Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
DOI: 10.22112/JWWSE.2023.378266.1341

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب

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]، احمد شرافتی[۴]

۱– گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Mohammadkakeshpoor@yahoo.com

۲–گروه عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، M_jalili@sbu.ac.ir

۳- گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

۴- گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Asharafati@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۶
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۳/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۵

چکیده

تخمین هدر رفت، 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 به ارائه یک روش جهت ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری با شاخص‌های انتخاب بهینه پرداخته 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، جهت 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 گردید و به کمک شاخص‌های هزینه‌ای، هیدرولیکی و کیفی نتایج پهنه‌بندی حاصل تحقیق مورد تحلیل قرارگرفته 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

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

Mohammad Kakeshpour[1], Mohammadreza Jalili Ghazizadeh*[2], Seyed abbas

Hoseyni [3], Ahmad Sharafati[4]

1- Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Mohammadkakeshpoor@yahoo.com

2- Department of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, M_jalili@sbu.ac.ir

3- Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

4- Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Asharafati@srbiau.ac.ir

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

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 is 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 have 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.

۱- مقدمه

ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری در شبکه‌های توزیع آب دارای مزیت‌های زیادی است. از این جمله می‌توان به کنترل نشت به کمک 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 هدر رفت واقعی استفاده از روش‌های نشت‌یابی و اندازه‌گیری جریان شبانه[۱۲] به کمک ناحیه‌های مجزای اندازه‌گیری است(OP310, 2020). 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 به‌عبارتی‌دیگر 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 جهت پهنه‌بندی فشاری جهت 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, 2020). 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. هدر رفت واقعی شامل سه جزء هدر رفت آب ناشی از نشت و شکستگی‌های گزارش‌شده، هدر رفت 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 گردد که ناحیه مجزای اندازه‌گیری یا DMA نامیده می‌شود. این مناطق به‌عنوان بخش‌هایی از یک شبکه که شامل دبی سنج‌های 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 دبی سنج در ورودی و خروجی آن، با اهداف کنترل و کاهش هدر رفت 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 در نظر گرفته شود سبب افزایش هزینه‌های پایش نظیر دبی‌سنج‌ها، دیتالاگرها، شیرها و اگر خیلی بزرگ در نظر 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 باشند. می‌توان جهت کاهش هزینه نصب تجهیزات کنترلی اضافه و تسهیل در بهره‌برداری، امکان مجزا سازی خطوط اصلی شبکه خارج از DMA را در نظر 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 گردد(Christodoulou et al.; Pearson. 2019). بنابراین در نظر 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) به بررسی 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 پرداختند. در این تحقیق ابتدا شبکه شهر تفت در استان یزد در نرم‌افزار ایپنت مدل شد و بااتصال ایپنت به نرم‌افزار متلب و بارگذاری مشخصات شبکه، با استفاده از الگوریتم ساختار جامعه، شبکه به‌صورت خودکار خوشه‌بندی شد. در مرحله ناحیه بندی 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) به تحقیق بر روی بهینه‌سازی DMA جهت کاهش نرخ نشت زمینه در شبکه‌های توزیع آب پرداختند. 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 جهت زون بندی نواحی بزرگ با در نظر گرفتن یکنواختی ارتفاعی DMA ها و یکنواختی تقاضای DMA ها 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 به دست آمد. درنهایت شیرهای فشارشکن در هر ورودی لوله نصب و جهت کاهش نشت بهینه شدند. نتایج نشان داد که ترکیب مدیریت فشار و روش تحقیق پارتیشن‌بندی می‌تواند با کنترل اضافه ظرفیت فشار بر کاهش میزان نشت مؤثر باشد. Zeidan et al. (2021) به تحقیق بر روی تقسیم‌بندی DMA و بهینه‌سازی چندهدفه بر روی سن آب، اضافه فشار، هزینه عملیاتی پمپ در شبکه توزیع آب پرداختند. در این تحقیق یک رویکرد ابتکاری چندهدفه برای تقسیم‌بندی و عملکرد شبکه‌های توزیع آب ارائه شد. روش تحقیق یک رویکرد دومنظوره بکار گرفت. ابتدا یک روش ابتکاری برای تقسیم‌بندی شبکه به چند DMA بر اساس تحلیل اتصال صورت گرفت. دومین رویکرد به‌کارگیری روش بهینه‌سازی چندهدفه NSGAII[۱۷] برای کاهش هزینه‌های عملیاتی، اضافه فشار و سن آب در شبکه توزیع آب شهری را بکار برد. جهت 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) به تحقیق بر روی پارت‌بندی شبکه توزیع آب شهری با چندین منبع با مقایسه چندین شاخص پرداختند. در این تحقیق یک رویکرد دومرحله‌ای برای طراحی DMA ها ارائه شد. در گام اول خوشه‌بندی سیستم بر اساس الگوریتم لوبین از نوع حریصانه[۱۸] برای بیشینه‌سازی پیمانگی[۱۹] تامیم یافت. در گام دوم تقسیم‌بندی فیزیکی سیستم بر اساس مسئله بهینه‌سازی دوهدفه که در نسخه SMOSA[۲۰] بکار برده و جهت مدلسازی بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شد. یک هدف تعیین تعداد شیرهای جداسازی بود. برای دومین هدف سه شاخص تحلیل و مقایسه شدند. ۱) یک انحراف معیار استاندارد ۲) ضریب جینی ۳) تاب‌آوری. روش تحقیق بر روی دو نمونه مطالعاتی و با دو شاخص عملکردی در شرایطی که تقاضا در DMA ها مشابه بودند بکار برده شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی جهت زون بندی DMA های مستقل، با تقاضاهای مشابه مؤثر بوده است. Mambretti et al. (2021) با استفاده از تئوری گراف و الگوریتم یافتن جامعه به طراحی ابتدایی DMA پرداختند. در این تحقیق باهدف طراحی ابتدایی DMA ها و با استفاده از روش تئوری گراف و الگوریتم جامعه ساختاریافته بر روی شبکه توزیع آب میلانو بکار برده شد. این شبکه بسیار پیچیده و حلقه‌ای بوده و به حدود دو میلیون نفر خدمت‌رسانی می‌کند. در ابتدا شبکه به ۲۷، DMA ابتدایی تفکیک شده و به تعداد ایستگاه‌های پمپاژ فعال که از سه تقسیم‌بندی شبکه شامل الگوریتم جامعه ساختاریافته و تئوری گراف است، بدست آمد. برخلاف سایر روش‌های پارتیشن‌بندی، بیشینه ابعاد هر DMA ابتدایی از قبل محدود نشده و لذا نواحی تولیدشده بزرگ‌تر خواهند بود. سپس یک الگوریتم ساده جهت تبدیل DMA های ابتدایی به DMA های دینامیکی جهت کاهش انرژی مصرفی و فشار سراسری در شبکه بکار بده شد. نتایج نشان داد که هر دوجنبه بهبود پیداکرده است و لذا پژوهش توجیه‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. ضمناً جهت بکارگیری تئوری گراف از الگوریتم جستجوی اولین پهنا (BFS[۲۱]) و الگوریتم دایجسترا[۲۲] استفاده شد. همچنین جهت خوشه‌بندی از الگوریتم‌های گیروان-نیومن و الگوریتم گیروان-نیومن اصلاح‌شده استفاده شد. Bui et al. (2021) به تحقیق بر روی طراحی بهینه DMA در یک شبکه توزیع آب با استفاده از نقشه خودسازمان‌ده یا SOM[۲۳] و الگوریتم ساختار اجتماع (CSA[۲۴]) پرداختند. این تحقیق به طراحی بهینه DMA در چهارچوب معیار تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDA[۲۵]) بر اساس خروجی مدل ترکیبی SOM و CSA پرداخت. در ابتدا اصل خوشه‌بندی الگوریتم SOM برای ساخت خوشه‌های همسان بر اساس فشار و ارتفاع به‌کاربرده شد. سپس CSA جهت تصحیح SOM خوشه‌های

اولیه برای ساخت خودکار چند مقیاسه و پویای طرح‌های DMA ترکیب شد. درنهایت، معیاری برای تعیین عملکرد هر طرح ارائه‌شده DMA در ساختار MCDA تعیین شد. صحت‌سنجی مدل بر اساس شبکه فرضی و مدل واقعی شبکه توزیع آب انجام و مشخص شد که این مدل می‌تواند طرح‌های DMA های فرضی و پویای متناسب با تقاضاهای آبی متغیر را فراهم آورد. Sharma et al. (2022) به تحقیق بر روی پهنه‌بندی DMA شبکه توزیع آب شهری با استفاده از شیرهای موجود پرداختند. روش تحقیق پیشنهادی برای یافتن خوشه‌ها و کاهش هزینه شیرها و پارت بندی DMA ها با در نظر گرفتن شیرهای موجود عمل کرده است. روش یافتن DMA ها به سه مرحله تقسیم می‌شود. ۱-شناسایی خوشه‌ها ۲-پارت بندی یا بهینه‌سازی مرزها ۳-ارزیابی عملکرد شبکه پارتیشن‌بندی شده. روش تحقیق پیشنهادی بر روی یک شبکه ساده و شبکه واقعی با یافتن و مقایسه DMA ها ارزیابی شد. در این تحقیق از الگوریتم BFS برای پارتیشن‌بندی و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مرزها استفاده شد.

در تحقیق حاضر (۲۰۲۳) به ارائه یک روش جهت ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری پرداخته شد. بدین منظور در مرحله خوشه‌بندی به کمک دو روش گیروان-نیومن و فست نیومن به پهنه‌بندی شبکه توزیع آب شهری سه شبکه بالرما، مدنا و دی تاون پرداخته‌شده است. این خوشه‌بندی بر اساس معیار پیمانگی انجام پذیرفته است. بر اساس این معیار میزان ارتباط بین گره‌های درون خوشه‌ای حداکثر و میزان ارتباط بین خوشه‌ها حداقل می‌گردد. این موضوع سبب حداقل شدن لوله‌های رابط در هنگام ناحیه‌بندی می‌شود. در گام دوم، ناحیه‌بندی فیزیکی نیز جهت تعیین تکلیف لوله‌های رابط با معیار حداقل‌سازی هزینه در هنگام انتخاب شیرهای مجزاسازی و همچنین کنتورهای آب در نظر گرفته شد. در واقع در هر دوگام پهنه‌بندی شبکه توزیع آب حداقل‌سازی هزینه ایجاد DMA در دستور کار قرار گرفت. همچنین نتایج روش‌های گیروان-نیومن و فست نیومن با یکدیگر مقایسه شد. 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 گردید.

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

۲- مبانی نظری

به‌منظور تبدیل شبکه‌های سنتی موجود توزیع آب به شبکه‌های دارای هم‌زمان نواحی مجزای اندازه‌گیری با رعایت فشار حداقل موردنیاز و سایر پارامترهای هیدرولیکی در این تحقیق به ارائه یک مدل بهینه پرداخته شد. ضرورت بازطراحی و تبدیل شبکه‌هایی که این رویکرد در آن‌ها نادیده گرفته‌شده است، به 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 صورت گیرد. گراف مجموعه‌ای از نقاط و خطوط متصل‌به‌هم 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 ولوله‌ها است، می‌توان آن‌ها را به‌عنوان یک گراف در نظر گرفت. در شبیه‌سازی شبکه آب با استفاده از تئوری گراف می‌توان گره‌های مصرف و مخازن شبکه را رأس‌های گراف (V) ولوله‌ها، پمپ‌ها و شیرهای شبکه را همچون یال‌های گراف (E) در نظر 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 خوشه‌بندی گراف‌ها بر مبنای معیار پیمانگی می‌پردازد. ازآنجایی‌که 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 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، ls برابر با تعداد یال‌های موجود s، ds برابر با مجموع درجه‌های کلیه گره‌های موجود در جامعه s و m برابر با تعداد کل یال‌ها است. هرچه مقدار Q بیشتر باشد ناحیه‌بندی بهتری صورت گرفته است. پیمانگی ابتدا به‌عنوان معیاری جهت تعیین مرحله توقف الگوریتم گیروان-نیومن موردتوجه بود، ولی به‌سرعت جزء مهم‌ترین معیارهای الگوریتم‌های تشخیص جوامع تبدیل شد. حداکثر مقدار پیمانگی زمانی به دست می‌آید که تمامی رئوس خوشه به هم متصل باشند و یالی خوشه‌ها را به هم 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 بر اساس قطر لوله‌های مرزی میان پهنه‌ها محاسبه می‌گردد.

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

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

جدول ۱- هزینه تهیه و نصب کنتورها و شیرهای مجزاساز بر اساس 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 پارتیشن‌بندی که لوله‌های مرزی تعیین تکلیف می‌گردند، استفاده از کنتور و یا شیر مجزاساز بر اساس تابع هدف مورد استفاده و محدودیت ناشی از قید در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس مقدار تابع هدف در این مسئله بر اساس هزینه مطابق رابطه (۳) و محدودیت‌های بهینه‌سازی نیز مطابق رابطه (۴) تعریف شده است.

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

به‌منظور جلوگیری از ایجاد افت فشار گرهی در شبکه در اثر ایجاد DMA قید فشار به‌صورت رابطه (۴) در نظر گرفته می‌شود.

$$\boldsymbol{Subject\ to: h_i \geq h_i^*} \quad (۴)$$

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

۲-۳-۲-شاخص تاب‌آوری (I_r)

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

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

جایی 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، فشار h_i^* حداقل فشار متوسط گرهی که در تحقیق حاضر ۱۵ متر در نظر گرفته شد.

۲-۱-۲-شاخص تشابه تقاضای گرهی(DSI)

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

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

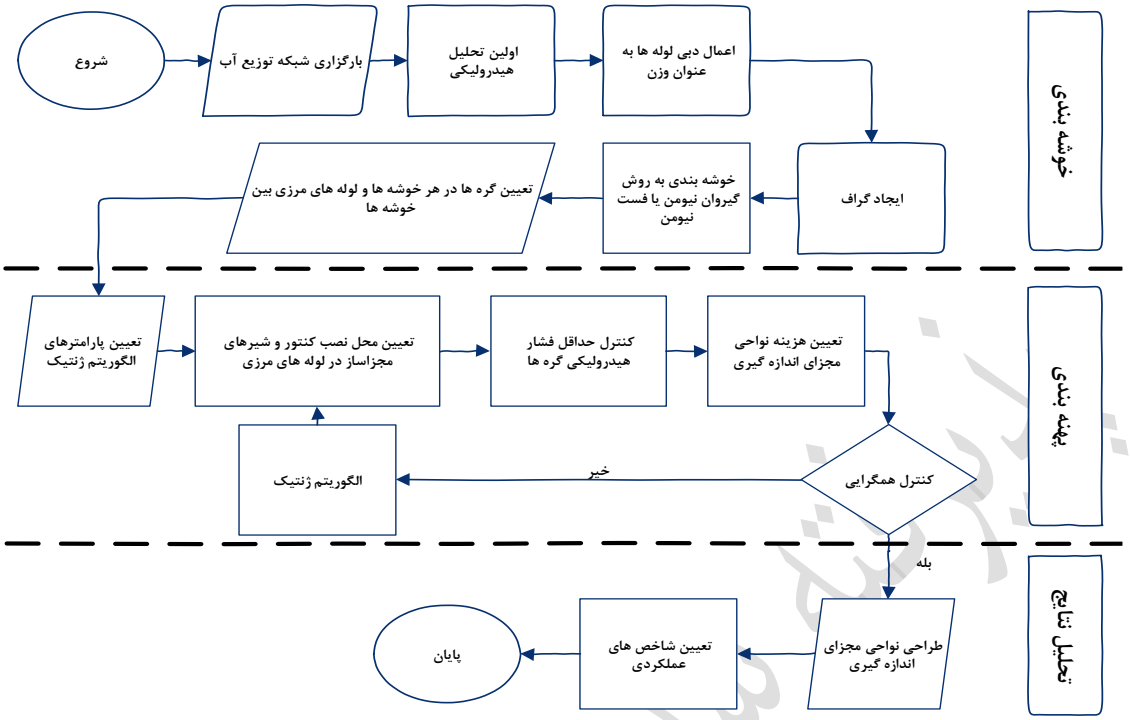
که K تعداد DMA و Q_d تقاضای گرهی در DMA k ام و Q_{mean} متوسط تقاضای گرهی در کل شبکه توزیع آب شهری است.

۲-۳-۳-سن آب(WA)

سن آب زمان موردنیاز برای ذرات سیال جهت 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 می‌گردد.

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

$\overline{WA}$ 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 صورت گرفته 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 غالب 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 می‌گردند. درنهایت با مشخص شدن DMA ها با تعداد مختلف تجزیه‌وتحلیل نتایج جهت تعیین حالت بهینه پهنه‌بندی با توجه به شاخص‌های هیدرولیکی، هزینه‌ای و کیفی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱- روندنمای انجام روش تحقیق

۲-۴- شبکه موردمطالعه

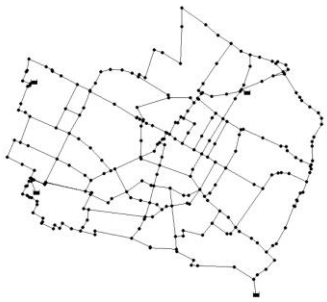
در این تحقیق از سه شبکه توزیع آب شهری بالرما، مدنا و دی تاون استفاده شده است. مشخصات شبکه بالرما در جدول (۲) و شکل (۲) مشخصات شبکه مدنا در جدول (۲) و شکل (۳) و در نهایت مشخصات شبکه دی در جدول (۲) و شکل (۴) نشان داده‌شده است.

جدول ۲- مشخصات شبکه‌های بالرما (Reca et al., 2008)**، مدنا** (Bragalli et al., 2012) **و دی تاون** (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

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

شکل ۲- نمای کلی شبکه بالرما



شکل ۳- نمای کلی شبکه مدنا

شکل ۴- نمای کلی شبکه دی تاون

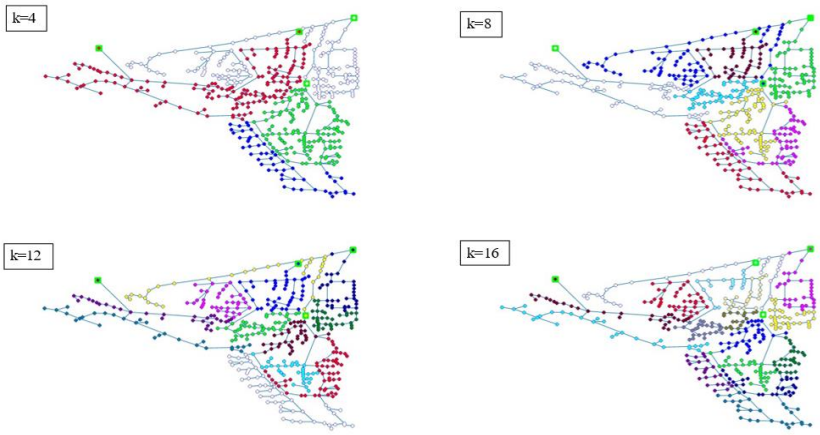
۳-نتایج و بحث

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

در شکل (۵) و جدول (۵) به بررسی نتایج مدلسازی شبکه بالرما پرداخته شده است. با توجه به توصیه IWA، با در نظر گرفتن اینکه پهنه‌ها بین ۴۲۰۰ تا ۵۰۰۰ مشترک را پوشش دهند و با در نظر گرفتن ۱۲۵۰ لیتر بر روز مصرف برای هر مشترک میزان مصرف برای هر پهنه بین ۷/۲ الی ۶۰/۹ لیتر بر ثانیه محاسبه گردیده است. با توجه به آنکه کل مصارف پایه شبکه ۱۲۱۸/۲ لیتر بر ثانیه است لذا تعداد پهنه‌ها بین ۱۶ تا ۲۰، DMA از این منظر مورد تائید است. لیکن در این تحقیق به بررسی بر روی ۲ تا ۲۰، DMA بر روی شبکه صورت گرفته است. پارامترهای هزینه‌ای و هیدرولیکی و کیفی مطابق جداول (۵) و (۶) با یکدیگر مقایسه شد. با توجه به آنکه در محدود ۱۶ تا ۲۰ پهنه شاخص RI و DSI و M و WA و همچنین نتایج فشار در شبکه مطابق جدول (۶) نیز به یکدیگر نزدیک بوده است، لذا با توجه به محدوده پیشنهادی با در نظر گرفتن کلیه جهات هیدرولیکی، کیفی، هزینه بین ۱۶ تا ۲۰، DMA به‌عنوان محدوده بهینه با کمترین هزینه ممکن در نظر 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 ۵- 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



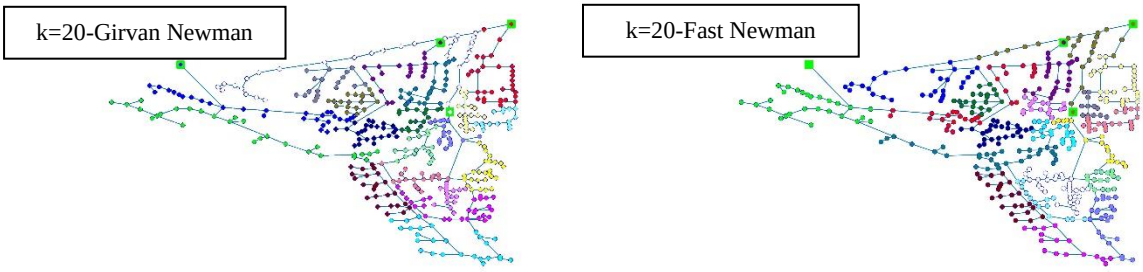
شکل ۵-نتایج ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری به روش گیروان-نیومن در شبکه بالرما

۳-۲- تحلیل شبکه بالرما به روش فست نیومن

به‌منظور انجام مقایسه بهتر بین روش خوشه‌بندی فست نیومن و گیروان-نیومن مطابق جدول (۶) به تحلیل نتایج شبکه بالرما به روش فست نیومن پرداخته شده است. با مقایسه نتایج روش گیروان-نیومن و فست نیومن مطابق جدول (۶) به‌وضوح پیداست 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 بدست آمده است. ازنقطه‌نظر فشار مطابق جدول (۶) 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 ۶- نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به روش 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
WA(hr)	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



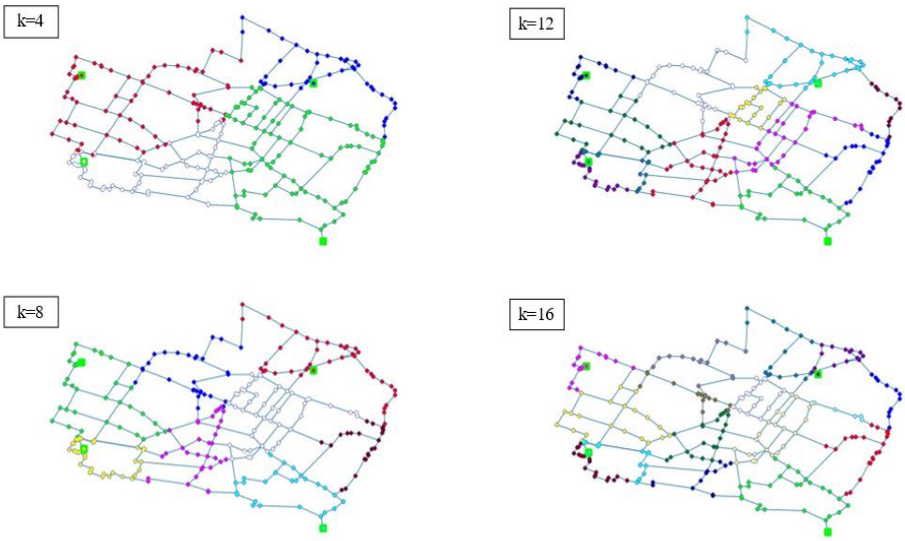
شکل ۶- مقایسه نتیجه تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به روش گیروان-نیومن و فست نیومن

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

نتایج ایجاد نواحی مجزای اندازه‌گیری بر روی شبکه مدنا به شرح جدول (۷) و شکل (۷) نشان داده‌شده است. با توجه به توصیه IWA و با در نظر 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 می‌گردد. در این تحقیق بین ۲ تا ۲۲ پهنه موردمحاسبه قرارگرفته است. با در نظر گرفتن معیار پیمانگی مشاهده می‌گردد، از تعداد ۴ دسته به بعد معیار پیمانگی افزایش قابل‌توجهی داشته است. همچنین در تعداد ۸ پهنه نیز مقدار معیار پیمانگی افزایش‌یافته است. همچنین با توجه به نزدیک بودن شاخص‌ها در تعداد ۱۰ و ۸ پهنه و به جهت انتخاب هزینه کمتر تا تعداد ۸ به‌عنوان تعداد پهنه مناسب در نظر گرفته‌شده است. ضمناً ازنقطه‌نظر متوسط فشار شبکه، در تعداد پهنه بین ۶ تا ۸ مقدار متوسط فشار شبکه حدود ۹ درصد کاهش پیداکرده و لذا 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 می‌گردد.

جدول ۷- 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



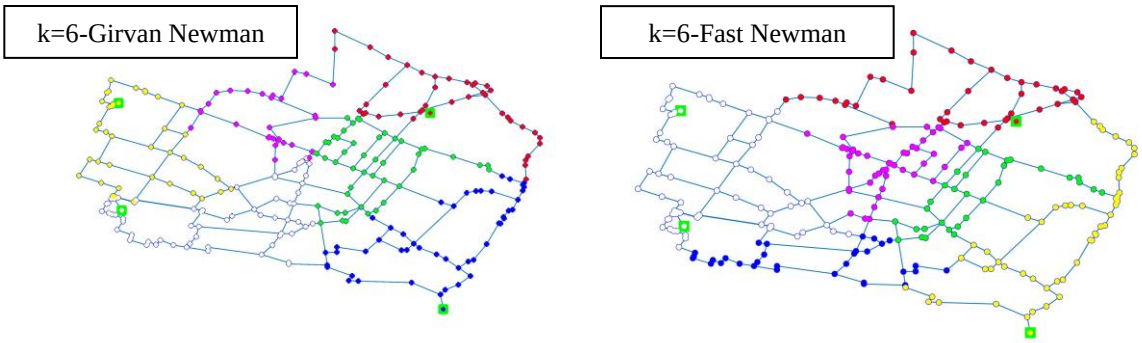
شکل ۷- نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به روش گیروان-نیومن در شبکه مدنا

۳-۴- تحلیل شبکه مدنا به روش فست نیومن

در جدول (۸) 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 محدود در نظر گرفته‌شده به‌عنوان محدوده بهینه جواب روش گیروان-نیومن نسبت به روش فست نیومن هزینه کمتری داشته و به‌عنوان روش منتخب در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۸) مقایسه نتایج فشار تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به روش گیروان-نیومن و فست نیومن نشان داده شده است.

جدول ۸- 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



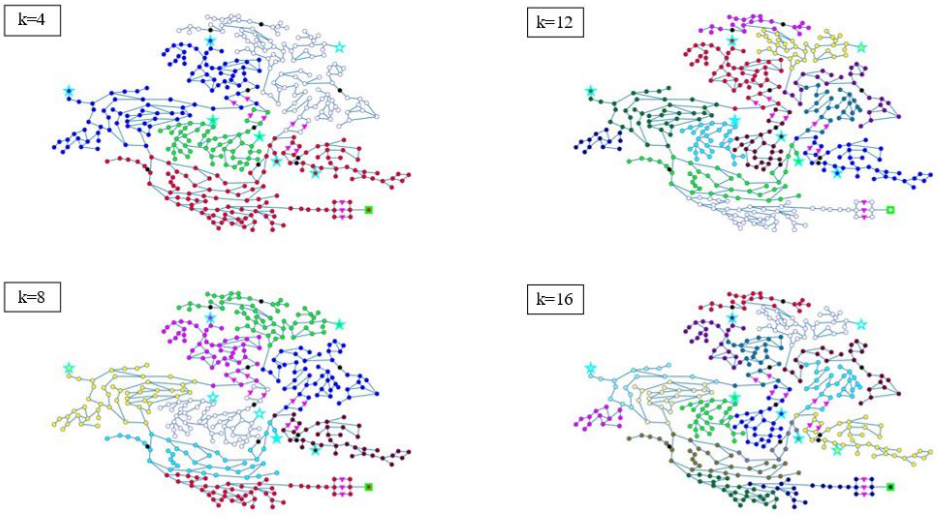
شکل ۸- مقایسه نتایج فشار تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به روش گیروان-نیومن و فست نیومن

۳-۵- تحلیل شبکه دی-تاون به روش گیروان-نیومن

با توجه به آنکه مصرف شبکه دی-تاون ۳۸۸ لیتر بر ثانیه است و با در نظر گرفتن تعداد مشترکین بین ۱۱۰۰ تا ۵۰۰۰ تعداد پهنه‌ها برای بین ۵ تا ۲۴ محاسبه گردیده است. لیکن در این تحقیق بین ۲ تا ۲۴ کلاستر موردبررسی قرارگرفته است. در جدول (۹) و شکل (۹) نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به روش گیروان-نیومن نشان داده شده است. در بازه ۵ تا ۲۴ پهنه و با در نظر گرفتن معیار پیمانگی مقدار در تعداد ۸ و ۱۰ پهنه مقدار معیار پیمانگی به مقدار ۰/۷۹ رسیده است. در تعداد ۱۲ پهنه نیز مقدار پیمانگی ثابت مانده است. همچنین ازنقطه‌نظر 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 جهت 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 گردیده 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 ۹- 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



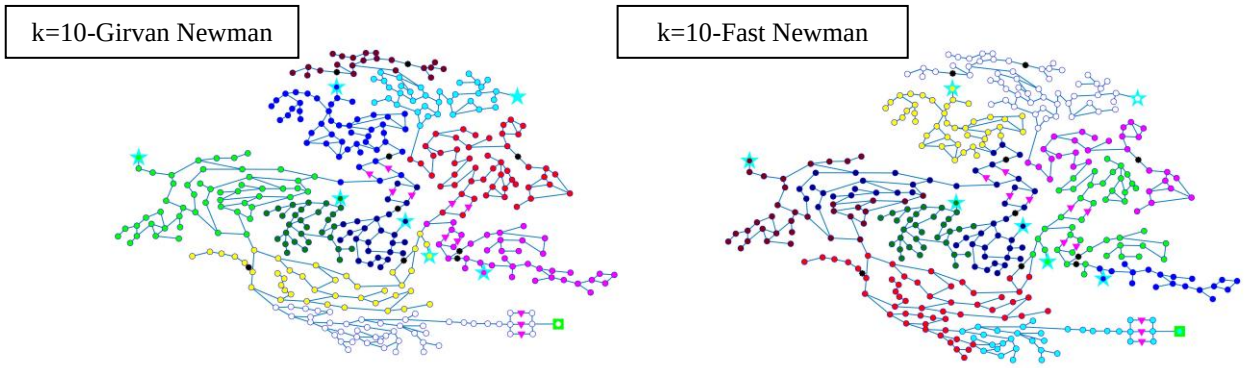
شکل ۹- مقایسه نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به روش گیروان-نیومن در شبکه دی-تاون

۳-۶- تحلیل شبکه دی-تاون به روش فست نیومن

در جدول (۱۰) و (۱۰) نتایج شبکه دی-تاون به ازای ۲ تا ۲۴ حالت نشان داده شده 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. لیکن در محدود در نظر گرفته‌شده به‌عنوان محدوده بهینه جواب روش گیروان-نیومن نسبت به روش فست نیومن هزینه کمتری داشته است. لذا روش گیروان-نیومن به عنوان روش پیشنهادی در مقایسه با روش فست نیومن در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۱۰) مقایسه نتایج بین روش گیروان-نیومن و فست نیومن نشان داده شده است.

جدول ۱۰- نتایج تشکیل نواحی مجزای اندازه‌گیری به روش 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 شده است. روش پیشنهاد شده بر روی سه شبکه بالرما، مدنا و دی تاون به دو روش خوشه‌بندی گیروان-نیومن و فست نیومن اجرا گردید. نتایج نشان داد که روش خوشه‌بندی گیروان-نیومن نسبت به روش فست نیومن ازنظر تعداد لوله‌های مرزی، برای سه مسئله بررسی‌شده هزینه پایین‌تری داشته است. در بین شاخص‌های موردبررسی شاخص هزینه و شاخص پیمانگی اثرگذاری بیشتری در تعیین محدوده تعداد پهنه بهینه داشته‌اند. ضمناً نتایج نشان داد پهنه‌بندی در شبکه‌های توزیع آب موردبررسی، 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-منابع و مراجع

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.

Christodoulou, S.E., Fragiadakis, M. and Xanthos, S., (2019), "Urban Water Distribution Networks".

Grayman, W.M., Murray, R. and Savic, D.A., (2009), "Effects of redesign of water systems for security and water quality factors", pp. 1-11.

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.

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.

OP310., (2020), "Guidelines for implementation and completion of water distribution network zoning (OP310)", *Country Water and Wastewater Engineering Company, Strategic deputy and supervision of exploitation*.

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.

Sadeghi, A., Javadianzade, M. and Pourdara, H., (2021). "Automatic Creation of District Metered Areas in Urban Water Distribution Networks Using Community Structure Algorithm and Genetic Algorithm aiming at Equitable Distributionof Network Pressure". *Iran Water Resources Research*, 17, 142-153.

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 & 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.