

نشتیابی در شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن تغییرات ساعتی نیازهای گرهی به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی

رضا زندی^۱، جعفر یزدی^{۲*}، محمد شاه‌سوندی^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست - دانشگاه شهید بهشتی، تهران
۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست - دانشگاه شهید بهشتی، تهران
۳- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست - دانشگاه شهید بهشتی، تهران

*j_yazdi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۵/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۲۷

چکیده

شبکه آبرسانی مهم‌ترین زیرساخت شهری برای تامین آب مصرفی است. با توجه به اینکه در حال حاضر هدررفت آب یک نگرانی جهانی است و از طرفی تقاضا برای آب در حال افزایش است؛ این مساله مدیریت تقاضا و اصلاح الگوی مصرف را ضروری ساخته است. از مهم‌ترین روش‌های مدیریت مصرف، کاهش آب بدون درآمد است. از زیرمجموعه‌های آب بدون درآمد می‌توان به نشت موجود در شبکه آبرسانی اشاره کرد. در این مقاله، یک روش شبیه‌سازی - بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم جستجوی هارمونی توسعه داده شده است که در آن، حل‌گر هیدرولیکی EPANET در محیط متلب به الگوریتم فراکاوشی جستجوی هارمونی لینک شده است. سناریوهایی برای مکان‌یابی نشت و یافتن اندازه نشت در دو شبکه آبرسانی مورد بررسی قرار گرفت. سناریوهای مکان‌یابی شامل یک نشت و سه نشت همزمان است. نیازهای گرهی در طول شبانه روز به صورت متغیر در نظر گرفته شده است و بدین ترتیب ضرایب الگوی مصرف در طول ۲۴ ساعت به گره‌های هر دو شبکه در نرم‌افزار EPANET اختصاص داده شد. پس از آن بدنه اصلی الگوریتم جستجوی هارمونی در محیط متلب نوشته شد و متناسب با هر یک از سناریوهای مکان‌یابی و اندازه نشت، الگوریتم جستجوی هارمونی توسعه داده شد. پارامترهای الگوریتم نیز با توجه به نوع سناریو، اندازه شبکه مورد مطالعه (تعداد گره‌ها) و تعداد متغیرهای تصمیم برای تولید پاسخ‌های قابل قبول تنظیم شدند. مدل توسعه داده شده، ۱۴ سناریو را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان می‌دهد مدل توسعه یافته به ترتیب در مکان‌یابی یک نشت، یافتن اندازه نشت و مکان‌یابی سه نشت موفق عمل نموده و به طور کلی مدل عملکرد قابل قبولی در مکان‌یابی و یافتن مقدار نشت در طول شبانه‌روز داشته است.

واژگان کلیدی: نشتیابی، بهینه‌سازی، جستجوی هارمونی، شبکه توزیع آب.

۱- مقدمه

تلفات آب در شبکه‌های توزیع آب شهری است، مسئله پیدا کردن محل و میزان نشت هم در شبکه توزیع آب با استفاده از ابزارهای موجود و مدل‌های رایانه‌ای، کمک شایانی برای کاهش نشت به شمار می‌آید. ضرورت مسئله نشت را می‌توان در موضوعاتی مانند کمبود منابع آبی و استفاده بهینه از منابع موجود و بالابودن هزینه‌های تصفیه و توزیع آب پیدا کرد، به عبارت دیگر در بحث انتقال و استفاده از آب، شاهد هدر رفت‌هایی به صورت آشکارا و نهان هستیم که این موضوع در کشوری خشک و نیمه خشک مانند ایران حائز اهمیت است، از این رو باید به دنبال این بود که میزان هدر رفت‌ها را به کمترین رسانید تا بتوان از منابع به صورت بهینه بهره برد. روش‌هایی که در موضوع کاهش نشت استفاده می‌شوند شامل بحث‌هایی همچون عملیات‌های میدانی، مدل‌های رایانه‌ای برای مکان‌یابی نشت و غیره هستند. در عملیات‌های میدانی برای نشت‌یابی نیز علاوه بر صرف وقت زیاد، دارای عدم قطعیت‌هایی از جمله سختی کار میدانی در شرایط آب و هوایی مختلف، هزینه‌های بالا، وجود خطاهای انسانی و دستگاهی است؛ که این شرایط در سال‌های اخیر موجب شده تا در مسئله کاهش نشت به سمت استفاده از ابزارهای رایانه‌ای و شبیه‌سازی روی آورده شود؛ که هم اندازه و هم ناحیه محل نشت را با صرف کمترین انرژی و زمان در اختیار قرار می‌دهند.

۲- اهداف

هدف از این مقاله بررسی و توسعه یک مدل و ابزاری مهندسی با به کارگیری الگوریتم جستجوی هارمونی، نرم‌افزارهای متلب و EPANET برای تعیین مکان و اندازه یک و یا چند نشت هم‌زمان در شبکه‌های توزیع آب واقعی برای استفاده‌های آتی در شرکت‌های آب و فاضلاب است.

۳- مروری بر سابقه پژوهش

روش‌های نشت‌یابی به دو روش کلی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری تقسیم‌بندی شده است [3]. روش‌های سخت‌افزاری مانند تشخیص صوتی در نشت یا استفاده از امواج و غیره و روش‌های

شبکه آبرسانی شهری مهم‌ترین زیرساخت برای تامین مطمئن آب مصرفی روزانه شهری و صنعتی است. تامین آب نیازمند مصرف انرژی زیاد است؛ که منجر به تولید مقدار زیادی گازهای گلخانه‌ای و افزایش هزینه‌های برق برای ارائه دهندگان خدمات آب می‌شود. در حال حاضر هدررفت آب به یک نگرانی جهانی تبدیل شده است. از طرفی تقاضا برای آب در حال افزایش است؛ که این مساله مدیریت تقاضا و اصلاح الگوی مصرف را ضروری ساخته است. از مهم‌ترین روش‌های مدیریت مصرف، کاهش آب بدون درآمد است. از زیر مجموعه‌های آب بدون درآمد می‌توان به نشت در شبکه‌های آبرسانی اشاره کرد. همچنین نظر به رشد جمعیت و بحران آب در بخش وسیعی از کشورهای دنیا، مقوله نشت در شبکه‌های آبرسانی شهری اهمیت زیادی یافته است. نشت در شبکه‌های توزیع آب، انرژی و منابع آب را اتلاف می‌کند و آسیب به زیرساخت‌ها را افزایش می‌دهد و امکان آلودگی آب شرب را فراهم می‌کند. نشت در سیستم توزیع آب بین ۵ تا ۵۵ درصد کل آب متغیر است [1]. از این رو نشت تاثیر مهمی روی عملکرد سیستم دارد. به طور کلی هدر رفت‌های آب ناشی از نشت با فشار افزایش می‌یابد. بیش از ۳۰ درصد هدررفت آب شرب از طریق سیستم توزیع آب در ایران که در منطقه نیمه‌خشک واقع شده است، نگرانی بزرگی برای مصارف آب ایرانیان است [2]. افزایش حوادث و نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری به دلیل افزایش سن لوله‌ها (سن لوله منجر به افزایش فرکانس شکست و نشت شده و بهره‌وری سیستم را کاهش می‌دهد) از جمله عواملی است که اصلاح شبکه را ضروری می‌سازد. پس، شناسایی عوامل بروز آن و عوامل موثر بر میزان آن ضروری است؛ تا به کمک آن بتوان به بررسی راهکارهای کاهش و اجتناب از آن پرداخت. تخمین هدر رفت واقعی جریان در شبکه توزیع آب در برنامه سرمایه‌گذاری برای نوسازی، ارزیابی افزایش نشت به مرور زمان و امکان دستیابی روش‌هایی برای شناسایی و تعمیر کردن اهمیت دارد. در سال‌های اخیر راهکارهای مختلف کاهش نشت مورد توجه پژوهشگران و مدیران صنعت آب قرار گرفته است. در کنار موضوع مدیریت فشار که یکی از روش‌های متداول برای کاهش

نشت در این بخش کمک گرفته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی گسترده، اثربخشی طرح پیشنهادی را در تشخیص و محل‌یابی دقیق نشت نشان می‌دهد [7].

آریفین و همکاران یک الگوریتم جدید برای شناسایی و مکان‌یابی نشت مبتنی بر داده و مفهوم فاصله کانتورویچ را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس اثر نشت خط لوله، نشت تشخیص داده شده و محل آن نیز حدس زده می‌شود. [8].

برگلد و همکاران از روش‌های تقریب خطی، مبتنی بر برنامه‌نویسی خطی و برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح مختلط، در یک چارچوب شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای کشف یک روش جایگزین تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری بر اساس اندازه‌گیری فشار استفاده کردند. این روش‌ها سعی در به کمترین رساندن اختلافات مطلق بین مقادیر فشار مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در سنسورها برای تعیین ترکیب خطی نشت‌هایی که به الگوی فشار مشاهداتی تقریباً نزدیکتر هستند، دارند. [9].

مازولانی و همکاران برای تخمین نشت شبکه توزیع آب تنها بر اساس داده‌های جریان ورودی، مطالعه‌ای انجام دادند. این روش از استراتژی همگون‌سازی داده‌ها (Data-assimilation strategy) استفاده می‌کند که در آن یک فرمول‌بندی سازگار با رفتار فیزیکی شبکه‌های توزیع آب ارائه شده است و نیازمند تخمین تنها تعداد کمی پارامتر عددی است. این روش برای هردو شبکه‌ی توزیع آب واقعی و مصنوعی به کار گرفته شده است [10].

وانگ و قیداوی یک روش تشخیص نشت مبتنی بر جریان گذرا با استفاده از یک طرح پردازش درست (MFP) تنظیم و استفاده کردند. همچنین نشان دادند که شناسایی منحصربه‌فرد با روش MFP بدست می‌آید مشروط بر اینکه سیگنال فشار در دو نقطه در امتداد لوله اندازه‌گیری شود. در مورد نشت‌های متعدد، MFP هر یک از نشت‌ها را مشخص می‌کند به شرط آنکه فاصله بین نشت‌ها به همان ترتیب یا بزرگتر از کوتاهترین طول نیمه موج کاوشگر باشد [11].

نرم‌افزاری مانند پیوند مدل‌های هیدرولیکی شبکه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. در بررسی این روش‌ها پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است که در ادامه به مروری برخی از این پژوهش‌ها می‌پردازیم.

اسکافت و همکاران روشی را برای ارزیابی توانایی یک الگوریتم مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو برای یافتن نشت در حضور عدم قطعیت‌های محدود در نیازهای گرهی را ایجاد کرده‌اند. دو رویکرد Monte Carlo و Monte Carlo همراه با رویکرد تجزیه و تحلیل زونوتوپ برای ارزیابی تأثیر عدم قطعیت نیاز گرهی در نظر گرفته شده. یک رویکرد این متدولوژی با استفاده از یک نسخه ساده شده از یک الگوریتم مکان‌یابی نشت موجود که برای درک اهمیت به یک شبکه مصور اعمال شده، ارائه شده [4].

واچلا و همکاران روشی برای یافتن نشت در شبکه‌های توزیع آب ارائه دادند. ایده این روش بر اساس تفکیک سیستم آبرسانی به مناطق از پیش تعریف شده و سپس شناسایی مکانی تقریبی است که در آن می‌تواند نشتی رخ دهد. در روش پیشنهادی، محل نشت با استفاده از گروه طبقه‌بندی کننده‌های عصبی-فازی مشخص می‌شود. وظیفه هر طبقه‌بندی این است که در صورت بروز نشت در شبکه مرتبط با این طبقه‌بندی، وضعیت خروجی آن را تغییر دهد [5].

کیم و همکاران یک الگوریتم جدید را پیشنهاد دادند که نشت در شبکه آب را شناسایی کرده و با اندازه‌گیری فشار و تحلیل آماری، محل آنرا نشان می‌دهد. طرح تشخیص، هشدار خطای بسیار کمتری را به نمایش می‌گذارد و محل‌یابی آن برای اجرا در شبکه‌های واقعی نسبت به روش‌های قبلی، عملی‌تر است [6].

سکیب و همکاران یک رویکرد جدید چند متغیره و چند مقیاس برای تشخیص و محل‌یابی نشت در شبکه‌های خط لوله آب ارائه دادند؛ که در آن از اندازه‌گیری فشار در نقاط مختلف شبکه برای یافتن محل لوله‌ای که در آن نشت رخ داده است، استفاده می‌شود و سپس از حسگرهای لرزش برای مکان‌یابی

کردند. علاوه بر این، روش توسعه یافته مکان یابی، چندین نشت همزمان را امکان پذیر می سازد [15].

معاشری و جلیلی قاضی زاده روش جدیدی برای تعیین مناطق نشتی در شبکه های توزیع آب ارائه داده اند. روش پیشنهادی ایشان شامل سه مرحله اصلی است. در اولین گام، شبکه با توجه به موقعیت جغرافیایی لوله های شبکه و ابزار زمینه اندازه گیری، به چندین منطقه مجازی تقسیم می شود. در مرحله دوم، در حالی که نشت به عنوان یک تقاضای اضافی از گره ها در نظر گرفته می شود، کالیبراسیون همزمان نیازها و زبری لوله ها در مدل هیدرولیک شبکه توسط الگوریتم رقابت استعماری انجام می شود. در مرحله سوم، براساس نتایج دو مرحله قبلی، احتمال نشت هر منطقه برآورد می شود. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن اولویت مقادیر، می تواند به درستی مکان نشت همزمان را پیش بینی کند [16].

بر اساس بررسی سوابق پژوهشهای مرتبط انجام شده، در بیشتر پژوهش های قبلی، نیاز گرهی در شبکه ثابت فرض شده است که این موضوع سبب می شود مسئله نشت یابی معکوس پذیر نباشد؛ بدین معنی که از روی اطلاعات گیج های فشارسنجی یا دبی سنجی در نقاط مشخص شبکه نتوان محل نشت را براحتی پیدا نمود؛ چرا که وجود نشت در محل های مختلف اثر یکسانی را روی هیدرولیک جریان عبوری از محل فشارسنج یا دبی سنج دارد. در این مقاله تلاش شده است با ترکیب مدل هیدرولیک شبکه با یک الگوریتم جستجو و در نظر گرفتن ارتباط تغییرات زمانی فشار با میزان نشت، مشکل معکوس ناپذیری را تا اندازه زیادی کاهش داده و روش جدید برای نشت یابی ارائه شود. در نظر گرفتن تغییرات زمانی نشت (از یک محل ثابت) سبب می شود که هیدرولیک جریان عبوری از محل گیج ها تحت سناریوهای مختلف مکان نشت در شبکه تغییرات بیشتری داشته باشند، پس مساله یافتن محل نشت ساده تر شود. به عبارتی دیگر نوآوری این مقاله در ترکیب مدل هیدرولیک شبکه با یک الگوریتم جستجو و در نظر گرفتن ارتباط تغییرات زمانی فشار با میزان نشت است؛ یعنی نیاز گرهی در شبکه به صورت ثابت

سوفوکلوس و همکاران یک روش مبتنی بر مدل برای تشخیص و مکان یابی نشت در شبکه های توزیع آب ارائه کردند. این روش دو مرحله را بکار می گیرد: ۱. کاهش فضای جستجو (SSR^۲) و ۲. مرحله شناسایی و محلی کردن نشت (LDL^۳). نتایج نشان می دهند که نشتی که باعث تاثیر هیدرولیکی بزرگ تر از خطای داده های سنسور می شود، می تواند تشخیص داده شده و با این روش محل یابی شود. نتیجه نمونه واقعی نشان می دهد که روش ارائه شده می تواند منطقه جستجو را برای پیدا کردن نشتی در حدود ۱۰٪ از شبکه توزیع آب، کاهش دهد [12].

ژی و همکاران یک روش جدید برای نظارت هیدرولیکی و شناسایی مناطقی که نشت در زمان نزدیک به واقعیت رخ می دهد، مورد بررسی قرار دادند. در این روش یک شبکه بزرگ ابتدا به چندین منطقه شناسایی تقسیم شده و سپس یک طبقه بندی کننده خطی برای تعیین مناطق احتمالی نشت توسعه داده می شود. نتایج نشان می دهد که روش پیشنهادی می تواند حوادث نشتی با قابلیت افزایش چشمپوشی را برای خطاهای اندازه گیری، شناسایی کند. این روش همچنین تا حدی برای شناسایی دو نشت همزمان مؤثر است [13].

گنگ و همکاران یک روش جدید شناسایی بر اساس ماتریس حساسیت جریان و به کمک مدل هیدرولیکی EPANET ارائه کردند. در این روش شناسایی نشت بر اساس ماتریس حساسیت جریان لوله پیشنهاد شده است. روش کمینه مربعات خطا بر اساس حساسیت جریان لوله در بیان کردن نشت واقعی در شبکه خط لوله استفاده می شود. نتایج نشان می دهد که روش پیشنهادی برای نشت یابی، دقیق تر و موثرتر بوده و می تواند باعث استفاده بهینه منابع آب شود [14].

بلاچر و همکاران مسئله معکوس اصطلاحاً بد رفتار (ill-posed) شناسایی و موقعیت یابی نقاط مهم نشت را با استفاده از یک روش مبتنی بر بهینه سازی جدید که با هدف به کمترین رساندن تفاوت بین داده های اندازه گیری هیدرولیکی و حالت های دائمی شبیه سازی شده از شبکه توزیع آب مطرح

گرفتن تغییرات نشت وابسته به فشار، تا اندازه زیادی مشکل عدم معکوس پذیری روند نشت یابی با استفاده از اطلاعات گنج های فشارسنجی را کاهش داده، پس عملکرد الگوریتم نشت یابی را بهبود می بخشد؛ به عبارت واضح تر، در بررسی مساله نشت یابی با استفاده از روش های بهینه سازی، کمترین مقدار تابع هدف مساله به ازای محل های نشت مختلف بدست می آید که این به معنای عدم منحصربه فرد بودن جواب مساله بهینه سازی (محل یافت شده برای نشت) است. در صورتی که تغییرات زمانی نشت در نظر گرفته شود، مشکل بدست آمدن جواب های یکسان برای محل نشت تا اندازه زیادی مرتفع می شود که در این پژوهش این رویکرد برای نشت یابی ارائه شده است.

۴-۱- شبکه های مورد مطالعه

۴-۱-۱- شبکه اول

شبکه اول یک شبکه توزیع آب واقعی، دارای ۶۱ گره، ۶۲ لوله، بدون در نظر گرفتن امکاناتی برای پمپاژ و یک مخزن در ارتفاع ۱۴۸۹ متری است. نیازهای گرهی شبکه بین ۰٫۰۴ تا ۰٫۱۸ مترمکعب بر ثانیه متغیر است.

شکل ۱. شبکه اول برای نشت یابی در سیستم توزیع آب

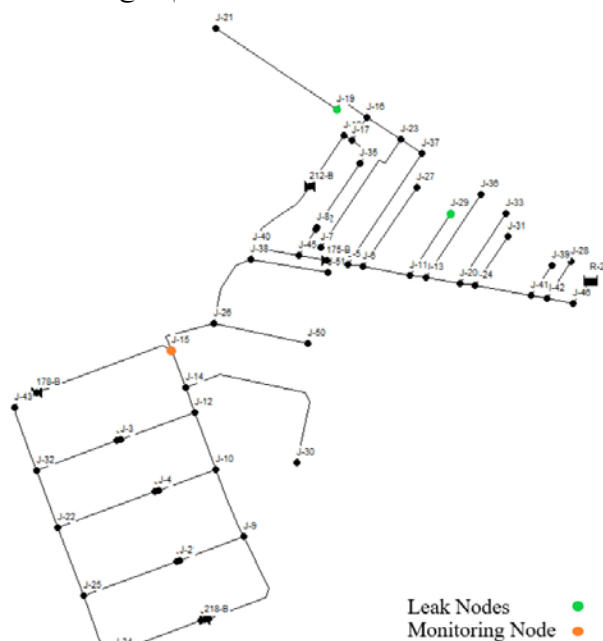


Fig. 1. The first network for locating leaks in water distribution system

نبوده، بلکه مانند شرایط واقعی هر گره، در هر ساعت دارای یک ضریب الگوی مصرف در شبانه روز است. در گره نشت، در هر ساعت علاوه بر مصرف ساعتی، میزان نشت متناسب با فشار گره نیز تعریف می شود. در نتیجه نیاز در گره نشت در هر ساعت تاثیر موضعی روی هیدرولیک جریان عبوری از گره پایش و مقدار فشار آن خواهد داشت و برای ۲۴ ساعت، در مجموع ۲۴ تاثیر موضعی برای ۲۴ مقدار برداشتی از فشار گره پایش وجود خواهد داشت و مدل بهینه سازی در تابع هدف خود باید با مکان یابی صحیح محل های پایش، به جای دو عدد اسکالر، دو مجموعه ۲۴ تایی از داده های فشار را با هم مقایسه و حداقل کند که این موضوع موجب منحصربه فرد شدن جواب تولید شده توسط مدل و حل شدن معکوس ناپذیری مسئله نشت می شود؛ در حالی که در حالت نیازگرهی ثابت تنها یک داده در فشار گره پایش وجود دارد (یعنی تابع هدف دو عدد اسکالر فشار را با هم مقایسه می کند). بنابراین همان گونه که در ادامه نتایج سناریوهای مختلف نشان می دهد، روش پیشنهادی سبب افزایش تمایز محل هایی می شود که با در نظرگیری نشت در آنها تاثیر نسبتا یکسان ر روی هیدرولیک جریان عبوری از محل گره پایش دارند و این در نهایت منجر به منحصربه فرد بودن جواب (یعنی یافتن محل واقعی نشت) می شود. در این مقاله روشی نیز برای تخمین مقدار نشت در هنگام شبانه روز بر اساس حل یک مساله بهینه سازی ارائه شده است که جزئیات آن در بخش روش شناسی ارائه خواهد شد.

۴- روش شناسی

روش پیشنهادی در این مقاله پیدا کردن میزان و محل نشت با در نظر گرفتن تغییرات نیاز گرهی در شبکه و در نتیجه تغییرات زمانی نشت در هنگام شبانه روز با استفاده از توسعه مدل شبیه سازی EPNAET و بهینه سازی با استفاده از جستجوی هارمونی است. در بیشتر مطالعات نشت یابی مبتنی بر مدل، میزان نشت مقدار ثابتی در نظر گرفته شده است، در حالی که در واقعیت این مقدار نشت ثابت نیست و در خلال ساعات شبانه روز تغییر می کند. متدولوژی توسعه داده شده در این پژوهش، با در نظر

۴-۱-۲- شبکه دوم

این شبکه، شبکه توزیع آب پولاکیس یکی از شبکه‌های مرجع در پژوهش‌های بین‌المللی است. این شبکه با پیکربندی منظم دارای ۳۰ گره، ۵۰ لوله، بدون در نظر گرفتن امکاناتی برای پمپاژ و یک مخزن در ارتفاع ۲۵ متری است. شبکه مرجع پولاکیس با نیازهای گرهی ثابت معرفی شده است، ولی در این پژوهش برای برابری بیشتر با شرایط واقعی، نیازهای گرهی بین ۰/۰۷۶ تا ۰/۴۹ مترمکعب بر ثانیه به گره‌های شبکه اختصاص داده شده است.

۴-۲- سناریوهای نشت

برای ارزیابی عملکرد مدل در نشت‌یابی، سناریوهای مختلفی در شبکه تعریف شد که به دو بخش مکان‌یابی نشت و یافتن اندازه نشت تقسیم می‌شود. جز در دو سناریو که سه نشت همزمان مورد مطالعه قرار گرفته است، در تمامی این سناریوها یک نشت لحاظ شده است. در جدول (۱) سناریوهای ذکر شده قابل مشاهده است.

شکل ۲. شبکه دوم برای نشت‌یابی در سیستم توزیع آب

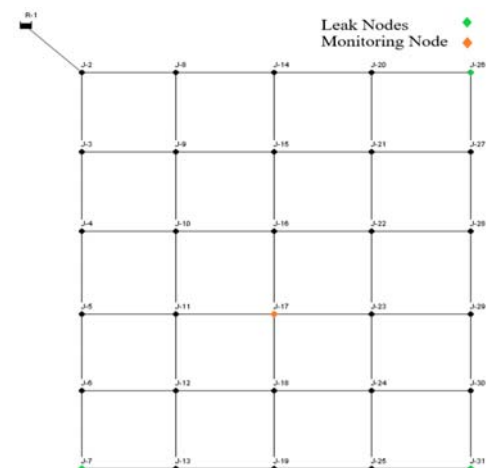


Fig. 2. The second network for locating leaks in water distribution system

۴-۳- فرمول‌بندی مسئله نشت‌یابی

تابع هدف:

مسئله نشت‌یابی به دو زیربخش یافتن محل نشت و یافتن مقدار نشت تقسیم شده است؛ متناظر با هر زیربخش یک تابع هدف تعریف خواهد شد:

۱. تابع هدف مکان‌یابی نشت

تابع هدف تعریف شده برای یافتن محل نشت، عبارت است از کمتر کردن قدر مطلق مجموع تفاضلات فشار گره پایش در حالت نشت واقعی با فشار همان گره در حالت یک مکان فرضی نشت (که توسط الگوریتم بهینه‌یابی به تصادف انتخاب شده است) در ساعات مختلف شبانه‌روز، که به آن مجموع پنالتهای عدم ارضای قیود مساله نیز افزوده می‌شود.

$$\text{Objective function: } \min z = \sum_{t=1}^T (|x_{pi} - x_{si}|)_t \quad (1)$$

x_{pi} : مقدار فشار گره i که توسط فشارسنج (فرضی) گره پایش

(در حالت وجود نشت در محل واقعی) اندازه‌گیری شده است.

x_{si} : مقدار فشار گره i که توسط مدل و با در نظر گرفتن نشت در یک مکان تصادفی محاسبه شده است.

۲. تابع هدف یافتن اندازه نشت

گرچه با حل مساله بهینه‌سازی اول، علاوه بر محل نشت، مقدار تخمینی نشت نیز با توجه به رابطه فشار-نشت یافت می‌شود، این مقدار به دلیل اینکه توان رابطه فشار-نشت ثابت و معین نیست و نیز به این دلیل که مقدار نشت آن گره در زمان تحلیل کمترین جریان شبانه دقیقاً معلوم نیست، می‌تواند دارای خطا باشد. به عبارت دیگر، همان‌گونه که در توضیحات ابتدای بخش ۵، آمده است، از آنجا که در استفاده از رابطه فشار-نشت، مقادیر نشت پایه و فشار پایه به ترتیب برابر کمترین جریان شبانه و فشار متوسط شبکه در زمان تحلیل کمترین جریان شبانه در نظر گرفته شده است، این فرضیات در تخمین میزان نشت گره‌های نشت تقریب وارد می‌کند. همچنین، این سوال کلی نیز می‌تواند مطرح باشد که در صورت معلوم بودن محل نشت به هر طریق ممکن (مثلاً با گزارش‌های محلی)، چگونه می‌توان میزان نشت آن محل را تخمین زد. برای این منظور، می‌توان یک مساله بهینه‌سازی دیگر را با معلوم بودن محل نشت حل نمود که در آن متغیرهای تصمیم، مقادیر نشت در ساعات مختلف در محل‌های نشت هستند و به شکلی تعیین می‌شوند که مقادیر فشار یافت شده توسط مدل در گره پایش با مقادیر واقعی فشار در گره پایش

در رابطه (۵) Δh_k افت هد در لوله k ام و NI تعداد کل حلقه‌ها در شبکه است [17].

متغیرهای تصمیم در سناریوی مکان‌یابی نشت، شامل محل وقوع نشت (شماره گره نشت) و در سناریوی یافتن مقدار نشت، شامل ۲۴ مقدار نشت متناظر با ۲۴ ساعت شبانه‌روز است.

۵- اجرای مدل و تحلیل نتایج

برای نشت‌یابی در هر دو شبکه مورد مطالعه، دو برنامه در نظر گرفته شده که شامل برنامه مکان‌یابی (و تعیین مقدار) نشت و برنامه تنها تعیین مقدار نشت است. برنامه اول (مکان‌یابی نشت) شامل دو مرحله است. در مرحله اول مدل معرف شرایط واقعی نشت ساخته می‌شود. برای این منظور، به تمامی گره‌های شبکه مجموعه‌ای از ضرایب الگوی مصرف داده می‌شود؛ سپس گره‌ای (یا گره‌هایی) به عنوان محل نشت انتخاب می‌شود. دو مقدار نشت پایه (میزان نشت شبکه در ساعت تحلیل کمترین جریان شبانه) و فشار پایه (متوسط فشار گره‌های شبکه در زمان تحلیل کمترین جریان شبانه) تعیین می‌شوند. همچنین مقادیر فشار گره (های) نشت در طول ۲۴ ساعت نیز از مدل هیدرولیک شبکه استخراج و در ادامه با استفاده از رابطه ۶ مقادیر نشت متناظر با هر ساعت از شبانه‌روز محاسبه می‌شود.

$$\frac{Q_t}{Q_0} = \left(\frac{P_t}{P_0}\right)^a \quad (6)$$

که در آن Q_t نشت متناظر با هر ساعت از شبانه‌روز، Q_0 نشت پایه، P_t فشار در ساعت t در طول ۲۴ ساعت، P_0 فشار پایه و a توان فشار که به طور معمول ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود [18]. نشت پایه و فشار پایه در عمل از طریق تحلیل کمترین جریان شبانه شبکه بدست می‌آیند. در ادامه هر یک از نشت‌های بدست آمده را به نیازگرهی ساعت متناظر با آن اضافه و حاصل را بر نیازگرهی پایه گره نشت تقسیم کرده تا ضرایب الگوی مصرف جدید بدست آید. این ضرایب جدید تنها به گره‌های نشت در نرم‌افزار EPANET اعمال می‌شود؛ در حالیکه سایر گره‌ها ضرایب الگوی مصرف قبلی را دارا هستند و در نهایت فشارهای شبانه‌روزی گره پایش یادداشت می‌شوند. در این حالت اثر نشت روی فشار ثبت شده توسط فشارسنج لحاظ شده است و فرض می‌شود این حالت مدل‌سازی معرف شرایط واقعی همراه با نشت

کمترین اختلاف را داشته باشند. بنابراین فرمول‌بندی این مسئله به شرح زیر است:

$$\text{Objective function : Min } z = M \times \sum_{t=1}^{24} (|x_{pi} - x_{si}|)_t + \sum_{k=1}^q \text{Penalty}_k \quad (2)$$

x_{pi} : مقدار فشار گره پایش i که توسط گنج فشار (در شبکه دارای نشت واقعی) اندازه‌گیری شده است.
 x_{si} : مقدار فشار گره پایش i که توسط مدل (با در نظر گرفتن مقادیر تصادفی نشت در گره نشت) محاسبه شده است.

M : ضریب مقیاس برای هم وزن کردن دو ترم تابع هدف
 Penalty_k : خطای عدم ارضای روند صعودی یا نزولی دو به دو نشت‌های ساعات متوالی (متناسب با فشار دو به دو نشت دو ساعت پشت سر هم) و q تعداد روندهای صعودی و نزولی است. به عبارت دیگر، به دلیل نوسانات مصرف در ساعات مختلف، فشار و نشت نیز دارای روند مشخصی در شبانه‌روز خواهند بود. بنابراین مقادیر متغیرهای تصمیم (مقادیر نشت ساعات مختلف) که بطور تصادفی در الگوریتم جستجو تولید می‌شوند نیز باید از روند نوسانات فشار (صعودی یا نزولی بودن) پیروی نمایند.

قیود مسئله:

قیدهای مسئله بهینه‌سازی شامل معادلات زیر است که برای ارضای این قیدها از حل‌گر هیدرولیکی EPANET استفاده شده است.

۱. قید پیوستگی که برای هر گره باید ارضا شود:

$$\sum Q_{in} - Q_{out} = Q_e \quad (3)$$

که Q_{in} و Q_{out} به ترتیب دبی ورودی و خروجی از گره و Q_e میزان برداشت گره است. مقدار Q_e برابر نیاز گرهی و میزان نشت در نظر گرفته در آن گره است:

$$Q_e = Q_j + Q_L \quad (4)$$

۲. قید بقای انرژی در هر حلقه به صورت زیر است:

$$\sum_{k \in \text{Loop } l} \Delta h_k = 0 \quad \forall l \in M \quad (5)$$

است. در مرحله دوم تمام نقاط شبکه دارای همان ضرایب الگوی مصرف اولیه هستند و هیچ نشتی در شبکه اعمال نشده است. در این مرحله الگوریتم جستجوی هارمونی در محیط متلب با لینک شدن به نرم افزار EPANET به دنبال گره‌های صحیح نشت خواهد گشت. تابع هدف تعریف شده برای الگوریتم، قدرمطلق مجموع تفاضلات فشار هر ساعت از گره پایش در مدل با نشت واقعی (که در مرحله اول این بخش حاصل شد) و مدل مرحله دوم (که الگوریتم جستجو در گره‌های تصادفی انتخاب شده آن، نشت قرار می‌دهد) است (رابطه ۱). بدین ترتیب الگوریتم با رویکرد کمتر کردن تابع هدف، شماره گره درست نشت (فرض شده در مرحله اول) را به عنوان پاسخ کشف می‌کند و از رابطه فشار-نشت، نیز مقادیر تخمینی نشت ساعات مختلف قابل محاسبه است.

برنامه دوم، یافتن مجموع مقادیر نشت در طول ۲۴ ساعت است. برای این منظور، ابتدا شبکه معرف شرایط واقعی نشت ساخته می‌شود. در محل نشت، روی مدل، مقادیر ساعتی نشت گره وارد می‌شود و سپس با اجرای مدل، مقادیر فشارهای ساعتی در خلال شبانه‌روز در گره پایش یادداشت می‌شوند. حال، یک مساله بهینه‌سازی فرمول‌بندی و حل می‌شود تا این مقادیر نشت را بیابد. تابع هدف این برنامه، از مجموع قدرمطلق تفاضلات فشار هر ساعت از گره پایش در حالت واقعی، با فشار همان گره در همان ساعت با مقدار نشت تصادفی در گره نشت است که به آن پهنالتهای عدم ارضای قیود مساله نیز اضافه شده است (رابطه ۲). میزان نشت با مقدار فشار رابطه مستقیم دارد و متناظر با آن تغییر می‌کند؛ یعنی اگر فشار افزایش یابد، نشت هم افزایش می‌یابد و بالعکس. بدین منظور زمانی که فشار در یک ساعتی نسبت به ساعت قبل خود افزایش پیدا کند، به دنبال آن نشت همان ساعت هم باید به نسبت ساعت قبل خود افزایش داشته باشد و اگر فشار نسبت به ساعت قبل خود کاهش یابد، نشت هم نسبت به ساعت قبل کاهش خواهد داشت؛ برای نمونه مقادیر فشار از ساعت ۱ تا ۵، در هر ساعت نسبت به ساعت قبل به صورت افزایشی بوده که در نتیجه نشت متناظر هم باید به صورت افزایشی باشد. از ساعت ۶ تا ۱۰، مقدار فشار در هر ساعت نسبت به ساعت قبل خود، کاهشی بوده که در نتیجه

مقادیر نشت هم باید در این بازه زمانی به صورت کاهشی باشد. حال مقادیر فشارهای ساعتی گره نشت معلوم است و با بررسی صعودی یا نزولی بودن مقدار فشار هر ساعت نسبت به ساعت قبل خود، در مجموع ۷ الگو صعودی و نزولی یافت شد که برای هر الگو یک پهنالتهای در تابع هدف تعریف شد. در نتیجه این تعریف پهنالتهای برای لحاظ کردن روند صعودی و نزولی شدن مقدار نشت در ساعات مختلف مطابق با الگوی روزانه تغییرات فشار و همچنین بالا رفتن دقت و سرعت الگوریتم در یافتن مجموع نشت در طول شبانه‌روز است. به منظور نزدیک کردن تقریبی مقیاس هردو بخش تابع هدف، بخش اول در عدد ۱۰^۶ ضرب شد. در آخر، الگوریتم ۲۴ مقدار نشت را به عنوان پاسخ تولید می‌کند که مجموع این نشت‌ها همان میزان نشت مورد نظر در طول ۲۴ ساعت خواهد بود.

نتایج بررسی سناریوهای مطرح شده در جدول (۵) به صورت خلاصه نشان داده شده است. در سناریوهای مکان‌یابی نشت، محدوده جستجوی الگوریتم بین ۱ تا ۶۱ گره در شبکه اول و بین ۱ تا ۳۱ گره در شبکه دوم (به تعداد گره‌های هر شبکه) و در سناریوهای یافتن اندازه نشت، این محدوده بین ۰ تا ۰.۱۰ مترمکعب بر ثانیه (به طور میانگین در حدود ۰.۱۳٪ نیازهای گرهی پایه در شبکه اول) تعریف شده است. همچنین پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی برای تمامی سناریوها در جداول (۲، ۳ و ۴) تعریف شده‌اند. مقادیر پارامترها بر اساس مقادیر توصیه شده در سابقه پژوهش در نظر گرفته شده‌اند [19]. و تعداد تکرارها و اندازه جمعیت متناسب با تعداد متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده‌اند. توضیحات تکمیلی در مورد الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی در مقاله Geem et al. (2001) ارائه شده است [20].

همانطور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود؛ در ابتدا نقطه J-29 که در یکی از سرشاخه‌های شبکه اول قرار دارد، مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر نشت پایه برای این گره ۰.۵٪، ۱.۰٪، ۲.۰٪، ۲.۵٪ و ۳.۰٪ دبی پایه انتخاب شد؛ که تا مقدار ۲.۰٪ دبی پایه گره، برنامه بدون اشتباه قادر به یافتن مکان نشت بود (سناریوهای ۱ تا ۳) که حاکی از منحصر به فرد بودن جواب الگوریتم حتی در

جدول ۱. سناریوهای نشت

Monitoring Node	Total leakage	Leak Node No.	Scenario No.	Scenario type	Network No.	
J-15	5% of Nodal Base Demand	J-29	1	leak Location	First Network	
J-15	10% of Nodal Base Demand	J-29	2			
J-15	20% of Nodal Base Demand	J-29	3			
J-15	25% of Nodal Base Demand	J-29	4			
J-15	30% of Nodal Base Demand	J-29	5			
J-15	10% of Nodal Base Demand	J-34	6			
J-15	10% of Nodal Base Demand	J-19	7			
J-15	10% of Nodal Base Demand	J-29-34-19	8			
J-15	10% of Nodal Base Demand	J-29	9	leak size	Second Network	
J-15	10% of Nodal Base Demand	J-34	10			
J-15	10% of Nodal Base Demand	J-19	11			
J-17	10% of Nodal Base Demand	J-31	12	leak Location		
J-17	10% of Nodal Base Demand	J-26	13			
J-17	10% of Nodal Base Demand	J-26-31-7	14			

Table 1. Leak scenarios

هم‌زمان در نظر گرفته شد که در آن برنامه عملکرد قابل قبولی نداشت. از میان جواب‌ها در ۲۰٪ آن سه گره نشت دقیق، در ۲۰٪ دیگر یک گره نشت دقیق و دو گره دیگر نزدیک به گره‌های نشت و در ۶۰٪ باقیمانده یک گره دقیق، یک گره نزدیک و یک گره دور از گره‌های نشت یافت شد؛ که منحصر به فرد نبودن جواب الگوریتم، تاثیر فاصله گره‌های نشت تا گره پایش، محل گره پایش و کم بودن تعداد تکرارهای برنامه (Maximum number of Iteration) دلیل آن است؛ به عبارت واضح‌تر گره‌هایی در شبکه وجود دارند که با فرض مقدار مشخصی نشت در آن‌ها توسط مدل، همان تاثیری که سه گره اصلی نشت روی مقدار فشار گنج پایش می‌گذارند، را دارند. سه سناریوی بعدی مربوط به یافتن مجموع نشت ۲۴ ساعت در شبکه اول است. در این قسمت نیز همان سه نقطه مطرح شده برای گره نشت انتخاب شدند؛ که برنامه در دو سناریوی ۱۰ و ۱۱ عملکرد خوب و در

توانایی الگوریتم در مکان‌یابی نشت افزایش نمی‌یابد و جواب‌های الگوریتم دیگر منحصر به فرد نیست. برای هر دو سناریوی فوق ۵۰ درصد دیگر جواب‌ها با تابع هدف صفر، جواب‌های نسبتاً دوری است؛ یعنی ۵ مورد از ۱۰ جواب مدل دارای تابع هدف یکسان و برابر صفر بوده ولی محل‌های نشت یافت شده توسط الگوریتم با محل‌های نشت واقعی فاصله خیلی زیادی داشته است؛ که این موضوع عدم معکوس‌پذیری مسئله بهینه‌سازی نشت را در این مورد خاص بیان می‌کند. در ادامه برای سایر سناریوها، میزان نشت پایه مقدار ۱۰٪ دبی پایه گره نشت انتخاب شد. سپس دو گره دیگر از شبکه اول در دو نقطه مختلف واقع در شبکه مورد بررسی قرار گرفت تا توانایی الگوریتم برای یافتن جواب منحصر به فرد مورد سنجش قرار بگیرد؛ که نتایج قابل قبول بود (سناریوهای ۶ و ۷). در سناریوی ۸، هر سه گرهی J-29، J-34 و J-19 به عنوان سه نشت

$PAR = 0.4$	Pitch Adjustment Rate
$FW = 0.02 \times (VarMax - VarMin)$	Bandwidth
$FW_damp = 0.995$	Bandwidth damping rate

Table 4. Harmony search algorithm parameters for scenarios 9 & 10

عملکرد متوسط الگوریتم می تواند به لحاظ موقعیت گره مدنظر (در سرشاخه بودن و تاثیر گذاری کم در جریان هیدرولیکی و گره پایش) و فاصله داشتن از گره پایش (بسته بودن شیر در حدفاصل گره J-5 و J-45 سبب طولانی شدن حرکت جریان و فاصله تا گره پایش) باشد. سناریوهای ۱۲ تا ۱۴ در شبکه دوم صورت گرفت. برنامه در دو سناریویی که برای مکان یابی یک نشت بود، به علت منحصر به فردی جواب (حل شدن مشکل عدم معکوس پذیری مسئله نشت در این سناریو) و تاثیر نوع شبکه (منظم بودن شکل حلقه های شبکه) کاملاً موفق به یافتن مکان نشت شد. سناریوی آخر برای سه نشت همزمان بررسی شد؛ افزایش تعداد محل های نشت سبب نزدیک تر شدن اثر سایر گره ها به گره های واقعی نشت در میزان تغییر فشار گره پایش می شود. همچنین در این شبکه فشارهای گرهی بسیار نزدیک به هم هستند. از طرفی کم بودن تعداد تکرارهای الگوریتم جستجو نیز می تواند جزء عواملی باشد که سبب شدند در این شبکه، برنامه در ۵ بار از ۱۰ بار مکان های نشت را بیابد و در ۵ بار دیگر با وجود صفر شدن تابع هدف، جواب های تولید شده در گره های دورتری از گره های نشت باشد؛ این مساله نشان می دهد مشکل عدم معکوس پذیری مسئله بهینه سازی با وجود محدود کردن نشت متناسب با فشار همچنان وجود دارد.

۶- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از اجرای مدل ترکیبی، نکات زیر در مورد عملکرد الگوریتم نشت یابی را می توان برشمرد:

سناریو ۹ عملکرد متوسط داشت؛ به این صورت که ۵۰٪ جواب ها قابل قبول (نسبت مجموع نشت شبیه سازی شده به مشاهداتی بالاتر از ۹۰٪)، در ۲۰٪ جواب ها نسبت فوق بین ۸۰ تا ۹۰ درصد و برای ۳۰٪ جواب ها این نسبت بین ۷۰ تا ۸۰ درصد است.

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی برای سناریوهای ۱ تا ۷ و ۱۱ تا ۱۲

$MaxIt = 50$	Maximum number of Iteration
$HMS = 50$	Harmony Memory Size
$nNew = 50$	number of new harmonies produced in each step
$HMCR = 0.98$	Harmony Memory Consideration Rate
$PAR = 0.4$	Pitch Adjustment Rate
$FW = 0.02 \times (VarMax - VarMin)$	Bandwidth

Table 2. Harmony search algorithm parameters for scenarios 1 to 7 & 11 to 12

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی برای سناریوی ۸، ۱۳ و ۱۴

$MaxIt = 150$	Maximum number of Iteration
$HMS = 100$	Harmony Memory Size
$nNew = 100$	Number of new harmonies produced in each step
$HMCR = 0.98$	Harmony Memory Consideration Rate
$PAR = 0.4$	Pitch Adjustment Rate
$FW = 0.02 \times (VarMax - VarMin)$	Bandwidth

Table 3. Harmony search algorithm parameters for scenarios 8, 13 & 14

جدول ۴. پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی برای سناریوهای ۹ و ۱۰

$MaxIt = 100$	Maximum number of Iteration
$HMS = 100$	Harmony Memory Size
$nNew = 100$	Number of new harmonies produced in each step
$HMCR = 0.98$	Harmony Memory Consideration Rate

جدول ۵. نتایج سناریوهای نشت

The number of times model finds the true response	Total number of model running	Monitoring Node	Leak Node No.	Scenario No.	Scenario type	Network No.
10 out of 10	10	J-15	J-29	1	Leak location	First Network
10 out of 10	10	J-15	J-29	2		
10 out of 10	10	J-15	J-29	3		
5 out of 10	10	J-15	J-29	4		
5 out of 10	10	J-15	J-29	5		
10 out of 10	10	J-15	J-34	6		
10 out of 10	10	J-15	J-19	7		
2 out of 10	10	J-15	J-29-34-19	8		
5 out of 10	10	J-15	J-29	9	Leak size	
10 out of 10	10	J-15	J-34	10		
9 out of 10	10	J-15	J-19	11		
10 out of 10	10	J-17	J-31	12	Leak location	Second Network
10 out of 10	10	J-17	J-26	13		
5 out of 10	10	J-17	J-26-31-7	14		

Table 5. Results of leak scenarios

نشت‌یابی بشدت تاثیرگذار باشد. بنابراین توسعه روش بهینه‌سازی این پژوهش با احتساب عدم قطعیت‌های مذکور و اعتبارسنجی آن در پژوهشهای آتی پیشنهاد می‌شود.

۷- منابع و مراجع

- [1] Maskit, M. & Ostfeld, A. 2014 Leakage Calibration of Water Distribution Systems. *World Environmental & Water Resources Congress* 2014, <https://doi.org/10.1061/9780784413548.045>.
- [2] Hosseini, KH., Mahdavi, M. M., Behzadian, K., Ardeshtir, A. & Jalilsani, F. 2011 Leakage Control in water Distribution Network by Using Optimal Pressure management: A Case Study. *12th Annual Conference on Water Distribution System Analysis*, [https://doi.org/10.1061/41203\(425\)101](https://doi.org/10.1061/41203(425)101).
- [3] Shekofte, M., Jalili-Ghazizade, M. & Yazdi, J. 2018 Finding Leakage Range in Water Distribution Network District Metered Area (DMA). *2nd Iranian Water and Wastewater Science and Engineering Congress, Isfahan*, <https://civilica.com/doc/856123> (In Persian).
- [4] Escofet, P. C., Blesa, J., Perez, R., Escofet, M. A. C. & Sanz, G. 2015 Assessment of a Leak Localization Algorithm in Water Networks under Demand Uncertainty. *International Federation of Automatic Control*, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.532>.

مدل توسعه یافته در مکان‌یابی یک نشت، در حالتی که نشت پایه برابر ۱۰٪ دبی پایه گره نشت بود، برای نقاط مختلف در هر دو شبکه کاملاً موفق بوده است (البته برای حالت ۵٪ و ۲۰٪ دبی پایه گره نشت که در یک نقطه مورد بررسی بود، نیز نتایج بدین صورت بوده است).

با افزایش مقدار نشت پایه (برای ۲۵٪ دبی پایه به بالا) عملکرد مدل در مکان‌یابی نشت کاهش یافت؛ در واقع موفقیت مدل در مکان‌یابی یک نشت از ۱۰۰٪ به ۵۰٪ رسید. عملکرد مدل در یافتن مکان سه نشت همزمان نسبتاً ضعیف و برابر با ۳۵٪ بود.

مدل در یافتن مجموع نشت ۲۴ ساعت یک گره، عملکرد نسبتاً خوبی را از خود نشان داده است؛ به گونه‌ای که موفقیت مدل در یافتن مقدار نشت ۸۰٪ بود. مدل توسعه داده شده به طور متوسط ۸۹٪ در مکان‌یابی یک نشت، ۳۵٪ در مکان‌یابی سه نشت و ۸۰٪ در یافتن مجموع نشت، قادر به یافتن پاسخ درست بوده است و در مجموع، مدل ۸۰٪ موفقیت در تولید پاسخ درست داشته است.

در انتها لازم است به این نکته اشاره شود که عدم قطعیت‌های موجود در شبکه مانند ضریب زبری و عدم قطعیت‌های نیاز گرهی نیز می‌تواند بر عملکرد الگوریتم‌های

- Sensitivity Matrix of Pipe Flow: Case Study of Water distribution Systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 1061/ 10/(ASCE)WR.1943-0001025/ 5452.
- [15] Blocher, C. Pecci, F. & Stoianov, I. 2020 Localizing Leakage Hotspots in Water Distribution Networks via the Regularization of an Inverse Problem. *Journal of Hydraulic Engineering.*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001721.
- [16] Moasheri, R., Jalili-Ghazizadeh, M. 2020 Locating of Probabilistic Leakage Areas in Water Distribution Networks by a Calibration Method Using the Imperialist Competitive Algorithm. *Water Resour. Manage.*, 34, 35~C49 (2020), <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02388-4>.
- [17] Yazdi, J. 2015 Development of a multi-objective optimization algorithm based on decomposition using genetic algorithm operators for optimal design of water distribution networks. *Iranian Hydraulic Journal*, 10(3): 27-40 (In Persian).
- [28] Sophocleous, S., Savic, D. & Kapelan, Z. 2019 Leak Localization in a Real Water Distribution Network Based on Search-Space Reduction. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001079.
- [19] Yazdi, J., Yoo, DG. & Kim, J. H. 2017 Comparative study of multi-objective evolutionary algorithms for hydraulic rehabilitation of urban drainage networks. *Urban Water journal*, 14(5), pp. 483-492.
- [20] Geem, Z.W., Kim, J.H. & Loganathan, G.V., 2001 A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. *Simulation. SIMULATION*, <https://doi.org/10.1177/003754970107600201>.
- [5] Wachla, D., Przysalka, P. & Moczulski, W. 2015 A Method of Leakage Location in Water Distribution Networks using Artificial Neuro-Fuzzy System. *International Federation of Automatic Control*, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.692>.
- [6] Kim, Y., Lee, S. J., Park, T., Lee, G., Suh, J. C. & Lee, J. M. 2016 Robust leak detection and its localization using interval estimation for water distribution network. *Computers and Chemical Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.04.027>.
- [7] Saqib, N. U., Mysorewala, M. F. & Cheded, L. 2017 A Multiscale Approach to Leak Detection and Localization in Water Pipeline Network. *Water Resour. Manage.*, 10.1007/s11269-017-1709-3.
- [8] Arifin, B. M. S., Li, Z., Shah, S. L., Meyer, G. A. & Colin, A. 2017 A Novel Data-Driven Leak Detection and Localization Algorithm using the Kantorovich Distance. *Computers and Chemical Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.09.022>.
- [9] Berglund, A., Areti, V. S., Brill, D. & Mahinthakumar, G. K. 2017 Successive Linear Approximation Methods for Leak Detection in Water Distribution Systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000784.
- [10] Mazzolani, G., Berardi, L., Laucelli, D., Simone, A., Martino, R., & Giustolisi, O. 2017 Estimating Leakages in Water distribution Networks Based only on Flow Data. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 1061/ 10/(ASCE)WR.1943-0000758/ 5452.
- [11] Wang, X., & Ghidaoui, M. S. 2018 Pipeline Leak Detection Using the Matched-Field processing Method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1061/10/(ASCE)HY.1943-0001476/ 7900.
- [12] Sophocleous, S., Savic, D. & Kapelan, Z. 2019 Leak Localization in a Real Water Distribution Network Based on Search-Space Reduction. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001079.
- [13] Xie, X., Hou, D., Tang, X. & Zhang, H. 2019 Leakage Identification in Water Distribution Networks with Error Tolerance Capability. *Water Resour. Manage.*, <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2179-y>.
- [14] Geng, Z., Hu, X., Han, Y., & Zhong, Y. 2019 A Novel Leakage-Detection Method Based on

Leakage Detection in Water Distribution Systems by Considering the Uncertainty of Node Demands Using Harmony Search Algorithm

Reza Zandi¹, Jafar Yazdi^{*2} & Mohammad Shahsavandi³

1. M.Sc. Student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering - Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering - Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
3. PhD Student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering - Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

^{*}j_yazdi@sbu.ac.ir

Abstract

Water distribution networks are of the most important urban infrastructure for water supply. Given that water loss is currently a global concern, and water demand is increasing; this has made it necessary to manage demand and improve consumption patterns. One of the most important ways to manage consumption is to reduce unaccounted-for water. Leakage is one of the components of unaccounted-for water in the water supply networks. Also, due to population growth and water crisis in a large part of the world, the issue of leakage in urban water supply networks has become very important. Leakage in water distribution networks wastes energy and water resources, increasing damage to infrastructure, and contaminating drinking water. Water leakage in the water distribution systems (WDSs) varies between 5 to 55% of the total water. Therefore, leakage has an important effect on system performance. The importance of leakage can be found in issues such as water scarcity, optimal use of available resources and high costs of water treatment and distribution. In other words, in the discussion of water transmission and use, we are observing obvious and hidden waste, which is important in dry and semi-arid countries like Iran, so this need to minimize the amount of waste so that resources can be used optimally. In recent years, various solutions have been considered to reduce leakage by researchers and managers of the water industry; this includes hardware methods (acoustic procedures, flow measurements, etc.) and software methods (neural network, genetic algorithm, EPANET, WATERGEMS, etc.). In this paper, a software method is developed to facilitate leakage detection and eliminate uncertainty of hardware methods such as human and device errors. In other words, to reduce the cost and time of hardware methods, a simulation-modeling method is developed here based on harmonic search algorithm. For this purpose, EPANET hydraulic model and MATLAB environment have been used. Different scenarios for locating leaks and finding leakage sizes were investigated in two water supply networks. Scenarios include one leak and three simultaneous leaks in different parts of the networks. Also, the variability of nodal demands during the day and night was considered as an uncertainty parameter, and thus the coefficients of the consumption pattern during 24 hours were allocated to the nodes of both networks in EPANET software. After that, the main body of the Harmony Search Algorithm was written in MATLAB environment, and in accordance with each of the location and leakage scenarios, the Harmony Search Algorithm was developed. Algorithm parameters were also adjusted according to the type of scenario, the size of the studied network (number of nodes) and the number of variables to produce acceptable responses. The algorithm in MATLAB environment was linked to EPANET software. The developed model examined 14 different scenarios. The results show that the developed model has been successful in locating one leak, finding the size of the leak, and locating three leaks, respectively. In general, the model has had an acceptable performance in locating and finding the size of leakage during the day and night.

Keywords: Leak detection, Optimization, Harmony search, Water Distribution Network