

**Technical Note**

مقاله ترویجی (یادداشت فنی)

**Performance Evaluation of WaterGEMS  
Software for Leakage Detection of Water  
Distribution System**

**ارزیابی عملکرد نرم‌افزار WaterGEMS در  
نشت‌یابی شبکه‌های توزیع آب**

Elham Darvishi<sup>1\*</sup> and Fatemeh Farhangiyani<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.

2- M.Sc. Student, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.

\* Corresponding author, Email: [e.darvishi@razi.ac.ir](mailto:e.darvishi@razi.ac.ir)

الهام درویشی<sup>۱\*</sup> و فاطمه فرهنگیان<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

\* نویسنده مسئول، ایمیل: [e.darvishi@razi.ac.ir](mailto:e.darvishi@razi.ac.ir)

Received: 24/12/2019

Revised: 18/05/2020

Accepted: 02/06/2020

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۳

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۹/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۳

**Abstract**

**چکیده**

Leakage in water distribution networks will cause waste of water and reduced pressure. Different leak detection methods are used in the networks among which the Meta-search algorithms have received much attention in the recent years. WaterGEMS commercial software uses genetic algorithm for optimal design and calibrate water distribution networks and detect leakage. In this paper, the WaterGEMS V8i performance in leakage detection using Darwin Calibrator tool was investigated in two hypothetical networks (Poulakis and Aniton). In the Poulakis network where only the node's pressure was put into the software as observational data, the location of leakage was determined at or in the vicinity of the exact location. However, in the Aniton network, where the input discharge was also introduced to the program as observational data, the location and the amount of the leakage were calculated more accurately. These results were similar to the leakage resulted in using the Ant colony algorithm. WaterGEMS is therefore evaluated as a good tool for engineers for estimating the location and amount of leakage in water networks.

در شبکه‌های توزیع آب، نشت موجب هدررفت و کاهش فشار می‌شود. روش‌های شناسایی نشت مختلفی در شبکه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله این روش‌ها الگوریتم‌های فراکاوشی هستند که در سال‌های اخیر مورد توجه زیاد محققین قرار گرفته‌اند. در نرم‌افزار تجاری WaterGEMS امکان طراحی بهینه، کالیبراسیون و نشت‌یابی شبکه توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک وجود دارد. در این مقاله با استفاده از ابزار Darwin Calibrator در نرم‌افزار WaterGEMS V8i امکان نشت‌یابی WaterGEMS در دو شبکه فرضی (پولاکیس و انی‌تاون) مورد بررسی قرار گرفت. در شبکه پولاکیس که فشار ثبت‌شده در گره‌ها به‌عنوان داده‌های مشاهده‌ای به نرم‌افزار معرفی شد، محل نشت توسط نرم‌افزار در محل دقیق و یا در مجاورت آن تعیین شده است. اما در شبکه انی‌تاون دبی ورودی نیز به‌عنوان داده‌های مشاهده‌ای به برنامه معرفی شد که محل و مقدار نشت با دقت بالاتری توسط نرم‌افزار محاسبه شد. این نتایج مشابه نشت‌یابی انجام‌شده با الگوریتم کلونی مورچه‌ها است. بنابراین، WaterGEMS ابزاری مناسب برای مهندسين در برآورد اولیه محل و مقدار نشت است.

**Keywords:** Darwin Calibrator, Genetic Algorithm, Leakage Detection, WaterGEMS, Water Distribution System, WaterGEMS.

**واژه‌های کلیدی:** نشت‌یابی، WaterGEMS، شبکه توزیع آب، الگوریتم ژنتیک، Darwin Calibrator.

روش جامعه مورچگان انجام دادند. هم‌چنین نشت براساس رابطه دبی-فشار در مدل محاسبه شده است. طراحی پویا، شبکه‌های با اطمینان بالاتر و هزینه کمتر را تولید می‌کند. Martinez-Bahena et al. (2018) الگوریتم ژنتیک و مدل Epanet را برای بهینه‌سازی یک شبکه توزیع واقعی در مکزیک به کار بردند. تابع هدف آن‌ها حداقل کردن هزینه تغییرات در شبکه شامل لوله‌های جدید، تانک و شیرآلات بوده است. با شبیه‌سازی دوره گسترده شبکه توزیع آب، حداقل هزینه‌ها برای اصلاح شبکه به دست آمد. مروری بر تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که روش‌های فراکوشی قابلیت بالایی در طراحی، نوسازی، نشت‌یابی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب دارند. از بین روش‌های فراکوشی، الگوریتم ژنتیک به‌طور گسترده توسط محققین به کار رفته است. در نرم‌افزار WaterGEMS این الگوریتم برای طراحی بهینه، بهره‌برداری از ایستگاه پمپاژ، کالیبراسیون و نشت‌یابی شبکه توزیع وجود دارد. در این مقاله توانایی نرم‌افزار WaterGEMS در نشت‌یابی شبکه توزیع آب مورد بررسی قرار گرفته است. نشت‌یابی در دو شبکه توزیع انجام شده است که نتایج قابلیت مناسب این نرم‌افزار در نشت‌یابی را نشان می‌دهد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۱-۲- شبکه‌های توزیع

به‌منظور مقایسه نتایج با نتایج مقالات دیگر، دو شبکه فرضی که در سایر پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند به‌منظور محاسبه نشت توسط نرم‌افزار WaterGEMS انتخاب شدند. شبکه ۱ که در شکل ۱ 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. مشخصات ارتفاع گره‌های شبکه و لوله‌ها در شکل ۱ درج شده است.

شبکه ۲ که در شکل ۲ 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 ( $\epsilon$ ) کلیه لوله‌ها ۰/۲۶ میلی‌متر و مصرف گرهی در تمام گره‌ها ۵۰ لیتر بر ثانیه است. قطر، شماره لوله‌ها و گره‌ها در شکل ۲ آورده شده است.

### ۲-۲- نرم‌افزار WaterGEMS

نرم‌افزار تجاری WaterGEMS به‌صورت گسترده توسط مهندسين به‌منظور طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب

نشت‌یابی برای کاهش تلفات آب در شبکه‌های توزیع دارای اهمیت زیادی است. در سال‌های اخیر محققین مختلف از روش‌های فراکوشی برای برآورد محل و مقدار نشت در شبکه‌های توزیع آب استفاده کرده‌اند. Wu et al. (2006) با استفاده از الگوریتم ژنتیک شبکه‌های توزیع آب را کالیبره کردند. آن‌ها بیان داشتند که کالیبره کردن به کمک الگوریتم ژنتیک انعطاف بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد و می‌توان پارامترهای بیشتری را وارد مسئله نمود.

فغفور مغربی و همکاران (۱۳۹۲) مدل‌های شبکه توزیع آب شهری را با استفاده از روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها مورد بررسی و کالیبراسیون قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها روشی مؤثر و انعطاف‌پذیر بوده و دارای سرعت و همگرایی بالایی در رسیدن به جواب‌ها با حداقل خطاها است. نصیریان و فغفور مغربی (۱۳۹۳) با روش کلونی مورچه‌ها و نتایج آزمایشگاهی نشان دادند تعداد گره‌های دارای نشت و مقدار نشت، تأثیر جدی بر روی دقت روش کلونی مورچه‌ها دارند. در طی تحلیل‌های صورت‌گرفته مشخص شد که کمینه شدن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده نمی‌تواند به‌عنوان تنها شاخص، اطمینان از صحت نتایج به‌دست آمده ایجاد کند.

Creaco and Pezzinga (2015) با استفاده از الگوریتم چندهدفه هیبریدی و با هدف کاهش نشت در شبکه توزیع آب، تحت قید حداقل فشار گره‌ها، تعداد و محل نصب شیرهای کنترل و لوله‌های جایگزین را بهینه‌سازی کردند. براساس نتایج آن‌ها این الگوریتم توانایی قابل‌قبولی در بهینه‌سازی اهداف ذکر شده داشته است. Sousa et al. (2016) دو مدل بهینه‌سازی با الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده را مورد مقایسه قرار دادند که شامل شناسایی لوله‌های نیازمند به جایگزینی با حداقل هزینه و مدل بهره‌برداری بهینه از شبکه با تعریف کنترل پمپ و تنظیمات شیرهای فشار شکن هستند. هر دو مدل جواب‌های خوبی را ارائه کردند. Paolo et al. (2017) موقعیت و تنظیمات شیرهای فشار شکن در شبکه توزیع را با هدف کاهش فشار در گره‌ها با روش جستجوی هماهنگ بهینه‌سازی کردند. هدف از حداقل‌سازی فشار در گره‌ها کاهش نشت در شبکه بوده است. روش جستجوی هماهنگ با کاهش زمان محاسبات روشی مفید در مدیریت فشار شبکه بوده است. Shirzad et al. (2017) با هدف طراحی شبکه با اطمینان بالاتر و هزینه کمتر، بهینه‌سازی چندهدفه شبکه توزیع آب را با

وزنی که اهمیت فشار و دبی در تابع هدف را به ترتیب مشخص می‌کند (Bentley, 2005).

همچنین حداکثر تعداد نقاط نشت توسط کاربر تعیین می‌شود. ممکن است تعداد گره‌های نشت یافته شده کمتر از تعداد گره‌های تعیین شده توسط کاربر باشد. در ابزار معرفی شده رابطه دبی و فشار گره نشت مطابق رابطه (۴) برای محاسبه دبی نشت گره به کار می‌رود:

$$Q=KP^n \quad (4)$$

که  $K$ : ضریب نشت،  $P$ : فشار در گره و  $Q$ : دبی نشت گره هستند. مقدار توان  $n$  نیز برابر  $0.5$  است. در الگوریتم ژنتیک ضریب  $K$  به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود و محدوده و اندازه گام توسط کاربر تعیین می‌شود. با قرار دادن ضریب  $K$  محاسباتی و فشار در گره مقدار نشت محاسبه می‌شود. در برنامه واحد فشار متر آب و واحد دبی لیتر بر ثانیه است. بنابراین واحد ضریب  $K$  برابر  $l/s/(m H_2O)^{0.5}$  است.

در این مقاله با سعی و خطا، پارامترهای الگوریتم به این صورت تعیین شد: اندازه جمعیت  $100$ ، احتمال آمیزش  $95$  درصد، احتمال جهش  $1/7$  درصد و حداکثر تکرار برابر  $100$  هزار. همان‌طور که قبلاً گفته شد لازم است برای تعیین محل نشت، داده‌های مشاهداتی شامل فشار و دبی به مدل وارد شوند. به این منظور برای دو شبکه فرضی، در ابتدا دبی نشت به دبی‌های موجود در گره نشت اضافه شده است. بعد از اجرای برنامه و فشار در گره مشاهداتی و یا دبی در لوله ورودی به‌عنوان داده‌های مشاهداتی ثبت می‌شود. دبی‌های نشت از دبی گره‌ها حذف شد و سپس با استفاده از ابزار Darwin Calibrator موقعیت و ضریب نشت گره نشت محاسبه شد. با قراردادن ضریب نشت در رابطه (۴) دبی نشت در گره محاسبه شده است. به‌منظور بررسی و مقایسه توانایی WaterGEMS در یافتن نقاط نشت، مقادیر فشار و دبی در شبکه  $1$  مشابه سناریوهای انجام شده توسط نصیریان و مغربی (۱۳۹۲) و برای شبکه  $2$  مشابه ساقی (۱۳۹۶) در نظر گرفته شده است.

### ۳- نتایج

قبل از بررسی نتایج، ستون‌های جدول‌های  $1$  و  $2$  که مشابه یکدیگر هستند معرفی می‌شوند. ستون  $1$ ، شماره تحلیل انجام شده در شبکه مورد نظر است. ستون‌های  $2$  و  $3$  به ترتیب شماره

مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار دارای قابلیت‌های زیادی از جمله طراحی بهینه شبکه، کالیبراسیون و نشت‌یابی است. قابلیت‌های ذکر شده توسط الگوریتم ژنتیک در WaterGEMS فراهم شده است. کرمی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از ابزار Darwin Scheduler موجود در این نرم‌افزار، بهینه‌سازی مصرف برق در یک شبکه توزیع با  $5$  پمپ را انجام دادند. در این بهینه‌سازی قیده‌های هیدرولیکی شامل حداقل و حداکثر فشار در گره، حداکثر سرعت در لوله و تعداد دفعات خاموش و روشن شدن پمپ‌ها بود که نتیجه آن کاهش مصرف برق تا  $15$  درصد نسبت به حالت بدون اعمال بهینه‌سازی است.

ابزار Darwin Calibrator برای کالیبراسیون و نشت‌یابی شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تعیین موقعیت نشت و مقدار آن لازم است در نقاطی از شبکه فشار مشاهداتی و یا دبی اندازه‌گیری شده لوله در مدل وارد شود. مشابه تمام روش‌های فراکاوشی، این مقادیر در برآورد تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله خروجی‌ها، اختلاف فشار و دبی در حالت‌های مشاهداتی و محاسباتی هستند. حداقل مربعات، حداقل اختلاف مطلق و حداقل حداکثر اختلاف به‌عنوان تابع هدف قابل تعریف است. این توابع به ترتیب در روابط (۱) تا (۳) تعریف شده است:

$$\text{Minimize} \quad \sum_{np=1}^{NH} w_{nh} \left( \frac{Hsim_{nh} - Hobs_{nh}}{Hpnt} \right)^2 + \sum_{nf=1}^{NF} w_{nf} \left( \frac{Fsim_{nf} - Fobs_{nf}}{Fpnt} \right)^2 \quad (1)$$

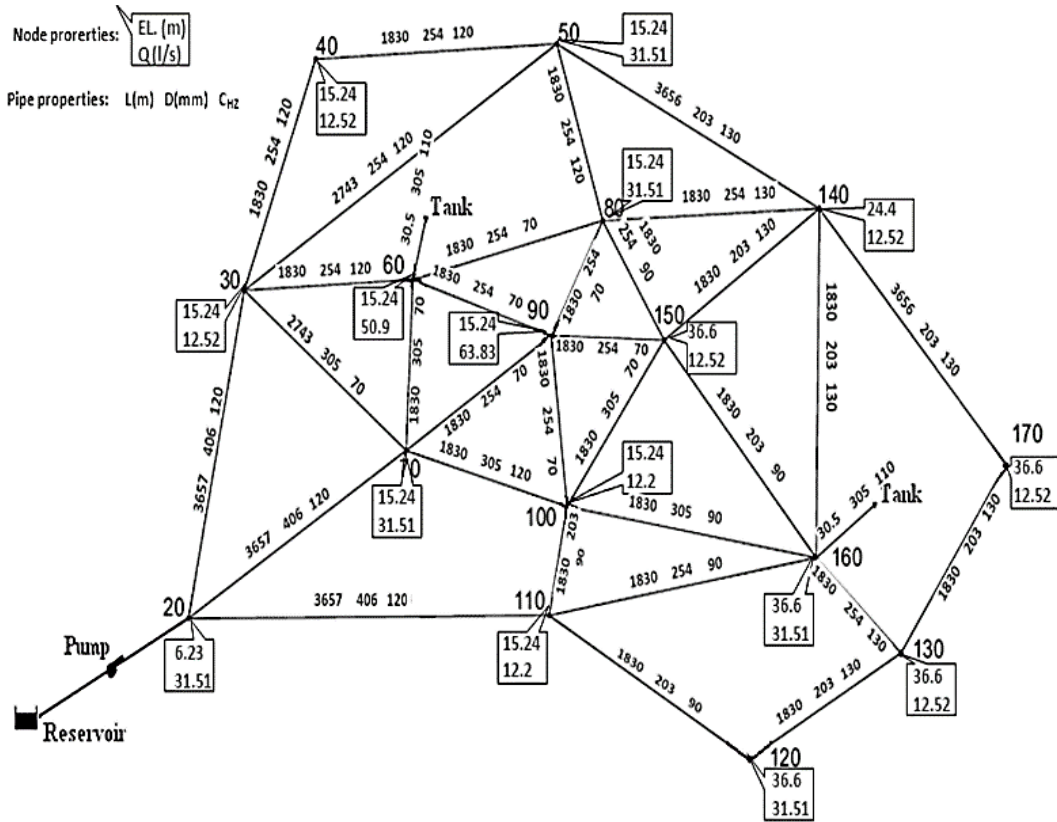
$$\text{Minimize} \quad \sum_{np=1}^{NH} w_{nh} \left| \frac{Hsim_{nh} - Hobs_{nh}}{Hpnt} \right| + \sum_{nf=1}^{NF} w_{nf} \left| \frac{Fsim_{nf} - Fobs_{nf}}{Fpnt} \right| \quad (2)$$

$$\text{Minimize} \quad \max \left\{ \max_{nh=1}^{NH} w_{nh} \left| \frac{Hsim_{nh} - Hobs_{nh}}{Hpnt} \right|, \max_{nf=1}^{NF} w_{nf} \left| \frac{Fsim_{nf} - Fobs_{nf}}{Fpnt} \right| \right\} \quad (3)$$

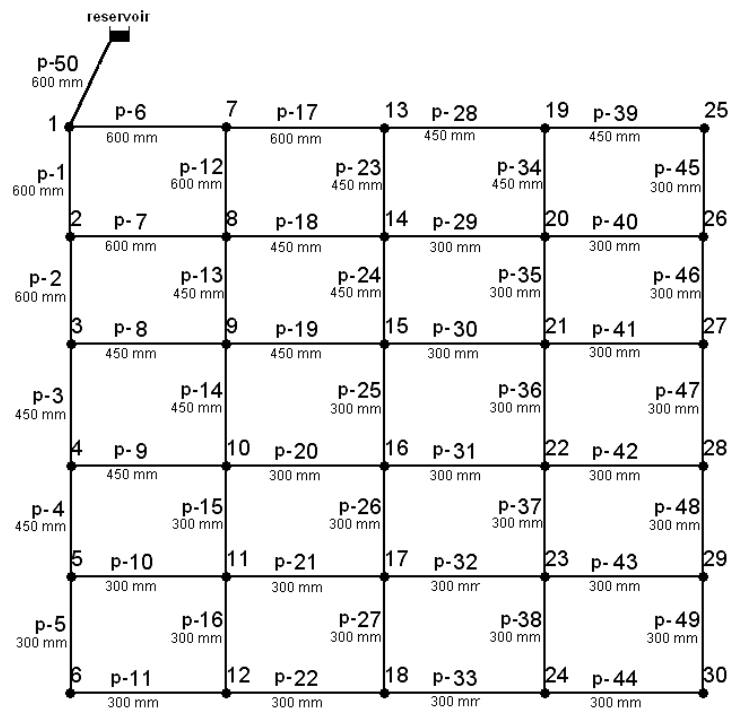
که  $NH$ : تعداد کل گره‌های فشارسنجی،  $NF$ : تعداد اندازه‌گیری‌های دبی در لوله‌ها،  $Hobs_{nh}$ : گرادیان هیدرولیکی مشاهداتی در گره  $nh$ ،  $Hsim_{nh}$ : گرادیان هیدرولیکی شبیه‌سازی شده در گره  $nh$ ،  $Fobs_{nf}$ : دبی مشاهداتی در لوله  $nf$ ،  $Fsim_{nf}$ : دبی شبیه‌سازی شده در لوله  $nf$ ،  $Hpnt$ : گرادیان هیدرولیکی برای بی‌بعد کردن،  $Fpnt$ : دبی برای بی‌بعدسازی و  $w_{nh}$  و  $w_{nf}$ : ضرایب

فشار در آن ها ثبت و به عنوان داده مشاهداتی وارد مدل شده است. در برخی تحلیل ها مانند تحلیل شماره ۱ در شبکه ۱، دبی ورودی به شبکه نیز به عنوان داده مشاهداتی در نظر گرفته شده است.

گره و دبی نشت واقعی است. به عنوان مثال در تحلیل شماره ۱ در شبکه ۱، در گره شماره ۷۰، دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه به عنوان دبی نشت در نظر گرفته شده است. ستون ۴ شماره گره هایی است که



شکل ۱- شبکه ۱ (Walski et al., 1987)



شکل ۲- شبکه ۲ (Poulakis et al., 2003)

نتایج تحلیل نشت در شبکه ۲ در جدول ۲ نشان داده شده است. در ستون ۸، موقعیت نشت محاسبه شده به روش تحلیل فشار گرهی (ساقی، ۱۳۹۶ و فغفورمغربی و همکاران، ۱۳۹۳) ارائه شده است. در تمام تحلیل‌های صورت گرفته در این شبکه تنها فشار گره‌ها به‌عنوان داده‌های مشاهداتی به نرم‌افزار معرفی شده است. در تحلیل شماره ۱ با وجود فشار در دو گره به‌عنوان داده‌های مشاهداتی، نرم‌افزار WaterGEMS موقعیت و مقدار نشت را به‌درستی محاسبه کرده است. در تحلیل شماره ۲ در تعداد گره‌های نشت مختلف معرفی شده به برنامه، گره نشت واقعی، گره شماره ۱۶، به‌عنوان گره نشت با بیشترین دبی نشت به‌دست آمده است.

در این شبکه امکان نشت‌یابی توسط نرم‌افزار در صورت وجود دو نشت هم‌زمان در تحلیل‌های شماره ۳ و ۴ مورد بررسی قرار گرفت. در تحلیل شماره ۳ در حالت ۲ گره نشت تعریف شده در مدل، محل نشت به‌درستی محاسبه شده است؛ اما مقادیر نشت دارای تفاوت با مقادیر واقعی هستند. در این تحلیل در حالت ۳ گره نشت، موقعیت یکی از گره‌ها به‌درستی تعیین شده است؛ اما به‌جای گره ۱۷، گره مجاور آن (گره ۱۱) به‌عنوان موقعیت نشت محاسبه شده است. مشابه این نتایج در تحلیل شماره ۴ نیز مشاهده می‌شود.

در ستون شماره ۵، حداکثر تعداد گره‌های نشت تعیین شده توسط کاربر آمده است. ستون‌های ۶ و ۷ به‌ترتیب گره نشت و دبی نشت محاسبه شده توسط نرم‌افزار هستند. برای بررسی توانایی ابزار معرفی شده، در ستون ۵، تعداد گره نشت متفاوتی به نرم‌افزار وارد شده است. اما در تحلیل شماره ۱ در جدول ۱ در هر سه حالت تنها یک گره نشت توسط نرم‌افزار یافت شده است. در ستون‌های ۸ و ۹ شماره گره نشت و دبی محاسبه شده توسط محققین دیگر آمده است.

نتایج تحلیل نشت در شبکه ۱ در سناریوهای مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است. در تحلیل شماره ۱، نرم‌افزار WaterGEMS برای تعداد مختلف گره نشت، موقعیت و مقدار نشت را به‌درستی برآورد می‌کند. با مقایسه چهار تحلیل انجام شده برای این شبکه می‌توان دریافت که در تحلیل شماره ۳ که دبی ورودی به‌عنوان داده مشاهداتی به برنامه معرفی نشده است دارای خطا در تعیین موقعیت و مقدار نشت است. اما در حالتی که تعداد گره نشت ۲ در برنامه در نظر گرفته شده است، یکی از گره‌های نشت به‌درستی تعیین شده و به‌جای گره دوم گره مجاور آن به‌عنوان گره نشت در برنامه تعیین شده است. در چهار تحلیل انجام شده برای شبکه ۱، نرم‌افزار توانایی قابل‌قبولی در تعیین گره نشت و مقدار نشت دارد.

جدول ۱- نتایج نشت‌یابی در شبکه ۱

نشت محاسبه شده (نصیریان و مغربی، ۱۳۹۳)		نشت محاسبه شده (WaterGEMS)			مشاهدات	نشت واقعی		شماره تحلیل
مقدار (l/s)	شماره گره	مقدار (l/s)	شماره گره	تعداد گره		مقدار (l/s)	شماره گره	
(۹)	(۸)	(۷)	(۶)	(۵)	(۴)	(۳)	(۲)	(۱)
۱۰	۲۰	۳۰/۱	۷۰	۱	۹۰ جریان ورودی	۳۰	۷۰	۱
۱۰	۷۰	۳۰/۱	۷۰	۲				
۱۰	۴۰	۳۰/۱	۷۰	۳				
۳۰	۷۰	۳۰/۱	۷۰	۱	۹۰ ۱۲۰ جریان ورودی	۳۰	۷۰	۲
		۳۰/۱	۷۰	۲				
		۳۰/۱	۷۰	۳				
۲۰	۱۱۰	۲۰/۶	۱۴۰	۲	۹۰ ۱۲۰	۳۰	۷۰	۳
		۲۵/۴	۳۰					
		۲۹/۶	۱۶۰	۳				
		۳۰/۹	۴۰					
		۱/۰	۶۰					
۳۰	۷۰	۳۰/۱	۷۰	۲	۹۰ ۱۲۰	۳۰	۷۰	۴
		۲۰/۱	۱۴۰					
۲۰	۱۴۰	۳۰	۷۰	۳	۱۱۰ جریان ورودی	۲۰	۱۴۰	
		۲۰	۱۴۰					
		۰/۱	۵۰					

جدول ۲- نتایج نشت‌یابی در شبکه ۲

شماره تحلیل	نشت واقعی		شماره گره مشاهدات	نشت محاسبه شده (WaterGEMS)		
	شماره گره	مقدار (l/s)		تعداد گره	شماره گره	مقدار (l/s)
(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)
۱	۲۰	۱۰	۲۰	۱	۲۰	۱۰/۲
				۲	۱۱	۱۰/۲
				۳		۱۰/۲
۲	۱۶	۵۰	۲۰	۱	۱۱	۴۹/۹
				۲	۴	۱۴/۳
					۱۶	۵۰/۲
				۳	۹	۸/۴
					۲۴	۱۸/۲
					۱۶	۴۵/۳
۳	۱۷	۳۰	۲۰، ۳	۲	۶	۴۷/۲
				۳	۱۷	۶۳/۲
					۲۹	۲۳/۳
				۳	۲۰	۴۷/۵
					۱۱	۳۳/۹
۴	۱۵	۱۰	۲۰، ۳	۲	۶	۴۵/۵
				۳	۱۸	۱۴/۹
					۲۰	۴۵/۱
				۳	۱۸	۱۰/۱
					۶	۵/۰

#### ۴- نتیجه‌گیری

نرم‌افزار تجاری WaterGEMS در طراحی شبکه‌های توزیع آب و خطوط انتقال آب به‌طور گسترده توسط مهندسیین مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله قابلیت نشت‌یابی این مدل با استفاده از اطلاعات دو شبکه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در صورت تعریف دبی ورودی در شبکه به‌عنوان داده مشاهداتی، محل و مقدار نشت محاسبه شده توسط مدل از دقت بسیار بالایی برخوردار است. اما چنانچه تنها فشار اندازه‌گیری شده به‌عنوان داده مشاهداتی در مدل وارد شود، تعیین موقعیت نشت در محل دقیق یا گره مجاور صورت می‌گیرد. براساس نتایج به‌دست آمده، ابزار Darwin Calibrator در نرم‌افزار WaterGEMS V8i می‌تواند در عملیات مربوط به نشت‌یابی شبکه توزیع آب به مهندسیین کمک کند که این امر هزینه‌های نشت‌یابی در شبکه را کاهش می‌دهد.

#### ۵- مراجع

ساقی، ح.، (۱۳۹۶)، "ارائه روشی نوین جهت تخمین میزان نشت در شبکه‌های آبرسانی با استفاده از تحلیل فشار گرهی"، نشریه علوم آب و خاک، ۲۱(۱)، ۱۲۷-۱۴۳.

عطاری، م.، فغفور مغربی، م.، و منوریان، ع.، (۱۳۹۶)، "کاربرد روش اندازه‌گیری گرهی فشار در شناسایی نشت"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۷(۲)، ۵۳-۶۲.

کرمی، ج.، مقدم، ع.، فریدحسینی، ع.، ثنائی‌نژاد، ح.، و ضیایی، ع.ن.، (۱۳۹۶)، "بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ با استفاده از ابزار Darwin Scheduler"، نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۲(۱)، ۳-۱۲.

فغفور مغربی، م.، حسن‌زاده، ی.، و یزدانی، س.، (۱۳۹۲)، "کالیبراسیون مدل‌های شبکه توزیع آب شهری با استفاده از روش بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها"، مجله آب و فاضلاب، ۲۴(۱)، ۱۱۱-۱۰۱.

نصیریان، ع.، و فغفور مغربی، م.، (۱۳۹۲)، "ارزیابی عملکرد مدل‌های بهینه‌سازی در کالیبراسیون و نشت‌یابی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از مدل آزمایشگاهی"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۵(۲)، ۳۶-۴۷.

Bentley Systems Incorporated, (2005), *WaterGEMS user's manual*, <http://docs.bentley.com/>.

Creaco, E., and Pezzinga, G., (2015), "Multiobjective optimization of pipe replacements and control valve installations for leakage attenuation in water distribution networks", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(3), 04014059.

Martínez-Bahena, B., Cruz-Chávez, M.A., Ávila-Melgar, E.Y., Cruz-Rosales, M.H., and Rivera-Lopez, R., (2018), "Using a genetic algorithm with a mathematical programming solver to optimize a real water distribution system", *Water*, 10(10), 1-17.

Paola, F. D., Galdiero, E., and Giugni, M., (2017), "Location and setting of valves in water distribution networks using a harmony search approach", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(6), 04017015.

Poulakis, Z., Valougeorgis, D., and Papadimitriou, C., (2003), "Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 18(4), 315-327.

Shirzad, A., Tabesh, M., and Atayikia, B., (2017), "Multiobjective optimization of pressure dependent dynamic design for water distribution networks", *Water Resources Management*, 31(4), 2561-2578.

Sousa, J., Muranho, J., Sá Marques, A., and Gomes, R., (2016), "Optimal management of water distribution networks with simulated annealing: The C-Town problem", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(5), C4015010.

Walski, T.M., Brill, E.D., Gessler, J., Goulter, I.C., Jeppson, R.M., Lansley, K., Lee, H.L., Liebman, J.C., Mays, L., Morgan, D.R., and Ormsbee, L., (1987), "Battle of networks models: Epilogue", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(2), 191-203.

Wu, Z.Y., and Sage, P., (2006), "Water loss detection via genetic algorithm optimizationbased model calibration", *ASCE 8<sup>th</sup> Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis*, Cincinnati, Ohio.