۵۰	۶۰۰	۵۹۰۰	۱۴۳۰۰
۲۰۰	۹۴۵	۱۸۱۰	۷۰۰	۸۴۵۰	۲۰۵۰۰
۲۵۰	۱۳۱۵	۲۵۲۰	۸۰۰	۱۰۸۵۰	۲۳۰۰۰
۳۰۰	۱۷۷۰	۳۷۸۰	۹۰۰	۱۵۶۵۰	۳۴۲۳۰
۳۵۰	۲۱۸۰	۴۸۰۰	۱۰۰۰	۲۲۵۶۰	۵۰۳۵۰

در مرحله ناحیه‌بندی که لوله‌های مرزی تعیین تکلیف می‌شوند، استفاده از کنتور و یا شیر مجزاساز براساس تابع هدف مورد استفاده و محدودیت ناشی از قید درنظر گرفته می‌شود. لذا مقدار تابع هدف در این مسئله براساس هزینه مطابق رابطه (۳) و محدودیت‌های بهینه‌سازی نیز مطابق رابطه (۴) تعریف شده است.

$$Min\ f_1 = \sum_{fm=1}^{N_{fm}} [C_{fm}(D_{fm})] + \sum_{gv=1}^{N_{gv}} [C_{gv}(D_{gv})] \qquad (۳)$$

به‌منظور جلوگیری از ایجاد افت فشار گرهی در شبکه در اثر ایجاد

DMA، قید فشار به‌صورت رابطه (۴) درنظر گرفته می‌شود

$$Subject\ to: h_i \geq h_i^* \qquad (۴)$$

که h_i: فشار هیدرولیکی در گره i، h_i^*: حداقل فشار متوسط گرهی است و در تحقیق حاضر برابر ۱۵ متر درنظر گرفته شد.

۲-۳-۲-شاخص تاب‌آوری (I_r)

شاخص تاب‌آوری یک ایده برای توانایی شبکه برای تأمین آب در شرایط پرتنش مانند افزایش درخواست اضافی آب ناشی از شکست‌های مکانیکی یا شکست‌های هیدرولیکی است. این معیار مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Todini, 2000).

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^{Nn}[d_i(h_i - h_i^*)]}{\sum_{k=1}^{Ns}[Q_K H_K] - \sum_{i=1}^{Nn}[d_i h_i^*]} \qquad (۵)$$

که d_i: تقاضای گرهی، h_i: فشار هیدرولیکی در گره i، N_n: مجموع تعداد گره‌های شبکه، N_s: تعداد منابع، Q_K و H_K: دبی و فشار در مخزن و h_i^*: حداقل فشار متوسط گرهی است که در تحقیق حاضر ۱۵ متر درنظر گرفته شد.

۲-۱-۲- شاخص تشابه تقاضای گرهی (DSI)

شاخص (DSI) تشابه یکنواختی ابعاد DMAها در شبکه توزیع آب شهری است. این شاخص از انحراف معیار برای مقایسه تقاضا با متوسط تقاضا استفاده می‌کند. مطابق رابطه (۶) مقدار شاخص DSI محاسبه می‌شود (Liu and Han, 2018).

$$DSI = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^{k}[(Q_d - Q_{mean})^2]}{k}} \qquad (۶)$$

که K: تعداد DMA و Q_d: تقاضای گرهی در DMAk ام و Q_{mean}: متوسط تقاضای گرهی در کل شبکه توزیع آب شهری است.

۲-۳-۳- سن آب (WA)

سن آب زمان موردنیاز برای ذرات سیال برای پیمودن از منبع به گره‌های مصرف در شبکه است. سن آب بر سطح درصد کلر در آب مؤثر است. این شاخص به‌طور مؤثر بر کیفیت آب در شبکه توزیع آب اثرگذار است. این شاخص مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌شود (Grayman et al., 2009).

$$\overline{WA} = \frac{\sum_{j=1}^{n}[\frac{\sum_{i=1}^{T}[WA_{j.i}]}{T}]}{n} \qquad (۷)$$

که $\overline{WA}$: متوسط سن آب در شبکه و $WA_{j,i}$: سن آب در گره j و در زمان i ام است (Grayman et al., 2009).

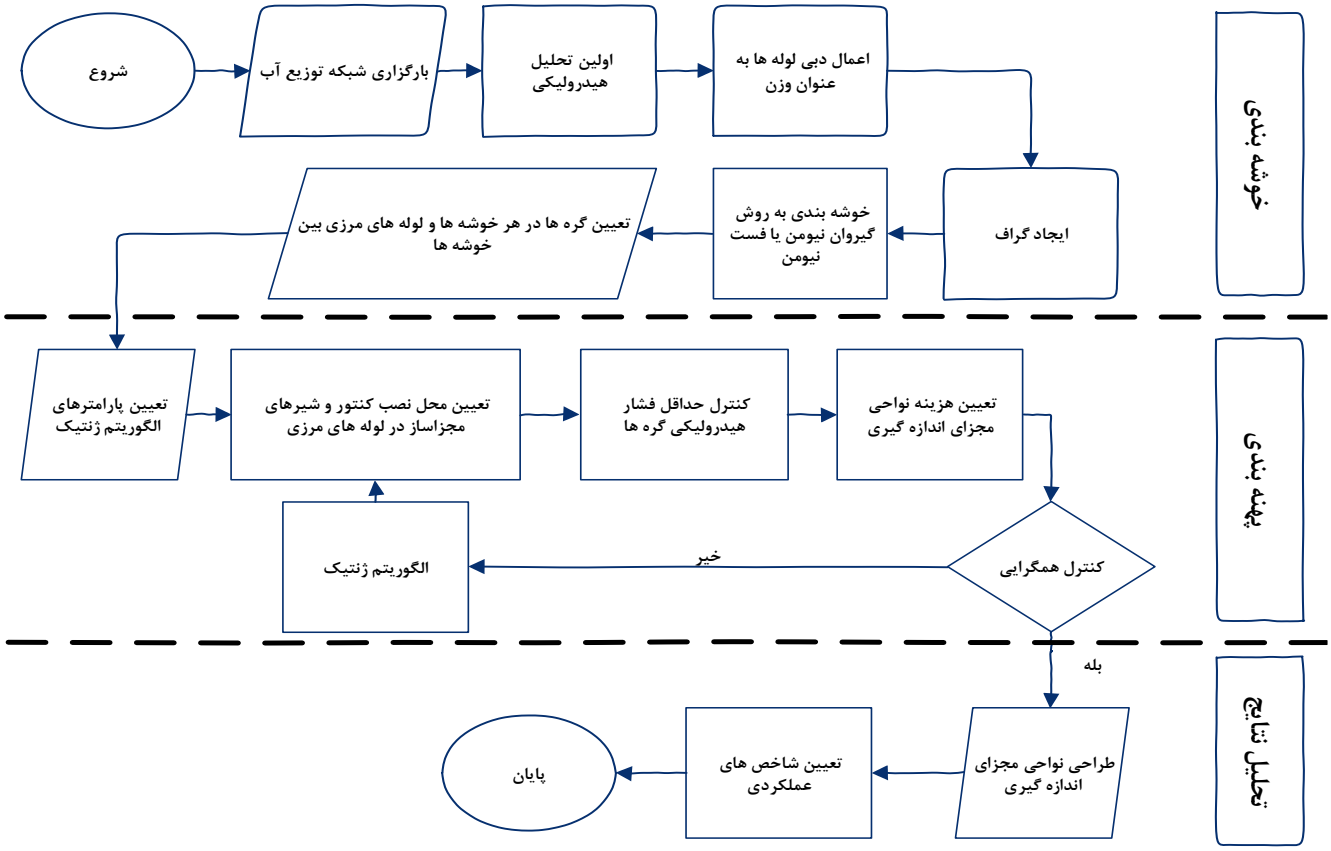
در شکل ۱ روندنمای انجام پهنه‌بندی بر روی شبکه‌های بالرما، مدنا و دی-تاون نشان داده‌شده است. پس از بارگذاری شبکه در نرم‌افزار متلب و با استفاده از افزونه تولکیت تحلیل اولیه بر روی شبکه صورت‌گرفته و سپس با استفاده از داده‌های هیدرولیکی اولیه از دبی گذرنده در لوله‌ها مشخص و به‌عنوان وزن در نظر گرفته می‌شوند. سپس این اوزان در قالب ماتریس مجاورت وارد الگوریتم خوشه‌بندی‌شده و خوشه‌بندی بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد. در ادامه با مشخص شدن لوله‌های مرزی، به کمک الگوریتم ژنتیک لوله‌های مرزی ازنظر قرارگیری کنتور و شیرهای مجزاساز تعیین تکلیف می‌شوند. درنهایت با مشخص شدن DMAها با تعداد مختلف تجزیه و تحلیل نتایج برای تعیین حالت بهینه پهنه‌بندی با توجه به شاخص‌های هیدرولیکی، هزینه‌ای و کیفی درنظر گرفته می‌شود.

۲-۴- شبکه موردمطالعه

در این تحقیق از سه شبکه توزیع آب شهری بالرما، مدنا و دی تاون استفاده شده است. مشخصات شبکه بالرما در جدول ۲ و شکل ۲، مشخصات شبکه مدنا در جدول ۲ و شکل ۳ و در نهایت مشخصات شبکه دی‌تاون در جدول ۲ و شکل ۴ نشان داده‌شده است.

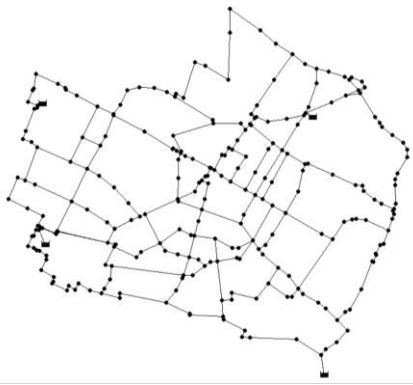
جدول ۲- مشخصات شبکه‌های بالرما (Reca et al., 2008)، مدنا (Bragalli et al., 2012) و دی‌تاون (Marchi et al., 2014)

شرح	دی تاون	مدنا	بالرما	شرح	دی تاون	مدنا	بالرما
تعداد گره‌های مصرف	۳۸۸	۲۶۸	۴۴۳	حداقل فشار گره‌ای (m)	۲۱/۷۹	۱۸/۷	۲۰
تعداد لوله‌ها	۴۲۴	۳۱۷	۴۵۴	متوسط فشار گره‌ای (m)	۵۱/۱۴	۲۹/۶	۳۲/۲۸
تعداد مخازن	۱	۴	۴	بیشترین فشار گره‌ای (m)	۷۸/۳۶	۳۹/۲	۶۸/۴۶
دبی پیک تقاضای گره‌ای (l/s)	۲	۱/۱	۵/۵۵	انحراف از معیار فشار متوسط (m)	۱۵/۹۰	۴/۴	۱۰/۹
دبی پایه تقاضای گره‌ای (l/s)	۱	۰/۵۵	۲/۷۷۵	متوسط سن آب (hour)	۴/۶	۱/۴۹	۵/۵۵



شکل ۱- روندنمای انجام روش تحقیق

شکل ۲- نمای کلی شبکه بالرما



شکل ۳- نمای کلی شبکه مدنا

شکل ۴- نمای کلی شبکه دی تاون

۳- نتایج و بحث

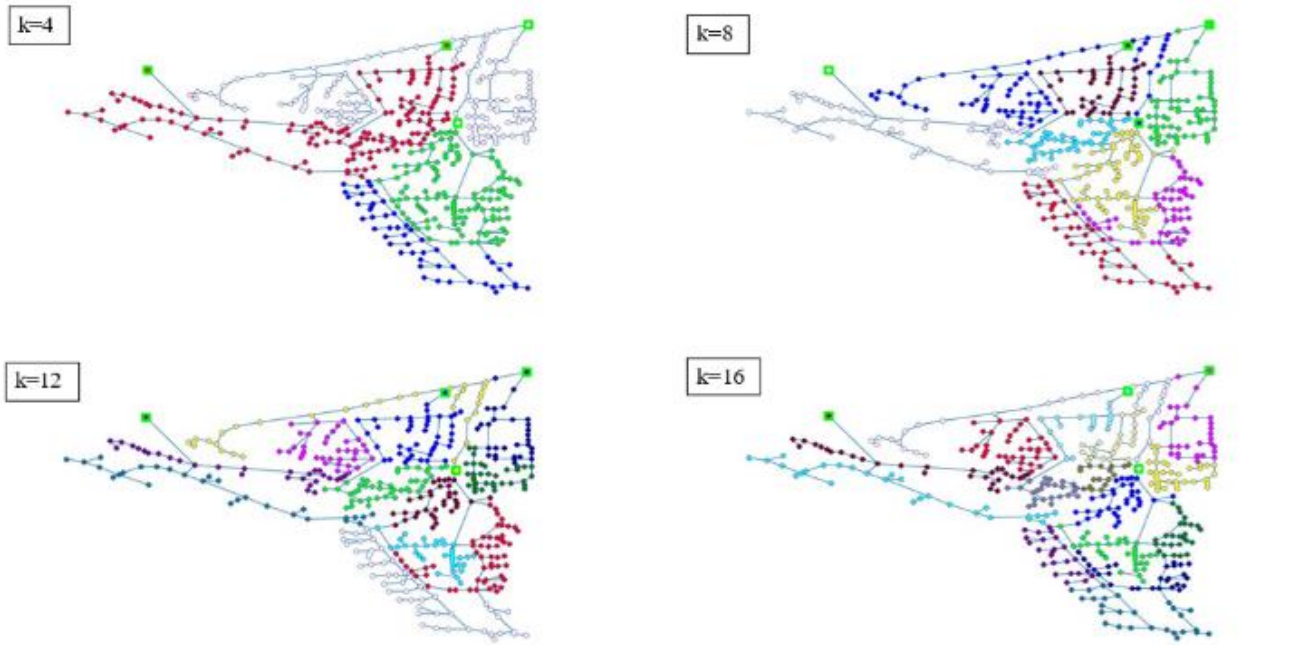
۳-۱- تحلیل شبکه بالرما به روش گیروان-نیومن

در شکل ۵ و جدول ۳ نتایج مدل‌سازی شبکه بالرما بررسی شده است. با توجه به توصیه IWA، با درنظر گرفتن این‌که پهنه‌ها بین ۴۲۰۰ تا ۵۰۰۰ مشترک را پوشش دهند و با درنظر گرفتن ۱۲۵۰ لیتر بر روز مصرف برای هر مشترک، میزان مصرف برای هر پهنه بین ۷/۲ الی ۶۰/۹ لیتر بر ثانیه محاسبه شده است. با توجه به آن‌که کل مصارف پایه شبکه ۱۲۱۸/۲ لیتر بر ثانیه است، لذا تعداد پهنه‌ها بین ۱۶ تا ۲۰ قابل محاسبه است. لیکن در این تحقیق برای کنترل دقیق‌تر بین ۲ تا ۲۰ عدد DMA بر روی شبکه بررسی‌شده است. پارامترهای هزینه‌ای و هیدرولیکی و کیفی مطابق جدول‌های ۳ و ۴ با یکدیگر مقایسه شد. با توجه به آن‌که در محدوده ۱۶ تا ۲۰ پهنه، شاخص‌های RI و DSI و M و WA و هم‌چنین نتایج فشار به یکدیگر نزدیک بوده است، لذا با توجه به محدوده پیشنهادی با درنظر گرفتن کلیه جهات هیدرولیکی، کیفی، هزینه بین ۱۶ تا ۲۰ عدد DMA به‌عنوان محدوده بهینه با کمترین هزینه ممکن درنظر گرفته می‌شود. طبعاً

در بازه معرفی‌شده تعداد بالاتر پهنه هزینه بالاتر ولوله‌های مرزی بیشتر را دارا بوده و در عوض با توجه به کوچک‌تر شدن پهنه‌ها، دقت کنترل نشت در پهنه‌ها افزایش می‌یابد.

جدول ۳- نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به روش گیروان-نیومن در شبکه بالرما

k	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰
تعداد لوله‌های مرزی	۱	۳	۵	۶	۷	۱۰	۱۲	۱۳	۱۵	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۲	۲۴	۲۶
تعداد کنتورها	۱	۳	۵	۵	۶	۹	۱۰	۱۱	۱۳	۱۵	۱۶	۱۸	۱۸	۲۰	۲۲	۲۴
تعداد شیرهای مجزاساز	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۲	۲
هزینه (¥)	۱۰۲۰۰	۱۵۴۵۵	۲۱۰۴۵	۲۱۲۷۰	۲۷۵۷۰	۳۳۲۸۰	۳۳۹۶۰	۳۸۷۶۰	۴۹۸۶۰	۵۵۹۱۰	۵۷۱۶۰	۶۲۱۹۰	۶۳۷۷۰	۶۹۳۶۰	۷۴۳۹۰	۸۲۵۰۰
RI	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۵	۱/۱۷	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۵
DSI	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۶	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۸	۰/۳۷	۰/۳۶
M	۰/۴۱	۰/۶۵	۰/۷۱	۰/۷۵	۰/۷۹	۰/۸۲	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸
WA (hr)	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶
حداقل فشار (m)	۲۰	۲۰	۲۰	۱۹/۳۱	۱۹/۳۱	۱۹/۳۱	۱۸/۴۱	۱۸/۴۱	۱۸/۴۱	۱۷/۶۱	۱۸/۴۱	۱۷/۶۱	۱۷/۶۱	۱۸/۴۱	۱۸/۴۱	۱۷/۶۱
حداکثر فشار (m)	۶۸/۴۶	۶۸/۴۶	۶۸/۴۶	۶۸/۴۲	۶۸/۴۲	۶۸/۴۲	۶۸/۲۸	۶۸/۲۸	۶۸/۲۸	۶۸/۰۶	۶۸/۲۸	۶۸/۰۶	۶۸/۰۶	۶۸/۲۸	۶۸/۲۸	۶۸/۰۶
متوسط فشار (m)	۳۲/۲۸	۳۲/۲۸	۳۲/۲۸	۳۲/۲۷	۳۲/۲۷	۳۲/۲۷	۳۲/۲۷	۳۲/۲۷	۳۲/۲۷	۳۱/۹۸	۳۲/۲۷	۳۱/۹۸	۳۱/۹۸	۳۲/۲۷	۳۲/۲۷	۳۱/۹۸
متوسط اضافه فشار (m)	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۸۹	۱۰/۸۹	۱۰/۸۹	۱۰/۸۲	۱۰/۸۲	۱۰/۸۲	۱۰/۶۴	۱۰/۸۲	۱۰/۶۴	۱۰/۶۴	۱۰/۸۲	۱۰/۸۲	۱۰/۶۴



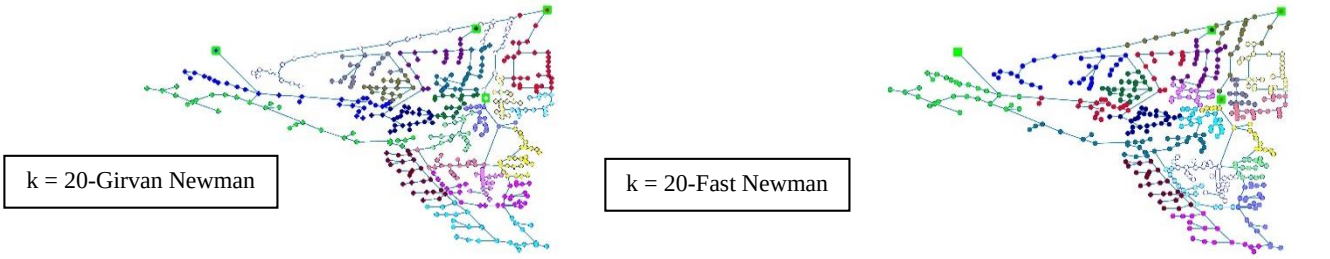
شکل ۵- نتایج ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری به‌روش گیروان-نیومن در شبکه بالرما

۳-۲- تحلیل شبکه بالرما به‌روش فست نیومن

به‌منظور انجام مقایسه بهتر بین روش خوشه‌بندی فست نیومن و گیروان-نیومن مطابق جدول ۴ تحلیل نتایج شبکه بالرما به‌روش فست نیومن انجام شده است. با مقایسه نتایج روش گیروان-نیومن و فست نیومن مطابق جدول ۴ به‌وضوح پیدا است که روش فست نیومن تعداد لوله‌های مرزی بیشتر و درنتیجه هزینه بالاتری در مقایسه با روش گیروان-نیومن دارد. به‌طور متوسط میزان افزایش هزینه در بین تمامی حالت‌ها ۹ درصد از روش گیروان-نیومن بیشتر است. ازنقطه‌نظر معیار DSI و تعداد لوله‌های مرزی و هزینه نیز مقادیر بالاتری در تعداد زون مشابه نسبت به روش گیروان-نیومن به‌دست آمده‌است. از نقطه‌نظر فشار، مطابق جدول ۴ نتایج دو روش به یکدیگر نزدیک است. در شکل ۶ نواحی مجزای اندازه‌گیری به دو روش گیروان-نیومن و فست نیومن در حالت تعداد دسته برابر ۲۰ با یکدیگر مقایسه شده است. در شکل ۶ نیز وجود لوله‌های مرزی بیشتر روش فست نیومن نسبت به روش گیروان-نیومن مشهود است.

جدول ۴- نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به‌روش فست نیومن در شبکه بالرما

k	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰
تعداد لوله‌های مرزی	۱	۶	۹	۱۲	۱۴	۱۶	۲۰	۲۲	۲۴	۲۶
تعداد کنتورها	۱	۶	۸	۱۱	۱۲	۱۴	۱۸	۲۰	۲۲	۲۳
تعداد شیرهای مجزاساز	۰	۰	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۳
هزینه (¥)	۱۰۲۰۰	۳۰۳۳۵	۴۰۶۴۰	۴۳۰۸۹	۴۹۴۶۹	۵۲۴۴۴	۶۹۵۹۴	۷۵۱۸۴	۷۸۲۴۴	۸۳۲۶۹
RI	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۵
DSI	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۱۸	۰/۲	۰/۳۴	۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۴۵	۰/۴۳	۰/۴۲
M	۰/۶۴	۰/۷۱	۰/۷۹	۰/۸۳	۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۸۸	۰/۸۸
(hr) WA	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶
حداقل فشار (m)	۲۰	۲۰	۱۸/۸۷	۱۸/۸۷	۱۷/۵۷	۱۷/۵۷	۱۷/۵۷	۱۷/۵۷	۱۷/۵۷	۱۷/۵۷
حداکثر فشار (m)	۶۸/۴۶	۶۸/۴۶	۶۸/۲۵	۶۸/۲۵	۶۷/۷۷	۶۷/۷۷	۶۷/۷۷	۶۷/۷۷	۶۷/۷۷	۶۷/۷۷
متوسط فشار (m)	۳۲/۲۸	۳۲/۲۸	۳۲/۲۴	۳۲/۲۴	۳۱/۹۵	۳۱/۹۵	۳۱/۹۵	۳۱/۹۵	۳۱/۹۵	۳۱/۹۵
متوسط اضافه فشار (m)	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۷۵	۱۰/۷۵	۱۰/۶۴	۱۰/۶۴	۱۰/۶۴	۱۰/۶۴	۱۰/۶۴	۱۰/۶۵



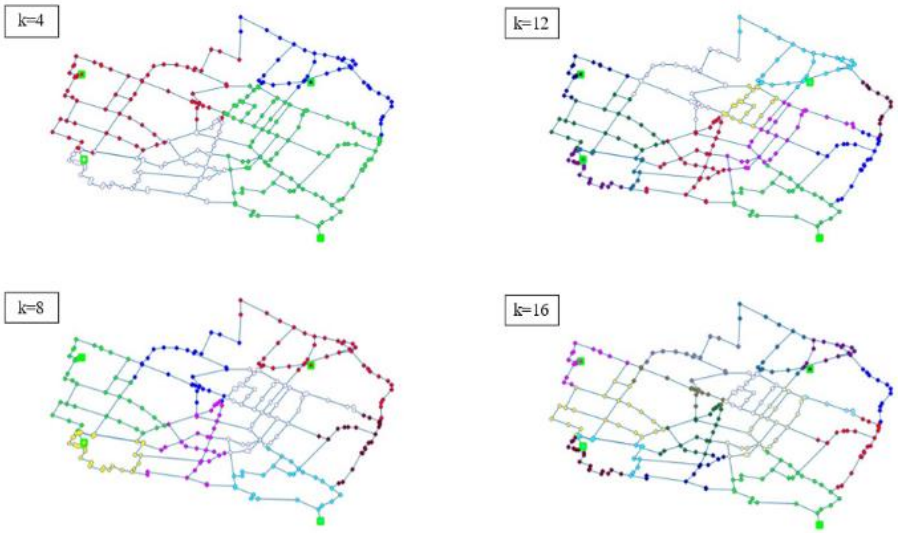
شکل ۶- مقایسه نتیجه تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به‌روش گیروان-نیومن و فست نیومن

۳-۳- تحلیل شبکه مدنا به روش گیروان-نیومن

نتایج ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری بر روی شبکه مدنا در جدول ۵ و شکل ۷ نشان داده‌شده است. با توجه به توصیه IWA و با درنظر گرفتن ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ مشترک در هر DMA و مصرف ۱۲۵۰ لیتر بر روز مصرف برای هر مشترک، میزان مصرف در هر پهنه بین ۷/۲ تا ۷۲ لیتر بر ثانیه و میزان مصرف کلی ۱۴۵/۲ لیتر بر ثانیه برای کل شبکه، تعداد پهنه‌ای مجاز بین ۲ تا ۲۰ پهنه محاسبه شد. در این تحقیق بین ۲ تا ۲۲ پهنه مورد محاسبه قرارگرفت. با درنظر گرفتن معیار پیمانگی مشاهده می‌شود، از تعداد ۴ دسته به بعد معیار پیمانگی افزایش قابل‌توجهی داشته است. در تعداد ۸ پهنه نیز مقدار معیار پیمانگی افزایش‌یافته است. هم‌چنین با توجه به نزدیک بودن شاخص‌ها در تعداد ۱۰ و ۸ پهنه و برای انتخاب هزینه کمتر تا تعداد ۸ پهنه به‌عنوان تعداد پهنه مناسب درنظر گرفته‌شده است. ضمناً ازنقطه‌نظر متوسط فشار شبکه، در تعداد پهنه بین ۶ تا ۸، مقدار متوسط فشار شبکه حدود ۹ درصد کاهش پیدا کرده و مدیریت فشار با رعایت حداقل فشار مجاز در شبکه نیز به‌طور هم‌زمان در شبکه اعمال‌شده است. لذا درمجموع تعداد ۶ الی ۸ پهنه به‌عنوان تعداد پهنه مناسب پیشنهاد می‌شود.

جدول ۵- نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به روش گیروان-نیومن در شبکه مدنا

k	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲
تعداد لوله‌های مرزی	۷	۱۵	۲۱	۲۶	۲۹	۳۳	۳۷	۴۰	۴۵	۴۹	۵۳
تعداد کنتورها	۱	۵	۶	۱۰	۱۳	۱۶	۱۸	۲۱	۲۳	۲۹	۳۲
تعداد شیرهای مجزاساز	۶	۱۰	۱۵	۱۶	۱۶	۱۷	۱۹	۱۹	۲۲	۲۰	۲۱
هزینه (¥)	۵۰۳۵	۱۳۸۱۴	۱۷۴۳۰	۲۱۶۸۰	۲۵۲۹۲	۳۰۱۹۶	۳۷۶۸۰	۳۹۶۴۴	۴۳۲۹۹	۴۷۸۴۶	۵۲۶۲۲
RI	۰/۸۶	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۸	۰/۷۹	۰/۸۱	۰/۷۸	۰/۷	۰/۷۳	۰/۶۸	۰/۷۵
DSI	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱	۰/۱
M	۰/۴۶	۰/۶۶	۰/۷۳	۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۸	۰/۷۷	۰/۷۷
(hr) WA	۱/۵۲	۱/۵۳	۱/۵۲	۱/۵۲	۱/۵۲	۱/۵۱	۱/۵	۱/۵	۱/۴۸	۱/۴۷	۱/۵
حداقل فشار (m)	۱۸/۸۷	۱۵/۴۴	۱۵	۱۵/۱۷	۱۶/۱۱	۱۶/۶۲	۱۶/۶	۱۵/۲۶	۱۵/۵۱	۱۵/۰۴	۱۵/۰۵
حداکثر فشار (m)	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۶۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲
متوسط فشار (m)	۲۷/۸۵	۲۶/۸۳	۲۶/۸۹	۲۶/۷۵	۲۶/۸۶	۲۷/۱۵	۲۶/۷۳	۲۵/۴۴	۲۶/۰۱	۲۵/۲۱	۲۶/۲۱
متوسط اضافه فشار (m)	۵/۵۸	۶/۴۴	۶/۴۷	۶/۵۸	۶/۱۹	۶/۱۶	۵/۰۹	۶/۴۱	۶/۵	۶/۳۸	۶/۲۳



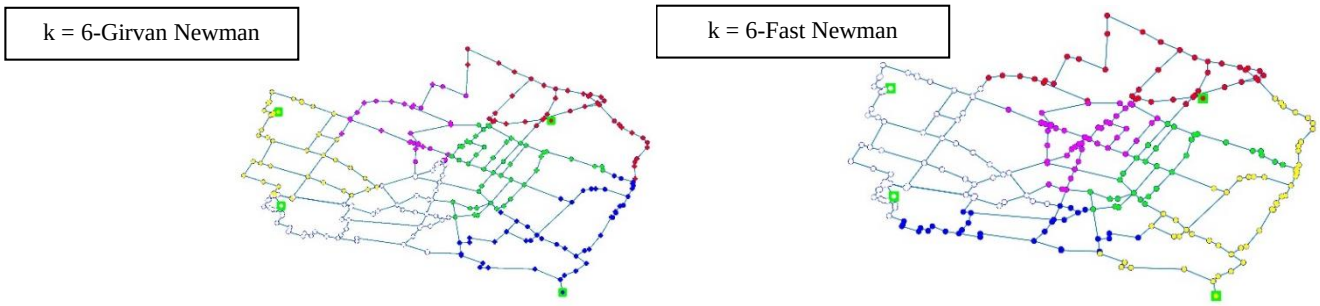
شکل ۷- نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به‌روش گیروان-نیومن در شبکه مدنا

۳-۴- تحلیل شبکه مدنا به‌روش فست نیومن

در جدول ۶ نتایج ناحیه بندی شبکه توزیع آب شهری مدنا نشان داده‌شده است. با مقایسه نتایج روش فست نیومن با روش گیروان-نیومن می‌توان نتیجه گرفت که در شبکه مدنا هر دو روش نتایج نزدیک به یکدیگر داشته‌اند. به‌طوری‌که در برخی حالت‌ها هزینه و لوله‌های مرزی یک روش برتری هزینه‌ای نسبت به روش دیگر داشته است. طبعاً این موضوع به شکل شبکه وابسته است. لیکن در محدوده درنظر گرفته‌شده به‌عنوان محدوده بهینه جواب، روش گیروان-نیومن نسبت به‌روش فست نیومن هزینه کمتری داشته و به‌عنوان روش منتخب درنظر گرفته می‌شود. در شکل ۸ مقایسه نتایج فشار تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به‌روش گیروان-نیومن و فست نیومن نشان داده شده است.

جدول ۶- نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به روش فست نیومن در شبکه مدنا

k	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲
تعداد لوله‌های مرزی	۱۰	۱۹	۲۳	۲۸	۳۱	۳۴	۳۷	۴۱	۴۴	۴۷	۵۰
تعداد کنتورها	۴	۷	۸	۹	۱۱	۱۶	۱۶	۱۹	۲۱	۲۴	۲۴
تعداد شیرهای مجزاساز	۶	۱۲	۱۵	۱۹	۲۰	۱۸	۲۱	۲۲	۲۳	۲۳	۲۶
هزینه (¥)	۱۲۶۵۹	۱۸۲۰۹	۲۰۶۵۹	۲۳۰۰۳	۲۶۰۰۱	۲۹۶۵۸	۳۱۲۲۷	۳۴۰۹۷	۳۷۵۰۳	۴۰۶۶۳	۴۱۹۶۹
RI	۰/۸۸	۰/۷۷	۰/۸۱	۰/۷۹	۰/۷۴	۰/۷	۰/۷۵	۰/۷۴	۰/۷۳	۰/۷۱	۰/۶۵
DSI	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۲
M	۰/۴۲	۰/۶۴	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۷	۰/۷۶۹	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۷۶
WA (hr)	۱/۵۳	۱/۵۱	۱/۵۱	۱/۴۹	۱/۴۸	۱/۴۹	۱/۴۹	۱/۴۹	۱/۴۹	۱/۴۸	۱/۴۶
حداقل فشار (m)	۱۸/۵۹	۱۶/۰۵	۱۶/۴۹	۱۶/۱۱	۱۵/۰۳	۱۵/۰۳	۱۶/۳۷	۱۶/۲۸	۱۵/۲۶	۱۶/۴۶	۱۶/۰۸
حداکثر فشار (m)	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲
متوسط فشار (m)	۲۸/۱۹	۲۶/۴۸	۲۷/۱۲	۲۶/۸۱	۲۶/۱۳	۲۵/۴۶	۲۶/۲۷	۲۶/۱۵	۲۵/۹۲	۲۵/۶۳	۲۴/۷۱
متوسط اضافه فشار (m)	۴/۲۸	۶/۱۷	۵/۴	۵/۴۸	۶/۱۵	۶/۹۱	۶/۲۱	۶/۲۱	۶/۳۷	۶/۷۵	۶/۳۱



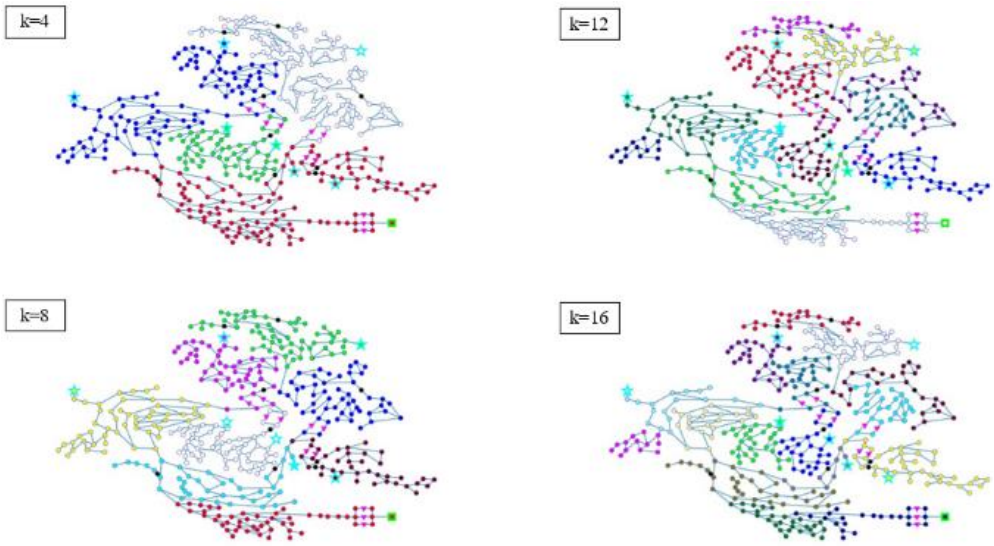
شکل ۸- مقایسه نتایج فشار تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به‌روش گیروان-نیومن و فست نیومن

۳-۵- تحلیل شبکه دی-تاون به‌روش گیروان-نیومن

با توجه به آنکه مصرف شبکه دی-تاون ۳۸۸ لیتر بر ثانیه است و با درنظر گرفتن تعداد مشترکین بین ۱۱۰۰ تا ۵۰۰۰، تعداد پهنه‌ها بین ۵ تا ۲۴ محاسبه شده است. لیکن در این تحقیق بین ۲ تا ۲۴ کلاستر موردبررسی قرارگرفته است. در جدول ۷ و شکل ۹ نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به‌روش گیروان-نیومن نشان داده شده است. معیار پیمانگی در تعداد ۸ و ۱۰ پهنه به‌مقدار ۰/۷۹ رسیده است. در تعداد ۱۲ پهنه نیز مقدار پیمانگی ثابت مانده است. هم‌چنین از نقطه‌نظر هزینه نیز اختلاف بین ۸ تا ۱۰ پهنه نسبت به فاصله سایر پهنه‌ها کمتر است. ضمناً مقدار مصرف این شبکه نیز نسبت به شبکه مدنا بالاتر است و لذا برای افزایش دقت کنترل نشت، افزایش تعداد دسته‌ها نسبت به شبکه مدنا دقت عملیات نشت‌یابی را افزایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد ایجاد DMA در این شبکه منجر به کاهش ۲ درصدی متوسط فشار شبکه شده است. سایر شاخص‌ها نظیر RI، DSI و فشار در بین پهنه‌ها در این محدوده اختلاف قابل‌توجهی با یکدیگر نداشته و عملاً معیار هزینه (تعداد لوله‌های مرزی) و پیمانگی در تعیین بازه بهینه تعداد پهنه‌ها اثرگذار هستند.

جدول ۷- نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به روش گیروان-نیومن در شبکه دی-تاون

k	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۴
تعداد لوله‌های مرزی	۱	۳	۵	۷	۹	۱۱	۱۴	۱۷	۱۹	۲۳	۲۵	۲۷
تعداد کنتورها	۰	۲	۴	۶	۸	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۹	۲۰
تعداد شیرهای مجزاساز	۱	۱	۱	۱	۱	۳	۴	۵	۵	۷	۶	۷
هزینه (¥)	۴۵۷۵	۸۹۰۵	۲۲۸۸۵	۲۷۲۱۵	۲۸۸۶۵	۳۶۴۸۰	۴۸۳۳۰	۵۴۰۷۹	۵۸۵۳۴	۶۸۶۳۸	۸۱۳۵۸	۸۵۲۲۷
RI	۲/۳۸	۲/۳۸	۲/۳۸	۲/۳۸	۲/۳۸	۲/۴	۲/۴۱	۲/۳	۲/۱۸	۲/۳	۲/۳	۲/۵۲
DSI	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۹
M	۰/۴۵	۰/۶۶	۰/۷۶	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۷۸	۰/۷۷	۰/۷۷
حداقل فشار (m)	۲۰/۹۳	۲۰/۹۳	۲۰/۹۳	۲۰/۹۳	۲۰/۹۳	۲۱/۶۳	۲۱/۶۳	۱۶/۲۷	۱۵/۵۵	۱۴/۳۲	۱۶/۲۷	۲۱/۳۶
حداکثر فشار (m)	۸۱/۵۷	۸۱/۵۷	۸۱/۵۷	۸۱/۵۷	۸۱/۵۷	۸۵/۱۶	۸۵/۱۶	۸۴/۹۹	۸۵/۱۳	۸۴/۹۹	۸۴/۹۹	۸۴/۹۹
متوسط فشار (m)	۵۰/۱۸	۵۰/۱۸	۵۰/۱۸	۵۰/۱۸	۵۰/۱۸	۵۰/۵۲	۵۰/۵۷	۴۹/۰۶	۴۷/۲۹	۴۹	۴۹/۰۳	۵۲/۱۹
متوسط اضافه فشار (m)	۱۶/۰۷	۱۶/۰۷	۱۶/۰۷	۱۶/۰۷	۱۶/۰۷	۱۶/۶۷	۱۶/۵۹	۱۷/۶۷	۱۶/۶	۱۷/۸	۱۷/۶۸	۱۷/۲۲



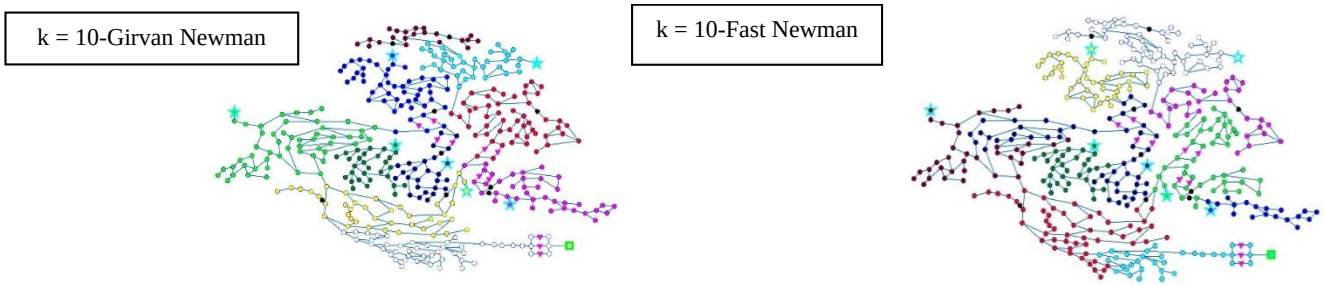
شکل ۹- مقایسه نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به‌روش گیروان-نیومن در شبکه دی-تاون

۳-۶- تحلیل شبکه دی-تاون به‌روش فست نیومن

در جدول ۸ و شکل ۱۰ نتایج شبکه دی-تاون به‌ازای ۲ تا ۲۴ حالت نشان داده‌شده است. با مقایسه نتایج روش فست نیومن با روش گیروان-نیومن می‌توان نتیجه گرفت که در شبکه مدنا هر دو روش نتایج نزدیک به یکدیگر داشته‌اند. به‌طوری‌که در برخی حالت‌ها هزینه و لوله‌های مرزی یک روش برتری هزینه‌ای نسبت به‌روش دیگر داشته است. لیکن در محدوده درنظر گرفته‌شده به‌عنوان محدوده بهینه جواب، روش گیروان-نیومن نسبت به روش فست نیومن هزینه کمتری داشته است. لذا روش گیروان-نیومن به‌عنوان روش پیشنهادی در مقایسه با روش فست نیومن درنظر گرفته می‌شود. در شکل ۱۰ مقایسه نتایج بین روش گیروان-نیومن و فست نیومن نشان داده شده است.

جدول ۸- نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به‌روش فست نیومن در شبکه دی-تاون

k	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۴
تعداد لوله‌های مرزی	۱	۴	۱۳	۱۷	۱۹	۲۴	۲۶	۲۸	۳۰	۳۲	۳۵	۳۷
تعداد کنتورها	۰	۱	۳	۳	۴	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۵	۱۶	۱۹
تعداد شیرهای مجزاساز	۱	۳	۱۰	۱۴	۱۵	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۷	۱۹	۱۸
هزینه (¥)	۴۵۷۵	۱۰۹۸۵	۲۹۰۶۰	۳۲۳۰۵	۳۳۶۵۵	۴۵۹۹۸	۴۸۷۶۸	۵۱۸۲۸	۵۴۸۸۸	۵۹۷۴۳	۶۲۶۶۳	۷۰۲۳۲
RI	۲/۳۸	۲/۳۹	۲/۳۳	۲/۲۸	۲/۲۸	۲/۲۸	۲/۲۸	۲/۲۸	۲/۲۹	۲/۲۶	۲/۲۸	۲/۲۵
DSI	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۲
M	۰/۴۴۵	۰/۷۰۱	۰/۷۸۸	۰/۸۱۱	۰/۸۲۳	۰/۸۲۸	۰/۸۲۸	۰/۸۲۸	۰/۸۲۷	۰/۸۲۷	۰/۸۲۷	۰/۸۲۶
حداقل فشار (m)	۲۰/۹۳	۲۰/۹۷	۲۰/۹۷	۲۱/۰۱	۲۱/۷۸	۲۱/۰۱	۲۱/۸۱	۲۱/۸۱	۲۱/۰۱	۲۰/۱۶	۲۱/۸۱	۱۶/۷۲
حداکثر فشار (m)	۸۱/۵۷	۸۱/۵۸	۸۱/۷۶	۸۷/۴۷	۸۷/۴۴	۸۷/۴۴	۸۷/۴۴	۸۷/۴۴	۸۷/۴۴	۸۷/۴۴	۸۷/۴۴	۸۷/۴۴
متوسط فشار (m)	۵۰/۱۸	۵۰/۳۹	۴۹/۴۱	۴۸/۷۵	۴۸/۶۹	۴۸/۶۵	۴۸/۷۱	۴۸/۷۱	۴۸/۸۷	۴۸/۳۹	۴۸/۷۱	۴۸/۳۱
متوسط اضافه فشار (m)	۱۶/۰۷	۱۶/۱	۱۵/۴۹	۱۶/۲۳	۱۶/۲۱	۱۶/۱۵	۱۶/۰۲	۱۶/۰۲	۱۶/۲۵	۱۶/۴۲	۱۶/۰۱	۱۶/۴۹



شکل ۱۰- مقایسه نتایج تشکیل DMA به روش گیروان-نیومن و فست نیومن در شبکه دی-تاون

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر روش جدیدی برای تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری برای شبکه‌های توزیع آب مخصوصاً شبکه‌های قدیمی ارائه شد. روش پیشنهادشده بر روی سه شبکه بالرما، مدنا و دی-تاون به دو روش خوشه‌بندی گیروان-نیومن و فست نیومن اجرا شد. نتایج نشان‌داد که روش خوشه‌بندی گیروان-نیومن نسبت به‌روش فست نیومن ازنظر تعداد لوله‌های مرزی، برای سه مسئله بررسی‌شده هزینه پایین‌تری داشته است. در بین شاخص‌های مورد بررسی، شاخص هزینه و شاخص پیمانگی اثرگذاری بیشتری در تعیین محدوده تعداد پهنه بهینه داشتند. ضمناً نتایج نشان‌داد پهنه‌بندی در شبکه‌های توزیع آب مورد بررسی، سبب کاهش متوسط فشار بین ۲ تا ۹ درصد شبکه شده است که خود باعث کاهش نرخ نشت، حوادث شبکه و افزایش عمر شبکه خواهد شد. استفاده هم‌زمان معیارهای هیدرولیکی، کیفی (سن آب) و هزینه‌بر انتخاب بهینه نواحی مجزا در شبکه توصیه می‌شود.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- Districted Metered Areas
2- Balerma
3- Modena
4- D-town
5- Girvan-Newman
6- Fast-Newman
7- Modularity
8- Clustering
9- Genetic Algorithm
10- EPANET
11- International Water Association (IWA)
12- Night Flow
13- The Water Loss Task Force
14- Water Age
15- Community structure
16- Graph Theory
17- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
18- Louvain-type Greedy
19- Modularity
20- Simulated Annealing for Multi Objective
21- Breadth-First Search
22- Dijkstra's Algorithm
23- Self-Organized Map
24- Community Structure Algorithm
25- Multiple-Criteria Decision Analysis
26- Community Detection

۶- مراجع

صادقی، ع ر.، جوادیان‌زاده، م م.، و پوردارا، ه.، (۱۴۰۰)، "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"، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۷(۲)، ۱۴۲-۱۵۳.

OP310، (۱۴۰۰)، *دستورالعمل ملاحظات اجرا و تکمیل پهنه‌بندی شبکه توزیع آب*، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، معاونت راهبردی و نظارت بر بهره‌برداری، ۹-۵۵.

Bader, D.A., Meyerhenke, H., Sanders, P., and Wagner, D., (2013), *Graph partitioning and graph clustering*, American Mathematical Society Providence, RI.

Bianchotti, J.D., Denardi, M., Castro-Gama, M., and Puccini, G.D., (2021), "Sectorization for water distribution systems with multiple sources: A performance indices comparison", *Water*, 13(2), 131.

Bragalli, C., D′Ambrosio, C., Lee, J., Lodi, A., and Toth, P., (2012), "On the optimal design of water distribution networks: a practical MINLP approach", *Optimization and Engineering*, 13(2), 219-246.

Bui, X.K., Marlim, M.S., and Kang, D., (2021), "Optimal design of district metered areas in a water distribution network using coupled self-organizing map and community structure algorithm", *Water*, 13(6), 836.

Grayman, W.M., Murray, R., and Savic, D.A., (2009), "Effects of redesign of water systems for security and water quality factors", In: *World Environmental and Water Resources Congress 2009*, Great Rivers, (pp. 1-11), https://doi.org/10.18063/JSC.2015.01.004.

Liu, J., and Han, R., (2018), "Spectral clustering and multicriteria decision for design of district metered areas", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(5), 04018013.

Mambretti, S., Raimondi, A., and Stroppa, F.F., (2021), "Graph theory and community detection for elementary DMA design", *Sustainable Water Resources Management XI: Effective Approaches for River Basins and Urban Catchments*, 250, 121 Effective.

Marchi, A., Salomons, E., Ostfeld, A., Kapelan, Z., Simpson, A.R., Zecchin, A.C., Maier, H.R., Wu, Z.Y., Elsayed, S.M., and Song, Y., (2014), "Battle of the water networks II", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(7), 04014009.

Newman, M.E., and Girvan, M., (2004), "Finding and evaluating community structure in networks". *Physical Review E*, 69(2), 026113.

Pearson, D., (2019), *Standard definitions for water losses*, IWA Publishing, London, UK.

Reca, J., Martinez, J., Banos, R., and Gil, C., (2008), "Optimal design of gravity-fed looped water distribution networks considering the resilience index", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(3), 234-238.

Sharma, A.N., Dongre, S.R., Gupta, R., Pandey, P., and Bokde, N.D., (2022), "Partitioning of water distribution network into district metered areas using existing valves", *CMES-Computer Modeling in Engineering and Sciences*,131(3), 1515-1537.

Todini, E., (2000), "Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach", *Urban Water*, 2(2), 115-122.

Yao, H., Zhang, T., Shao, Y., Yu, T., and Lima Neto, I.E., (2021), "Improved modularity-based approach for partition of Water Distribution Networks", *Urban Water Journal*, 18(2), 69-78.

Zeidan, M., Li, P., and Ostfeld, A., (2021), "DMA segmentation and multiobjective optimization for trading off water age, excess pressure, and pump operational cost in water distribution systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(4), 04021006.

Zhang, T., Yao, H., Chu, S., Yu, T., and Shao, Y., (2021), "Optimized DMA partition to reduce background leakage rate in water distribution networks". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(10), 04021071.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.