2021, Vol.8, No.2, Pages 81 to 90
Journal of Water and Sustainable Development

سال هشتم، شماره ۲، ۱۴۰۰، صفحات ۸۱ تا ۹۰
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Regular article

نوع مقاله: پژوهشی

Leak Modeling in Water Supply Networks Using WaterGEMS Model and Artificial Neural Network

P. Miserjani[1], N. Sayari[2*], S. Sayari[3]

1,2,3-MSc Student, Assistant Professor and Guest Master, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.

*(Corresponding Author Email: na_sa@uk.ac.ir)

Received: 20-01-2021
Accepted: 16-06-2021

مدل‌سازی نشت در شبکه‌های آبرسانی با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS و شبکه عصبی مصنوعی

پروانه میسرجانی[۱]، نسرین سیاری[۲*]، ساره سیاری[۳]

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، استادیار و استاد مدعو، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: na_sa@uk.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۶

Abstract

Loss of more than 30% of the incoming water to the country's drinking water distribution networks due to leakage from the network, has caused serious concern to the officials of the country's water and sewage companies and finding the location of leakage in distribution networks is one of the important issues and concerns of users and related organizations. Reducing the amount of leakage in water supply networks is one of the main methods of managing the water distribution network in different countries. Currently, several methods have been proposed to detect leaks in water supply networks. In this paper, hydraulic modeling of a real network flow by WaterGEMS hydraulic software and inverse solution of flow equations, having measured values of pressure in a number of network nodes, location prediction and leakage rate in the network Water distribution works were carried out in Mohiabad city located in Kerman province. First, the hydraulic model of the studied network was prepared and calibrated in the hydraulic analysis software and the amount of existing leaks was collected, and then by analyzing the network for different states and number of hypothetical leaks, the pressure values in different network nodes were calculated. In the second stage, using artificial neural networks, after network training, by presenting the measured pressures in some network nodes as input data to the neural network, the position and amount of possible leaks were predicted. Investigation and comparison of the results of hydraulic analysis of the network and artificial neural network showed a very high accuracy of artificial neural networks in estimating the amount and position of leaks.

Keywords: Leak Modeling, Water Loss, Pressure Difference, WaterGEMS Model, Artificial Neural Network.

چکیده

اتلاف بیش از متوسط ۳۰ درصد آب ورودی به شبکه‌های توزیع آب شرب کشور در اثر نشت از شبکه، موجب نگرانی جدی مسئولین شرکت‌های آب و فاضلاب کشور شده و یافتن موقعیت نشت در شبکه‌های توزیع یکی از مسائل و دغدغه‌های مهم کاربران و سازمان‌های مربوطه می‌باشد. کاهش میزان نشت در شبکه‌های آبرسانی یکی از روش‌های اصلی مدیریت شبکه‌ای توزیع آب در کشورهای مختلف به شمار می‌رود. درحال‌حاضر روش‌های متعددی برای شناسایی نشت در شبکه‌های آبرسانی ارائه شده است. در این مقاله، مدل‌سازی هیدرولیک جریان یک شبکه واقعی توسط نرم‌افزار هیدرولیکی WaterGEMS و حل معکوس معادلات جریان، با داشتن مقادیر اندازه‌گیری شده فشار در تعدادی از گره‌های شبکه، پیش‌بینی محل و میزان نشت موجود در شبکه‌های توزیع آب شهر محی‌آباد واقع در استان کرمان انجام شد. ابتدا مدل هیدرولیکی شبکه مورد بررسی در نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی تهیه و کالیبره شده و مقدار نشت‌های موجود برداشت و سپس با تحلیل شبکه برای حالات و مقادیر مختلف وجود نشت‌های فرضی، مقادیر فشار در گره‌های مختلف شبکه محاسبه شد. در مرحله دوم با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، پس از آموزش شبکه، با ارائه فشارهای اندازه‌گیری شده در برخی از گره‌های شبکه به عنوان داده‌های ورودی به شبکه عصبی، موقعیت و مقدار نشت‌های احتمالی موجود، پیش‌بینی شد. بررسی و مقایسه نتایج حاصل از تحلیل هیدرولیکی شبکه و شبکه عصبی مصنوعی نشان‌دهنده دقت بسیار بالای شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین مقدار و موقعیت نشت‌ها بود.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی نشت، هدررفت آب، اختلاف فشار، مدل WaterGEMS، شبکه عصبی مصنوعی.

DOI: 10.22067/jwsd.v8i2.1010

مقدمه

در گذشته مطالعات و بررسی‌های اندکی در خصوص کاهش آب به‌حساب نیامده در شهرهای بزرگ و کلان‌شهرهای کشور صورت گرفته است. درحالی‌که نتایج این تحقیقات در شهرهای کم‌جمعیت و کوچک کارساز نبوده و قابلیت تعمیم به شهرهای کمتر از ده هزار انشعاب (شهرهایی با جمعیت کمتر از ۳۵۰۰۰ نفر) نخواهد داشت. همچنین با سکونت نزدیک به ۳۷ درصد جمعیت شهرنشین کشور در شهرهای کوچک نیاز به مطالعه خاص در این مورد بسیار ضروری به‌نظر می‌رسد (طالبی، ۱۳۹۵). هدف اصلی کاهش نشت و در نتیجه آن کاهش آب به‌حساب نیامده[1] یا آب بدون درآمد[2] در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مقابله با کم‌آبی به دلیل خشکسالی‌ها و محدودیت منابع آب می‌باشد. اما هدف مهم دیگر مربوط به جنبه‌های اقتصادی آن می‌باشد، به‌طوری‌که با کاهش میزان آب‌های به‌حساب نیامده، هزینه‌های ناشی از مصرف برق، ذخیره‌سازی، تصفیه و پمپاژ کاهش یافته و در عوض به‌دلیل پرداخت آب‌بها، درآمدی برای شرکت‌های آب و فاضلاب به همراه خواهد داشت. همچنین اگر بتوان با کاهش آب‌های به‌حساب نیامده به تقاضاهای جدید مشترکین پاسخ داد، در هزینه مربوط به توسعه منابع آب، برای نمونه ساخت سد و مخزن جدید، ساخت و تجهیز تصفیه‌خانه‌های جدید و دیگر موارد صرفه‌جویی زیادی خواهد شد (ایدی و قاضی زاده ۱۳۸۸).

به‌طورکلی عامل اصلی انتقال آب در شبکه‌ها، اختلاف هد فشاری بین دو نقطه است. اما فشار بیشتر از حد استاندارد در نقاط مختلف شبکه باعث نشت آب می‌شود. بسیاری از شبکه‌های توزیع آب در معرض بحران کمبود منابع آبی، محدودیت‌های اقتصادی جهت بهره‌برداری بهینه و کهنگی و فرسودگی اجزای خود قرار داشته و فرسودگی آنها باعث ایجاد شکست مکانیکی و هیدرولیکی در اجزای شبکه و در نتیجه افزایش نشت می‌شود. لذا، مدیریت مصرف در شبکه‌های توزیع آب شهری، از مهمترین راهکارهای مبارزه با تلفات آب و کاهش هدر رفت این سرمایه ملی است. انتخاب صحیح محل احداث مخازن ذخیره، اجرای طرح ناحیه‌بندی فشار، کنترل پمپاژ، کنترل سطح آب در مخازن ذخیره، احداث حوضچه‌های تعدیل فشار و استفاده از شیرهای کنترل جریان و فشار، از جمله ابزارهای مناسب جهت مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب است (Jing و Zhi-Hong، ۲۰۱۲). به‌منظور بررسی پارامترهای مؤثر در ایجاد نشت، شناسایی محل‌های احتمالی نشت و نیز مقدار نشت در شبکه‌های توزیع آب، تحقیقات متعددی توسط محققین مختلف صورت گرفته است. (Soltani Asl و Maghrebi، ۲۰۰۸) بااستفاده‌از نرم‌افزار EPANET و با در نظر گرفتن نشت در گره‌ها نشان دادند با مدیریت فشار می‌توان مقدار نشت را حدود ۳۶ درصد کاهش داد. روشی دیگر برمبنای تشخیص هشدار زودهنگام و کنترل نشت خط لوله توسط Nicolinie و همکاران (۲۰۱۰) ارائه شد. این روش شامل کالیبراسیون و مدیریت مطلوب نشت بود. نتایج آنها نشان داد با انجام کالیبراسیون میزان خطاها به ۳/۷ متر برای فشارها و ۰/۲ لیتر برثانیه برای دبی جریان محدود شد و دراین روش استفاده از دریچه‌های کاهش فشار برای مدیریت نشت پیشنهاد شد. Roy (۲۰۱۷) برای تشخیص نشت در شبکه‌های آبرسانی از مدل شبکه عصبی ترکیبی جهت بررسی نوسانات فشار استفاده نمود. روش پیشنهادی یک رویکرد نوآورانه برای تشخیص نشت در خطوط لوله های آبرسانی بود و برای به‌دست آوردن موقعیت دقیق یک نقطه نشت، از الگوریتم مکان‌یابی استفاده شد. نتایج او نشان دهنده دقت بالا وتوانایی تشخیص دقیق نشت در خطوط لوله بود.

Jafari و همکاران (۲۰۱۸) مسئله مدیریت بهینه فشار در شبکه‌های توزیع آب را با هدف حداقل کردن نشت بررسی و از مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی مبتنی بر یکی از انواع الگوریتم‌های فراکاوشی تحت عنوان الگوریتم فرهنگی (CA) بررسی کردند. آن‌ها در این مدل الگوریتم بهینه‌سازی CA در محیط Matlab را با شبیه‌ساز هیدرولیکی مدل Epanet تلفیق کردند. نتایج آنها نشان داد، با به کاربردن روش ارائه شده برای جانمایی و تنظیم بهینه شیرهای فشارشکن، ضمن رعایت قیود مسئله، میزان نشت متوسط شبکه در سه شرایط تقاضای آبی حداکثر، متوسط و حداقل به میزان ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت.

AhmadFouad و همکاران (۲۰۱۹) به‌منظور تشخیص نشت در شبکه توزیع آب از سنسور یا حسگرهای بی‌سیم استفاده کردند. سنسورهای مبتنی بر زمان واقعی هرگونه بروز را اطلاع می‌دهند و الگوریتم قبل از تجسم و اطلاع‌رسانی، نشتی را پیش‌بینی می‌کند. در این بررسی روش تشخیص نشت مبتنی بر زمان واقعی و فناوری شبکه آب بی‌سیم است. سنسورها مجهز به اندازه‌گیری جریان، نمونه‌برداری صدای گذرا و سوابق فشار هستند. لازم به ذکر است، مدل‌سازی هیدرولیک سنسورهای بی‌سیم راه حل در دسترس برای تشخیص نشت هستند. سنسورهای نظارت بر زمان به اپراتور آب کمک می‌کنند تا وضعیت شبکه آب خود را کنترل کند افزون به سنسورها و یکپارچه‌سازی بین آنها با دیگری امکان نظارت مستمر را فراهم کرده و می‌توان نشت را قبل از وقوع پیش‌بینی نمود.

کنترل هوشمند فشار، روشی مناسب برای کنترل نشت و کاهش صدمات ناشی از فشارهای زیاد در شبکه است. نتایج کنترل هوشمند فشار پس از مدل‌سازی و تلفیق روش اندازه‌گیری جریان حداقل شبانه و نصب شیر فشارشکن در شیر ورودی شبکه، همچنین تحلیل هیدرولیکی، نشان می‌دهد، می‌توان با استفاده از روش مدیریت فشار، ضمن کاهش نشت شبانه به حدود ۳۵ درصد،

توزیع فشار را نیز در شبکه یکنواخت‌تر نمود (سلطانی اصل، ۱۳۸۸). فاضل ولی‌پور و فغفور مغربی (۱۳۸۸)، مکان نشت و تعیین مقدار آن، براساس روشی بر پایه بهینه‌سازی از طریق کالیبراسیون مدل هیدرولیکی فشارهای گره‌ای شبکه و سیستم توزیع آب شهری را به کمک نرم‌افزار WaterGEMS بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد، روش در شناسایی گره‌های دارای نشت و مقدار نشت در زمان حداقل جریان شبانه کارآمد است. کلیایی و محمدولی سامانی (۱۳۹۰) مطالعاتی جهت پیش‌بینی محل نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی انجام دادند. آنها به‌منظور پیش‌بینی محل و میزان نشت در شبکه‌های توزیع آب، با داشتن فشار اندازه‌گیری شده در تعدادی از گره‌های شبکه، روشی مبتنی بر مدل‌سازی هیدرولیکی و حل معکوس معادلات جریان ارائه نمودند. مغربی و عطاری (۱۳۹۲) به انجام فشارسنجی در حالت وجود و عدم وجود نشت در شبکه در حالت وجود دو نشت هم‌زمان، موقعیت نشت‌ها را در شبکه آبرسانی تعیین کردند. عطاری و فغفورمغربی (۱۳۹۷) یک ایده جدید برای تعیین موقعیت و مقدار نشت‌های موجود در شبکه‌های توزیع آب ارائه کردند. آنها با اعمال نشت فرضی در گره‌های مشخصی از شبکه، تولید داده‌های آموزشی و اعمال آن به شبکه عصبی، مقدار و موقعیت نشت‌های موجود گرهی را با دقت مناسبی تعیین کردند.

آزادفر و همکاران (۱۳۹۸) مطالعه‌ای جهت معرفی جدیدترین الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه NSGA-II به عنوان ابزار بهینه‌سازی انجام دادند. آن‌ها جهت حل مدل‌های بهینه‌سازی، یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار Matlab نوشته و از نرم‌افزار Epanet برای شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب استفاده کردند. نتایج نشان داد، نصب و تنظیم شیرآلات فشارشکن مطابق با موقعیت‌ها و تنظیمات بهینه خروجی مدل‌های پیشنهادی بهبود قابل توجهی در اهداف مورد نظر به وجود خواهد آورد.

شیرزاد و همکاران (۱۳۹۹) پس از تهیه مدل هیدرولیکی کالیبره شده برای شبکه توزیع آب شهر اشنویه واقع در استان آذربایجان غربی، قابلیت اطمینان شبکه مذکور را ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد مقدار متوسط شاخص قابلیت اطمینان شبکه توزیع آب شهر اشنویه در طول شبانه‌روز برابر ۳۸/۳ بوده و این به معنی وضعیت بهره‌برداری پر تنش می‌باشد. بررسی دلایل پایین بودن قابلیت اطمینان آنها منجر به شناسایی نقاط ضعف و نارسایی این شبکه شد که از جمله این نقاط ضعف می‌توان به قطر نامناسب برخی لوله‌ها، ضعف و نارسایی در اجرای برنامه مدیریت فشار، وضعیت نامناسب بخش حلقوی شبکه و مقدار بالای نشت از شبکه (حدود ۵۲ لیتر در ثانیه) اشاره نمود.

شیرزاد و همکاران (۱۳۹۹) پس از تهیه مدل هیدرولیکی کالیبره شده برای شبکه توزیع آب شهر اشنویه واقع در استان آذربایجان غربی، قابلیت اطمینان شبکه گفته شده را ارزیابی کردند. در این پژوهش پس از تهیه مدل هیدرولیکی کالیبره شده برای شبکه توزیع آب شهر اشنویه واقع در استان آذربایجان غربی، اقدام به ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه مذکور شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده مقدار متوسط شاخص قابلیت اطمینان شبکه توزیع آب شهر اشنویه در طول شبانه‌روز برابر با ۳۸/۳ بود که به معنی وضعیت بهره‌برداری پرتنش است. آنها با بررسی دلایل پایین بودن قابلیت اطمینان به شناسایی نقاط ضعف و نارسایی این شبکه پرداختند که از جمله آنها می‌توان به قطر نامناسب برخی لوله‌ها، ضعف و نارسایی در اجرای برنامه مدیریت فشار، وضعیت نامناسب بخش حلقوی شبکه و مقدار بالای نشت از شبکه (حدود ۵۲ لیتر در ثانیه) اشاره نمود. نتایج پژوهش آنها نشان داد که با ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع آب میتوان نقاط ضعف موجود را شناسایی و نسبت به ارتقاء سطح سرویس‌دهی آنها و افزایش رضایت‌مندی مشترکین اقدام نمود.

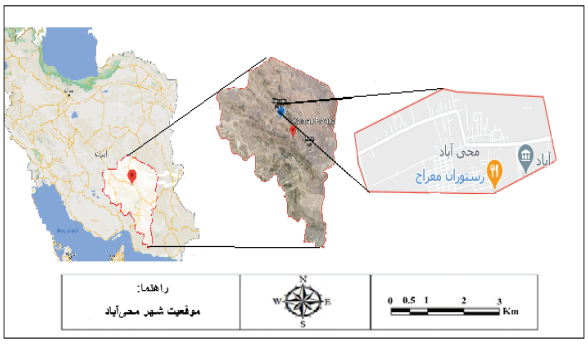
مرور تحقیقات انجام شده، نشانگر لزوم تداوم مطالعه در زمینه بررسی پدیده نشت در شبکه‌های توزیع آب است. لذا در این پژوهش، ایده‌ای جدید به‌منظور تعیین موقعیت و مقدار نشت‌های موجود در شبکه‌های توزیع آب شهری محی‌آباد واقع در استان کرمان با استفاده از مدل WaterGEMS و شبکه عصبی مصنوعی معرفی می‌شود. با تولید داده‌های آموزشی و اعمال آن به شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه قادر خواهد بود، با دریافت فشار، موقعیت و مقدار دقیق نشت گرهی را تعیین کند. همچنین با مدل نمودن شبکه آب و کالیبره نمودن آن، مقدار نشت هر کدام از گره‌های شبکه توزیع آب بااستفاده‌از مدل تحلیل هیدرولیکی WaterGEMS برآورد و در نهایت نتایج حاصل، با استفاده از شاخص‌های آماری R^2 و RMSE با یکدیگر مقایسه شدند.

مواد و روش‌ها

•منطقه مورد مطالعه

شبکه مورد بررسی در این پژوهش قسمتی از شهر محی‌آباد است که موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. محی آباد در فاصله ۱۸ کیلومتری جنوب شهرستان کرمان در مسیر بزرگراه هفت باغ در میان شهرهای ماهان و جوپار قرار دارد و در ارتفاع بالاتری نسبت به شهر کرمان است. این شهر از ادغام سه روستای محی‌آباد، کوثرخیز و حسین آباد تشکیل شده است. این شهر دارای جمعیت حدود چهارهزار نفر و اقلیم معتدل در فصول گرم از ویژگی‌های آب و هوایی محی‌آباد است که باعث تمرکز اغلب فعالیت‌های تفریحی و توریستی در فصول گرم سال شده است.

همانگونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، این شبکه دارای ۱۱۵ گره و ۱۱۶ لوله و یک مخزن که به‌صورت نقطه قرمز نمایش داده شده است. طول کل شبکه مورد بررسی برابر ۱۵ کیلومتر و اختلاف ارتفاع بالاترین و پایین‌ترین نقطه شبکه ۱۳۵ متر است. ابتدا شبکه در نرم‌افزار WaterGEMS مدل شده و مشخصات شبکه از جمله اطلاعات رقومی گره‌ها و مخزن، جنس و طول لوله‌ها (جدول ۱) به‌طور کامل به نرم‌افزار داده شد. سپس با داشتن مقادیر فشارهای واقعی تعدادی از گره‌ها، کالیبراسیون شبکه انجام می‌گیرد تا شبکه طراحی شده به واقعیت نزدیک‌تر شود.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (استان کرمان، شهر محی آباد)

شکل ۲- مدل اسکلت‌بندی شده شبکه توزیع آب شهر محی آباد

جدول ۱- جنس و طول لوله‌های موجود در شبکه

جنس لوله	طول لوله (کیلومتر)
آزبست	۷/۳۴
پلی اتیلن	۴/۸۵
چدن	۲/۸۱

• اطلاعات مربوط به مصرف نرمال

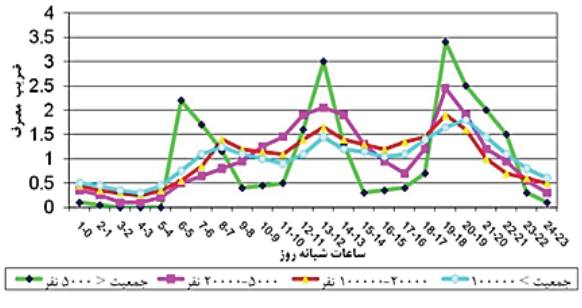
در یک شبکه توزیع آب با توجه به نیاز مصرف آب ساکنین در هر ساعت از شبانه‌روز، یک مصرف ویژه وجود خواهد داشت. جهت انجام آزمایشات مربوط به نشت‌یابی لازم است تا مصرف نرمال ساکنین شهر در ساعت خاصی که قرار است آزمایش انجام گیرد، به‌دست آورده شود.

برای دستیابی به مصارف نرمال شبکه در یک ساعت به خصوص لازم است، نوسانات ساعتی مصرف را در مصرف متوسط روزانه لحاظ نمود. برای این منظور می‌توان بیان کرد مصرف متعارف مردم در هر ساعت به‌صورت ضریبی از مصرف متوسط روزانه می‌باشد. به عبارتی مصرف نرمال در ساعت h با استفاده از رابطه (۱) به‌دست می‌آید:

$$Q^{h}_{normal} = \alpha Q^{d}_{m} \quad (۱)$$

که در آن Q^{d}_{m} ضریب مصرف نرمال نامیده می‌شود، α متوسط مصرف روزانه شهر نامیده می‌شود.

تعیین ضریب α مهمترین بخش از محاسبه مصارف نرمال در شبکه می‌باشد تنها روش به دست‌آوردن این ضریب، تجزیه و تحلیل آماری مصارف ساعتی ساکنین یک شهر است. یک راه به‌دست آوردن ضریب مصرف نرمال α، استفاده از شکل (۳) که شماتیک شدت نوسانات ساعتی مصرف را نشان می‌دهد، می‌باشد. با توجه به جمعیت شهر تعیین و سپس درصد مصرف در ساعت موردنظر از روی نمودار به‌دست می‌آید.



شکل ۳- نمونه‌ای از نوسانات ساعتی مصرف (ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی، نشریه ۳۸۰-الف).

• اندازه‌گیری‌های میدانی و کالیبراسیون

پس از وارد کردن مشخصات کامل و مورد نیاز شبکه و ساخت مدل شبکه توزیع، مدل باید با استفاده از اطلاعات میدانی، بازبینی شود. این فرآیند کالیبراسیون شبکه است و اولین گام برای کالیبراسیون، جمع‌آوری اطلاعات میدانی می‌باشد. مهمترین اطلاعات جمع‌آوری شده میدانی معمولا اندازه‌گیری‌های فشار و جریان می‌باشند.

کالیبراسیون فرآیند مقایسه نتایج مدل با نتایج میدانی برداشت شده و در صورت نیاز تنظیم پارامترهای شبکه تا رسیدگی به هماهنگی مناسب بین نتایج مدل با نتایج میدانی در بازه گسترده‌ای از شرایط مختلف عملکردی سیستم می‌باشد (Ormsbee، ۱۹۸۹). نرم‌افزار WaterGEMS از جمله قوی‌ترین نرم‌افزارهای تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب می‌باشد، علاوه‌بر تحلیل هیدرولیکی توانایی انجام فرآیند کالیبراسیون با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک را دارد. الگوریتم ژنتیک یک روش آماری برای بهینه‌یابی و جستجو می‌باشد

که ایده اولیه آن از نظریه تکامل الهام گرفته شده و در بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک، در هر نسل مقادیر متغیرهای تصمیم مسأله تنظیم و اصلاح می‌شوند (Tabesh و همکاران، ۲۰۱۱). یکی از روش‌های نشت‌یابی در شبکه توزیع آب، استفاده از کالیبراسیون فشارهای گره‌ای با برداشت فشار در چند نقطه شبکه است. بااستفاده‌از نرم‌افزار WaterGEMS علاوه‌بر کالیبراسیون شبکه، مقادیر و موقعیت نشت را در شبکه توزیع آب تخمین می‌زنند (مغربی و همکاران، ۱۳۹۳).

گره‌های آزمون گره‌هایی هستند که اندازه‌گیری فشار در آنها امکان‌پذیر است. این گره‌ها در نتیجه بررسی نقشه‌های موجود و بازدید محلی، شناسایی می‌شوند. بدیهی است هرچه تعداد گره‌های آزمون در یک شبکه بیشتر باشد، مطالعات نشت‌یابی صورت گرفته در این شبکه دقت عمل و قابلیت اطمینان بیشتری خواهند داشت. در این تحقیق ۱۰ گره به‌عنوان گره آزمون بررسی شد. فشارهای اندازه‌گیری شده در گره‌های آزمون شبکه در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- فشار در گره‌های آزمون شبکه در ساعت آزمون (۴ بامداد)

شماره گره	فشار (مترآب)
۶	۴۳/۸۵
۱۸	۳۸/۷۵
۴۶	۲۱/۴۱
۵۳	۴۰/۷۹
۶۲	۸۱/۵۸
۶۹	۴۸/۹۵
۸۳	۲۰/۳۹
۸۷	۲۰/۳۹
۱۰۶	۳۲/۶۳
۱۱۰	۴۰/۷۹

• ساختار مدل‌سازی نشت در مدل هیدرولیکی

با افزایش مقدار نشت، فشار به‌صورت غیر خطی کاهش می‌یابد (بی‌نام، ۱۳۸۹). برای پیش‌بینی تغییرات نشت با کنترل فشار، نیاز به رابطه‌ای است که نشت در هر نقطه از شبکه را به‌صورت تابعی از فشار در آن نقطه نمایش دهد. برای نشت آزاد (تخلیه در هوا)، می‌توان از معادله تئوری دبی خروجی از روزنه، با فرض سطح مقطع ثابت به‌صورت رابطه (۲) استفاده کرد.

$$Q=KP^{0.5} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، Q دبی نشت از روزنه موجود بر روی لوله، P فشار در محل نشت و K ضریب ثابتی است که بستگی به شکل و سطح مقطع روزنه دارد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در این رابطه میزان نشت متناسب با جذر فشار در محل وقوع نشت در نظر گرفته شده است. برخی از تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند دبی نشت به مقدار قابل توجهی از آنچه دبی روزنه پیشنهاد می‌کند، بیشتر است (تائبی، ۱۳۷۸). بنابراین به‌عنوان یک رابطه کلی برای تخمین نشت از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$Q=CP^{n} \qquad (۳)$$

ضریب C بستگی به ویژگی‌های خاص هر روزنه دارد. در منابع مختلف و برای کشورهای مختلف باتوجه‌به وضعیت شبکه توزیع آنها مقادیر مختلفی برای توان n پیشنهاد شده است.

روش‌های مختلفی برای تخصیص نشت روزنه‌های فرضی در نظر گرفته شده برروی لوله به گره‌های موجود در شبکه و محاسبه C وجود دارد، باتوجه‌به امکان استفاده از خاصیت آبفشان‌های نرم‌افزار WaterGEMS، در این مقاله از این امکان استفاده شده است. آبفشان‌ها، تأسیسات متصل به انشعابات هستند که جریان عبوری از یک نازل یا روزنه، که به اتمسفر تخلیه می‌شود را مدل می‌کنند. دبی عبوری از یک آبفشان به‌صورت تابعی از فشار موجود، درگره تغییر می‌کند. برای مدل‌سازی آبفشان‌ها در WaterGEMS از رابطه (۴) استفاده می‌شود.

$$Q_i=C_i\ P_i^{N} \qquad (۴)$$

که Q_i دبی جریان آبفشان iأم، P_i فشار در محل پخش‌کننده i أم، C_i ضریب شدت جریان و N توان فشار است (اسدیانی یکتا، ۱۳۸۳).

• شبکه عصبی مصنوعی

شبکه های عصبی سیستم‌های دینامیکی هستندکه با پردازش داده‌های تجربی، دانش و یا قانون نهفته در داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند. به همین خاطر این سیستم‌ها را هوشمند می‌نامند، چرا که براساس انجام محاسبات برروی داده‌های عددی یا نمونه‌ها، قوانین کلی را فرا می‌گیرند. تاآنجایی‌که این سیستم‌های مبتنی بر هوش محاسباتی سعی در مدل‌سازی ساختار نرو-سیناپتیکی مغز بشر دارند. شبکه‌های عصبی چند بخش مهم دارند که اساس آن‌ها را تشکیل می‌دهد. هریک از این بخش‌ها با یک دلیل منطقی و یک وظیفه مشخص استفاده می‌شوند و مهمترین آنها عبارتند از:

۱-ورودی p: پارامترهای ورودی یک مقدار اولیه خام است که بدون هیچ تغییری به نرون وارد می‌شود اما مستقیماً وارد عمل نمی‌شود.

۲-تابع انتقال f[۳]: این قسمت که در برخی مراجع با عنوان تابع فعال‌سازی[۴] نیز نام‌گذاری شده است، عمل پردازش برروی داده‌های ورودی را انجام می‌دهد. توابع فعال‌سازی از طریق طراح شبکه تعیین می‌شوند. بسته به دلخواه طراح، توابع فعال سازی در لایه‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد.

۳-وزن w[۵]: یک پارامتر اسکالر است که در ورودی p ضرب می‌شود؛

به‌این معنی که بااستفاده‌از وزن، تأثیر ورودی در خروجی نرون مشخص می‌شود. هر ورودی در ضریب وزنی مربوط به خودش ضرب می‌شود.

۴-بایاس b[۶]: پارامتری است که مرز تشخیص را جابه‌جا می‌کند و با ضریب واحد وارد می‌شود؛ در واقع آستانه تحمل نرون توسط این پارامتر تعیین می‌شود و با تغییر آن، تغییر خواهد کرد.

۵-خروجی a_n: پس از انجام عملیات پردازش برروی داده‌های ورودی، در نهایت داده خروجی توسط نرون ایجاد خواهد شد.

ارتباط بین خروجی و ورودی‌های نرون را می‌توان به‌صورت رابطه (۵) نشان داد:

$$a_n=f(wp+b) \qquad (۵)$$

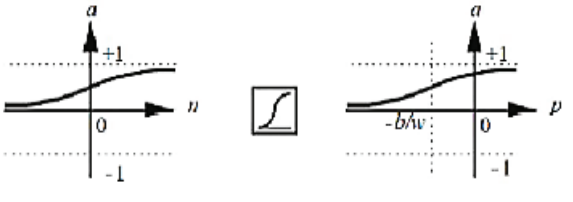
نحوه آرایش و در واقع کنار هم قرار گرفتن انواع نرون‌ها را معماری[۷] (ساختار) شبکه می‌نامند. با ایجاد معماری‌های متفاوت می‌توان شبکه‌های ساده و یا پیچیده‌تر طراحی نمود. در واقع قابلیت شبکه بر حسب نوع معماری آن تغییر می‌کند و دقت محاسبات صورت گرفته در آن کمتر یا بیشتر می‌شود.

تابع محرک لگاریتمی زیگموئید:

این تابع به‌صورت رابطه (۶) بیان می‌شود:

$$a = f_s(n) = \frac{1}{1+e^{-cn}} \qquad c>0 \qquad (۶)$$

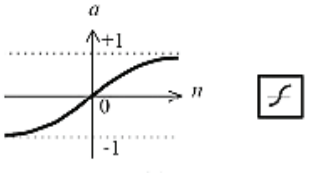
شکل این تابع به ازاء C=1 در شکل (۴) رسم شده است. مقدار C وسعت ناحیه خطی بودن تابع را تعیین می‌کند. این تابع، در شبکه‌های عصبی استفاده زیادی دارد که به‌عنوان نمونه می‌توان به شبکه‌های عصبی چند لایه با قانون یادگیری پس انتشار خطا اشاره کرد.



a=logsig(n) a=logsig(wp+b)

شکل ۴- تابع محرک لگاریتمی زیگموئید

تابع محرک تانژانت زیگموئید:



a=tansig(n)

شکل ۵- تابع محرک تانژانت زیگموئید

• تهیه داده‌های مورد نیاز جهت آموزش شبکه عصبی مصنوعی

پس از ایجاد مدل، درحالتی‌که هیچ نشتی در گره‌ها وجود ندارد، شبکه تحلیل هیدرولیکی شده و کلیه مقادیر فشار در گره‌های شبکه اندازه‌گیری شد. سپس به‌منظور تحلیل معکوس شبکه، در چندین حالت مختلف بااستفاده‌از خاصیت آبفشان‌های WaterGEMS نشت در گره‌های مختلف شبیه‌سازی شد. جهت تهیه داده‌های مورد نیاز برای آموزش شبکه عصبی باید رفتار شبکه در صدها یا هزاران حالت مختلف با وجود مقادیر متفاوت نشت در هر کدام از گره‌ها و وجود نشت در بیش از یک گره به‌صورت هم‌زمان، مدل شود و مقادیر فشار در هرکدام از حالت‌های مختلف این امر به‌دست آورده شود.

پس از چندین بار تکرار مراحل بالا، داده‌های مورد نیاز جهت آموزش شبکه که متشکل از ۱۰۵۰ سری داده می‌باشند، فراهم می‌شود. مقادیر فشارها در کلیه گره‌های شبکه به‌عنوان بردار ورودی شبکه و مقادیر نشت متناظر با آنها به‌عنوان بردار هدف به شبکه داده می‌شود.

پس از آماده‌سازی ماتریس ورودی و خروجی، باید تقسیم‌بندی داده‌ها به سه بخش داده‌های آموزشی، داده‌های صحت‌سنجی و داده‌های آزمون، صورت گیرد تا شبکه ضمن انجام محاسبات بهینه‌سازی جهت بهبود وزن و بایاس در هر لینک، بتواند گزارش مناسبی از چگونگی عملکرد خود را در اختیار قرار دهد. در این پژوهش داده‌های آموزشی ۷۰ درصد از مقدار کل را دربر می‌گیرند و داده‌های صحت سنجی و تست هر یک به میزان ۱۵ درصد خواهند بود (Zhang، ۲۰۰۲).

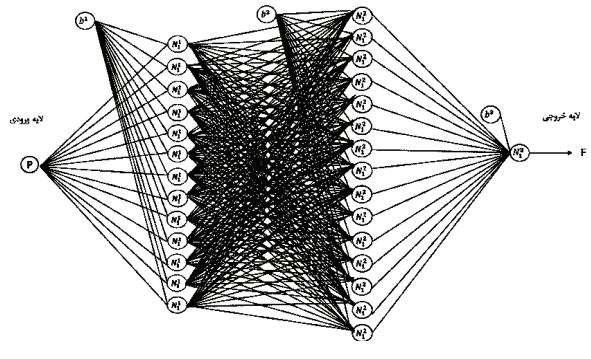
• مقایسه نتایج حاصل از شناسایی نشت توسط WaterGEMS و شبکه عصبی مصنوعی

شاخص‌های پرکاربرد که به‌منظور ارزیابی نتایج حاصل از محاسبات و مقایسه آن با سایر روش‌ها به‌کار می‌روند، شامل: NS[۸]، CRM[۹]، R^2[۱۰] و RMSE[۱۱] می‌باشند. شاخص نش-ساتکلیف یا به اختصار NS، اختلاف نسبی مقادیر را نشان می‌دهد. مقدار این شاخص از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است؛ عدد یک بیانگر انطباق کامل بین نتایج و سایر روش‌ها می‌باشد و هرچه عدد کوچک‌تر شود، اختلاف بیشتر بین نتایج را نشان می‌دهد (Nash و Sutcliffe، ۱۹۷۰). شاخص‌های آماری دیگر، ضریب مجموع باقی‌مانده CRM و ضریب تعیین R^2 و ریشه دوم میانگین مربع خطاها RMSE می‌باشند. CRM اندازه گرایش شبیه به سمت تخمین اندازه‌گیری بیش از حد یا کمتر از حد است. CRM مثبت نشانگر گرایش به سمت تخمین بیش از حد است، در شرایطی که مقدار محاسبات و مشاهداتی باهم برابر باشند. در حالت آرمانی، مقدار این شاخص‌ها به‌ترتیب R^2=1، CRM=0 و RMSE=0 خواهند بود (Santhi و همکاران، ۲۰۰۱).

نتایج و بحث

• جزئیات شبکه عصبی

جهت بررسی این مدل از شبکه مورد بحث، یک شبکه پرسپترون دو لایه با تعداد ۱۳ نرون در لایه پنهان اول و ۱۵ نرون در لایه پنهان دوم ایجاد شد. تعداد نرون‌های لایه خروجی برابر با تعداد مؤلفه‌های بردار هدف می‌باشد. توابع فعالیت به‌کار رفته تابع logsig برای هر دو لایه پنهان و تابع purelin برای لایه خروجی بوده و جهت آموزش شبکه از تابع trainlm و الگوریتم پس انتشار استفاده شد. همه پارامترهای شبکه عصبی پس از تعداد دفعات زیاد ایجاد شبکه با معماری‌های مختلف و توابع فعالیت و آموزش متفاوت و انتخاب بهینه‌ترین حالت از بین همه حالات مورد آزمایش به روش سعی و خطا برگزیده شدند که ملاك این گزینش بر مبنای کمترین میزان خطای ایجاد شده (میانگین مربعات خطا یا MSE) و بیش‌ترین مقدار ضریب همبستگی R بین بردارهای خروجی و هدف (هرچه مقدار این معیار به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده کارایی مطلوب و دقت بالاتر مدل است) قرار گرفت. باتوجه‌به مشخصات بهینه شبکه، ساختار شبکه عصبی برای پیش‌بینی نشت شبکه توزیع آب به‌صورت شکل (۶) است.



شکل ۶- ساختار بهینه شبکه عصبی

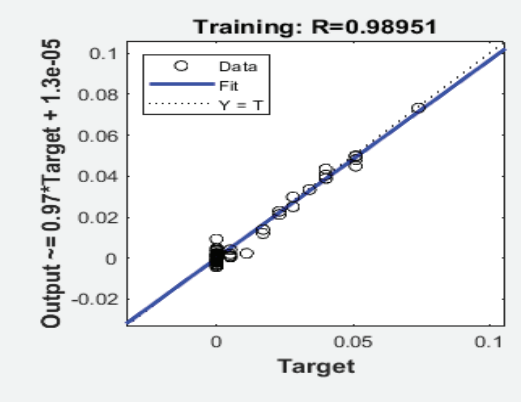
• نتایج حاصل از روندیابی نشت توسط شبکه عصبی

با انتخاب بهترین معماری و پارامترهای بهینه برای شبکه عصبی، شبکه ایجاد شده تا حدود زیادی توانایی پیش‌بینی محل و مقدار نشت را در گره‌های مختلف شبکه برای حالت‌های متفاوت نشت در شرایط واقعی خواهد داشت. در جدول (۳) مقایسه‌ای بین چند معماری مختلف و خروجی آنها انجام شده است.جزئیات عملکرد بهترین معماری انتخاب شده از بین کلیه شبکه‌های آزمایش شده در شکل (۷) قابل مشاهده است.

در بهترین حالت انتخاب شده از بین کلیه شبکه‌های آزمایش شده، ضرایب نشت حاصل از پیش‌بینی شبکه عصبی نسبت به مقادیر مدل‌سازی شده توسط WaterGEMS، دارای ضریب همبستگی ۰/۹۸ و خطای MSE شبکه برابر ۰/۰۰۵۶ است.

جدول ۳- مقایسه کارایی تعدادی از شبکه‌های عصبی مورد بررسی

خطای MSE	ضریب همبستگی	الگوریتم آموزش	ساختار شبکه
۰/۰۱۳۳	۰/۹۵۰۷۱	Trainlm	۱-۲۰-۱
۰/۰۱۵۳	۰/۹۳۲۵	Trainlm	۱-۱۳-۱
۰/۰۱۰۵	۰/۸۹۲۳	Trainlm	۱-۱۳-۱۱-۱
۰/۰۲۰۶	۰/۹۵۲۲	Trainlm	۱-۱۹-۱۷-۱
۰/۰۰۵۶	۰/۹۸۹۵۱	Trainlm	۱-۱۵-۱۳-۱
۰/۰۱۹۳	۰/۹۲۴۰	Trainscg	۱-۱۷-۱۵-۱
۰/۰۲۵	۰/۸۸۹۱	Trainscg	۱-۲۰-۱
۰/۰۶۵۰	۰/۷۳۰۶	Trainscg	۱-۱۶-۱
۰/۰۵۸۳	۰/۶۴۰۲	Trainscg	۱-۱۷-۱۳-۱



شکل ۷- مقایسه ضرایب نشت مدل‌سازی شده با خروجی شبکه عصبی و تعیین ضریب رگرسیون

با بررسی ضرایب c به‌دست آمده برای گره‌ها، می‌توان نواحی مشکوک به نشت را شناسایی کرد. در جدول (۴) نتایج حاصل از ضرایب نشت مدل‌سازی شده و حاصل از شبکه عصبی در شبکه مورد بررسی در حالت پویا و در ساعت آزمون ۴ بامداد ارائه شده است. باتوجه‌به جدول (۴) و با مقایسه ضرایب نشت دریافتی از شبکه عصبی و ضرایب نشت مدل‌سازی شده توسط نرم‌افزار WaterGEMS، کارایی خوب شبکه‌های عصبی برای حل اینگونه مسائل تأیید می‌شود. با بررسی ضرایب نشت به دست‌آمده برای گره‌های شبکه می‌توان گره‌ها و در نتیجه لوله‌های مشکوک به نشت را شناسایی کرد. نتایج این بررسی با مقدار فشارهای تعیین شده در ساعت آزمون، در جدول (۵) قابل مشاهده است. لازم به توضیح است معمولاً برای تأیید کارایی شبکه به‌جای یک بردار ورودی، از یک سری داده که در مرحله آموزش به شبکه داده نشده‌اند به‌عنوان تست استفاده می‌شود و باتوجه‌به مقادیر خطا و آنالیز رگرسیون بین مقادیر خروجی و هدف، در صورت به‌دست آمدن نتایج قابل قبول، کارایی مطلوب شبکه تأکید می‌شود.

جدول ۴- ضرایب نشت مدل‌سازی شده و حاصله از شبکه عصبی در شبکه شاخص در ساعت آزمون (۴ بامداد)

شماره گره	ضریب نشت به‌دست آمده از شبکه عصبی	ضریب نشت مدل‌سازی شده توسط نرم‌افزار
۷	۰	۰
۱۹	۰/۰۷۱	۰/۰۷
۲۲	۰/۰۲۶	۰/۰۲
۳۷	۰/۰۵۱	۰/۰۵
۵۳	۰/۰۳۸	۰/۰۴
۶۲	۰	۰
۶۳	۰/۰۵۹۶	۰/۰۶
۶۹	۰/۰۷۱	۰/۰۷
۷۰	۰/۰۰۳	۰
۷۸	۰/۰۰۱	۰
۸۳	۰/۰۲۶	۰/۰۲
۸۷	۰/۰۳۳	۰/۰۳
۹۳	۰	۰

جدول ۵- گره‌ها و لوله‌های مشکوک به نشت

گره‌های نشت‌دار	لوله‌های مشکوک به نشت
۱۹	۶۱ -۲۲ -۱۵
۲۲	۴۲
۳۷	۸۲ -۴۰ -۳۷
۵۳	۹۶
۶۳	۵۴ -۵۳ -۳۳
۶۹	۹۳ -۵۸ -۵۷
۸۳	۶۶ -۵ -۴
۸۷	۲۹ -۱۴

نتیجه‌گیری

با وجود اینکه نشت در شبکه‌های توزیع آب باعث هدر رفت منابع ارزشمند آب شیرین می‌شود، اما خطر بزرگ‌تر ورود مواد آلاینده به شبکه است. روش‌های رایج نشت‌یابی که بر پایش شبکه، منطقه به منطقه نشت را جستجو می‌کنند بسیار هزینه‌بر و وقت‌گیر می‌باشند، لذا اخیراً روش‌هایی که با مدل‌سازی شبکه به‌صورت فراگیر موقعیت نقاط با پتانسیل نشت را شناسایی می‌کند، مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله به‌منظور تعیین موقعیت و مقدار نشت‌های موجود در شبکه، از حل معکوس معادلات نشت و کارایی دقیق شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شد.

شبکه‌های عصبی در مرحله آموزش، نیازمند تعداد زیادی سری داده آموزشی با نتایج از پیش تعیین شده هستند. بدیهی است امکان تهیه این حجم زیاد اطلاعات برای حالات واقعی وجود نشت در شبکه مورد بررسی میسر نیست، لذا این نیاز با مدل‌سازی و تحلیل هیدرولیکی شبکه به وسیله نرم‌افزار WaterGEMS تأمین شده است. بسته به میزان توانایی مدل در شبیه‌سازی شرایط واقعی، دقت این داده‌ها تغییر می‌کند. کاملا مشخص است که در هیچ حالتی این شبیه‌سازی صد درصد دقیق نبوده و لذا این داده‌ها و به تبع آن نتایج حاصل از شبکه عصبی حتی در صورت عملکرد بسیار خوب شبکه، همواره درصدی خطای اجتناب ناپذیر خواهند داشت.

در این تحقیق با مقایسه نشت‌های حاصل از مدل تحلیل هیدرولیکی WaterGEMS و شبکه عصبی مصنوعی بااستفاده‌از مقادیر شاخص‌های آماری R^2، RMSE و MSE که به‌ترتیب برابر ۰/۹۸۵، ۰/۰۰۳ و ۰ می‌باشند، می‌توان به دقت بالای شبکه‌های عصبی و تخمین دقیق آن اشاره نمود.

از مزایای روش پیشنهادی سادگی و عدم نیاز به آزمایشات پیچیده و یا وسایل خاص یا گران قیمت می‌باشد. برای بررسی وجود نشت در یک شبکه خاص با مدل‌سازی شبکه و ایجاد یک شبکه عصبی آموزش دیده، توانایی پیش‌بینی نشت تا مدت زیادی بااستفاده‌از همین شبکه میسر است و هر بار، در صورت لزوم تنها باید یک سری تغییرات جزئی در برنامه‌های مورد استفاده ایجاد شود. لحاظ کردن این تغییرات نیازمند صرف زمان یا هزینه زیادی نخواهد بود. دقت نتایج به‌دست آمده به صحت اطلاعات ورودی مربوط به مشخصات شبکه مورد بررسی و همچنین دقت پیش‌بینی شبکه عصبی وابسته است. بنابراین با افزایش دقت این موارد می‌توان قابلیت اطمینان نتایج به‌دست آمده را بهبود بخشید. از طرفی مدل‌های شبیه‌سازی صرفا برای تعیین موقعیت نشت و نه برای تعیین مقادیر نشت در گره‌ها کاربرد دارند. این روش‌ها هزینه محاسباتی بسیار کمی دارند، می‌توانند در بهره‌برداری شبکه‌ها استفاده شوند.

پی‌نوشت

1-Unaccounted for Water
2-Non-Revenue Water
3-Transfer Function
4-Activation Function
5-Weight

6-Bias or Offset
7-Network Architectures
8-Nash-Sutcliffe
9-Coefficient of Residual Mass
10-Coefficient of Determination
11-Root Mean Square Deviation

منابع

آزادفر، م.، بارانی، غ. و حسامی کرمانی، م. ۱۳۹۸. بهینه‌سازی نشت در شبکه توزیع آب شهری به وسیله مدیریت فشار با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه. دومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، سازه و زلزله، تهران، ایران.

اسدیانی یکتا، ا.ح. ۱۳۸۳. تهیه بسته نرم‌افزاری محاسبه آب به حساب نیامده با استفاده از مدل تحلیل هیدرولیکی و GIS. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد. دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

ایدی، ض. و قاضی زاده، م. ۱۳۸۸. تهیه مدل تعیین نشت لحظه‌ای در لوله‌های شبکه توزیع آب با تلفیق مدل هیدرولیکی (WaterGEMS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS). هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، شیراز، ایران.

بی‌نام. ۱۳۸۹. نشریه "راهنمای شناخت و بررسی عوامل مؤثر در آب به حساب نیامده و راه‌کارهای کاهش آن". شماره ۳۰۸-الف.

تائبی، ا. ۱۳۷۸. ارتباط بین فشار و میزان نشت در شبکه توزیع آب. دومین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

سلطانی‌اصل، ف. ۱۳۸۸. مدیریت هوشمند فشار به منظور کاهش نشت در شبکه‌های آبرسانی، مطالعه موردی: منطقه سرافرازان مشهد. مجله آب و فاضلاب، ۳(۲۰): ۹۹-۱۰۴.

شیرزاد، ا.، حیدرزاده، م. و محمدی، م. ۱۳۹۹. تهیه مدل هیدرولیکی و ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع آب (مطالعه موردی: شهر اشنویه). نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۵(۲): ۳۹-۴۷.

طالبی، ا.ح. ۱۳۹۵. شناسایی عوامل و کاهش آب به حساب نیامده در شبکه‌های آبرسانی شهری، مطالعه موردی شهرهای کمتر از ۱۰۰۰۰ انشعاب استان آذربایجان شرقی. کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران. تهران.

عطاری، م. و مغربی، م. ۱۳۹۷. روش نوین نشت‌یابی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله آب و فاضلاب، ۲۹(۱): ۱۴-۲۶.

فاضل ولی‌پور، ب. فغفور مغربی، م. ۱۳۸۸. نشت‌یابی شبکه‌های آبرسانی شهری با اندازه‌گیری میدانی فشارهای گره‌ای (مطالعه موردی شهرک گلبهار)، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه تهران، تهران، ایران.

کلیایی، پ. و محمد ولی سامانی، ح. ۱۳۹۰. پیش‌بینی محل نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

مغربی، م. و عطاری، م. ۱۳۹۲. روش نوین نشت‌یابی در شبکه آبرسانی با استفاده از حداقل فشارسنجی در حالت وجود دو نشت همزمان. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

مغربی، م.، منوریان، ع. و ترابی، ف. ۱۳۹۳. استفاده از اصل جمع آثار قوا در یافتن موقعیت نشت در شبکه‌های آبرسانی. هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشکده مهندسی عمران. زابل، ایران.

AhmadFouad Z., Eddy H. S., Badronnisa Y. and Syazwani I. 2019. Water leak detection method in water distribution network. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

Jafari Asl J., SamiKashkooli B. and Bahrami M. 2018. Optimal Pressure Control for Leakage Minimization in Water Distribution Networks. Journal of Water and Sustainable Development, 4(2): 49-56.

Jing K., and Zhi-Hong Z. 2012. Time Prediction Model for Pipeline Leakage Based on Grey Relational Analysis. J. Physics Procedia. 25: 2019-2024.

Nash J.E., and Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models: PART 1. A discussion of principles. Journal Hydrol,10: 282-290.

Nicolini M., Giacomello C. and Deb K. 2010. Calibration and optimal leakage management for a real water distribution network. Journal of Water Resources Planning and Management, 137(1): 134-142.

Ormsbee L.E. 1989. Implicit network calibration", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 115(2): 243-257.

Roy U. 2017. Leak Detection in Pipe Networks Using Hybrid ANN Method. Water Conserv Science Enginear, 2: 145-152.

Santhi C., J.G. Arnold J.R. Williams W.A. Dugas R. Srinivasan and Hauck L. 2001. Validation of the

Tabesh M., JamasbM. and Moeini R. 2011. Calibration of water distribution hydraulic model: A comparison between pressure dependent and demand driven analyses, Journal of Urban Water, 8: 93-102.

Zhang W.J. 2002. An artificial neural network approach to mechanism kinematic chain isomorphism identification. Mechanism and Machine Theory, 37: 549–551.

SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. J. Am. Water Resour. Assoc., 37: 1169-1188.

Soltani Asl M. S. and Maghrebi M. F. 2008. Intelligent pressure management to reduce leakage in urban water supply networks, a case study of Sarafrazan District, Mashhad, Journal of Water and Wastewater, 20(3): 99-104.