

ارائه روش بهینه‌یابی جدید براساس واسنجی برای مکان‌یابی نشت در شبکه‌های توزیع آب

مرضیه احراری^۱، علی نصیریان^۲

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶

مقاله پژوهشی برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران، گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه بیرجند

چکیده

اخیراً، روش‌های مبتنی بر واسنجی برای تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع آب مورد توجه قرار گرفته‌اند. این روش‌ها اطلاعات شبکه واقعی شامل فشار و دبی را جمع‌آوری می‌کنند و تلاش می‌کنند تا مصارف را در مدل هیدرولیکی شبکه تنظیم کنند تا نتایج مدل با مشاهدات منطبق شود. از این رو علاوه بر تحلیل هیدرولیکی به یک الگوریتم بهینه‌یابی نیاز می‌باشد. در این تحقیق یک روش بهینه‌یابی جدید مبتنی بر جمعیت معرفی گردیده است. در این روش شبکه به چند ناحیه تقسیم می‌شود. نسل اول پاسخ‌ها برای تلفات ظاهری شبکه و نشت هر ناحیه حدس زده می‌شود و برازندگی پاسخ‌ها محاسبه می‌شود. علاوه بر آن پارامتر جدیدی که در این تحقیق برازندگی جزئی نامیده می‌شود، برای هر ناحیه برای همه پاسخ‌ها محاسبه می‌گردد. کوچک بودن برازندگی جزئی یک ناحیه، مقدار صحیح نشت در آن ناحیه را پیش‌بینی می‌کند. با ادغام پاسخ‌های برتر بدست آمده در یک نسل، در هر ناحیه، بازه‌ای برای نسل بعدی محاسبه می‌گردد. این بازه در نسل‌های پیاپی کوچکتر می‌شود و پاسخ صحیح پیدا می‌شود. روش پیشنهادی با ایجاد نشت‌های فرضی روی شبکه توزیع آب بررسی شده است. نتایج بدست آمده از مدل با مقادیر فرضی اولیه و همچنین نتایج مدل و اترجمز مقایسه شد. نتایج، توانایی روش بهینه‌یابی پیشنهادی را در شناسایی مقدار و موقعیت نشت نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مقایسه این روش با واسنجی گر داروین، دقت، همگرایی و سرعت بیشتر روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. برازندگی بدست آمده از روش تحقیق حاضر ۰/۶۵۴ و برازندگی حاصل از روش واسنجی نرم‌افزار و اترجمز ۰/۸۱۷ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: واسنجی، شبکه توزیع آب، بهینه‌یابی، واسنجی گر داروین، نشت‌یابی

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
marziye.ahrari@birjand.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. a.nasirian@birjand.ac.ir (نویسنده مسئول)

مقدمه

شبکه پرداخته‌اند. آن‌ها نشت را مرتبط با فشار و مصرف را برمبنای الگوی مصرف تعیین کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دقت این روش به تغییرات فشار در طول شبانه روز و الگو مصرف وابسته است. در نتیجه این روش در شبکه‌های با الگو مصرف یکنواخت و فشار ثابت کاربرد نخواهد داشت. Sage (2005) برای تشخیص نقاط دارای نشت در یک شبکه از الگوریتم ژنتیک استفاده کرد. در این روش کل جریان ورودی به شبکه که شامل مصارف و آب به حساب نیامده می‌باشد، به تمامی گره‌ها اختصاص داده شد. مقادیر مصرف اختصاص یافته به گره‌ها در یک فرآیند بهینه‌یابی اصلاح می‌شود. در صورتی که مقدار اختصاص یافته به گره بزرگتر از مقدار از قبل تعیین شده باشد، گره مورد نظر به عنوان نشت بزرگ و شکستگی لوله شناسایی می‌شود. روش پیشنهادی Sage (2005) توسط Wu and Sage., (2008) توسعه داده شد. روش آن‌ها بر روی یک شبکه فرضی و بخشی از یک شبکه واقعی مورد بررسی قرار گرفت. تحقیقات آن‌ها نشان داد که جهت شناسایی نشت بایستی تعداد گره‌های فشارسنجی زیاد باشد و همچنین افت هیدرولیکی زیادی در لوله‌ها اتفاق افتد. Wu et al., (2010) به واسنجی و تشخیص نشت بر روی یک شبکه فرضی و یک شبکه واقعی براساس الگوریتم ژنتیک پرداختند. آن‌ها نشت را وابسته به فشار و به عنوان ضریب نشت روزنه در گره‌های مدل در نظر گرفتند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با شناسایی نشت، دقت واسنجی مدل هیدرولیکی بهبود می‌یابد. Nasirian et al., (2013) در دو شبکه فرضی با ادغام روش الگوریتم ژنتیک و یک روش ابتکاری به نام حذف مرحله‌ای^۳ به تشخیص نقاط دارای نشت پرداختند. تحقیقات آن‌ها نشان داد پس از چند بار اجرای فرآیند واسنجی نقاط دارای نشت با دقت بالایی قابل تشخیص هستند. بوستانی و خدائشاناس (۱۳۹۴) براساس واسنجی گرهی به بررسی رابطه نشت با تغییرات فشار در گره‌ها پرداختند. آن‌ها مقادیر نشت متناسب با فشارهای گرهی را با استفاده از فرمول نشت از روزنه تخمین زدند. معاشری و قاضی‌زاده (۱۳۹۷) برای تعیین مقدار و موقعیت

در کشور ایران که از مناطق خشک و کم آب جهان محسوب می‌شود، متوسط بارندگی ۵۰ ساله به ۲۴۷/۹ میلی‌متر در سال می‌رسد (دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۹). به دلیل هزینه بر بودن تامین، تصفیه و انتقال آب، علاوه بر اهمیت آن به عنوان یک مایع حیاتی، یک کالای اقتصادی نیز در نظر گرفته می‌شود. به همین علت، مفهوم آب به حساب نیامده که شامل مفاهیم مربوط به تلفات آب از دو جهت اقتصادی و حیاتی می‌باشد، برای کارشناسان آب حائز اهمیت است. یکی از راه‌های کاهش آب به حساب نیامده در شبکه‌های توزیع، شناسایی محل نشت است. تعیین محل نشت در کل شبکه با روش‌های سنتی، زمان و هزینه زیادی را به دنبال خواهد داشت و معمولاً ضریب خطا در بعضی از موارد نسبتاً بالا است. به موازات روش‌های سنتی بهتر است ابتدا با شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی شبکه، محدوده نشت شناسایی شود و سپس با استفاده از دستگاه‌های نشت‌یابی محل دقیق نشت مشخص گردد. در این روش‌ها نشت در شبکه با استفاده از مدل‌سازی و تحلیل شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌سازی، واسنجی هیدرولیکی شبکه و نشت‌یابی مبتنی بر واسنجی، به واسطه صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ها در نشت‌یابی میدانی، مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. Pudar and Liggett. (1992) برای نخستین بار به منظور شناسایی نشت در شبکه لوله‌ها از روش تحلیل ماندگار معکوس^۱ استفاده کردند. در این تحقیق، برداشت‌های آب از گره‌ها مجهول‌ها و فشارسنجی و دبی‌سنجی در شبکه مشاهدات بودند. آن‌ها مسئله را در دو حالت کم‌معین (تعداد مجهولات بیشتر از تعداد مشاهدات) و بیش‌معین (تعداد مشاهدات بیشتر از مجهولات) مورد ارزیابی قرار داده و نشت را با استفاده از رابطه خروج آب از روزنه مدل‌سازی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در حالت بیش‌معین نشت با دقت خوبی شناسایی شد، در حالی که در حالت کم‌معین نشت به درستی شناسایی نشد. Almandoz et al., (2005) به واسنجی شبکه در حالت دائمی^۲ جهت شناسایی نشت در

³ Step-by-step Elimination

¹ Inverse steady state analysis

² Steady state

فرضی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملکرد روش پیشنهادی به تعداد نقاط فشارسنجی وابسته است. همچنین با افزایش تعداد گره‌های نشت‌دار، فرآیند تشخیص نشت سخت‌تر و پیچیده‌تر می‌شود. Amoatey et al., (2018) با استفاده از روش مونت کارلو به تشخیص نشت در شبکه پرداختند. نشت متناسب با فشارهای گرهی و با استفاده از فرمول نشت از روزنه در نظر گرفته شد. در تحقیق مذکور یک نشت بزرگ شناخته شده بر روی یک گره از مدل شبکه قرار داده شد. نتایج نشان داد که روش به کار رفته در تشخیص نشت‌هایی که در یک شبکه حلقوی رخ می‌دهد، بسیار خوب عمل می‌کند در حالی که برای نشت‌هایی که در مناطق شاخه‌ای اتفاق می‌افتد، عملکرد خوبی ندارد. همچنین Amoatey et al., (2018) در تحقیقی دیگر به شناسایی همزمان دو نشت در شبکه توزیع آب و تعیین تعداد نقاط مشاهداتی مورد نیاز برای شناسایی نشت پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که روش به کار رفته برای نشت‌هایی که در فواصل دور از هم اتفاق می‌افتند عملکرد بهتری نسبت به نشت‌هایی که در مجاورت هم رخ می‌دهند، دارد. Moasheri and Jalili- Ghazizadeh., (2019) روشی جدید برای تعیین نواحی نشت‌دار در شبکه‌های توزیع آب ارائه دادند. آن‌ها نشت را به عنوان یک برداشت گرهی اضافی بر مصرف پایه در نظر گرفتند. سپس به واسنجی همزمان مصارف و زبری لوله‌ها توسط الگوریتم رقابت استعماری^۵ پرداختند. عملکرد روش پیشنهادی بر روی یک مدل از شبکه فرضی و یک شبکه واقعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد این روش می‌تواند نواحی نشت‌دار را به صورت احتمالی و بدون محدودیت در تعداد نشت‌های همزمان اولویت‌بندی کند. در تحقیق حاضر، شناسایی نشت‌ها براساس مدل‌سازی و واسنجی شبکه‌ی توزیع با استفاده از مشاهدات فشار و جریان مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت، میزان نشت با استفاده از تنظیم مصرف در گره‌ها که با تنظیم ضرایب نشت روزنه صورت گرفته، تعیین می‌شود. همچنین از تحلیل نشت وابسته به فشار و گروه‌بندی گره‌ها استفاده

نشت در شبکه از یک الگوریتم دو مرحله‌ای استفاده کردند. در مرحله اول محل نشت‌ها با استفاده از الگوریتم پله‌ای و در مرحله دوم مقدار نشت‌ها با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب^۱ تعیین می‌شود. روش پیشنهادی آن‌ها با موفقیت بر روی یک شبکه فرضی با دو نشت همزمان اجرا شد. ثابت و همکاران (۱۳۹۸) با روش نشت‌یابی مبتنی بر واسنجی و با استفاده از الگوریتم مورچگان، توانستند مقدار و موقعیت آب به حساب نیامده و موقعیت نشت‌های بزرگ در شبکه را به خوبی تشخیص دهند. سپس با تلفیق نشت‌یابی مبتنی بر کالیبراسیون و حداقل جریان شبانه مولفه‌های آب به حساب نیامده را به تفکیک ناحیه محاسبه کردند. Eryiğit (2017) برای واسنجی و تعیین مقدار و موقعیت تلفات آب در شبکه، از الگوریتم بهینه‌یابی سیستم ایمنی مصنوعی^۲ استفاده کرد. او در تحقیق خود، تلفات آب را به صورت مصرف غیرمجاز در گره‌ها و نشت در لوله‌ها در نظر گرفت. این روش توانست مقدار و موقعیت تلفات آب در گره‌ها و لوله‌های یک شبکه فرضی را تنها با مشاهدات جریان تشخیص دهد. Sophocleous et al., (2017) با روش دو مرحله‌ای به واسنجی مدل یک شبکه واقعی به منظور تعیین نقاط نشت‌دار پرداختند. برای حل مسئله بهینه‌یابی از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. پارامترهای بهینه‌یابی در این تحقیق وضعیت شیرها، تصحیح زبری لوله‌ها و اصلاح نشت در گره‌ها بود. همچنین آن‌ها از روش کاهش فضا جستجو^۳ به منظور افزایش سرعت همگرایی استفاده کردند. Sophocleous et al., (2018) در یک شبکه واقعی با استفاده از الگوریتم ژنتیک درهم ریخته^۴ و براساس کاهش فضا جستجو نقاط دارای نشت را شناسایی کردند. نشت‌یابی با استفاده از تنظیم ضرایب نشت روزنه در یک فرآیند بهینه‌یابی حاصل می‌شود، به گونه‌ای که اختلاف میان مقادیر فشار و دبی پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده شده به حداقل برسد. Hajibandeh and Nazif., (2018) روشی جدید برای تعیین مقدار و موقعیت نشت در شبکه‌های توزیع آب، با استفاده از واسنجی مصارف به وسیله‌ی الگوریتم مورچگان ارائه دادند. روش آن‌ها بر روی دو شبکه

⁴ Non Sorting Genetic Algorithm

⁵ Imperialist Competitive Algorithm

¹ Firefly Algorithm

² Artificial Immune System Optimization

³ Search Space Reduction

نشت‌یابی به روش واسنجی شبکه

اختلاف بین مقادیر مصرف قرائت شده از کنتورهای مشترکین با مقادیر ورودی به شبکه توزیع، تعریف و مقدار آب به حساب نیامده در شبکه می‌باشد. کل آب به حساب نیامده طبق نمودار شماره ۱-۱ نشریه ۵۵۶ شامل چندین مولفه می‌باشد که ماهیت هر کدام از این مولفه‌ها با یکدیگر متفاوت است (تابش، ۱۳۹۱). برخی از این مولفه‌ها نظیر مصارف غیرمجاز و خطای کنتورها در یک شبانه روز بر اساس الگوی مصرف مشترکین تغییر می‌کنند. همچنین برخی دیگر از این مولفه‌ها نظیر شکستگی لوله و نشت از اتصالات تابع فشار آب در شبکه هستند. در این تحقیق مولفه‌های اساسی در آب به حساب نیامده به سه دسته‌ی تلفات ظاهری، نشت زمینه و نشت‌های بزرگ تقسیم‌بندی شده‌اند. جداسازی نشت زمینه و نشت بزرگ با هدف شناسایی مناطق دارای نشت بزرگ انجام شده است، اگر چه از نظر ماهیت یکسان هستند.

حال با معلوم بودن مصرف پایه در هر گره، با تخمین نشت در گره‌ها که از رابطه نشت با فشار تبعیت می‌کند و همچنین تخمین تلفات ظاهری در گره‌ها، مقدار برداشت شده از گره‌ها اصلاح می‌شود تا انطباق بین مقادیر فشار و جریان اندازه‌گیری شده با مقادیر مدل‌سازی حاصل شود. بنابراین مقدار برداشت شده از گره‌های مختلف براساس مولفه‌های مختلف آب به حساب نیامده از رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$D_j = DB_j + DA_j + DL_j \quad (1)$$

در این رابطه j شماره گره‌های شبکه، D_j برداشت آب در گره j ام، DB_j مصرف پایه در گره j ام می‌باشد. DA_j تلفات ظاهری در گره j ام است که از رابطه (۲) و DL_j دبی نشت در گره j ام است که از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$DA_j = C \times DB_j \quad (2)$$

$$DL_j = (Kb_j + KB_j) \times (P_j)^n \quad (3)$$

در رابطه (۲)، C ضریب تلفات ظاهری می‌باشد که به صورت درصدی از مقدار مصرف پایه بدست می‌آید. زیرا در

شده است. در این تحقیق روش بهینه‌یابی جدیدی جهت یافتن محدوده‌های نشت در شبکه‌های آبرسانی ارائه شده است. در این روش پس از ناحیه‌بندی شبکه، تابعی تحت عنوان برازندگی جزئی برای هر یک از نواحی معرفی و محاسبه می‌شود. با انتخاب و ادغام پاسخ‌های متناظر با برازندگی جزئی برتر در هر ناحیه، مقدار نشت برای هر یک از نواحی تشخیص داده می‌شود و با محدود کردن فضا جستجو سرعت و دقت فرآیند بهینه‌یابی بهبود می‌یابد. همچنین میزان تلفات ظاهری در کل شبکه قابل محاسبه است که از نوآوری‌های دیگر این تحقیق نسبت به تحقیقات مشابه به شمار می‌آید. برنامه بهینه‌یابی پیشنهادی در نرم‌افزار متلب^۱ کد نویسی شده و در نهایت بین دو نرم افزار متلب و ایپانت^۲ ارتباط پویا برای تحلیل شبکه برقرار می‌شود. این روش به عنوان پایلوت بر روی منطقه D شبکه توزیع آب بیرجند مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد نشت‌های در نظر گرفته شده در شبکه سه نشت همزمان بوده و علاوه بر آن، مقداری نشت نیز به عنوان نشت زمینه بطور همزمان در شبکه در نظر گرفته شده است.

روش‌شناسی

جهت واسنجی شبکه، بایستی اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی فشار و دبی در نقاط منتخب، کمینه شود (Shamir and Howard., 1968). این کار با تنظیم برخی پارامترهای مدل‌سازی شبکه که تعیین آن‌ها با خطا همراه است، انجام می‌شود. در تحقیق حاضر، پارامتر اصلی که باید تنظیم شود، مصارف خواهد بود. این پارامتر با تنظیم مقادیر ضرایب نشت روزنه و تلفات ظاهری در گره‌ها در یک فرآیند شبیه‌سازی، بهینه‌سازی می‌شود.

در بخش اول روش‌شناسی، روابط مربوط به مسئله نشت‌یابی به روش واسنجی شبکه تشریح می‌گردد. در ادامه روش بهینه‌یابی پیشنهادی معرفی و فرآیند بهینه‌یابی و پارامترهای مرتبط با آن بیان می‌گردد. در سومین بخش، شبکه توزیع پایلوت مورد استفاده معرفی خواهد شد.

² Epanet 2.0

¹ Matlab 8.0

در این رابطه، K_j ضریب نشت روزنه برای گره j ام، K_N ضریب نشت روزنه برای ناحیه N و Nj تعداد گره‌های موجود در ناحیه N می‌باشد. بدین ترتیب مدل بهینه‌سازی برای تعیین ضرایب نشت روزنه و تلفات ظاهری از روابط زیر پیروی می‌کند.

$$X = (K_N, C); N = 1, 2, \dots, NGroup \quad (۶)$$

$$F(X) = \frac{\sum_{nh=1}^{NH} (HS_{nh} - HO_{nh})^2 + \sum_{nf=1}^{NF} (FS_{nf} - FO_{nf})^2}{NH + NF} \quad (۷)$$

$$\begin{aligned} 0 &\leq K_N \leq K_{sum} \\ NGroup \\ \sum_{N=1} K_N &= K_{sum} \\ C_{min} &\leq C \leq C_{max} \end{aligned} \quad (۸)$$

در رابطه (۶)، X مجموعه پارامترهای تنظیمی مدل، $NGroup$ تعداد گروه‌ها، K_N ضریب نشت روزنه برای گروه N می‌باشد. در رابطه (۷)، $F(X)$ تابع هدف است که مناسب بودن مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل را نشان می‌دهد. HS_{nh} و HO_{nh} به ترتیب تراز هیدرولیکی محاسبه و اندازه‌گیری شده برای گره nh و FS_{nf} و FO_{nf} به ترتیب جریان محاسبه و اندازه‌گیری شده در لوله nf و NH و NF به ترتیب تعداد فشارها و جریان‌های اندازه‌گیری شده در شبکه می‌باشند. رابطه (۸) قیود مدل بهینه‌سازی را نشان می‌دهد که در این رابطه K_{sum} ضریب نشت روزنه برای کل شبکه، C_{min} و C_{max} به ترتیب حد پایین و بالای ضریب تلفات ظاهری می‌باشند. مقدار تلفات ظاهری نسبت به کل آب به حساب نیامده شبکه، برای هر شبکه متفاوت است. اگر شبکه‌ای دارای نشت زیاد باشد، سهم این پارامتر در کل آب به حساب نیامده کاهش می‌یابد و اگر در شبکه‌ای مشترکین غیرمجاز زیاد باشند و شبکه دارای نشت اندکی باشد، ضریب تلفات ظاهری افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در حد بررسی‌های انجام شده،

نواحی با مصرف بالا، تعداد انشعابات و مصرف‌کنندگان زیادتر بوده و احتمال وجود دست‌کاری در کنتورهای مشترکین و خرابی آن‌ها و مصارف غیرمجاز نیز بیشتر می‌باشد. در رابطه (۳)، Kb_j ضریب نشت روزنه برای نشت زمینه در گره j ام، Kb_j ضریب نشت روزنه برای نشت بزرگ در گره j ام است. با توجه به این که ماهیت نشت بزرگ و نشت زمینه مانند هم است می‌توان ضریب نشت روزنه برای نشت زمینه و نشت بزرگ را تحت یک پارامتر به صورت K_j در نظر گرفت. P_j فشار گرهی در گره j ام و n توان فشار می‌باشد. توان فشار به جنس لوله‌ها و تغییرات فشار در شبکه بستگی دارد و می‌توان با استفاده از روابط نظری، داده‌های آزمایشگاهی و یا اندازه‌گیری‌های میدانی آن را تعیین کرد. در تعیین مقدار توان فشار نظریه FAVAD^۱ که یکی از معتبرترین روش‌ها می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت (Karamouz et al., 2005).

با توجه به مطالب گفته شده و با ادغام روابط (۱)، (۲) و (۳)، رابطه (۴) حاصل می‌شود.

$$D_j = DB_j + C \times DB_j + K_j \times (P_j)^n \quad (۴)$$

طبق رابطه (۴)، تعداد مجهولات در واسنجی شبکه توزیع که شامل ضریب نشت روزنه برای تمامی گره‌های شبکه و ضریب تلفات ظاهری در کل شبکه می‌باشند، بسیار زیاد و تعداد مشاهدات فشار و جریان نسبت به مجهولات بسیار کم می‌باشد. روش رایج برای کاهش مجهولات، گروه‌بندی گره‌ها می‌باشد. بدین سبب گره‌هایی که در یک ناحیه می‌باشند، به عنوان یک گروه در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به گروه‌بندی گره‌ها، ضریب نشت روزنه برای هر یک از نواحی شبکه به عنوان پارامتر مجهول در نظر گرفته می‌شود و به تمامی گره‌های یک گروه معین مانند رابطه (۵) ضریب نشت روزنه یکسانی تعلق می‌گیرد.

$$K_j = \frac{K_N}{Nj} \quad (۵)$$

^۱ Fixed And Variable Area Discharge



در این رابطه، $F(d)$ برازندگی ضریب نشت روزانه ناحیه‌ای، N تعداد گروه‌های شبکه، Ko_N ضریب نشت روزانه‌ای واقعی برای گروه N ام، Ks_N ضریب نشت روزانه‌ای شبیه‌سازی شده برای گروه N ام می‌باشد.

معرفی روش بهینه‌یابی

اساس واسنجی، حداقل‌سازی اختلاف بین مقادیر مشاهداتی در شبکه و مقادیر بدست آمده از مدل می‌باشد. این عملیات در یک فرآیند بهینه‌یابی مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش‌های بهینه‌یابی زیادی برای اهداف مختلف در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی پیشنهاد شده است. برخی از این روش‌ها مانند الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جمعیت هستند. در الگوریتم بهینه‌یابی پیشنهادی مانند سایر روش‌های مبتنی بر جمعیت، ابتدا جمعیتی از پاسخ‌های پارامترهای تنظیمی با در نظر گرفتن قیود مسئله در یک محیط گسسته تولید می‌شود. سپس تحلیل هیدرولیکی هر پاسخ با ارتباط پویا میان برنامه‌ایپانت و متلب، شبیه‌سازی می‌شود. برنامه مقادیر بدست آمده جریان و فشار حاصل از شبیه‌سازی را با مقادیر مشاهداتی در همان موقعیت‌ها مقایسه می‌نماید و پس از آن با محاسبه تابع هدف، برازندگی در کل شبکه محاسبه می‌شود. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، مشاهده شد که ممکن است یک پاسخ مسئله بهینه‌یابی، قادر به تنظیم فشارها و دبی‌ها در کل شبکه نباشد اما فشارها و دبی‌های یک ناحیه از شبکه را به خوبی تنظیم کرده باشد. در نتیجه آن پاسخ برای کل شبکه مناسب نیست اما می‌تواند پاسخ صحیحی برای آن ناحیه باشد. بدین ترتیب ایده برازندگی جزئی برای اولین بار در این تحقیق مطرح و استفاده شده است.

در این روش شبکه را به نواحی مختلف تقسیم کرده و تابعی تحت عنوان تابع برازندگی جزئی برای هر ناحیه به ازای هر جمعیت طبق رابطه (۱۰) معرفی می‌شود. تابع برازندگی جزئی برای هر ناحیه متناسب با فشار و جریان‌های مشاهداتی موجود در هر ناحیه تعریف شده است.

(۱۰)

$$FN_i(X) =$$

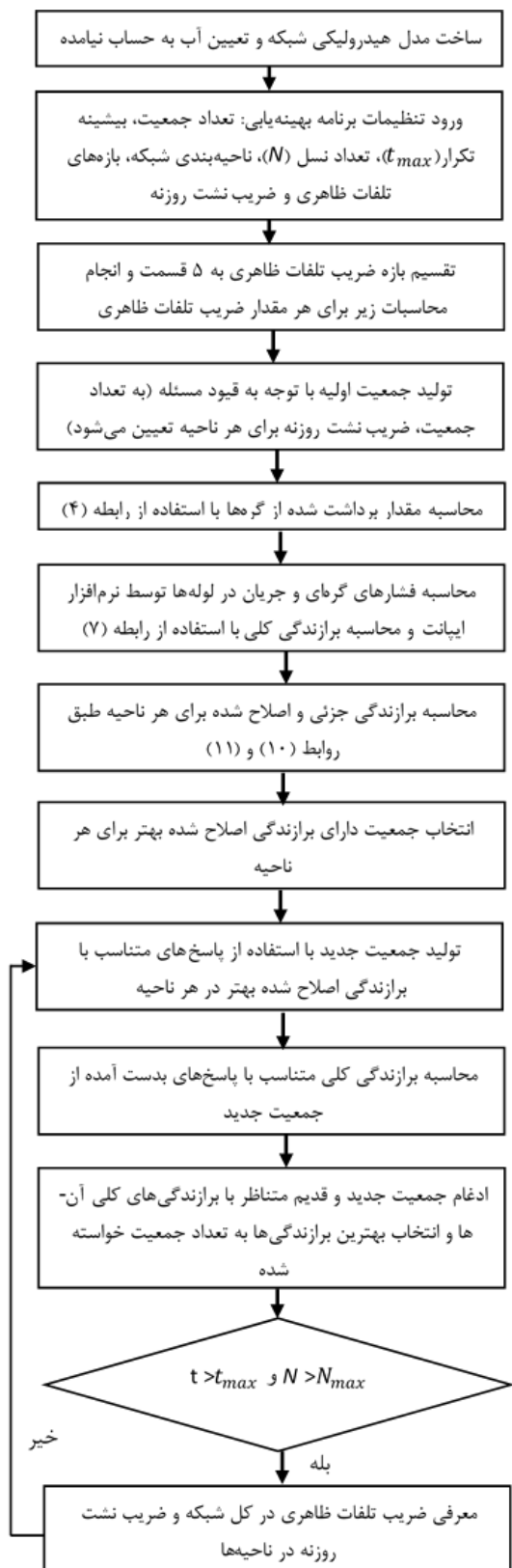
چنین تفکیکی برای آب به حساب نیامده در مراجع یافت نشد و بازه‌ای نیز برای شبکه‌های مختلف معرفی نشده است.

برای تعیین این پارامترها در یک شبکه واقعی با توجه به آب به حساب نیامده شبکه، ابتدا برای ضریب تلفات ظاهری حد پایین و بالایی به صورت فرضی با طول گام مشخص در نظر گرفته می‌شود. در هر تحلیل یک ضریب C با توجه به بازه در نظر گرفته شده انتخاب می‌شود. با انتخاب ضریب تلفات ظاهری و معلوم بودن مقدار آب به حساب نیامده، K_{sum} با توجه به رابطه نشت با فشار به صورت تقریبی برای هر تحلیل محاسبه می‌شود. با محاسبه مقدار برازندگی به ازای هر یک از تحلیل‌ها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، کمترین برازندگی به عنوان پاسخ صحیح تشخیص داده می‌شود. چنانچه مقدار برازندگی محاسبه شده در هر تحلیل به ازای بازه تعریف شده برای ضریب C به گونه‌ای باشد که بهترین برازندگی به ازای انتخاب ضریب C در وسط بازه بدست آمده باشد، بازه در نظر گرفته شده به درستی انتخاب شده و می‌توان بازه را به صورت محدودتر انتخاب کرد. در صورتی که بهترین برازندگی به ازای انتخاب ضریب C در ابتدا و یا انتهای بازه حاصل شده بایستی محدوده بازه را در جهت مقدار حاصل شده با بهترین برازندگی گسترش داد.

لازم به ذکر است که علاوه بر قیود ذکر شده، یک قید در واسنجی وارد شده است که مقدار مجموع برداشت از گره‌ها را به مقدار اندازه‌گیری شده در کنتور ورودی شبکه محدود می‌کند.

برای صحت‌سنجی نتایج نشت‌یابی، علاوه بر تابع برازندگی $F(X)$ تابع برازندگی دیگری به صورت رابطه (۹) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که محاسبه این پارامتر در شرایط واقعی امکان‌پذیر نیست و تنها در شبکه‌های فرضی که مقدار نشت در آن‌ها مشخص است قابل ارزیابی می‌باشد.

$$F(d) = \sqrt{\frac{\sum_{N=1}^{NGroup} (Ko_N + Ks_N)^2}{NGroup}} \quad (9)$$



شکل (۱): فلوچارت برنامه نشت‌یابی به کمک الگوریتم پیشنهادی

$$\frac{\sum_{zh=1}^{ZH} (HNS_{zh} - HNO_{zh})^2 + \sum_{zl=1}^{ZL} (FNS_{zl} - FNO_{zl})^2}{ZH + ZL}$$

در این رابطه، $FN_i(X)$ تابع برازندگی جزئی ناحیه N برای جمعیت i می‌باشد. HNS_{zh} و HNO_{zh} به ترتیب تراز هیدرولیکی محاسبه و اندازه‌گیری شده برای گره zh در ناحیه N ، FNS_{zl} و FNO_{zl} به ترتیب جریان اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای لوله zl در ناحیه N و ZH و ZL تعداد فشارها و جریان‌های اندازه‌گیری شده در ناحیه N می‌باشند.

برای آن که اثر تابع برازندگی در کل شبکه در یافتن پاسخ صحیح در نظر گرفته شود، تابعی تحت عنوان تابع برازندگی اصلاح شده طبق رابطه (۱۱) برای هر ناحیه به ازای هر جمعیت معرفی شده است که اثر هر دو تابع برازندگی را در خود دارد.

$$FNm_i(X) = \frac{FN_i(X) \times F(X)_i}{F(X)} \quad (11)$$

در این رابطه، $FNm_i(X)$ تابع برازندگی اصلاح شده ناحیه N برای جمعیت i ، $FN_i(X)$ برازندگی جزئی ناحیه N برای جمعیت i ، $F(X)_i$ برازندگی در کل شبکه برای جمعیت i و $\overline{F(X)}$ میانگین برازندگی در کل شبکه برای تمام جمعیت تولید شده در شبکه می‌باشند.



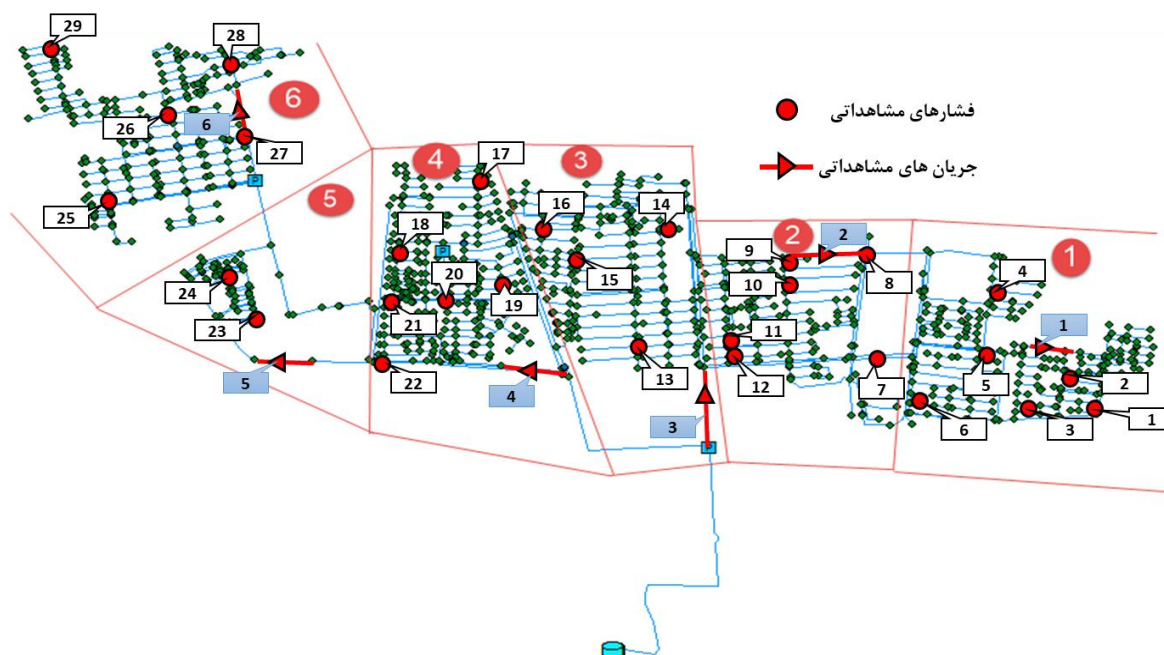
درست شدن برازندگی‌های جزئی در هر ناحیه برازندگی در کل شبکه نیز بهبود می‌یابد. در نتیجه انتظار می‌رود که برنامه با حداقل تکرار و با دقت مناسب نواحی نشت‌دار را شناسایی کند. در شکل (۱) روند نشت‌یابی به کمک الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است.

معرفی منطقه مورد مطالعه

شهرستان بیرجند در جنوب استان خراسان جنوبی قرار دارد. شبکه توزیع آب شهری بیرجند به چندین شبکه مجزا تقسیم شده است که در این تحقیق منطقه D شهر بیرجند مورد مطالعه قرار گرفته است. شبکه آبرسانی شهر دارای ۱۱۴۰ گره و ۱۱۹۱ لوله می‌باشد. جنس لوله‌های استفاده شده در این شبکه اکثراً از دو نوع آبست (AC) و پلی‌اتیلن (PE) می‌باشد. شکل (۲) ناحیه‌بندی منطقه D شبکه توزیع آب بیرجند به ۶ ناحیه را نشان می‌دهد و در آن نقاط فشارسنجی و دبی‌سنجی مناطق مختلف مشخص شده است. با توجه به مشاهدات میدانی و گفته‌های کارشناسان شرکت آب و فاضلاب شهر بیرجند، ضریب هیزن- ویلیامز در این شبکه برای لوله‌های پلی‌اتیلن برابر ۱۳۰ و برای لوله‌های آبست برابر با ۱۱۵ می‌باشد. متوسط جریان ورودی به شبکه برابر با ۱۱۷۶۰ لیتر بر دقیقه می‌باشد و تمام مصارف برمبنای قرائت کنتورهای مشترکین در بازه حدود ۶۰ روز برداشت شده است (آب و فاضلاب خراسان جنوبی شهرستان بیرجند، ۱۳۹۴).

پس از محاسبه برازندگی جزئی $FN_i(X)$ و برازندگی جزئی اصلاح شده $FNm_i(X)$ در هر ناحیه، بازه جستجو برای K_N اصلاح می‌شود. برای هر ناحیه، بازه‌ای براساس پاسخ‌های متناظر با بهترین برازندگی‌های اصلاح شده محاسبه می‌شود که احتمال وجود پاسخ صحیح در آن بیشتر است. جمعیت جدید با توجه به بازه انتخابی در هر ناحیه تشکیل می‌شود. بدین ترتیب روش بهینه‌یابی پیشنهادی با معرفی بازه جستجوی کاهش یافته، احتمال انتخاب ضرایب نشت در این بازه را برای ایجاد جمعیت جدید افزایش می‌دهد.

در ادامه، برای جمعیت جدید برازندگی‌های کلی، جزئی و اصلاح شده دوباره محاسبه می‌شوند. در انتها تمامی جمعیت تولید شده قدیم و جمعیت تولید شده جدید متناظر با برازندگی‌های کلی آن‌ها در یک ماتریس قرار گرفته و از میان آن‌ها بهترین برازندگی‌ها به تعداد جمعیت خواسته شده انتخاب می‌گردد. این فرآیند به این دلیل انجام می‌شود که اگر برازندگی‌های خوبی در جمعیت اولیه تولید شده وجود داشته باشد، نادیده گرفته نشود و از آن‌ها در ادامه تحلیل‌ها استفاده شود. این چرخه تحت پارامتری به عنوان نسل چندین مرتبه تکرار می‌شود به طوری که راه حل‌ها تکامل یافته و سرانجام حل‌های بهینه ظاهر می‌شوند. روند برنامه بهینه‌یابی به گونه‌ای است که سعی در بهتر کردن برازندگی‌های جزئی در هر ناحیه دارد. همچنین با



شکل (۲): جانمایی مکان‌های مشاهده‌ای فشار و دبی در منطقه D شبکه توزیع آب بیرجند

با توجه به اینکه نشت‌های شبکه فرضی است، مقدار و موقعیت دقیق آن‌ها معین است. بر این اساس اولین بررسی برای ارزیابی نتایج، مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌سازی و نشت‌یابی با مقادیر دقیق آن است. همچنین نتایج این روش با نتایج واترجمز مقایسه می‌شود. این نرم‌افزار از محبوب‌ترین نرم‌افزارها برای مدل‌سازی و واسنجی شبکه‌های توزیع آب می‌باشد و توسط محققین زیادی در تحقیقات علمی مورد استفاده قرار گرفته است (Switnicka et al., 2017, Ali et al., 2015).

در ادامه، واسنجی و نشت‌یابی شبکه جهت یافتن میزان تلفات ظاهری و نشت با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی پیشنهادی انجام می‌گیرد.

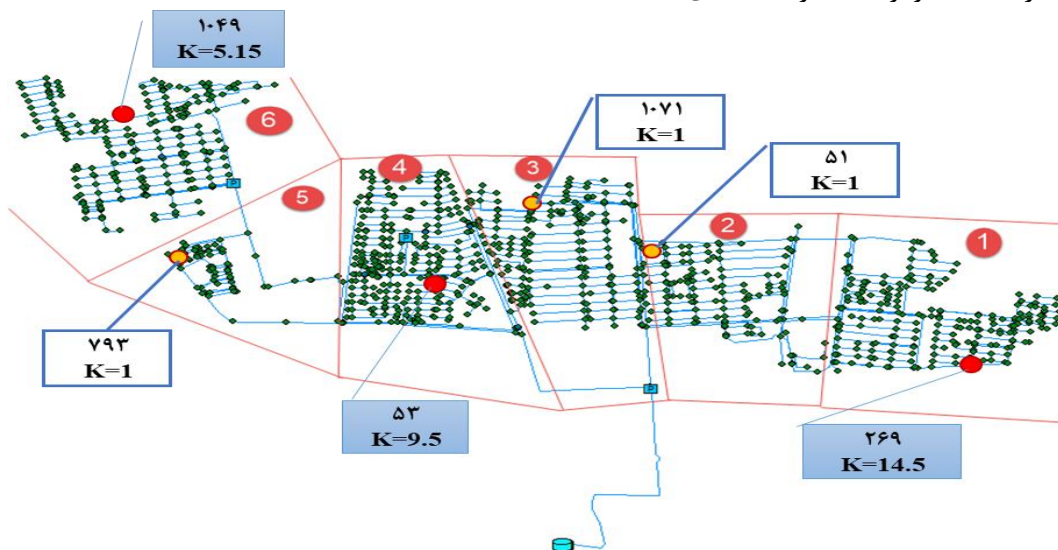
ارزیابی و تحلیل شبکه بیرجند

بررسی اتفاقات در شبکه بیرجند نشان می‌دهد که نسبت تعداد منافذ نشت با سطح مقطع ثابت به تعداد منافذ نشت با سطح مقطع متغیر (R_{FVL}) برابر ۰/۵ بوده است. با توجه به نمودار FAVAD و R_{FVL} ، دامنه تغییرات توان فشار مقدار ۰/۹ تا ۱/۲ بدست آمده است. همچنین نسبت (P_1/P_0) که بیانگر فشار متوسط شبکه در شرایط فشاری متفاوت می‌باشد، در شبکه بیرجند برابر ۱ محاسبه شده

نتایج و بحث

در این تحقیق نشت‌یابی بر مبنای واسنجی فشار و جریان و با استفاده از روش بهینه‌یابی پیشنهادی انجام می‌شود. جهت کارایی این روش، نشت‌یابی بر روی منطقه D شبکه توزیع آب بیرجند اجرا شده است. در این شبکه، از روش بهینه‌یابی پیشنهادی با توجه به فرضی بودن نشت در شبکه و امکان استفاده از داده‌های حالت نشت فرضی به عنوان داده‌های مشاهده‌ای استفاده شده است. همچنین شبکه مورد بررسی با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در جعبه ابزار واسنجی گر داروین مورد واسنجی و نشت‌یابی قرار گرفت تا امکان مقایسه بین نتایج روش پیشنهادی با نتایج واسنجی گر داروین صورت گیرد. لازم به ذکر است که واسنجی گر داروین قادر به محاسبه تلفات ظاهری شبکه نمی‌باشد. برای آنکه در شرایطی یکسان امکان مقایسه میان نتایج حاصل از واسنجی با الگوریتم بهینه‌یابی پیشنهادی و واسنجی گر داروین صورت گیرد، در قسمت نخست نتایج، مقدار واقعی تلفات ظاهری در هر دو روش در شبکه اعمال شده و پس از آن واسنجی و نشت‌یابی شبکه صورت گرفته است.

شبکه وجود دارند. بدین ترتیب ضریب نشت روزنه برای نشت‌های بزرگ براساس رابطه نشت با فشار محاسبه شده است که مقدار آن در کل شبکه برابر با $(\frac{L}{min}/(m))^{1.15}$ بدست آمده است. این مقدار به گره ۲۶۹ با ضریب نشت روزنه $(\frac{L}{min}/(m))^{1.15}$ ۱۴/۵، گره ۵۳ با ضریب نشت روزنه $(\frac{L}{min}/(m))^{1.15}$ ۹/۵ و گره ۱۰۴۹ با ضریب نشت روزنه $(\frac{L}{min}/(m))^{1.15}$ ۵/۱۵ به عنوان گره‌های نشت فرضی به شبکه اختصاص داده شده‌اند. همچنین در گره‌های ۷۹۳، ۱۰۷۱ و ۵۱، ضریب نشت روزنه‌ای به مقدار $(\frac{L}{min}/(m))^{1.15}$ ۱ در شبکه اختصاص داده شده است. با توجه به مقدار آب به حساب نیامده و مقادیر در نظر گرفته شده برای نشت بزرگ و نشت زمینه، مقدار ۱۰۹۸/۴۲ لیتر بر دقیقه برای تلفات ظاهری در نظر گرفته می‌شود. تلفات ظاهری به صورت درصدی از مصرف آب مشترکین در نظر گرفته شده که مقدار آن ۱۵/۷ درصد مصرف می‌باشد. شکل (۳) نقاط نشت‌دار در نواحی مختلف شبکه را نشان می‌دهد.



شکل (۳): ناحیه‌بندی و گره‌های نشت‌دار در شبکه توزیع آب بیرجند (ناحیه D)

است. با توجه به مقادیر (P_1/P_0) و همچنین R_{FVL} مقدار توان فشار برابر با ۱/۱۵ بدست آمده است.

براساس قرائت کنتورهای مشترکین، متوسط مصرف ناحیه ۶۹۳۹ لیتر بر دقیقه (۱۱۵/۶۵ لیتر بر ثانیه) و متوسط جریان ورودی به شبکه ۱۱۷۶۰ لیتر بر دقیقه (۱۹۶ لیتر بر ثانیه) می‌باشد. آب به حساب نیامده از اختلاف میان جریان ورودی به شبکه و میزان مصارف مشترکین حاصل می‌شود که مقدار آن برابر ۴۸۲۱ لیتر بر دقیقه (۸۰/۳۵ لیتر بر ثانیه) می‌باشد. آب به حساب نیامده در این تحقیق به سه مولفه‌ی نشت بزرگ، نشت زمینه و تلفات ظاهری تقسیم‌بندی می‌شود. ۴۰ درصد از آب به حساب نیامده به صورت فرضی به عنوان نشت زمینه در نظر گرفته شده است که مقدار آن برابر با ۱۹۲۸/۴ لیتر بر دقیقه می‌باشد. با توجه به مقدار در نظر گرفته شده برای نشت زمینه و براساس رابطه نشت با فشار مقدار $(\frac{L}{min}/(m))^{1.15}$ ۲۶/۲۵ به عنوان ضریب نشت روزنه برای نشت زمینه در کل شبکه بدست آمده است. همچنین فرض شده است که نشت‌های بزرگی به مقدار ۱۸۰۰ لیتر بر دقیقه در قسمت‌های مختلف

نشت زمینه و نشت بزرگ، مقادیر ضریب نشت روزنه آن‌ها با یکدیگر جمع شده و در ستون ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه تحلیل‌ها در یک محیط گسسته

جدول (۱) تعداد گره‌ها در هر ناحیه و مقادیر ضریب نشت روزنه برای نشت زمینه و نشت بزرگ در هر ناحیه را به تفکیک مشخص کرده است. با توجه به ماهیت یکسان

انجام می‌گیرد این مقادیر به صورت گرد شده در ستون ۶ آورده شده است.

جدول (۱): ضرایب واقعی نشت روزنه در نواحی مختلف شبکه

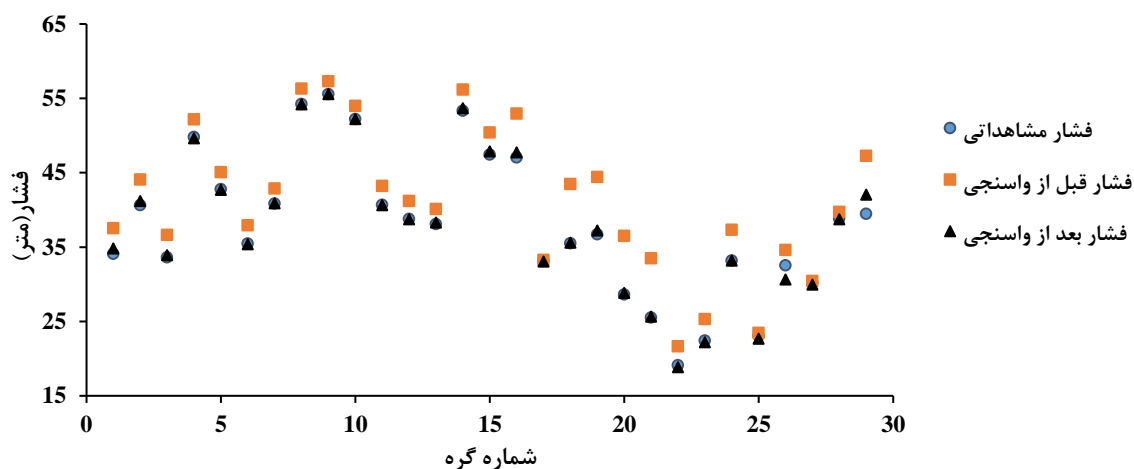
ناحیه	تعداد گره	ضریب نشت روزنه برای نشت بزرگ $(\frac{l}{min}/(m)^{1.15})$	ضریب نشت روزنه برای نشت زمینه $(\frac{l}{min}/(m)^{1.15})$	ضریب نشت روزنه برای بزرگ و نشت زمینه $(\frac{l}{min}/(m)^{1.15})$	ضریب نشت روزنه برای نشت زمینه در محیط گسسته $(\frac{l}{min}/(m)^{1.15})$
۱	۲۳۷	۱۴/۵	۶/۵۹	۲۱/۰۹	۲۱
۲	۱۲۵	۱	۳/۳۷	۴/۳۷	۴
۳	۲۰۶	۱	۵/۵۳	۶/۵۳	۷
۴	۲۷۲	۹/۵	۵/۱۵	۱۴/۶۵	۱۵
۵	۷۲	۱	۱/۲۱	۲/۲۱	۲
۶	۲۲۸	۵/۱۵	۴/۴	۹/۵۵	۱۰

نشت‌یابی براساس واسنجی با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی مبتنی بر برازندگی جزئی (ضریب تلفات ظاهری معلوم و برابر ۰/۱۵۷)

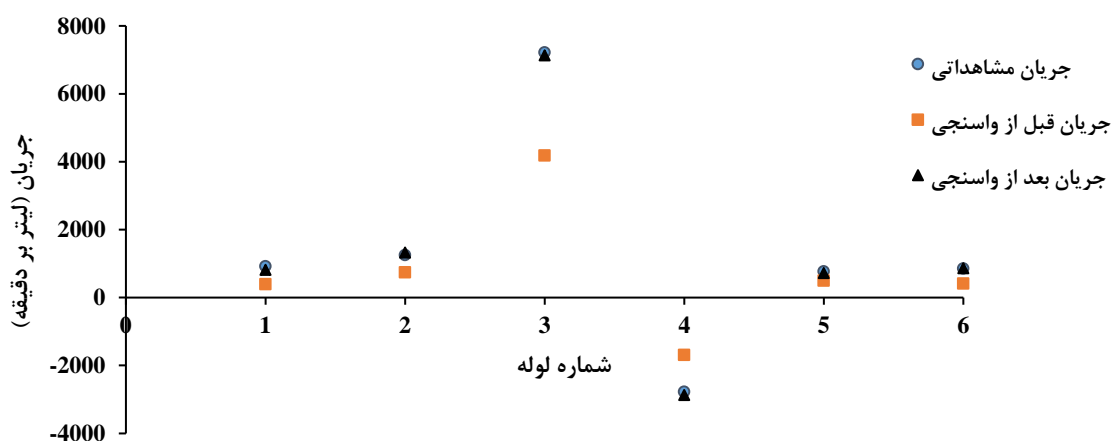
با توجه به اینکه نشت زمینه و نشت بزرگ هر دو از یک جنس هستند و در اثر وجود روزنه و متناسب با فشار از شبکه خارج می‌شوند، می‌توان مجموع آن‌ها را به عنوان قید در برنامه واسنجی در نظر گرفت. مقدار مجموع ضریب نشت روزنه برابر با $(\frac{l}{min}/(m)^{1.15})$ در نظر گرفته شده است. از آنجایی که یک قید در مسئله بهینه‌یابی وجود دارد که مجموع ضرایب نشت روزنه در کل شبکه را محدود می‌کند می‌توان با در نظر گرفتن مقداری خطا ضرایب نشت روزنه بین $(\frac{l}{min}/(m)^{1.15})$ تا $۶۰ \cdot (\frac{l}{min}/(m)^{1.15})$

را برای آن قابل قبول دانست. همچنین مقدار جریان ورودی به عنوان یک قید در مسئله وارد می‌شود. با توجه به تحلیل شبکه در زمان متوسط جریان، مقدار جریان ورودی ۱۱۷۶۰ لیتر بر دقیقه اعمال می‌گردد.

در این مسئله جمعیت اولیه، تعداد جمعیت و نسل به ترتیب برابر با ۵۰، ۵۰ و ۵ در نظر گرفته شده است. چرخه تولید پاسخ‌های جدید برای جمعیت در نظر گرفته شده چندین مرتبه تکرار می‌شود تا تمامی جمعیت تولید شده تمامی قیود مسئله را ارضا نمایند. در نتیجه نتایج تحلیل با ۳۶۲ تکرار حاصل شده است. شکل‌های (۴) و (۵) فشارها و جریان‌های مشاهداتی، فشارها و جریان‌های قبل و بعد از واسنجی در گره‌ها و لوله‌های مشاهداتی را در بهترین برازندگی نشان می‌دهند.



شکل (۴): فشار مشاهداتی، فشار قبل و بعد از واسنجی



شکل (۵): جریان مشاهداتی، جریان قبل و بعد از واسنجی

برازندگی بوده‌اند در جدول (۲) ارائه شده است. بهترین برازندگی برابر $0/۶۵۴$ می‌باشد که در ردیف ۱ واقع شده است. میزان برازندگی‌های حاصل از این ۱۰ تحلیل از $0/۶۵۴$ تا $0/۸۱۹$ بدست آمده است.

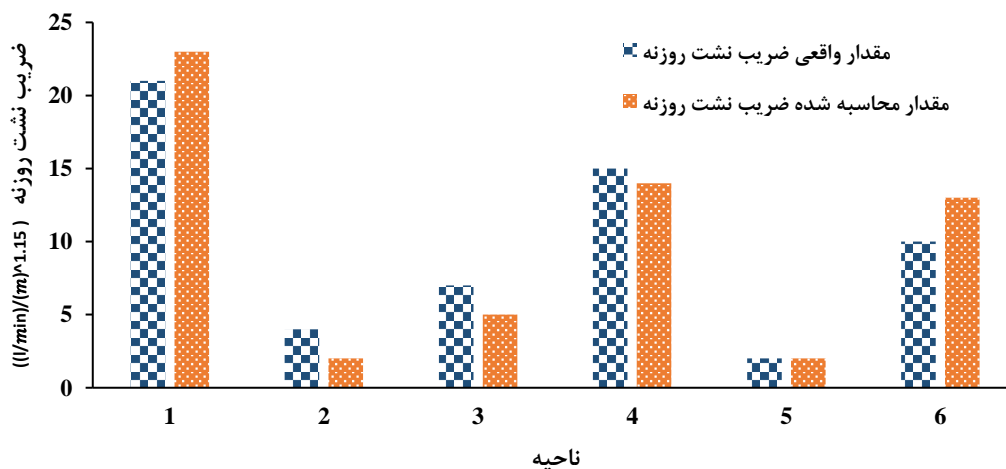
همان‌طور که در شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شود با واسنجی شبکه اختلاف مقادیر فشار و جریان مشاهداتی و محاسباتی به کمترین میزان رسیده است که نشان‌دهنده دقت بالا واسنجی است. ۱۰ پاسخ که دارای بهترین

جدول (۲): نتایج تحلیل‌ها حاصل از واسنجی شبکه

شماره پاسخ	$F(X)$	ضریب نشت روزنه $(\frac{l}{min}) / (mH_2O)^{1.15}$	۱	۲	۳	۴	۵
ضریب نشت روزنه در محیط گسسته (ستون ۶ جدول ۱)	۱/۰۳	۲۱	۴	۷	۱۵	۲	۱۰
۱	۰/۶۵۴	۱۸	۶	۵	۱۵	۰	۱۳
۲	۰/۷۱۹	۲۱	۲	۶	۱۴	۳	۱۴
۳	۰/۷۲۷	۲۱	۳	۹	۱۱	۲	۱۴
۴	۰/۷۳۲	۲۶	۰	۴	۱۵	۲	۱۲
۵	۰/۷۷۲	۲۵	۰	۴	۱۸	۰	۱۳
۶	۰/۷۸۶	۲۶	۱	۲	۱۵	۱	۱۴
۷	۰/۷۸۹	۲۳	۱	۷	۱۱	۲	۱۳
۸	۰/۸۰۷	۲۳	۶	۲	۱۳	۲	۱۴
۹	۰/۸۰۸	۲۴	۳	۴	۱۳	۱	۱۱
۱۰	۰/۸۱۹	۲۵	۲	۴	۱۵	۲	۱۱

به نتایج جدول (۲)، ضرایب نشت روزنه بدست آمده از میانگین ۱۰ پاسخ با بهترین برازندگی به همراه مقادیر واقعی آن‌ها در نواحی مختلف در شکل (۶) نشان داده شده است.

پس از انجام تحلیل‌ها، نتایج حاصل در نواحی مختلف شبکه، در ستون‌های ۳ تا ۸ جدول (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی برازندگی‌ها، نشت بزرگ در ناحیه‌های ۴، ۱ و ۶ شناسایی شده است. با توجه



شکل (۶): مقدار واقعی و محاسبه شده ضریب نشت روزنه در نواحی مختلف



جدول (۳): نتایج تحلیل‌ها در ابزار واسنجی گر داروین
نرم‌افزار واترجمز

ضریب نشت	ضریب نشت	ضریب نشت	ناحیه
روزنه در محیط گسسته	روزنه در ناحیه‌ها	روزنه در گره‌ها	
(۱۰۰۰۰۰ تکرار) $(\frac{l}{min}/(m)^{1.15})$			
۲۱	۲۸/۴۴	۰/۱۲	۱
۴	۰	۰/۱۰۰	۲
۷	۲/۰۶	۰/۰۱	۳
۱۵	۱۶/۳۲	۰/۰۶	۴
۲	۰	۰/۱۰۰	۵
۱۰	۱۳/۶۸	۰/۰۶	۶

مقایسه میان نشت‌یابی براساس واسنجی با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی مبتنی بر برازندگی جزئی و ابزار واسنجی گر داروین نرم‌افزار واترجمز

برای آنکه دقت واسنجی‌های انجام شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و واسنجی گر داروین مشخص شود، نیاز است که تابع برازندگی $F(X)$ با نشت‌های واقعی هر ناحیه محاسبه و با برازندگی‌های بدست آمده از این دو روش مقایسه شود. با توجه به اینکه شبکه به نواحی مختلفی تقسیم شده است و به تمامی گره‌های یک ناحیه معین ضریب نشت روزنه یکسانی تعلق می‌گیرد، رسیدن به تابع برازندگی صفر دور از انتظار است. مقدار تابع برازندگی $F(X)$ با نشت‌های واقعی هر ناحیه طبق جدول (۲) برابر با ۱/۰۳ می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده در بخش‌های قبل مقدار تابع برازندگی $F(X)$ برای روش بهینه‌یابی پیشنهادی با ۳۶۲ تکرار برابر با ۰/۶۵۴ و برای واسنجی گر داروین با ۱۰۰۰۰۰ برابر با ۰/۸۱۷ می‌باشد. اساس واسنجی به روش بهینه‌یابی پیشنهادی و واسنجی گر داروین بدون در نظر گرفتن پاسخ صحیح، حداقل‌سازی اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد. با مقایسه برازندگی‌های بدست آمده حاصل از این دو روش با مقدار برازندگی بدست آمده با نشت‌های واقعی هر ناحیه، می‌توان گفت که هر دو

نشت‌یابی براساس واسنجی با استفاده از ابزار واسنجی گر داروین نرم‌افزار واترجمز (ضریب تلفات ظاهری معلوم و برابر ۰/۱۵۷)

واسنجی گر داروین نرم‌افزار واترجمز با استفاده از الگوریتم ژنتیک به واسنجی و نشت‌یابی شبکه می‌پردازد. جهت واسنجی شبکه فشارها و جریان‌های مشاهداتی در حالت متوسط جریان شبکه به واسنجی گر داروین معرفی شده سپس با تنظیم ضرایب نشت روزنه مکان‌یابی نشت در شبکه انجام می‌شود. در واسنجی گر داروین شبکه به ۶ ناحیه تقسیم و هر ناحیه به عنوان یک گروه از گره‌ها جهت فرآیند واسنجی معرفی شده است. حداقل و حداکثر ضریب نشت روزنه برای هر یک از گره‌ها به ترتیب برابر با $(\frac{l}{min}/(m)^{1.15})$ و $0.58/4$ و دقت محاسبه نیز برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شد. مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک همان مقادیر پیش فرض نرم‌افزار در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که با منظور نمودن مقادیر مختلف برای این پارامترها، افزایش در میزان دقت واسنجی‌گری مشاهده نگردید به همین جهت همان مقادیر پیش فرض به عنوان مقادیر تنظیمی در نظر گرفته شدند. همچنین جهت فراهم کردن محیطی یکسان با روش بهینه‌یابی پیشنهادی، تابع هدف استفاده شده در ابزار واسنجی گر داروین همان تابع هدف رابطه (۷) می‌باشد.

برنامه با حداکثر تعداد تکرار ۱۰۰۰۰۰ اجرا شده است که کمترین میزان برازندگی آن ۰/۸۱۷ بدست آمده است. در این حالت واسنجی گر داروین توانسته است ناحیه‌های ۴، ۱ و ۶ را به عنوان نواحی نشت‌دار شناسایی کند. نتایج حاصل در جدول (۳) ارائه شده است. لازم به ذکر است که جهت افزایش دقت واسنجی، دبی ورودی به شبکه به عنوان جریان مشاهداتی به برنامه معرفی شده است.

تشخیص درست مقدار و موقعیت نشت در نواحی با حداقل خطا می‌باشد. از این رو جهت صحت‌سنجی نتایج نشت‌یابی حاصل از این دو روش تابع برازندگی $F(d)$ برای بهترین برازندگی هر یک از آن‌ها محاسبه شده و سپس با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در جدول (۴) نتایج حاصل از روش بهینه‌یابی پیشنهادی و واسنجی‌گر داروین ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود روش بهینه‌یابی پیشنهادی توانسته با تعداد تکرار کمتر، دقت بیشتری نسبت به واسنجی‌گر داروین داشته باشد.

روش توانسته‌اند فشار در گره‌ها و جریان در لوله‌ها را با دقت مناسبی واسنجی کنند. از این جهت هر دو روش دارای کارایی قابل قبولی هستند. همچنین با مقایسه برازندگی‌های بدست آمده از این دو روش، این نتیجه حاصل می‌شود که روش بهینه‌یابی پیشنهادی با تعداد تکرار کمتر، همگرایی بیشتری با مقادیر مشاهداتی دارد.

رسیدن به یک برازندگی خوب، انجام یک نشت‌یابی خوب را تضمین نمی‌کند و ممکن است جواب‌های متعددی وجود داشته باشد که فشار و جریان را در نقاط اندازه‌گیری شده تنظیم کند. اما مسئله مهم در روش‌های نشت‌یابی

جدول (۴): مقایسه نتایج روش بهینه‌یابی مبتنی بر برازندگی جزئی با واسنجی‌گر داروین نرم‌افزار واترجمز

تعداد تکرار	$F(d)$	$F(X)$	نام روش
-	۰/۳۵	۱/۰۳	مقدار برای ضریب نشت روزنه در محیط گسسته (ستون ۶ جدول ۱)
۳۶۲	۲/۲۸	۰/۶۵۴	روش بهینه‌یابی پیشنهادی
۱۰۰۰۰۰	۴/۴۳	۰/۸۱۷	واسنجی‌گر داروین در نرم‌افزار واترجمز

جدول (۵): نتایج حاصل از انتخاب ضریب تلفات ظاهری در بازه ۰/۱ تا ۰/۳

برازندگی	ضریب تلفات ظاهری	ردیف
۱/۲۵	۰/۱	۱
۰/۶۹	۰/۱۵	۲
۰/۷۹	۰/۲	۳
۱/۰۸	۰/۲۵	۴
۱/۶۸	۰/۳	۵

با توجه به نتایج جدول (۵)، بهترین برازندگی‌ها در ردیف ۲ و ۳ واقع شده که ضریب تلفات ظاهری متناظر با آن‌ها ۰/۱۵ و ۰/۲ می‌باشد. جهت ارزیابی دقیق‌تر ضریب تلفات ظاهری می‌توان حد پایین و بالا ضریب تلفات ظاهری را در برنامه واسنجی به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۰/۲ و با طول گام ۰/۰۱ در نظر گرفت. نتایج بدست آمده در جدول (۶) ارائه شده است.

محاسبه ضریب تلفات ظاهری براساس واسنجی با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی مبتنی بر برازندگی جزئی (ضریب تلفات ظاهری نامعلوم فرض می‌شود).

در این مرحله از واسنجی تعداد جمعیت و نسل و همچنین تمامی قیود مسئله بهینه‌یابی همان مقادیر در نظر گرفته شده در بخش قبلی لحاظ شده است.

جهت محاسبه ضریب تلفات ظاهری ابتدا برنامه واسنجی با حد بالا و پایین ۰/۱ و ۰/۳ و با طول گام ۰/۰۵ تحلیل شد. به ازای هر یک از مقادیر انتخابی برای تلفات ظاهری مجموعه‌ای از جواب‌ها به همراه برازندگی‌های متناظرشان حاصل می‌شود. نتایج در جدول (۵) ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقدار برازندگی ارائه شده در جدول (۵) از میانگین ۱۰ برازندگی برتر بدست آمده است.



جدول (۶): نتایج حاصل از انتخاب ضریب تلفات ظاهری
در بازه ۰/۱۵ تا ۰/۲

ردیف	ضریب تلفات ظاهری	برازندگی
۱	۰/۱۵	۰/۶۹
۲	۰/۱۶	۰/۷۲
۳	۰/۱۷	۰/۷۴
۴	۰/۱۸	۰/۷۶
۵	۰/۱۹	۰/۷۳
۶	۰/۲	۰/۷۹

تحقیق واسنجی و نشت‌یابی منطقه D شبکه توزیع شهر بیرجند با استفاده از الگوریتم مبتنی بر برازندگی جزئی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی با بهره‌گیری از برازندگی جزئی در هر ناحیه می‌تواند نواحی محتمل به نشت را با دقت بالایی شناسایی کند. هر چند که در تشخیص مقدار نشت در نواحی مختلف دارای خطا بوده است اما به دلیل ماهیت تصادفی روش به کار برده شده و نامعین بودن مسئله نشت‌یابی و همچنین ناحیه‌بندی گره‌های شبکه، وجود این مقدار خطا را نمی‌توان دلیلی بر ناکارآمدی این روش دانست. نتایج حاصل از مقایسه روش بهینه‌یابی پیشنهادی و واسنجی‌گر داروین نشان داد که الگوریتم بهینه‌یابی پیشنهادی برای رسیدن به جواب صحیح به تکرار کمتری نسبت به واسنجی‌گر داروین نیاز دارد. هر دو روش در تشخیص مقدار نشت در نواحی مختلف شبکه دارای خطا می‌باشند اما میزان خطای برآورد نشت در ناحیه‌ها در روش الگوریتم پیشنهادی کمتر از واسنجی‌گر داروین است. همچنین در این تحقیق میزان تلفات ظاهری در کل شبکه قابل محاسبه است در صورتی که واسنجی‌گر داروین قادر به محاسبه تلفات ظاهری در شبکه نمی‌باشد. سازمان‌های آب می‌توانند از این روش جهت شناسایی نواحی نشت‌دار بهره‌برند. همچنین روش پیشنهادی این پتانسیل را دارد که به عنوان روشی کمکی در کنار روش‌های موضعی در جهت کاهش هزینه‌های نشت‌یابی استفاده گردد.

نتایج جدول (۶) بهترین برازندگی‌ها را واقع در ردیف ۱ و ۲ نشان می‌دهد که ضریب تلفات ظاهری متناظر با آن‌ها برابر با ۰/۱۵ و ۰/۱۶ می‌باشد. در ادامه برنامه با ضریب تلفات ظاهری ۰/۱۵۵ نیز تحلیل شد که میانگین ۱۰ برازندگی برتر آن برابر با ۰/۶۶ بدست آمده است. با توجه به اینکه با انتخاب ضریب تلفات ظاهری ۰/۱۵۵ بهترین برازندگی حاصل شد، این مقدار به عنوان ضریب تلفات ظاهری در کل شبکه تعیین می‌شود.

نتیجه‌گیری

شناسایی نشت یکی از مهم‌ترین مسائل مرتبط با شبکه‌های توزیع آب است. از اهداف اصلی این تحقیق بهبود در روش‌های موجود نشت‌یابی مبتنی بر واسنجی بوده که با بهبود در شیوه‌های بهینه‌یابی تحقق یافته است. در این

منابع

- آب و فاضلاب خراسان جنوبی شهرستان بیرجند. ۱۳۹۴. داده‌های آماری مربوط به جریان ورودی به شبکه، آرشو اطلاعات آب و فاضلاب خراسان جنوبی شهرستان بیرجند.
- بوستانی، آ. و س. خدانشناس. ۱۳۹۱. بررسی روش نشت‌یابی در شبکه آب برمبنای رابطه فشار-نشت (ارائه کد بهینه‌یابی مکان‌یابی نشت). نشریه آب و توسعه پایدار، سال دوم، شماره ۴، ص ۶۶-۵۹.
- تابش، م. ۱۳۹۱. راهنمای شناخت و بررسی عوامل موثر در آب به حساب نیامده و راهکارهای آن، نشریه شماره ۵۵۶، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی نهاد ریاست جمهوری.
- ثابت، م.، ع. نصیریان، م. محتشم و م. احراری. ۱۳۹۸. تعیین مقدار و موقعیت نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از کالیبراسیون (مطالعه موردی: شبکه توزیع آب شهر گلپه‌ار، خراسان رضوی)، نشریه آب و فاضلاب، سال سی‌ام، شماره ۶، ص ۱۱۹-۱۲۵.

- دفتر مطالعات پایه منابع آب. ۱۳۹۹. گزارش آخرین وضعیت بارندگی ایستگاه‌های مینای وزارت نیرو، وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، دفتر مطالعات پایه منابع آب، <http://wrs.wrm.ir/m3/gozaresh.asp>
- معاشری، ر. و م. جلیلی قاضی‌زاده. ۱۳۹۷. یافتن موقعیت و تعیین مقدار دو نشت همزمان در شبکه‌های آبرسانی با استفاده از الگوریتم دومرحله‌ای. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2173-4>
- Ali, N. A., G. Abozeid, M. S., Darweesh and M. Mamdouh. 2015. EVALUATION OF REHABILITATION SOLUTIONS FOR PERFORMANCE OF WATER PIPES NETWORK (CASE STUDY-EL-MINIA NEW CITY NETWORK). *Journal of Engineering Sciences Assiut University*, 43(5): 644-662.
- Almandoz, J., E. Cabrera, F. Arregui, E. Cabrera Jr and R. Cobacho. 2005. Leakage assessment through water distribution network simulation. *Journal of water resources planning and management*, 131(6): 458-466.
- Amoatey, P. K., A. Bárdossy and H. Steinmetz. 2018. Inverse Optimization based Detection of Leaks from Simulated Pressure in Water Networks, Part 1: Analysis for a single Leak. *Journal of Water Management Modeling*.
- Amoatey, P. K., A. Bárdossy and H. Steinmetz. 2018. Inverse Optimization based Detection of Leaks from Simulated Pressure in Water Networks, Part 2: Analysis for Two Leaks. *Journal of Water Management Modeling*.
- Eryiğit, M. 2017. Water loss detection in water distribution networks by artificial immune systems-based on model calibration. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(9): 1014-1018.
- Hajibandeh, E. and S. Nazif. 2018. Pressure zoning approach for leak detection in water distribution systems based on a multi objective ant colony optimization, *Water Resources Management*, 32(7): 2287-2300.
- Karamouz, M., M. Tabesh, S. Nazif and A. Moridi. 2005. Estimation of hydraulic pressure in water networks using artificial neural networks and fuzzy logic. *Journal of Water and Wastewater*, 56: 3-14.
- Moasheri, R. and M. Jalili-Ghazizadeh. 2019. Locating of Probabilistic Leakage Areas in Water Distribution Networks by a Calibration Method Using the Imperialist Competitive Algorithm. *Water Resources Management*, 1-15.
- Nasirian, A., M. F. Maghrebi and S. Yazdani. 2013. Leakage detection in water distribution network based on a new heuristic genetic algorithm model. *Journal of Water Resource and Protection*, 5(3): 294.
- Pudar, R. S. and J. A. Liggett. 1992. Leaks in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(7): 1031-1046.
- Sage, P. 2005. Developments in use of network models for leakage management at United Utilities North West. in *CIWEM North West and North Wales Branch Water Treatment and Distribution Conference*, Warrington, UK, 1-31.
- Shamir, U. Y. and C. D. Howard. 1968. Water distribution systems analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, 94(1): 219-234.
- Sophocleous, S., D. Savić and Z. Kapelan. 2018. Leak Detection and Localization Based on Search Space Reduction and Hydraulic Modelling. in *WDSA/CCWI Joint Conference Proceedings*.
- Sophocleous, S., D. Savić, Z. Kapelan and O. Giustolisi. 2017. A two-stage calibration for detection of leakage hotspots in a real water distribution network. *Procedia Eng*, 186: 168-176.
- Świtnicka, K., P. Suchorab and B. Kowalska. 2017. The optimisation of a water distribution system using Bentley WaterGEMS software. In *ITM Web of Conferences*, 15: 03009.
- Wu, Z. Y. and P. Sage. 2008. Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration. in *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 1-11.
- Wu, Z. Y., P. Sage and D. Turtle. 2010. Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(1): 116-128.



Developing a New Calibration-Based Optimization Method for Leak Detection in Water Distribution Networks

Marzieh Ahrari¹, Ali Nasirian²

Abstract

Recently, calibration based methods are developed for leak detection in water distribution networks (WDN). These methods are collected the pressures and flows data of a real network and try to regulate the demands in hydraulic network model to match the model results with observations. Therefore, in addition of hydraulic analysis, an optimization algorithm is needed. In this study, a new population based optimization method is presented. In this method, the network first is zoned to some regions. First generation are guessed for appearance loss and leakage in each zone and answers fitness are calculated. Moreover, a new factor named minor fitness, developing in this research, is computed for each zone in all answers. A small minor fitness in a zone, predicts the correct value of leakage. With combination of the results of best answers, in each generation, a range is calculated for the next generation selection. This range become narrower in consecutive generations and the correct answer is found. The proposed method is investigated on a real network with hypothetical leakages. The results obtained in model are evaluated with the assumed value, as well as, WaterGEMS model results. The results show the capability of the proposed optimization method in detection of the both location and the value of leakage. Comparing this method with Darwin calibrator show more accuracy, convergence and speed of the proposed method. The fitness in the present study method and WaterGEMS calibration are 0.654 and 0.817, respectively.

Keywords: Calibration, Water Distribution Network, Optimization, Darwin Calibrator, Leak Detection

¹ MSc Student of Water and Hydraulic Structures Engineering, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Birjand University, Birjand, Iran. marziye.ahrari@birjand.ac.ir

² Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Birjand University, Birjand, Iran. a.nasirian@birjand.ac.ir
(Corresponding Author)

Extended Abstract

Research Paper

Developing a New Calibration-Based Optimization Method for Leak Detection in Water Distribution NetworksMarzieh Ahrari¹, Ali Nasirian²

1. MSc Student of Water and Hydraulic Structures Engineering, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Birjand University, Birjand, Iran. marziye.ahrari@birjand.ac.ir

2. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Birjand University, Birjand, Iran. a.nasirian@birjand.ac.ir (Corresponding Author)



10.22125/IWE.2020.215890.1278

Received:

25. June.2020

Accepted:

05. October.2020

Available online:

10. January.2022

Keywords: Calibration, Water Distribution Network, Optimization, Darwin Calibrator, Leak Detection

Abstract

Recently, calibration based methods are developed for leak detection in water distribution networks (WDN). These methods are collected the pressures and flows data of a real network and try to regulate the demands in hydraulic network model to match the model results with observations. Therefore, in addition of hydraulic analysis, an optimization algorithm is needed. In this study, a new population based optimization method is presented. In this method, the network first is zoned to some regions. First generation are guessed for appearance loss and leakage in each zone and answers fitness are calculated. Moreover, a new factor named minor fitness, developing in this research, is computed for each zone in all answers. A small minor fitness in a zone, predicts the correct value of leakage. With combination of the results of best answers, in each generation, a range is calculated for the next generation selection. This range become narrower in consecutive generations and the correct answer is found. The proposed method is investigated on a real network with hypothetical leakages. The results obtained in model are evaluated with the assumed value, as well as, WaterGEMS model results. The results show the capability of the proposed optimization method in detection of the both location and the value of leakage. Comparing this method with Darwin calibrator show more accuracy, convergence and speed of the proposed method. The fitness in the present study method and WaterGEMS calibration are 0.654 and 0.817, respectively.

1. Introduction

In addition to the importance of water as a vital fluid, it is also considered an economic commodity. For this reason, the concept of non-revenue for water (NRW), which includes the concepts of water loss from both economic and critical perspectives, is important to water experts. The most important way to reduce NRW is to identify the locations of the leaks. Therefore, calibration-based leak detection has been considered by researchers due to its time and cost savings in field leak detection.

Sage (2005) used a genetic algorithm to detect leaking points in a network. Wu et al., (2010) calibrated and detected leakage on a hypothetical network and a real network based on genetic algorithm. They considered leakage as pressure dependent and as emitter coefficient in model nodes. The results of their research showed that by detecting leaks, the calibration accuracy of the hydraulic model is improved. Nasirian et al., (2013) in two hypothetical networks by merging the genetic algorithm method and an innovative method called step by step elimination method identified leaky points. Their research showed that after several iterations, leaky points can be detected with high accuracy. Sophocleous et al., (2018) in a real network using genetic algorithm and the reduction of search space identified leak points.

In this research, a new optimization method for finding leakage ranges in water supply networks is presented. In this method, after zoning the network, a function called local fitness (LF) is calculated for each area. Using reduce search space, the speed and accuracy of the optimization process is improved.

2. Materials and Methods

In this study, NRW are divided into three categories: apparent losses, background leaks and burst leaks (large leaks). Separation of background and large leakage has been done with the aim of identifying areas with large leakage, although they are identical in nature. Therefore, the demands of the nodes based on different water components is obtained from Equation (1):

$$D_j = DB_j + DA_j + DL_j \quad (1)$$

DA_j is the apparent loss in node j which is obtained from Equation (2) and DL_j is the leakage in node j which is obtained from Equation (3).

$$DA_j = C \times DB_j \quad (2)$$

$$DL_j = (Kb_j + KB_j) \times (P_j)^n \quad (3)$$

The integration of relations (1), (2) and (3), relation (4) is obtained.

$$D_j = DB_j + C \times DB_j + K_j \times (P_j)^n \quad (4)$$

The optimization model for determining emitter coefficients and apparent losses follows the following equations.

$$X = (K_N, C); N = 1, 2, \dots, NGroup \quad (6)$$

$$F(X) = \frac{\sum_{nh=1}^{NH} (Hs_{nh} - Ho_{nh})^2 + \sum_{nf=1}^{NF} (Fs_{nf} - Fo_{nf})^2}{NH + NF} \quad (7)$$

$$0 \leq K_N \leq K_{sum}$$

$$\sum_{N=1}^{NGroup} K_N = K_{sum} \quad (8)$$

$$C_{min} \leq C \leq C_{max}$$

to validate obtained results, in addition to $F(X)$, another fitness function is considered as:

$$F(d) = \sqrt{\frac{\sum_{N=1}^{NGroup} (Ko_N + Ks_N)^2}{NGroup}} \quad (9)$$

In Equation (7), $F(X)$ is the objective function that indicates the appropriateness of the measured values and the values simulated by the model. In this study, the network is divided into several zones and a

function is introduced as a local fitness (LF) function for each zone. LF for each zone is defined in proportion to the observational pressure and flows in each zone.

$$FN_i(X) = \frac{\sum_{zh=1}^{ZH} (HNS_{zh} - HNO_{zh})^2 + \sum_{zl=1}^{ZL} (FNS_{zl} - FNO_{zl})^2}{ZH + ZL} \quad (10)$$

In order to consider the effect of the fitness function on the whole network, a function called the modified fitness function according to Equation (11) is introduced for each zone.

$$FNm_i(X) = \frac{FN_i(X) \times F(X)_i}{F(X)} \quad (11)$$

Case study WDS

Birjand is located in the south of South Khorasan province. Water distribution network of Birjand is divided into several separate district metered area (DMA) that in this study, DMA D of Birjand has been studied. Figure (2) shows the zoning of DMA D of Birjand.

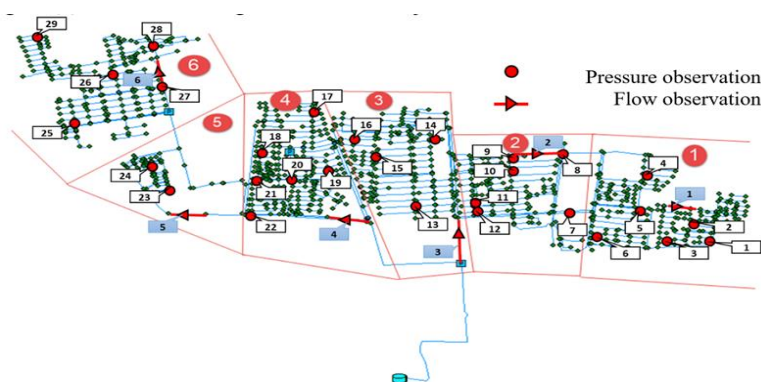


Figure (2): Location of pressure and flow observation point in zone D

3. Results

Investigation of pipe failure shows RFVL (Ratio of Fixed and Variable Leakage) is equal to 0.5 in this WDS. According to the FAVAD (Fixed and Variable Area Discharges) and RFVL diagrams, the range of pressure component is 0.9 to 1.2. Also, the ratio (P_1/P_0) , which indicates the average WDS pressure in different time, has been calculated to be 1 in the WDS. According to the values (P_1/P_0) as well as RFVL, the amount of pressure component is 1.15.

Based on customer meter readings, the average consumption is 6939 liters per minute (115.65 liters per second) and the average inflow to the WDS is 11760 liters per minute (196 liters per second). The NRW is equal to 4821 liters per minute (80.35 liters per second). 40% of NRW is hypothetically considered as background leakage, which is equal to 1928.4 liters per minute. Therefore, based on the relationship between leakage and pressure, the value of emitter coefficient was $26.25 \left(\frac{1}{\text{min}}/(\text{m})^{1.15}\right)$ for background leakage in the WDS. It is also assumed that there are large leaks of 1800 liters per minute in different nodes of the WDS. Thus, the emitter coefficient for large leaks has been calculated $32.15 \left(\frac{1}{\text{min}}/(\text{m})^{1.15}\right)$. Figure (3) shows leaky points in different zones of the WDS

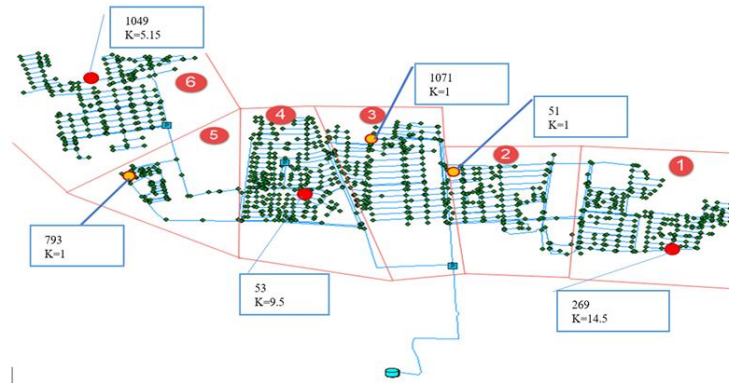


Figure (3): Zoning and leaky nodes in WDS (Zone D)

Table (1) shows the number of nodes in each zone and the values of emitter coefficient for field leakage and large leakage. Due to the same nature of field leakage and large leakage, the values of their emitter coefficient are added together and presented in column 5. It should be noted that since the analyzes are performed in a discrete space, these values are given in rounded form in column 6.

Table (1): Actual emitter coefficients in different zones of the WDS

Sum of emitter coefficient in discrete space $(\frac{l}{min}) / (m)^{1.15}$	Sum of emitter coefficient $(\frac{l}{min}) / (m)^{1.15}$	Emitter coefficient for field leaks $(\frac{l}{min}) / (m)^{1.15}$	Emitter coefficient for large leaks $(\frac{l}{min}) / (m)^{1.15}$	Number of junctions	zone
21	21.09	6.59	14.5	237	1
4	4.37	3.37	1	125	2
7	6.53	5.53	1	206	3
15	14.65	5.15	9.5	272	4
2	2.21	1.21	1	72	5
10	9.55	4.4	5.15	228	6

Leakage detection using LF optimization algorithm

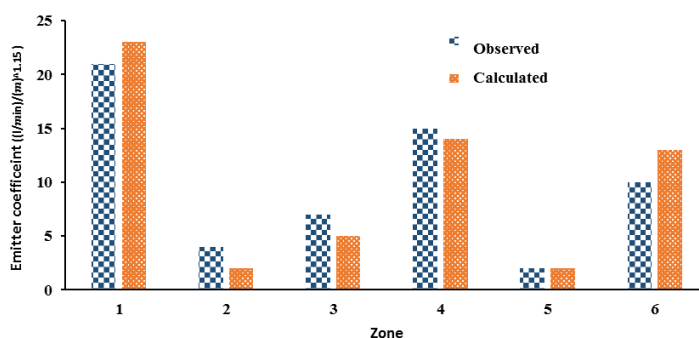
The results of the analysis were obtained with 362 iterations. The best fitness is 0.654, which is located in row 1. The fitness of the 10 best analyzes has been obtained from 0.654 to 0.819. The results in different zones are shown in columns 3 to 8 of Table (2). As can be seen, in all fitness, large leaks have been identified in zones 4, 1 and 6

Table (2): Results of WDS calibration analyzes

emitter coefficient $(\frac{l}{min})/(mH_2O)^{1.15}$						$F(X)$	Answer number
Zon e6	Zon e5	Zon e4	Zon e3	Zon e2	Zon e1		
10	2	15	7	4	21	1.03	Sum of emitter coefficient in discrete space
13	0	15	5	6	18	0.654	1
14	3	14	6	2	21	0.719	2
14	2	11	9	3	21	0.727	3
12	2	15	4	0	26	0.732	4
13	0	18	4	0	25	0.772	5
14	1	15	2	1	26	0.786	6
13	2	11	7	1	23	0.789	7
14	2	13	7	6	23	0.807	8
11	1	13	4	3	24	0.808	9
11	2	15	4	2	25	0.819	10

The emitter coefficients obtained from the average of 10 answers with the best fitness and their actual values in different zones are shown in Figure (6).

Figure (6): The actual and calculated value of the emitter coefficient in different zones.



In order to calibrate the WDS, the observed pressures and flows give to the Darwin calibrator. The program with 100,000 iterations results 0.817 as fitness. In this case, Darwin calibrator was able to identify 4, 1 and 6 as leaky zones. Table (4) presents the results of LF and Darwin calibration results.

Table (4): Comparison of the results of LF optimization method with Darwin calibrator

Iteration	$F(d)$	$F(X)$	Method
-	0.35	1.03	Value for emitter coefficient in discrete medium (column 6 of Table 1)
362	2.28	0.654	LF optimization method
100000	4.43	0.817	Darwin calibrator

4. Discussion and Conclusion

The results of comparing the proposed optimization method with the Darwin calibrator showed that the proposed optimization algorithm requires less iterations than the Darwin calibrator to achieve the correct answer. Both methods have errors in detecting the amount of leakage in different areas of the network, but the amount of leakage estimation error in the areas in the proposed algorithm method is less than Darwin calibrator.

.5. Six important references

1. Amoatey, P. K., A. Bárdossy and H. Steinmetz. 2018. Inverse optimization-based detection of leaks from simulated pressure in water networks, part 2: analysis for two leaks. *Journal of water management modeling*.
2. Sage, P. 2005. Developments in use of network models for leakage management at United utilities north west. in CIWEM north west and north Wales branch water treatment and distribution conference, Warrington, UK, 1-31.
3. Wu, Z. Y., P. Sage and D. Turtle. 2010. Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system. *Journal of water resources planning and management*, 136(1): 116-128.
4. Nasirian, A., M. F. Maghrebi and S. Yazdani. 2013. Leakage detection in water distribution network based on a new heuristic genetic algorithm model. *Journal of water resource and protection*, 5(3): 294.
5. Sophocleous, S., D. Savić and Z. Kapelan. 2018. Leak detection and localization based on search space reduction and hydraulic modelling. in WDSA/CCWI Joint conference proceedings.
6. Wu, Z. Y., P. Sage and D. Turtle. 2010. Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system. *Journal of water resources planning and management*, 136(1): 116-128.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.