

ترکیب روش حل معکوس و الگوریتم فراکاوشی برای محاسبه مقدار و موقعیت نشت در شبکه‌های توزیع آب

ایمان رستمی^۱، الهام درویشی^{۲*}

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۷

مقاله پژوهشی

چکیده

نشت در شبکه‌های توزیع آب علاوه بر هدر رفت آب و انرژی موجب مشکلات اجتماعی و زیست محیطی نیز می‌شود. بنابراین تلاش برای نشت‌یابی و کاهش هزینه‌های آن تا حد ممکن بسیار با اهمیت است. در نشت‌یابی‌های انجام شده با روش‌های فراکاوشی، متغیرهای تصمیم شماره گره نشت و دبی نشت است. در این پژوهش روشی با ترکیب حل معکوس معادلات جریان و الگوریتم فراکاوشی ارائه شده است. در روش پیشنهادی، تنها شماره گره‌های نشت به عنوان متغیر تصمیم در روش جستجوی هارمونی در نظر گرفته شده و دبی نشت با استفاده از حل معکوس معادلات پیوستگی و انرژی محاسبه می‌شود. علاوه بر تعدادی اندازه‌گیری برای تابع هدف الگوریتم فراکاوشی، لازم است که به تعداد گره‌های نشت اندازه‌گیری فشار گره و دبی لوله برای مدل هیدرولیکی انجام شود. نتایج در دو شبکه فرضی نشان می‌دهد که این روش موقعیت و مقدار نشت را با دقت بالایی حتی در حالتی که دبی نشت کم باشد، تعیین و محاسبه می‌کند. در صورتی که در اندازه‌گیری فشار گره‌ها خطا وجود داشته باشد، با افزایش گره‌های تابع هدف موقعیت و مقدار نشت با دقت خوبی محاسبه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نشت‌یابی، حل معکوس، جستجوی هارمونی، شبکه‌های توزیع آب

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، I.rostami@stu.razi.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، (نویسنده مسئول) e.darvishi@razi.ac.ir

مقدمه

تامین و انتقال آب شرب با کیفیت مناسب وظیفه شبکه‌های توزیع آب شهری است. اما از آنجاییکه این شبکه‌ها به صورت زیرزمینی احداث می‌شوند، مدیریت و بهره‌برداری از آنها را با مشکل روبرو کرده است. هدر رفت آب از طریق نشت بزرگترین مشکلی است که شبکه‌های آبرسانی با آن روبرو است (El-Zahab and Zayed, 2019).

روش‌های نشت‌یابی مختلفی مانند ابزارهای صوتی، گازهای ردیاب، استفاده از توپ هوشمند، ... در صنعت آب توسعه داده شده‌اند که برخی نیازمند تجهیزات با هزینه بالا هستند (Ramadevi et al. 2018). تحقیقاتی در زمینه یافتن محل و محاسبه نشت با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام گرفته است. در این روش با اعمال نشت فرضی در شبکه توزیع آب و ثبت فشار گرهی داده‌های آموزشی تولید می‌شود. سپس با ورود داده‌های فشار در برخی گره‌ها شبکه عصبی نشت‌های شبکه را جانمایی و مقدار تقریبی آنها را محاسبه می‌کند (کلیایی و سامانی، ۱۳۸۸؛ عطاری و مغربی، ۱۳۹۷).

برخی محققین با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در تلفیق با مدل هیدرولیکی به تعیین محل و مقدار نشت پرداخته‌اند. الگوریتم ژنتیک، پرندگان، کلونی مورچه‌ها و کرم شب‌تاب در نشت‌یابی و محاسبه مقدار نشت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این الگوریتم‌ها تابع هدف حداقل کردن اختلاف فشار محاسبه شده و ثبت شده در برخی از گره‌ها و یا اختلاف دبی محاسبه‌ای و اندازه‌گیری شده در برخی لوله‌های شبکه است. به این منظور موقعیت و مقدار نشت با استفاده از الگوریتم فراکاوشی تعیین و فشار و دبی لوله‌ها در مدل هیدرولیکی محاسبه می‌شود (حسن‌زاده و مغربی، ۱۳۸۳؛ بذری و علامتیان، ۱۳۹۳؛ قاضی‌زاده و معاشری، ۱۳۹۷؛ نصیریان و مغربی، ۱۳۹۲، Wu and Sage, 2006). در این مطالعات از آنجایی که دبی نشت به صورت تصادفی تعیین می‌شود، تعداد تکرار تا رسیدن به جواب بهینه قابل توجه است که هزینه محاسبات را افزایش می‌دهد.

مسئله کالیبراسیون شبکه توزیع آب، در صورتیکه که هدف تعیین دبی برداشتی از گره‌ها باشد، مشابه محاسبه مقدار نشت می‌باشد اما موقعیت گره برخلاف مسئله

نشت‌یابی مجهول نیست. روش‌های گوناگونی از جمله الگوریتم‌های فراکاوشی برای رسیدن به این هدف توسط محققین توسعه و بررسی شده است (نصیریان و مغربی، ۱۳۹۲؛ Dini and Tabesh, 2014).

Boulos and Wood 1990 روش صریح معادلات پیوستگی در گره و افت حلقه را برای کالیبره شبکه توزیع به کار بردند. آنها مقادیر اندازه‌گیری شده در شبکه (فشار در گره و دبی لوله) را به عنوان معلوم وارد دستگاه معادلات کردند و به همین تعداد معادله جدید برای محاسبه مقادیر مجهول در نظر گرفتند. دستگاه معادلات به دست آمده را به روش نیوتن حل کردند. در این روش کالیبراسیون لازم است به تعداد مجهولات اضافی مقادیر فشار و دبی در شبکه اندازه‌گیری شود. بنابراین در صورتیکه تعداد پارامترهای مورد نیاز به کالیبره زیاد باشد در عمل استفاده از این روش غیر ممکن است.

Kun et al. 2015 روشی مشابه Boulos and Wood 1990 را برای کالیبراسیون شبکه توزیع آب به کار بردند. اما به جای معادله افت در حلقه از معادله افت لوله‌ها در تشکیل دستگاه معادلات استفاده کردند. همچنین با توجه به تعداد زیاد پارامترهای مجهولات (دبی گره‌ها و ضریب هیزن ویلیامز لوله‌ها) و عدم امکان اندازه‌گیری فشار در تمام گره‌ها و دبی لوله‌ها، گروه‌بندی گره‌ها و لوله‌ها را پیشنهاد دادند. با این عمل تعداد مجهولات کاهش و امکان محاسبه با حل دستگاه معادلات وجود خواهد داشت.

مشابه مسئله کالیبراسیون در مسئله نشت‌یابی معمولاً تعداد نقاط نشت محدود هستند و بنابراین برای حل دستگاه معادلات تعداد نقاط اندازه‌گیری کمتری مورد نیاز است. در این پژوهش برای تعیین موقعیت نشت از روش‌های فراکاوشی و برای تعیین مقدار نشت از حل دستگاه معادلات استفاده می‌شود. به عبارتی سهم روش‌های فراکاوشی در نشت‌یابی کاهش می‌یابد. اما دقت محاسبه دبی نشت به مراتب افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به محاسبه دبی نشت در مدل هیدرولیکی نسبت داد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای تعیین موقعیت گره نشت الگوریتم جستجوی هارمونی و برای محاسبه دبی، مدل هیدرولیکی

رابطه ۴ که توسط (1988) Todini and Pilani ارائه شد، الگوریتم گرادیان برای حل آن را پیشنهاد دادند. این الگوریتم در نرم‌افزارهای Epanet 2.0 و WaterGEMS جهت محاسبه دبی لوله‌ها و هد در گره‌ها به کار می‌رود.

در مدل معکوس فشار و دبی مورد نیاز در برخی گره‌ها و دبی برخی از لوله‌ها اندازه‌گیری می‌شود، در حالی که دبی سایر لوله، فشار و نیاز سایر گره‌ها مجهول است. برای ساخت مدل متغیرهای معلوم و مجهول را می‌توان از هم جدا کرد و برای این منظور معادله پیوستگی به صورت زیر تجزیه می‌شود (Kun et al. 2015).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{kq} & \mathbf{I}_{uq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{kq} \\ \mathbf{q}_{uq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{kQ} & \mathbf{A}_{uQ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{kQ} \\ \mathbf{Q}_{uQ} \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

\mathbf{q}_{kq} و \mathbf{q}_{uq} زیرمجموعه \mathbf{q} می‌باشند که به ترتیب عبارت‌اند از نیاز معلوم و مجهول گره. به عبارت دیگر گره با تقاضای معلوم همان گره با خروجی اندازه‌گیری شده است. \mathbf{I}_{kq} و \mathbf{I}_{uq} زیرمجموعه‌های \mathbf{I}_q هستند که به ترتیب ماتریس با تقاضای گره معلوم و مجهول می‌باشند. \mathbf{Q}_{kQ} و \mathbf{Q}_{uQ} به ترتیب زیر مجموعه معلوم و مجهول از \mathbf{Q} می‌باشند. \mathbf{A}_{kQ} و \mathbf{A}_{uQ} به ترتیب ستون‌های ماتریس \mathbf{A} مربوط به جریان لوله‌های معلوم و مجهول می‌باشد و uq و kq به ترتیب نشان دهنده تعداد معلومات و مجهولات مربوط به دبی لوله‌ها و نیاز گره‌ها است.

به عبارت دیگر تقاضای مشخص گره‌ها همان میزان خروجی در نظر گرفته می‌شود. معادله ۶ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{I}_{kq} \mathbf{q}_{kq} + \mathbf{I}_{uq} \mathbf{q}_{uq} - \mathbf{A}_{kQ} \mathbf{Q}_{kQ} - \mathbf{A}_{uQ} \mathbf{Q}_{uQ} = 0 \quad (7)$$

همچنین می‌توان نوشت:

(۸)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{uq} & -\mathbf{A}_{uQ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{uq} \\ \mathbf{Q}_{uQ} \end{bmatrix} - \mathbf{A}_{kQ} \mathbf{Q}_{kQ} + \mathbf{I}_{kq} \mathbf{q}_{kq} = 0$$

به روش مشابه می‌توان معادله انرژی را به صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{A}_{kH}^T \mathbf{H}_{kH} + \mathbf{A}_{uH}^T \mathbf{H}_{uH} + \mathbf{I}_{uh} \mathbf{h}_{uh} + \mathbf{I}_{kh} \mathbf{h}_{kh} + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 = 0 \quad (9)$$

kh ، uH و uH به ترتیب تعداد گره‌هایی با فشار معلوم و نامعلوم و افت معلوم و نامعلوم خط لوله می‌باشند. \mathbf{A}_{kH}^T و \mathbf{A}_{uH}^T به ترتیب ماتریس‌هایی از \mathbf{A} هستند که

به کار گرفته است. به همین دلیل به صورت مجزا هر یک بحث خواهد شد. همچنین شبکه‌های توزیع آب مورد استفاده در بررسی توانایی روش پیشنهادی معرفی خواهد شد.

۱- مدل هیدرولیکی

معادلات در شبکه تحت فشار را بر اساس معادلات پیوستگی و انرژی می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\mathbf{A}\mathbf{Q} - \mathbf{q} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{H} + \mathbf{h} + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 = 0 \quad (2)$$

\mathbf{A} ماتریس $n \times m$ که n تعداد گره‌ها و m تعداد لوله‌ها می‌باشد که اگر گره i ابتدا و گره j انتهای لوله باشد برابر با منفی یک اگر گره i به گره j متصل نباشد صفر، و اگر گره i انتهای لوله و گره j ابتدای آن باشد برابر با یک است.

المان‌های ماتریس \mathbf{A}_{10} با همان روش ماتریس \mathbf{A} تعیین می‌شوند که رابطه بین گره با هد ثابت (مخزن یا تانک) و گره را تعیین می‌کند. \mathbf{Q} و \mathbf{q} به ترتیب عبارت‌اند از بردار دبی در لوله و تقاضای گره، \mathbf{H} و \mathbf{H}_0 بردار هد‌های نامشخص و مشخص، \mathbf{h} نیز بردار افت لوله می‌باشد که رابطه آن به صورت زیر است:

$$\mathbf{h} = \mathbf{R}|\mathbf{Q}|^{n-1} \mathbf{Q} \quad (3)$$

\mathbf{R} ثابت مقاومت لوله‌ها و \mathbf{n} توان دبی در رابطه افت است. به عنوان مثال در رابطه هیزن ویلیامز \mathbf{n} برابر ۱/۸۵۲ است. شکل ماتریسی روابط فوق به صورت زیر خواهد بود:

(۴)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ \mathbf{R}|\mathbf{Q}|^{n-1} & \mathbf{A}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ -\mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 \end{bmatrix}$$

در صورت وجود پمپ روی لوله، معادله منحنی مشخصه پمپ مانند رابطه افت در معادله انرژی تعریف می‌شود. صورت کلی معادله منحنی مشخصه پمپ‌ها در رابطه ۵ آمده است.

$$\mathbf{H}_p = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{Q}^C \quad (5)$$

در این رابطه \mathbf{H}_p هد پمپاژ، \mathbf{A} هد پمپاژ در دبی برابر صفر است. \mathbf{B} و \mathbf{C} ثابت‌های مربوط به نوع پمپ‌ها می‌باشند. روش خطی سازی این معادله مشابه معادله افت لوله می‌باشد.

غیرخطی ماسکینگام^۴، بهینه‌سازی ساختاری و غیره داشته است (Geem et al. 2002; Lee et al. 2005; Karahan et al. 2013). برخی از این تحقیقات نشان داده‌اند که در زمان کمتری نسبت به الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند. در این الگوریتم هر جواب یک هارمونی نامیده می‌شود. که در واقع مجموعه‌ای از مقادیر متغیرهای تصمیم برای هر جواب هستند. مجموعه جواب‌های هر گام حافظه هارمونی است. بعد از ایجاد حافظه هارمونی به صورت تصادفی، جواب جدید براساس روش تعیین شده از مجموعه جواب‌های حافظه هارمونی ایجاد می‌شود. تابع هدف برای جواب جدید محاسبه و با بدترین جواب حافظه هارمونی مقایسه می‌شود. در صورتی که بهتر از بدترین جواب باشد با آن جایگزین شده و تا رسیدن به شرط توقف تکرار ادامه می‌یابد.

مراحل این الگوریتم به قرار زیر است:

۱. تعریف مقادیر پارامترهای الگوریتم و مسئله
۲. ایجاد حافظه هارمونی
۳. تولید هارمونی جدید از حافظه هارمونی
۴. به روزرسانی حافظه هارمونی
۵. بررسی معیار توقف

تابع هدف به کار رفته مطابق رابطه ۱۲ است:

(۱۲)

$$\text{Min } OF = \sum_{i=1}^{nH} (H_i^o - H_i^s)^2$$

nH تعداد فشار مشاهداتی، H_i^o و H_i^s هد فشار محاسباتی و مشاهداتی در گره i ام است. فشار مورد استفاده در این رابطه جدا از مقادیر به کار برده شده در مدل هیدرولیکی است. به عبارتی چنانچه پیدا کردن دو گره نشت در شبکه مدنظر باشد، لازم است در مدل هیدرولیکی دو مقدار اندازه‌گیری شده وارد شود و علاوه بر این دو مقدار، تعدادی دیگری نیز برای تابع هدف اندازه‌گیری شود.

در الگوریتم جستجوی هارمونی با سعی و خطا نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی (HMCR) برابر ۰/۷۵، نرخ زیر و بمب (PAR) برابر ۰/۵، پهنای باند (FW) برابر ۱ و تعداد تکرار ۲۰۰۰ در نظر گرفته شد. این تعداد بستگی به تعداد گره نشت معرفی شده به مدل دارد. چنانچه تعداد

توسط ستونهای مربوطه A^T تشکیل شده‌اند، h_{uh} و h_{kh} زیر مجموعه h هستند که عبارت‌اند از افت فشار معلوم و مجهول، I_{uh} و I_{kh} زیر مجموعه ماتریس I_h می‌باشند که متناظر با افت فشار معلوم و مجهول هستند. براساس معادله ۹ و ۳ می‌توان بازنویسی کرد:

(۱۰)

$$\begin{bmatrix} I_{uQ} R | Q_{uQ} & A_{uH}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_{uQ} \\ H_{uH} \end{bmatrix} + A_{kH}^T H_{uH} + I_{kh} h_{kh} + A_{10} H_0 = 0$$

ترکیب معادلات ۸ و ۱۰ ایجاد می‌کند:

(۱۱)

$$\begin{bmatrix} I_{uQ} & -A_{uQ} & 0 \\ 0 & I_{uQ} R | Q_{uQ} & A_{uH}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{uq} \\ Q_{uQ} \\ H_{uH} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{kq} q_{kq} - A_{kQ} Q_{kQ} \\ A_{kH}^T H_{kH} + I_{kh} h_{kh} + A_{10} H_0 \end{bmatrix} = 0$$

معادله (۱۱) مدل معکوس شبکه‌های توزیع آب را نشان می‌دهد زیرا تقاضای مجهول گره را می‌توان با حل مستقیم محاسبه کرد (Kun et al. 2015). برای محاسبه نشت لازم است به تعداد گره‌های نشت در شبکه توزیع آب فشار و دبی اندازه‌گیری شود. به عنوان مثال چنانچه تعداد گره نشت برابر دو نشت است، باید به همین تعداد دبی لوله و فشار گره اندازه‌گیری شود. همانطور که قبلاً گفته شد در مسئله نشت‌یابی، محل نشت مجهول است برای رفع این مشکل الگوریتم جستجوی هماهنگ به کار رفته است. بدین معنی که الگوریتم فراکاوشی شماره گره‌های نشت را به مدل هیدرولیکی ارسال می‌کند و مدل هیدرولیکی با مجهول قرار دادن دبی در این گره‌ها، مقدار نشت را محاسبه می‌کند.

۲- الگوریتم جستجوی هماهنگ^۳

الگوریتم جستجوی هماهنگ که اولین بار توسط Geem et al. 2001 معرفی شد، الهام گرفته از موسیقی است. این روش تاکنون کاربرد زیادی در علوم مختلفی مانند بهینه‌سازی شبکه توزیع آب، تخمین پارامترهای مدل

^۴ Muskingum

^۳ Harmony Search

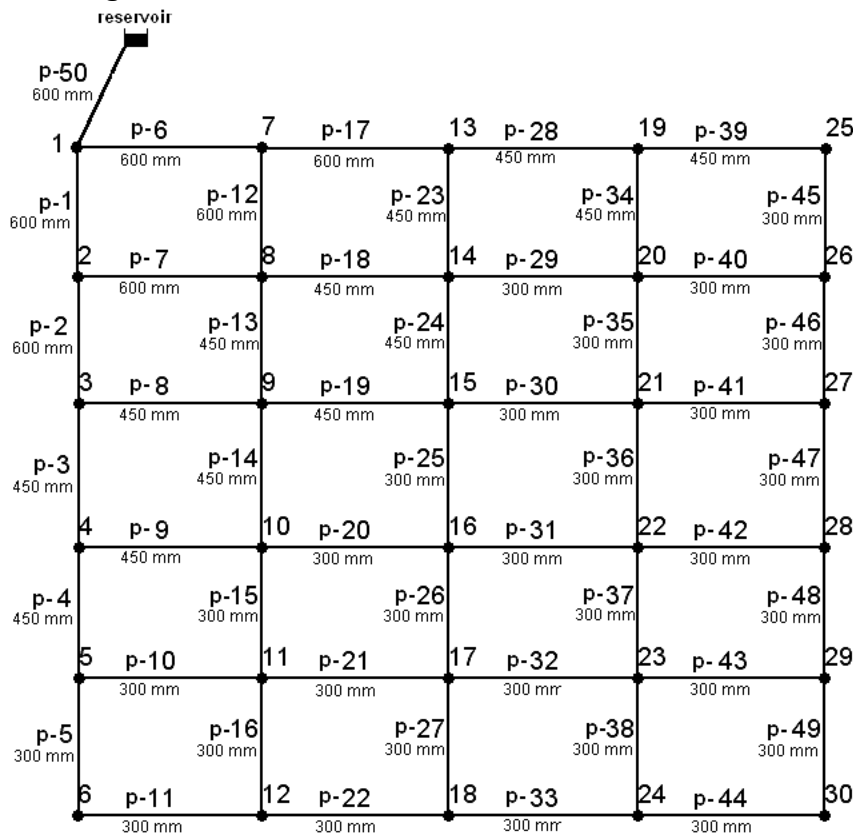
۳- شبکه‌های توزیع

به منظور مقایسه نتایج با مقالات دیگر دو شبکه فرضی که در سایر پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته جهت محاسبه نشت توسط روش پیشنهادی انتخاب شد. شبکه شماره ۱ که در شکل ۱ نشان داده شده است شامل ۲۰ حلقه، ۳۰ گره، ۵۰ لوله و یک مخزن است. طول لوله‌های افقی و عمودی به ترتیب ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر و متوسط زبری مطلق (e) کلیه لوله‌ها ۰/۲۶ میلیمتر و مصرف گرهی در تمام گره‌ها ۵۰ لیتر بر ثانیه که قطر، شماره لوله‌ها و گره‌ها در شکل ۱ آورده شده است.

شبکه شماره ۲ که در شکل ۲ نشان داده شده است دارای ۱۶ گره، ۳۴ لوله، ۳ پمپ موازی، یک مخزن با ارتفاع ۳/۰۴ متر و دو تانک با ارتفاع ۷۱/۶ متر است. منحنی مشخصه پمپ به صورت رابطه ۱۳ می باشد.

$$H_p = 91.54 - 135.9Q^{1.922} \quad (13)$$

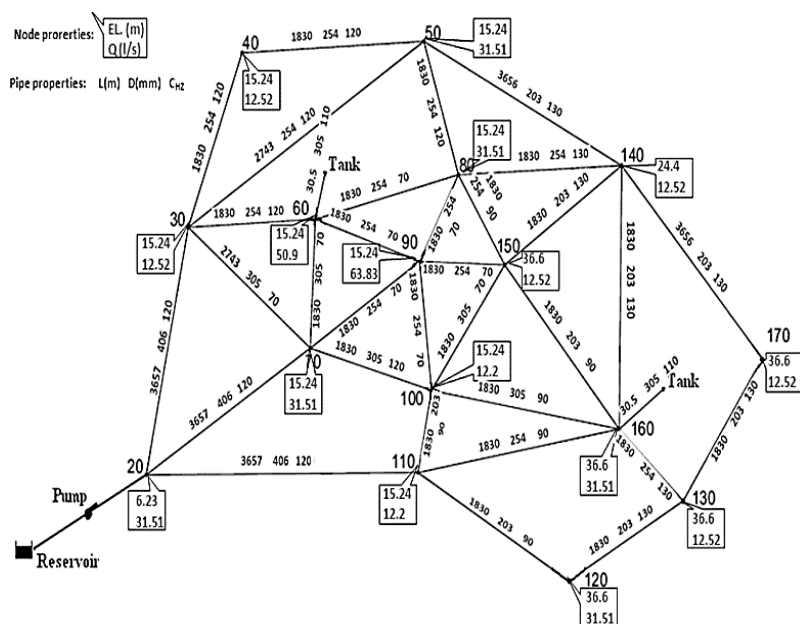
در این رابطه H_p هد پمپاژ (متر) و Q دبی پمپاژ (مترمکعب بر ثانیه) است. مشخصات ارتفاع گره‌های شبکه و لوله‌ها در شکل ۲ درج شده است.



شکل (۱): شبکه ۱ (Poulakis et al. 2003)

گره نشت کم باشد تعداد تکرار کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان در تعداد کل حالت ممکن نشت دانست. اندازه حافظه هارمونی (HMS) بستگی به گره‌های نشت دارد. در صورتی تعداد گره‌های نشت افزایش پیدا کند اندازه حافظه هارمونی به دلیل افزایش تعداد حالت‌های ممکن افزایش پیدا می‌کند. در این مقاله اندازه حافظه هارمونی از ۲۰ تا ۸۰ متغیر بوده است. متغیرهای تصمیم تنها شماره گره‌های شبکه می‌باشد و دبی‌های نشت در مدل هیدرولیکی محاسبه می‌شود. در مرحله ایجاد هارمونی جدید به جای انتخاب گره از کل گره‌های شبکه تنها از گره‌های مجاور گره مورد نظر انتخاب صورت می‌گیرد.

برنامه مدل هیدرولیکی و الگوریتم جستجوی هماهنگ در نرم‌افزار متلب توسعه داده شده است. مدل هیدرولیکی به صورت یک زیربرنامه قابل فراخوانی در برنامه جستجوی هماهنگ است. از جمله ورودی‌ها زیربرنامه شماره گره‌های نشت می‌باشد.



شکل (۲): شبکه ۲ (Walski et al. 1987)

است که فشار اندازه‌گیری شده دارای ۰/۱ متر آب خطا باشد. ستون ۸ و ۹ موقعیت و مقدار نشت محاسبه شده در خطای اندازه‌گیری فشار برابر ۰/۱- متر آب و ستون ۱۱ و ۱۲ موقعیت و مقدار نشت محاسبه شده در خطای اندازه‌گیری فشار برابر ۰/۱+ متر آب را نشان می‌دهد. در ستون‌های ۱۰ و ۱۳ خطای مطلق کل دبی نشت محاسبه شده است.

در شبکه ۱ که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است نشت‌های ۱ تا ۳ گره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل شماره ۱ مقدار و موقعیت نشت حتی در حالتی که در اندازه‌گیری فشار خطا وجود داشته است نیز با دقت خوبی برآورد شده است. در تحلیل شماره ۲ که نشت یک گره‌ای بررسی شده است موقعیت نشت در خطای ۰/۱- متر آب درست پیدا نشده است. در تحلیل شماره ۳ تعداد گره‌های مشاهداتی در مدل هیدرولیکی به ۲ گره افزایش یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود علاوه بر گره ۱۶ یک گره دیگر نیز به عنوان گره نشت توسط مدل در حالتی که در اندازه‌گیری فشار خطا وجود داشته است پیدا شده است اما دبی این گره‌ها در مقایسه با گره ۱۶ بسیار ناچیز است.

در تحلیل‌های ۴ تا ۶ نشت‌های ۲ گره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل شماره ۴ زمانی که در اندازه‌گیری فشار خطا وجود دارد به جای گره ۱۷ گره‌های

نتایج

در ابتدا دقت مدل هیدرولیکی برای شبکه ۱ مورد بررسی قرار گرفت. گرادیان هیدرولیکی محاسبه شده در مدل هیدرولیکی با مقادیر محاسبه شده توسط نرم‌افزار واترجمز در جدول ۱ مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اختلاف کمی بین نتایج وجود دارد. جدول ۲ و ۳ نتایج نشت‌یابی در دو شبکه مورد بررسی را نشان می‌دهد. در ستون اول شماره تحلیل و در ستون ۲ و ۳ به ترتیب شماره گره‌های نشت و مقدار نشت مازاد بر دبی مصرفی گره آمده است. ستون ۴ شماره گره‌های مشاهداتی به کار رفته در مدل هیدرولیکی را نشان می‌دهد. در ستون ۵ شماره گره‌های مشاهداتی در تابع هدف آمده است. از آنجایی که تعداد گره‌های نشت در نشت‌یابی مشخص نیست، تحلیل‌هایی نیز انجام شده است که تعداد گره‌های نشت معرفی شده به مدل بیش از تعداد گره‌های نشت واقعی باشد.

ستون ۶ و ۷ به ترتیب موقعیت (شماره گره) و دبی نشت محاسبه شده توسط روش پیشنهادی در خطای مطلق اندازه‌گیری فشار برابر صفر را ارائه کرده است. خطای مطلق اندازه‌گیری فشار برابر صفر در صورتی اتفاق می‌افتد که ابزار اندازه‌گیری فشار دارای دقت بالایی باشد. در عمل ابزارهای اندازه‌گیری فشار بدون خطا نیستند. به همین دلیل در تحلیل‌های انجام شده حالت‌هایی مورد بررسی قرار گرفته

می‌دهد که با افزایش تعداد گره‌های مشاهداتی و تابع هدف در شبکه، خطای مطلق محاسبه دبی کاهش می‌یابد. تحلیل‌های شماره ۶ و ۷ مشابه تحلیل‌های ۴ و ۵ می‌باشد با این تفاوت که دبی گره‌های نشت افزایش یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود موقعیت و مقدار نشت با دقت خوبی برآورد شده است.

مجاور تعیین شده است. در تحلیل شماره ۵ که دبی نشت گره ۱۷ افزایش یافته است با وجود خطای اندازه‌گیری فشار موقعیت و مقدار نشت با دقت خوبی برآورد شده است. در تحلیل شماره ۶ با افزایش تعداد گره‌های مشاهداتی به مدل موقعیت و مقدار نشت با وجود خطای اندازه‌گیری فشار به درستی محاسبه شده است. مشابه تحلیل‌های ۴ تا ۶ برای دو گره نشت، تحلیل‌های ۷ تا ۹ برای نشت ۳ گره‌ای انجام شده است.

در جدول ۳ که نتایج برای شبکه ۲ ارائه شده است، علاوه بر ستون‌های معرفی شده، ستون‌های ۱۴ تا ۱۶ نتایج مطالعه انجام شده توسط نصیریان و فغفور مغربی (۱۳۹۳) آورده شده است. در این شبکه در بسیاری از تحلیل‌های انجام شده دبی ورودی به شبکه به عنوان مقدار مشاهداتی در مدل هیدرولیکی وارد شده است. در تحلیل شماره ۱ و ۲ نشت تک گره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل شماره ۱ محل نشت در صورت وجود خطا در اندازه‌گیری فشار نیز به درستی تعیین شده است اما مقدار نشت محاسبه شده حدود ۳۰ درصد خطا دارد. دلیل آن را می‌توان به خصوصیات هیدرولیکی شبکه نسبت داد. در این شبکه اختلاف فشار گره‌ها بسیار اندک است. در تحلیل شماره ۲ با افزایش گره‌های مشاهداتی در مدل هیدرولیکی در صورتی که به اندازه ۰/۱- متر آب در اندازه‌گیری فشار خطا وجود داشته باشد دو گره به عنوان گره نشت محاسبه شده است.

تحلیل‌های ۳ تا ۷ نشت‌های دو گره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل شماره ۳ در صورتی که در اندازه‌گیری فشار خطا وجود داشته باشد، گره‌های مجاور به عنوان گره‌های نشت شناسایی شده است. در تحلیل شماره ۴ که گره‌های تابع هدف افزایش یافته است با وجود خطا در فشار اندازه‌گیری شده، موقعیت نشت به درستی محاسبه شده است. همچنین دبی‌های نشت محاسبه شده به نشت‌های موجود نزدیک است. در تحلیل شماره ۵ که مشابه تحلیل شماره ۴ است تعداد گره‌ها در مدل هیدرولیکی افزایش یافته است. در این تحلیل حتی با وجود خطای اندازه‌گیری فشار در گره‌ها موقعیت و مقدار نشت با دقت خوبی نسبت به نتایج نصیریان و فغفور مغربی (۱۳۹۳) محاسبه شده است. مقایسه تحلیل‌های ۳ تا ۵ نشان



جدول (۱): مقایسه گرادیان هیدرولیکی مدل هیدرولیکی و نرم افزار واترجمز

شماره گره	گرادیان هیدرولیکی (متر آب)			شماره گره	گرادیان هیدرولیکی (متر آب)		
	مدل هیدرولیکی	واترجمز	اختلاف		مدل هیدرولیکی	واترجمز	اختلاف
۱	۷۳/۸۱	۷۳/۷۹	۰/۰۲	۱۶	۳۷/۷۵	۳۷/۷۴	۰/۰۲
۲	۶۰/۱۲	۶۰/۱۰	۰/۰۲	۱۷	۲۹/۹۸	۲۹/۹۷	۰/۰۱
۳	۵۳/۳۱	۵۳/۲۹	۰/۰۲	۱۸	۲۷/۱۸	۲۷/۱۷	۰/۰۱
۴	۴۳/۲۵	۴۳/۲۳	۰/۰۲	۱۹	۵۴/۲۱	۵۴/۱۹	۰/۰۲
۵	۳۶/۵۵	۳۶/۵۳	۰/۰۲	۲۰	۵۲/۰۲	۵۲/۰۰	۰/۰۲
۶	۲۸/۶۲	۲۸/۶۰	۰/۰۱	۲۱	۴۳/۷۳	۴۳/۷۲	۰/۰۲
۷	۶۳/۲۵	۶۳/۲۳	۰/۰۲	۲۲	۳۴/۵۹	۳۴/۵۸	۰/۰۲
۸	۵۹/۶۵	۵۹/۶۳	۰/۰۲	۲۳	۲۸/۶۲	۲۸/۶۱	۰/۰۱
۹	۵۱/۷۵	۵۱/۷۳	۰/۰۲	۲۴	۲۶/۵۸	۲۶/۵۶	۰/۰۱
۱۰	۴۳/۲۵	۴۳/۲۳	۰/۰۲	۲۵	۵۳/۲۲	۵۳/۲۰	۰/۰۲
۱۱	۳۲/۵۶	۳۲/۵۴	۰/۰۲	۲۶	۴۸/۹۰	۴۸/۸۸	۰/۰۲
۱۲	۲۸/۰۴	۲۸/۰۳	۰/۰۱	۲۷	۴۱/۶۷	۴۱/۶۵	۰/۰۲
۱۳	۵۹/۷۱	۵۹/۶۹	۰/۰۲	۲۸	۳۳/۶۶	۳۳/۶۴	۰/۰۱
۱۴	۵۶/۷۷	۵۶/۷۵	۰/۰۲	۲۹	۲۸/۲۳	۲۸/۲۱	۰/۰۱
۱۵	۵۱/۲۱	۵۱/۱۹	۰/۰۲	۳۰	۲۶/۳۸	۲۶/۳۷	۰/۰۱



جدول (۲): نتایج نشت یابی در شبکه ۱

شماره تحلیل	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
	نشت واقعی	نشت واقعی	گره‌های مشاهداتی در مدل هیدرولیکی	گره‌های مشاهداتی در تابع هدف	نشت محاسبه شده	نشت محاسبه شده	نشت محاسبه شده	نشت محاسبه شده	نشت محاسبه شده	نشت محاسبه شده	نشت محاسبه شده	نشت محاسبه شده
	موقعیت	مقدار (l/s)			موقعیت	مقدار (l/s)	موقعیت	مقدار (l/s)	خطای مطلق (l/s)	موقعیت	مقدار (l/s)	خطای مطلق (l/s)
۱	۲۰	۱۰	۲۰	۱۱	۲۰	۱۰	۲۰	۱۰/۷	۰/۷	۲۰	۱۰/۷	۰/۷
۲	۱۶	۵۰	۲۰	۱۱	۱۶	۵۰	۴	۴۹/۳	۰/۷	۱۶	۴۹/۱	۰/۹
۳	۱۶	۵۰	۳	۱۱	۱۶	۵۰	۱۶	۵۰/۵	۰/۹	۱۶	۴۷/۵	۰/۹
	---	---	۲۰	۲۵	---	---	۱۴	۰/۴		۶	۱/۶	
۴	۱۷	۱۰	۳	۲۵	۱۷	۱۰	۱۲	۱۰/۷	۰/۹	۲۳	۷/۶	۰/۴
	۲۰	۴۰	۲۹	۲۰	۲۰	۴۰	۲۰	۴۰/۱		۲۰	۴۱/۸	
۵	۱۷	۳۰	۳	۶	۱۷	۳۰	۱۷	۲۹/۹	۱	۱۷	۳۰/۱	۱
	۲۰	۴۰	۲۹	۲۰	۲۰	۴۰	۲۰	۴۱/۱		۲۰	۳۸/۹	
۶	۱۷	۳۰	۳	۲۵	۱۷	۳۰	۱۷	۳۰	۱	۱۷	۳۰	۰/۱
	۲۰	۴۰	۲۰	۱۱	۲۰	۴۰	۲۰	۳۹/۹		۲۰	۳۹/۹	
	---	---	۲۹	---	---	---	۱۴	۱/۱		---	---	
۷	۹	۲۰	۳	۲۵	۹	۲۰	۹	۲۰/۷	۱/۱	۹	۱۹/۳	۰/۹
	۱۷	۳۰	۲۰	۱۱	۱۷	۳۰	۱۷	۳۱/۲		۱۷	۳۰	
	۲۰	۴۰	۲۹	---	۲۰	۴۰	۲۰	۴۰/۲		۲۰	۳۹/۸	
۸	۷	۱۵	۳	۲۵	۷	۱۵	۷	۱۵/۶	۱	۷	۱۴/۴	۱
	۱۵	۲۰	۲۰	۱۱	۱۵	۲۰	۱۵	۲۰/۴		۱۵	۱۹/۶	
	۲۴	۲۵	۲۹	---	۲۴	۲۵	۲۴	۲۵		۲۴	۲۵	



ادامه جدول (۳): نتایج نشت یابی در شبکه ۱

۱	۱۴/۴	۷	۱	۱۵/۶	۷	۱۵	۷	۲۵	۳	۱۵	۷	۹
	۱۹/۶	۱۵		۲۰/۵	۱۵	۲۰	۱۵	۱۱	۲۰	۲۰	۱۵	
	۲۵	۲۴		۲۴/۷	۲۴	۲۵	۲۴	---	۲۹	۲۵	۲۴	
	---	---		۰/۲	۲۹	---	---	---	۱۶	---	---	



جدول (۳): نشت یابی در شبکه ۲

نشت محاسبه شده در خطای ۰/۱ (نصیریان و مغربی، ۱۳۹۳)			مطالعه حاضر												
۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
مقدار (l/s)	موقعیت	گره‌های مشاهداتی	نشت محاسبه‌ای در خطای ۰/۱ +			نشت محاسبه‌ای در خطای ۰/۱ -			نشت محاسبه شده		گره‌های مشاهداتی در تابع هدف	گره‌های مشاهداتی در مدل هیدرولیکی	نشت واقعی		شماره تحلیل
			خطای مطلق (l/s)	مقدار (l/s)	موقعیت	خطای مطلق (l/s)	مقدار (l/s)	موقعیت	مقدار (l/s)	موقعیت	گره‌های مشاهداتی در تابع هدف	مدل هیدرولیکی	مقدار (l/s)	موقعیت	
۲۰	۷۰	۱۲۰، ۹۰	۸/۷	۲۱/۳	۷۰	۸/۸	۳۸/۸	۷۰	۳۰	۷۰	۹۰، ۵۰	۱۱۰	۳۰	۷۰	۱
---	---	---	۱/۹	۳۱/۹	۷۰	۲۰/۳	۲۸/۱	۷۰	۳۰	۷۰	۵۰	۱۱۰	۳۰	۷۰	۲
---	---	---		---	---		۲۲/۲	۱۳۰	---	---	۹۰	دبی ورودی			
۲۰	۱۰۰	۱۱۰، ۹۰	۱۷/۲	۲۲	۳۰	۵/۹	۲۲/۴	۱۰۰	۳۰	۷۰	۵۰	۱۱۰	۳۰	۷۰	۳
۲۰	۱۴۰	۱۲۰ و دبی													
۱۰	۱۶۰	ورودی		۱۰/۸	۷۰		۲۱/۷	۳۰	۲۰	۱۴۰	۹۰	دبی ورودی	۲۰	۱۴۰	
---	---	---	۲/۳	۳۰/۸	۷۰	۲/۶	۲۹/۳	۷۰	۳۰	۷۰	۹۰	۵۰	۳۰	۷۰	۴
---	---	---		۱۶/۹	۱۴۰		۲۳/۳	۱۴۰	۲۰	۱۴۰	۱۷۰، ۱۱۰	دبی ورودی	۲۰	۱۴۰	
۱۰	۶۰	۱۱۰، ۱۲۰	۱/۷	۳۰/۸	۷۰	۲	۲۹/۳	۷۰	۳۰	۷۰	۹۰	۴۰	۳۰	۷۰	۵
۲۰	۷۰	۱۷۰، ۴۰		۱۷/۵	۱۴۰		۲۲/۶	۱۴۰	۲۰	۱۴۰	۱۱۰	۵۰	۲۰	۱۴۰	
۲۰	۱۴۰	دبی ورودی		---	---		۰/۱	۴۰	---	---	۱۷۰	دبی ورودی			

نتیجه‌گیری

دقت روش پیشنهادی در صورت وجود خطا در اندازه‌گیری فشار مورد بررسی قرار گرفت. در شبکه‌ای که اختلاف فشارها قابل توجه است، خطا در اندازه‌گیری فشار (شبکه ۱) تاثیری کمی روی مقدار نشت محاسبه شده دارد و موقعیت نشت به درستی محاسبه شده است. خطای مطلق در این شبکه حداکثر ۱/۱ لیتر بر ثانیه بوده است. در شبکه ۲ که اختلاف فشارها کوچک است خطا در اندازه‌گیری فشار موجب خطا در برآورد مقدار و موقعیت نشت می‌شود. در این حالت با افزایش تعداد گره‌های تابع هدف مدل قادر خواهد بود مقدار و موقعیت نشت را با درستی بالاتری محاسبه کند. در تحلیل‌های انجام شده برای این شبکه افزایش تعداد گره‌های مدل هیدرولیکی و تابع هدف می‌تواند خطای مطلق را از ۱۷/۲ لیتر بر ثانیه تا ۱/۷ لیتر بر ثانیه کاهش دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مدل هیدرولیکی در محاسبه مقدار نشت دقت بالایی در مقایسه با روش‌های فراکاوشی دارد.

نشت در شبکه‌های توزیع و خطوط انتقال آب موجب هدر رفت به میزان قابل توجه می‌شود. به همین دلیل پیدا کردن موقعیت و مقدار نشت از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مقاله روش جدیدی جهت محاسبه موقعیت و مقدار نشت در شبکه توزیع پیشنهاد شده است. الگوریتم جستجوی هارمونی در تعیین محل نشت و حل معکوس معادلات پیوستگی و انرژی در محاسبه مقدار نشت به کار رفته است. در این روش علاوه بر اندازه‌گیری پارامترهای فشار و دبی در تعدادی از نقاط شبکه برای تابع هدف، لازم است به تعداد گره‌های نشت نیز در شبکه اندازه‌گیری انجام شود. چنانچه در اندازه‌گیری فشار خطا وجود نداشته باشد روش پیشنهادی قادر است موقعیت و مقدار نشت را به صورت دقیق محاسبه کند. دلیل این امر استفاده از مدل هیدرولیکی برای محاسبه مقدار نشت می‌باشد. همچنین

منابع

- فاضل ولیپور، ب. و فغفور مغربی، م. ۱۳۸۸. نشت‌یابی شبکه آبرسانی با اندازه‌گیری میدانی فشارهای گره‌ای. هشتمین کنفرانس هیدرولیکی ایران، دانشگاه تهران.
- بذری، م. و علامتیان، ا. ۱۳۹۳. شناسایی نشت به روش الگوریتم پرندگان در شبکه‌های توزیع آب، نهمین سمپوزیوم پیشرفتهای علوم و تکنولوژی، مشهد.
- حسنزاده، ی. و فغفور مغربی، م. ۱۳۸۹. شناسایی نشت بر مبنای بهینه‌یابی به روش کلونی مورچه‌ها در شبکه‌های توزیع آب. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. ایران، تهران.
- جلیلی قاضی‌زاده، م. و معاشری، ر. ۱۳۹۷. یافتن موقعیت و تعیین مقدار دو نشت همزمان در شبکه‌های آبرسانی، دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران و دومین همایش ملی عرضه و تقاضای آب شرب و بهداشتی.
- کلیایی، پ. و محمدولی سامانی، ح. ۱۳۹۱. پیش‌بینی محل نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. ایران، اصفهان.
- نصیریان، ع. و فغفور مغربی، م. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد مدل‌های بهینه‌سازی در کالیبراسیون و نشت‌یابی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از مدل آزمایشگاهی، مجله آب و فاضلاب، ۲۵(۲)، ۳۶-۴۷.
- عطاری، م. و فغفور مغربی، م. ۱۳۹۷. روش نوین نشت‌یابی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله آب و فاضلاب، ۲۹(۱)، ۱۴-۲۶.

El-Zahab, S., and Zayed, T. 2019. Leak detection in water distribution networks: an introductory overview. *Smart Water*, 4(1), 5.

Ramadevi, R., Jaiganesh, J., and Krishnamoorthy, N. R. 2018. Leak Detection Methods - A Technical Review. Springer Singapore, 125-139



Wu, Z. Y., and Sage, P., 2006. Water loss detection via genetic algorithm optimization based model calibration. ASCE 8th Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis, Cincinnati, Ohio.

Boulos, P. F., and Wood, D. J. 1990. Explicit calculation of pipe network parameters. *J. of Hydraulic Engineering*, 116(11), 1329-1344.

Kun, D., Tian-Yu, L., Jun-Hui, W., and Jin-Song, G. 2015. Inversion Model of Water Distribution Systems for Nodal Demand Calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(9), 04015002.

Dini, M., and Tabesh, M. 2014. A new method for simultaneous calibration of demand pattern and Hazen-Williams coefficients in water distribution systems. *Water Resour. Manage*, 28(7), 2021–2034.

Geem, Z. W., Kim J. H. and Loganathan G. V. 2001. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulations*, 76, 60–68.

Lee, K. S., Geem Z. W., Lee S. H., Bae K. W. 2005. The harmony search heuristic algorithm for discrete structural optimization. *Eng. Optim.* 37, 663–684.

Geem, Z. W., Kim, J. H., and Loganathan, G. V. 2002. Harmony search optimization: Application to pipe network design. *International Journal of Modelling and Simulation*, 22(2), 125–133.

Karahan, H., Gurarslan, G., and Geem, Z. W. 2013. Parameter estimation of the nonlinear Muskingum flood-routing model using a hybrid harmony search algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(3), 352–360.

Todini, E., and Pilati, S. 1988. A gradient method for the solution of looped pipe networks. *Computer applications in water supply*, B. Coulbeck and C. H. Orr, eds., Vol. 1, Wiley, London, 1–20.

Walski, T. M., Brill, E. D., Gessler, J., Goulter, I. C., Jeppson, R. M., Lansey, K., Lee, H. L., Liebman, J. C., Mays, L., Morgan, D. R., and Ormsbee, L. 1987. Battle of networks models: Epilogue. *J. Water Resour. Plan. Manage*, 113, 191-203.

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



Combining inverse solution method and meta-heuristic algorithm to calculate the amount and location of leaks in water distribution networks

Iman Rostami^۱, Elham Darvishi^{۲*}

Abstract

In addition to wasting water and energy, leaks in water distribution networks also cause social and environmental problems. So it is important to try to save as much as possible. In leaks made by meta-heuristic methods, the decision variables are leak node number and flow leakage. In this study, a method is presented with the combination of inverse solution of flow equations and meta-heuristic algorithm. In the proposed method, only the leakage node number is considered as the decision variable in the Harmony search method, and the leakage amount is calculated using the inverse solution of continuity and energy equations. In addition to a number of measurements for the objective function of the meta-heuristic algorithm, it is necessary to measure pressure nodes and discharge pipes as many as leakage nodes for the hydraulic model. The results in the two hypothetical networks show that this method determines and calculates the position and amount of leaks with high accuracy, even if the leakage amount is small. If there is an error in measuring the node pressure, the position and amount of leaks are calculated accurately by increasing the nodes of the objective function.

Keywords: Leakage Detection, Inverse solution, Harmony Search, Water Distribution System

^۱ Ms Student, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran, I.rostami@stu.razi.ac.ir

^۲ Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran, e.darvishi@razi.ac.ir



Combining inverse solution method and meta-heuristic algorithm to calculate the amount and location of leaks in water distribution networks

Iman Rostami^۱, Elham Darvishi^{۲*}

Introduction

Supply and conveyance of drinking water with appropriate quality is the task of urban water distribution networks. But because these networks are built underground, they have become difficult to manage and operate. Water loss through leakage is the biggest problem faced by water supply networks (El-Zahab and Zayed, 2019).

In this research, meta-heuristic methods are used to determine the leakage position and the solution of the equation system is used to determine the leakage amount. In other words, the share of meta-heuristic methods in leak detection is reduced. But the accuracy of the leakage discharge calculation is greatly increased.

Methodology

The equations in the distribution network based on the equations of continuity and energy can be expressed as follows:

$$\mathbf{A}\mathbf{Q} - \mathbf{q} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{H} + \mathbf{h} + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 = 0 \quad (2)$$

\mathbf{A} is the matrix $n \times m$, where n is the number of junctions and m is the number of pipes. If node i is the start and node j is the end of the pipe, it is -1. If node j is the start and node i is the end of the pipe, it is +1. If node i is not connect to j , it must be equal to zero.

The elements of matrix \mathbf{A}_{10} determines the relationship between a node with a fixed head (tank or reservoir) and a junction. \mathbf{Q} and \mathbf{q} are the pipe discharge vector and the junction demand, respectively, \mathbf{H} and \mathbf{H}_0 are the vector of unspecified heads, and \mathbf{h} is the pipe loss vector, which has the following relation:

$$\mathbf{h} = \mathbf{R} |\mathbf{Q}|^{n-1} \mathbf{Q} \quad (3)$$

\mathbf{R} is the resistance of the pipes and \mathbf{n} is the discharge power in the loss relation.

In the inverse model, the pressure and demand in some junctions and the discharge of some pipes are measured, while the discharge of other pipes, the pressure and the demand of other junctions are unknown. To construct the model, known and unknown variables can be separated and for this purpose, the continuity equation is decomposed as follows (Kun et al. 2015).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{kq} & \mathbf{I}_{uq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{kq} \\ \mathbf{q}_{uq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{kQ} & \mathbf{A}_{uQ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{kQ} \\ \mathbf{Q}_{uQ} \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

\mathbf{q}_{kq} and \mathbf{q}_{uq} are subsets of \mathbf{q} , which are the known and unknown junction demands, respectively. \mathbf{I}_{kq} and \mathbf{I}_{uq} are subsets of \mathbf{I}_q that are known and unknown by the junction demand of the matrix, respectively. \mathbf{Q}_{kQ} and \mathbf{Q}_{uQ} are known and unknown subsets of \mathbf{Q} , respectively. \mathbf{A}_{kQ} and \mathbf{A}_{uQ} are the columns of matrix

^۱ Ms Student, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran, I.rostami@stu.razi.ac.ir

^۲ Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran, e.darvishi@razi.ac.ir



\mathbf{A} for the discharge of known and unknown pipes, respectively, and \mathbf{kQ} , \mathbf{uQ} , \mathbf{kq} , and \mathbf{uq} represent the number of knowns and unknowns for the discharge of pipes and the demands of the junctions, respectively. Equation (4) can also be written:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{uq} & -\mathbf{A}_{uQ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{uq} \\ \mathbf{Q}_{uQ} \end{bmatrix} - \mathbf{A}_{kQ} \mathbf{Q}_{kQ} + \mathbf{I}_{kq} \mathbf{q}_{kq} = 0 \quad (5)$$

In a similar way, the energy equation can be written as follows:

$$\mathbf{A}_{kH}^T \mathbf{H}_{kH} + \mathbf{A}_{uH}^T \mathbf{H}_{uH} + \mathbf{I}_{uh} \mathbf{h}_{uh} + \mathbf{I}_{kh} \mathbf{h}_{kh} + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 = 0 \quad (6)$$

\mathbf{kH} , \mathbf{uH} , \mathbf{kh} and \mathbf{uh} are the number of junctions with known and unknown pressure and the known and unknown pressure drop, respectively. \mathbf{A}_{kH}^T and \mathbf{A}_{uH}^T are matrices of \mathbf{A} formed by the corresponding columns of \mathbf{A}^T , respectively, \mathbf{kh} and \mathbf{uh} are subsets of \mathbf{h} , which are known and unknown pressure drops, \mathbf{I}_{kh} and \mathbf{I}_{uh} are subsets of \mathbf{I}_h matrices, which correspond to known and unknown pressure drops. According to Equations 7 and 3 can be rewritten:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{uQ} \mathbf{R} |\mathbf{Q}_{uQ}|^{n-1} & \mathbf{A}_{uH}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{uQ} \\ \mathbf{H}_{uH} \end{bmatrix} + \mathbf{A}_{kH}^T \mathbf{H}_{kH} + \mathbf{I}_{kh} \mathbf{h}_{kh} + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 = 0 \quad (7)$$

The combination of Equations 3 and 7 creates:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{uQ} & -\mathbf{A}_{uQ} & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_{uQ} \mathbf{R} |\mathbf{Q}_{uQ}|^{n-1} & \mathbf{A}_{uH}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{uq} \\ \mathbf{Q}_{uQ} \\ \mathbf{H}_{uH} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{kq} \mathbf{q}_{kq} - \mathbf{A}_{kQ} \mathbf{Q}_{kQ} \\ \mathbf{A}_{kH}^T \mathbf{H}_{kH} + \mathbf{I}_{kh} \mathbf{h}_{kh} + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

$(n+m) \times (uq+uQ+uH)$ $(uq+uQ+uH) \times 1$ $(n+m) \times 1$

Equation (8) shows the inverse model of water distribution networks because the unknown demand of the junction can be calculated by direct solution (Kun et al. 2015).

In Harmony search algorithm which introduced by Geem et al., 2001, the objective function used according to Equation 9 is:

$$\text{Min } OF = \sum_{i=1}^{nH} (H_i^o - H_i^s)^2 \quad (9)$$

nH is the number of measurement pressures, H_i^s and H_i^o are the computational and measurement pressures in junction i . The pressure used in this equation is separate from the values used in the hydraulic model. In other words, if it is intended to find two leak nodes in the network, it is necessary to enter two measured values in the hydraulic model, and in addition to these two values, another number should be measured for the objective function.

Discussion and conclusion:

In this paper, a new method is proposed to calculate the position and amount of leakage in the distribution network. Harmony search algorithm is used to determine the location of leakage and reverse solve the equations of continuity and energy is used to calculate the amount of leakage. In this method, in addition to measuring the pressure and discharge parameters at a number of network points for the objective function, it is necessary to measure the pressure at a number of nodes equal to or greater than the number of leak junctions in the network. If there is no error in measuring the pressure, the proposed method is able to accurately calculate the position and amount of leakage. The reason for this is the use of a hydraulic model to calculate the amount of leakage. Also, the accuracy of the proposed method in the presence of errors in pressure measurement was evaluated. In a Poulakis network where the pressure



difference is significant, the error in measuring the pressure has little effect on the calculated leakage value and the leakage position is calculated correctly. The absolute error in this network was a maximum of 1.1 liters per second. In Aniton network, where the pressure difference is small, an error in the pressure measurement causes an error in estimating the amount and position of the leak. In this case, by increasing the number of nodes in the objective function, the model will be able to calculate and determine the amount and position of the leak with higher accuracy, respectively. In the analysis performed for this network, increasing the number of nodes of the hydraulic model and the objective function can reduce the absolute error from 17.2 l/s to 1.7 l/s. The results show that the use of hydraulic model in calculating the amount of leakage has a high accuracy compared to meta-heuristic methods.

Keywords: Leakage Detection, Inverse solution, Harmony Search, Water Distribution System

The most important references

El-Zahab, S., and Zayed, T. 2019. Leak detection in water distribution networks: an introductory overview. *Smart Water*, 4(1), 5.

Kun, D., Tian-Yu, L., Jun-Hui, W., and Jin-Song, G. 2015. Inversion Model of Water Distribution Systems for Nodal Demand Calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(9), 04015002.

Walski, T. M., Brill, E. D., Gessler, J., Goulter, I. C., Jeppson, R. M., Lansey, K., Lee, H. L., Liebman, J. C., Mays, L., Morgan, D. R., and Ormsbee, L. 1987. Battle of networks models: Epilogue. *J. Water Resour. Plan. Manage*, 113, 191-203.

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

Geem, Z.W., Kim J.H. and Loganathan G.V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulations*, 76, 60-68.