

Technical Note

یادداشت فنی

Step-by-Step Leakage Detection in Water Distribution Systems Based on Nodal Pressure Calibration using Genetic Algorithm

نشت یابی مرحله‌ای شبکه‌های توزیع آب بر اساس واسنجی فشارهای گرهی به روش الگوریتم ژنتیک

A. Nasirian¹, M.F. Maghrebi^{2*} and S. Yazdani³

علی نصیریان^۱، محمود فغفور مغربی^{۲*} و سیاوش یزدانی^۳

Abstract

The leakage is one of the most important issues in Water Distribution Systems (WDS) which imposes huge costs to water industries. Current methods detecting leakages are costly, time consuming, and labor intensive. New methods have recently been considered based on calibrating nodal pressures. Modeling and calibrating the nodal pressure using genetic algorithm is one of these methods which unfortunately is not yet accurate enough to be applied widely on real networks and more investigations is needed in this regard. In this paper, a new approach is developed which detects and eliminate the nodes with no leakage among unknown demand nodes step-by-step. In this method, an ordinary calibration was accomplished. Some nodes with no leakages are then eliminated from the set of leaky nodes and the network was calibrated again. Several iteration of this process have shown a good improvement in the leakage detection in WDS.

Keywords: Calibration, Step-by-step elimination algorithm, Water distribution network, Leak detection

چکیده

نشت یکی از مهمترین مشکلات شبکه‌های توزیع آب است که همه ساله هزینه‌های هنگفتی را به مسئولین شهری تحمیل می‌نماید. نشت یابی با روش‌های کنونی زمانبر و پرهزینه است. بدین منظور روش‌های نشت یابی سراسری مبتنی بر کالیبراسیون فشارهای گره‌ای اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این روش‌ها، نشت‌یابی بر اساس واسنجی شبکه با کمینه سازی اختلاف مقادیر مشاهداتی و محاسباتی فشار و دبی از طریق مدل‌سازی و بهینه‌یابی به روش الگوریتم ژنتیک است. متأسفانه این روش‌ها هنوز به دقت مناسب برای کاربرد در سطح شبکه‌های واقعی نرسیده‌اند. در این پژوهش روشی جدید مبتنی بر حذف مرحله‌ای گزیننده‌های وجود نشت در شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. این روش با کالیبراسیون عادی شبکه آغاز شده و پس از اتمام واسنجی با حذف برخی از گره‌ها از بین پارامترهای تنظیمی و کاهش دامنه جستجو، مجدداً واسنجی شبکه را به انجام می‌رساند. بررسی‌ها انجام شده کارایی بسیار مناسب این روش را برای بهبود نشت‌یابی در شبکه نشان داده است.

کلمات کلیدی: واسنجی، الگوریتم حذف مرحله‌ای، شبکه توزیع، نشت یابی.

Received: January 6, 2013

Accepted: January 27, 2013

تاریخ دریافت مقاله: ۱۷ دی ۱۳۹۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۸ بهمن ۱۳۹۱

1- Ph.D. Student of Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad -Iran. Email: ali_geran@yahoo.com

2- Professor of Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad- Iran, Email: maghrebi@um.ac.ir

3- Graduated From Tabriz University, Senior of Hydraulic Engineering, Tabriz- Iran

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری عمران- آب دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- کارشناس ارشد عمران - مهندسی آب، دانش آموخته دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*- نویسنده مسئول

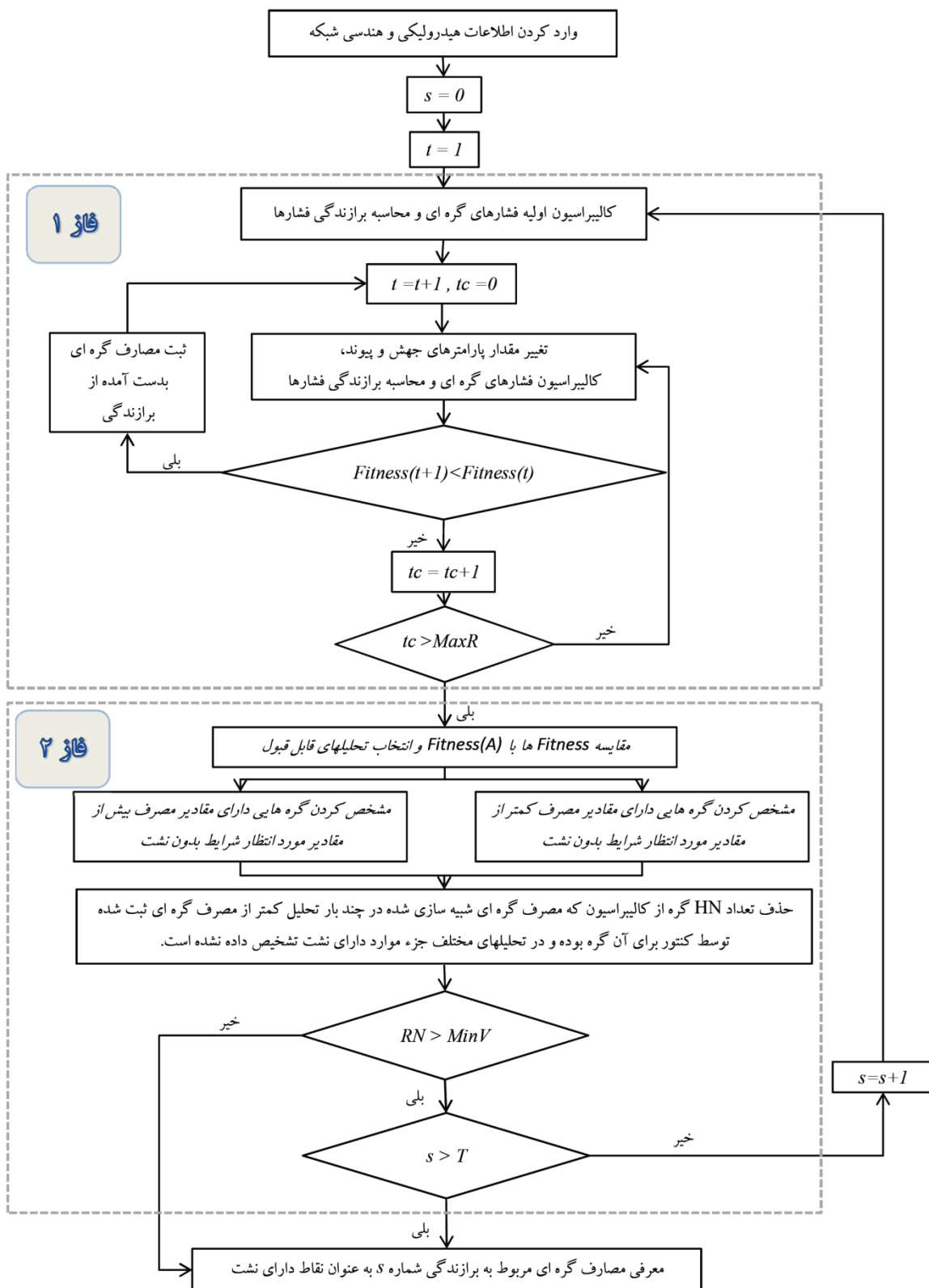
که نشت‌یابی بر اساس واسنجی فشارهای گرهی می‌تواند راهنمای خوبی برای نشت‌یابی در شبکه باشد. باید اذعان نمود، مساله شناسایی نشت براساس کالیبراسیون با توجه به تعداد محدود اندازه‌گیریها نسبت به مجهولات بسیار پیچیده می‌شود. هدف از این مقاله ارائه روشی موثر برای نشت‌یابی شبکه بر اساس کالیبراسیون بوده که برای این منظور روشی مبتنی بر حذف مرحله‌ای گره‌ها از مجموعه گره‌های کاندید نشت ارائه شده است. این روش با کالیبراسیون عادی شبکه آغاز می‌شود و سپس در طی مراحل مختلف گره‌هایی که نشت در آنها وجود ندارد از فضای جستجو حذف می‌گردد. با این فرآیند درجات آزادی کاهش یافته و نقاط دارای پتانسیل نشت شناسایی می‌شود. در طی این مقاله با ارائه دو شبکه فرضی روش مذکور تبیین می‌گردد. بررسی‌های صورت گرفته بر روی این روش بهبود قابل توجه نتایج نشت‌یابی را نسبت به حالت عادی نشان می‌دهد.

۲- متدولوژی

هدف از واسنجی در شبکه‌های توزیع آب تدقیق پارامترهایی نامعین شبکه توزیع می‌باشد. این کار با استفاده از یک روش حداقل مربعات انجام می‌شود که اختلاف مقادیر مشاهداتی و محاسباتی را با تنظیم این پارامترها کمینه کند (Wu and Sage 2006). این پارامترها معمولاً شامل فاکتور اصطکاک^۴ f_i برای لوله i ، ضریب مصرف $m_{j,t}$ برای مصرف گره j در زمان t و وضعیت باز یا بسته بودن شیرآلات $s_{k,t}$ برای اتصال k (مانند شیرها و پمپها) در زمان t می‌باشند. اطلاعات بیشتر در مرجع اصلی قابل دستیابی است (Wu and Sage 2006). الگوریتم ژنتیک^۵ اولین بار توسط Holland (1975) در دانشگاه میشیگان^۶ معرفی گردید. این الگوریتم براساس فرآیند تکامل تدریجی پایه گذاری شده است. این روش دارای سه پایه اساسی شامل انتخاب^۷، پیوند^۸ و جهش^۹ می‌باشد. در این تحقیق برای کمینه کردن اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی یا واسنجی از الگوریتم ژنتیک که رایج‌ترین روش مورد استفاده است، بهره‌گیری شده است. بدیهی است روش حذف مرحله‌ای برای کلیه روشهای بهینه‌یابی در جهت بهبود نتایج قابل کاربرد خواهد بود. شکل ۱ فلوچارت روش حذف مرحله‌ای گره‌ها از واسنجی را نشان می‌دهد.

در این فلوچارت، t شمارنده تحلیل‌ها در هر مرحله، s شمارنده مراحل، $Fitness(t)$ برازندگی^{۱۰} فشارهای گرهی در تحلیل t ، $Fitness(t+1)$ برازندگی فشارهای گرهی در تحلیل $t+1$ ، tc ، شمارنده بهبود برازندگی، $MaxR$ حداکثر تعداد تکرار برای بهبود

نشت‌یابی در شبکه‌های توزیع آب از اهمیت اقتصادی بالایی برخوردار بوده و کنترل و کاهش نشت باید به طور جدی مد نظر قرار گیرد. در یک نگاه کلی روشهای نشت‌یابی را می‌توان به دو دسته کلی روشهای نقطه‌ای که شبکه شهری را قسمت به قسمت پیمایش نموده و با ابزارهای مختلف نشت در شبکه را جستجو می‌کنند که این روشها علاوه بر هزینه بر و زمان‌بر بودن در بسیاری از مواقع دارای دقت لازم نیز نمی‌باشند (Covas and Ramos 2010; Hunaidi et al. 1998, 1999; Walski et al. 2002) سراسری که با نصب ابزارهای اندازه‌گیری مختلف بر روی شبکه، مانیتورینگ^۱ شبکه و مدل‌سازی^۲ شبکه، کل شبکه را مورد تحلیل قرار داده و موقعیتهای احتمالی نشت را تعیین می‌کنند (Almandoz et al. 2005; Walski et al. 2006a; Wu and Sage 2006). علیرغم اینکه این روشها هنوز در سطح گسترده مورد استفاده قرار نگرفته‌اند ولی با توجه به صرف هزینه و زمان اندک در نشت‌یابی، مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. این روشها عموماً مبتنی بر مدل‌سازی شبکه و سپس کالیبراسیون^۳ براساس حداقل نمودن اختلاف مقادیر فشار و یا دبی اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه شده در مدل‌های کامپیوتری می‌باشند. معمولاً تعیین دقیق پارامترهای شبکه، با خطاهایی همراه است که زبری لوله‌ها، مصارف گره‌ای و وضعیت شیرها مهم‌ترین پارامترهایی است که در شبکه تعیین دقیق آنها دشوار است (Ormsbee and Lingireddy 1997; Walski et al. 2002; Wu and Sage 2006; Wu et al. 2002). مقادیر پارامترهای نامعین شبکه به نحوی انتخاب می‌شود که نتایج بدست آمده از تحلیل مدل با نتایج مشاهداتی اندازه‌گیری شده فشار و دبی نظیر یکسان شود. به این فرآیند واسنجی گفته می‌شود (Ormsbee and Lingireddy 1997; Walski et al. 2006; Wu and Sage 2006; Wu et al. 2002). چنین مساله‌ای معمولاً در یک فرآیند بهینه‌یابی تحلیل می‌شود. بهینه‌یابی شامل روشهایی برای تنظیم پارامترهای مجهول شبکه (معمولاً زبری و مصرف) تا کمینه شدن اختلاف مقادیر مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد. نشت‌یابی مبتنی بر کالیبراسیون شامل تعیین مقدار مصرف در هر گره با استفاده از کالیبراسیون فشارهای گرهی و تعیین این کمیت براساس قرائت کنتورهای مشترکین و اختصاص ضرایب ساعتی و روزانه می‌باشد که از تفاضل این دو، گره‌های احتمالی دارای نشت شناسایی می‌گردند. (Wu and Sage 2006) نشت‌یابی شبکه توزیع با الگوریتم ژنتیک و روشهای مبتنی بر بهینه‌سازی فشارهای گرهی را مورد بررسی قرار دادند. آنها پی بردند



شکل ۱- فلوجارت نحوه واسنجی مرحله‌ای

تحمیل شده و نتایج تحلیل در این حالت به عنوان مشاهدات در نظر گرفته شد. دبی مبنا برای کلیه گره‌ها ۰/۲ لیتر بر ثانیه بوده و فشار گره‌های ۲ و ۴ به عنوان مشاهدات به برنامه داده شد. در لوله خروجی شبکه نیز یک شیر نیمه باز با ضریب افت ۱۰ در نظر گرفته شد.

براساس الگوریتم ارائه شده، پس از مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه، واسنجی اولیه انجام می‌گیرد و اولین مقدار برازندگی فشارهای گرهی بدست می‌آید. سپس با تغییر در مقادیر پارامترهای جهش و پیوند روند برازندگی‌ها به سمت بهبود هدایت می‌شود. این مرحله تا جایی ادامه پیدا می‌کند که مقدار برازندگی بهتری بدست نیاید. چنانچه در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در مرحله اول ۴ تحلیل صورت گرفته است که مقدار برازندگی از ۰/۱۸۹ به ۰/۰۰۸۸ رسیده است. لازم به ذکر است در جدول ۱ منظور از گره‌های با مصرف زیاد و گره‌های با مصرف کم به ترتیب، مصارف بیش از ۰/۴ و کوچکتر یا مساوی ۰/۲ لیتر بر ثانیه می‌باشد که بر اساس توضیحات مقدمه به ترتیب به عنوان گره‌های کاندید داشتن نشد و گره‌های بدون احتمال نشد در نظر گرفته شده است. در مرحله اول با توجه به اینکه گره شماره ۲ هیچ‌گاه جزء دسته گره‌های دارای احتمال نشد شناسایی نشد و همواره در دسته گره‌های با حداقل مصرف قرار گرفت، گره شماره ۲ از بین پارامترهای مصرف تنظیمی حذف شد. با حذف گره ۲ از ادامه واسنجی، مرحله دوم آغاز می‌شود. در این مرحله مصارف گرهی شبیه‌سازی شده در گره‌های ۱ و ۴ کمتر از مقدار مصارف گرهی مشاهداتی بوده و مشابه مرحله اول، این گره‌ها در این مرحله جزو گره‌های دارای احتمال نشد شناسایی نشد، لذا با حذف این دو گره از انجام واسنجی، واسنجی وارد مرحله سوم می‌شود. در مرحله سوم با انجام یک مرحله تحلیل، مقدار برازندگی فشارهای گرهی صفر بدست آمده و واسنجی به اتمام می‌رسد. نتایج بدست آمده در آخرین تحلیل وجود مصارفی به میزان ۰/۷ لیتر بر ثانیه را در گره‌های ۳ و ۵ نشان می‌دهد. دبی پایه فرضی در ابتدای تحلیل‌ها برای همه گره‌ها ۰/۲ لیتر بر ثانیه بود.

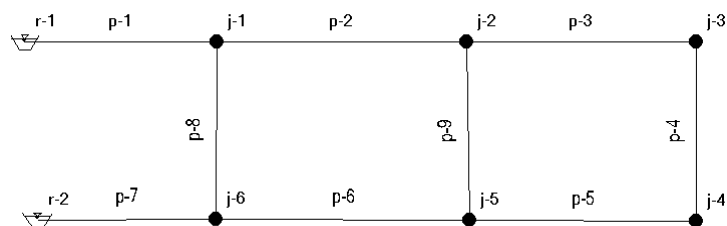
برازندگی در هر مرحله، T حداکثر تعداد مراحل، $Fitness(A)$ مقدار حداقل برازندگی که با توجه به دقت اطلاعات ورودی برای پذیرش نتایج بهینه‌یابی قابل قبول است، NH تعداد گره‌هایی که در هر مرحله از واسنجی حذف می‌شوند، RN تعداد گره‌های باقی مانده برای واسنجی و $MinV$ حداقل تعداد گرهی که در آخرین مرحله کالیبره می‌شود، می‌باشند. در این مقاله علاوه بر تابع برازندگی $f(x)$ ، برای صحت‌سنجی نتایج نشت یابی، تابع برازندگی دیگری به صورت رابطه (۱) در نظر گرفته شد. در این تحقیق با توجه به فرضی بودن شبکه‌ها برای نشان دادن دقت نشت یابی و روند نزدیک شدن مرحله ای نتایج به پاسخهای صحیح، این پارامتر مورد استفاده قرار گرفته است:

$$f(d) = \frac{\sum_{j=1}^N |D_j^{obs} - D_j^{sim}|}{Q_j} \quad (1)$$

که در آن $f(d)$ برازندگی مصارف گره‌ای، N تعداد گره‌های شبکه، D_j^{obs} مصرف گرهی واقعی (ثبت شده توسط کنتور یا تحلیل شده در حالت نشت‌دار) برای گره j و D_j^{sim} مصرف گرهی شبیه‌سازی شده برای گره j و Q_j دبی ورودی به شبکه از مخزن می‌باشد.

۳- کاربرد

برای انجام واسنجی فشارهای گرهی و یافتن نشت با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و حذف گره‌های بدون نشت، تحلیل‌ها بر روی یک شبکه نمونه صورت گرفته است. شبکه‌ای مطابق شکل ۲ شامل ۲ حلقه، ۶ گره و ۹ لوله برای بررسی روش مورد استفاده قرار گرفت. هد مخزن ورودی ۱۰۰ متر و مخزن خروجی ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. طول کلیه لوله P-7، ۱۰ و سایز لوله‌ها ۵ متر می‌باشد. قطر کلیه لوله‌ها ۲۵/۴ میلی‌متر و ضریب هیزن- ویلیامز^{۱۱} آنها ۱۴۰ می‌باشد. این مدل در دو حالت (الف) بدون وجود نشت و (ب) برداشتهای مشخص به عنوان شرایط فرضی اولیه و (ب) با وجود دو نقطه نشت در گره‌های ۳ و ۵ به میزان ۰/۵ لیتر بر ثانیه به عنوان شرایط واقعی تحلیل شد (نشت به عنوان مصرف اضافی به گره



شکل ۲- شکل شماتیک شبکه نمونه شبکه ۱

جدول ۱- نتایج واسنجی با حذف مرحله‌ای گره‌های بدون نشت

مرحله تحلیل	شماره تحلیل در هر مرحله	برازندگی‌ها		پارامترهای الگوریتم ژنتیک		حذف گره‌ها از کالیبراسیون	
		برازندگی فشار	برازندگی مصارف	جهش	پیوند	مصرف زیاد	مصرف کم
اول	۱	۰/۰۱۸۹	۰/۵۴۵	۰/۷	۷۰	۳	۵ و ۲
	۲	۰/۰۱۵۵	۰/۵۹۱	۳	۸۹	۱۵	۴ و ۳
	۳	۰/۰۱۳۸	۰/۵۰۰	۱	۹۰	۵	۴ و ۲
	۴	۰/۰۰۸۸	۰/۷۷۳	۱	۸۰	۶	۲ و ۱
دوم	۱	۰/۰۱۲۰	۰/۳۶۴	۱	۹۴	۳	۴ و ۱
	۲	۰/۰۰۸۴	۰/۲۷۳	۱	۸۸	۵	۴ و ۳
	۳	۰/۰۰۴۳	۰/۶۳۶	۱	۹۰	۳	۵ و ۱
	۴	۰/۰۰۱۴	۰/۷۷۳	۳	۹۲	۶	۱
سوم	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰	۱	۹۰	۵	۳ و ۶

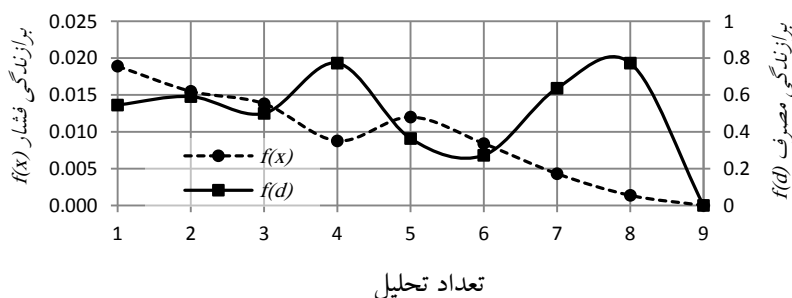
مسأله توسط (Walski et al. 2006b) نیز ذکر شده است. همچنین براساس صدها تحلیل صورت گرفته در این شبکه و شبکه‌های دیگر برای بهبود برازندگی فشار، نمی‌توان روند ثابتی برای تغییر در مقدار دو پارامتر جهش و پیوند ارائه داد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله نشت‌یابی در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از فشار سنجی گرهی در حالت پایدار و واسنجی شبکه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تاثیر پارامترهای جهش و پیوند و قابلیت‌های روش بهینه‌یابی الگوریتم ژنتیک نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در انتها روشی جدید مبتنی بر شناسایی نقاط بدون نشت در شبکه و حذف آنها از نقاط کاندید نشت معرفی شد. از دیدگاه نظری، شناسایی نشت در شبکه مبتنی بر واسنجی فشارسنجی و تحلیل شبکه در حالت پایدار امکان‌پذیر است ولی نیاز به گره‌های فشارسنجی نسبتاً زیادی دارد. براساس تحلیل‌های صورت گرفته بر روی شبکه فرضی مشخص شد در صورتی که نقاط بدون نشت مورد شناسایی قرار

با توجه به اینکه برای تنظیم فشارها در دو گره با مقادیر مشاهده‌ای، باید مقدار جدید به گره‌های ۳ و ۵ اعمال شود، می‌توان انتظار وقوع نشت از شبکه به میزان ۰/۵ لیتر بر ثانیه در این نقاط را داشت.

در شکل ۳ نمودار تغییرات برازندگی فشارهای گرهی و همچنین برازندگی مصارف گرهی در ۹ تحلیل صورت گرفته، نمایش داده شده است. مقادیر برازندگی فشارهای گرهی (تفاضل مربعات) و مقادیر برازندگی مصارف گرهی نیز از رابطه (۱) به دست آمده است. این مقادیر برای هر یک از تحلیل‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. نکته قابل توجه در مورد این دو نمودار این است که بهبود مقادیر برازندگی فشارهای گره‌ای نمی‌تواند متضمن بهبود در مقدار برازندگی مصارف گره‌ای و یافتن نشت باشد. همانگونه که در شکل مشخص است با وجود اینکه برازندگی فشارها در مرحله هشتم به مقدار بسیار ناچیز ۰/۰۰۱۴ رسیده است ولی برازندگی دبی‌ها نشان می‌دهد که کالیبراسیون کماکان دارای خطای بسیار زیادی می‌باشد. در شرایطی که تعداد نقاط مشاهده‌ای زیاد نباشد ممکن است تابع برازندگی فشارها به صفر نیز برسد ولی واسنجی صحیح انجام نشده باشد. این



شکل ۳- تغییرات برازندگی فشار و مصارف گرهی در تحلیل‌های مختلف

Hunaidi O, Chu W, Wang A, Guan W (1998) Effectiveness of leak detection methods for plastic water distribution pipes. Paper presented at the Workshop on Advancing the State of our Distribution Systems, Denver.

Hunaidi O, Chu W, Wang A, Guan W (1999) Leakage detection methods for plastic water distribution pipes. Paper presented at the Advancing the Science of Water, Denver.

Ormsbee LE, Lingireddy S (1997) Calibrating hydraulic network models. Journal of the American Water Works Association, 89(2): 44-54.

Walski TM, Bezts W, Posluszny ET, Weir M, Whitman BE (2006a) Modeling leakage reduction through pressure control. J AWWA, 98(4): 147-155.

Walski TM, Chase DV, Savic DA, Grayman W, Beckwith S (2002) Advanced Water Distribution Modeling and Management. Waterbury, CT USA: Haested Press.

Walski TM, DeFrank N, Voglino T, Wood R, Whitman BE (2006b) Determining the accuracy of automated calibration of pipe network models. Paper presented at the 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium. Ohio, USA.

Wu ZY, Sage P (2006) Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration. Paper presented at the ASCE 8th Annual Int. Symp. on Water Distribution Systems Analysis. Ohio, USA.

Wu ZY, Walski T, Mankowski R, Herrin G, Gurrieri R, Tryby M (2002) Calibrating water distribution model via genetic algorithms. Paper presented at the AWWA IM Tech Conferenc. Kansas City, Missouri.

گیرند، حذف آنها از نقاط بالقوه دارای نشت طی یک فرآیند چند مرحله‌ای، نشت‌یابی با دقت بسیار مناسب با استفاده از نقاط فشارسنجی کمتر امکان‌پذیر است. در استفاده از روش یاد شده مشخص گردید، روش بهینه‌یابی توسط الگوریتم ژنتیک به تنهایی قادر به نزدیک شدن به سمت جوابهای واقعی نمی‌باشد، در حالیکه استفاده از این روش بهینه‌یابی در ترکیب با روش حذف مرحله‌ای و به‌کارگیری تعداد ثابتی از اطلاعات مشاهداتی، در شبکه مورد مطالعه، طی ۹ تحلیل در سه مرحله جواب نهایی حاصل شده است.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Monitoring
- 2- Modeling
- 3- Calibration
- 4- Friction factor
- 5- Genetic Algorithm
- 6- Michigan
- 7- Selection
- 8- Crossover
- 9- Mutation
- 10- Fitness
- 11- Hazen-Williams coefficient

۵- مراجع

Almandoz J, Cabrera E, Arregui F, Cabrera E J, Cobacho R (2005) Leakage assessment through water distribution network simulation. J. of Water Resour. Plan. Manage. 131(6): 458-466.

Covas D and Ramos H (2010) Case studies of leak detection and location in water pipe systems by inverse transient analysis. Journal of Water Resources Planning and Management 136(2): 248-257.

Holland J H (1975) Adaptation in Natural and Artificial Systems. The University of Michigan Press.