



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

## کاربرد تکنیک نگاشت خود سامان در تشخیص گستره آلودگی تعمیدی در شبکه توزیع آب شهری

ناصر مهرداد<sup>۱\*</sup>، داود وفا<sup>۲</sup>، غلامرضا نبی بیدهندی<sup>۱</sup>، حسن هویدی<sup>۲</sup>

- ۱- گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۲- گروه مهندسی محیط‌زیست، پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تهران، جلفا، ایران
- ۳- گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

**زمینه و هدف:** شبکه‌های توزیع آب به علت گستردگی و در دسترس بودن، مستعد وقوع حملات تروریستی از طریق تزریق مواد سمی هستند. پژوهش حاضر با هدف کاربرد شبکه عصبی غیر نظارت شونده نگاشت خود سامان یا Self-Organizing Map (SOM) در تشخیص گستره آلودگی تعمیدی سم آرسنیک در شبکه توزیع آب شهری تهران صورت گرفت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۲  
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸  
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۳/۲۱

**روش بررسی:** بدین منظور، ابتدا وضعیت هیدرولیکی موجود شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن شماره ۴ تهران به عنوان پابلوت مدل‌سازی شد. سپس سناریوهای محتمل تزریق آلاینده آرسنیک در نقاط مختلف شبکه توزیع آب با استفاده از تحلیل کیفی شبکه و کاربرد تحلیلگر EPANET و با کدنویسی در محیط نرم‌افزار R نگارش شدند. برای یافتن گستره آلودگی به ازای تزریق آرسنیک در زمان‌ها و مکان‌های مختلف در شبکه توزیع آب، از شبکه SOM استفاده شد.

**واژگان کلیدی:** شبکه توزیع آب، تحلیل هیدرولیکی، هوش مصنوعی، نگاشت خود سامان

**یافته‌ها:** میزان غلظت آلودگی در یک نقطه مشخص با گذشت زمان کاهش یافته و میان زمان و غلظت، همبستگی بالایی وجود دارد. همچنین، گستره آلودگی وابسته به میزان مصرف مشترکین و به تبع آن، ساعت تزریق آلودگی است. روش توسعه یافته در پژوهش حاضر ۹۱ درصد با واقعیت تطابق دارد و با سرعت بالا قادر به مشخص نمودن گستره آلودگی در شبکه توزیع آب است.

**نتیجه‌گیری:** تکنیک SOM می‌تواند به عنوان تکمیل کننده سیستم پایش کیفیت آب و تشخیص آلودگی در شبکه توزیع آب شهری مورد استفاده قرار گیرد تا در کوتاه‌ترین زمان ممکن، به عنوان جایگزین مدل‌سازی کمی-کیفی شبکه توزیع آب، گستره آلودگی را در هنگام تشخیص آلودگی احتمالی مشخص نماید.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:  
mehrjadi@ut.ac.ir

Please cite this article as: Mehrdadi N, Vafaei Mehr D, Nabi Bidhendi Gh, Hoveidi H. Self-organizing map neural network application in detecting the extent of intentional pollution in the urban water distribution network. Iranian Journal of Health and Environment. 2022;15(1):17-36.

## مقدمه

حفظ و بقای زیرساخت‌های مهم کشور از جمله سامانه‌های آبرسانی در شرایط وقوع بحران از قبیل بلایای طبیعی، جنگ‌ها، اقدامات خرابکارانه و تروریستی، بسیار حائز اهمیت است (۱). با عنایت به اینکه سامانه‌های آبرسانی مستقیماً با نیازهای اولیه مردم از جمله آشامیدن و بهداشت در ارتباط هستند، ضروری است که حفاظت این تاسیسات در مقابله با بحران‌های گوناگون مورد توجه خاص قرار گیرد (۲). در این راستا، امنیت شبکه توزیع آب شهری به لحاظ کیفیت آب از اهمیت به سزایی برخوردار است؛ چرا که با توجه به گستردگی و در دسترس بودن، مستعد وقوع حملات تروریستی از طریق تزریق مواد سمی است. بنابراین جهت مقابله با این تهدیدات، ضرورت ایمنی و حفاظت از تاسیسات آبرسانی بیش از پیش نمایان می‌شود (۳، ۴). چنانچه در اثر یک اقدام خرابکارانه شبکه آب شهری آلوده شود، پیش‌بینی گستره آلودگی در لحظه تشخیص می‌تواند در کاهش اثرات حادثه و احیای بهینه شبکه آلوده شده نقش مهمی داشته باشد و دامنه آسیب‌های جانی و مالی را به حداقل تقلیل دهد (۵). بر این اساس، طراحی سامانه‌ای مناسب، جهت تشخیص به هنگام آلودگی و شناسایی گستره آلودگی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود، ضروری می‌نماید (۶).

اگرچه بررسی‌های متعددی در خصوص پایش شبکه‌های آب شهری در تحقیقات گذشته صورت پذیرفته، اما در خصوص تشخیص گستره آلودگی عمدی شبکه آب، پژوهش‌های محدودی انجام شده که در ادامه به مهمترین آنها اشاره می‌شود. به عنوان مثال Shafiei و همکاران (۲۰۲۰) به منظور شناسایی ورود همزمان آلودگی از چند گره، بهینه‌سازی موقعیت حسگرهای کیفی در شبکه‌های توزیع آب را انجام دادند. در این تحقیق با فرض ورود آلودگی به صورت عمدی در یک یا دو گره، تعداد حسگرهای نصب شده در شبکه بین یک تا چهار حسگر متغیر در نظر گرفته شد. شبکه در بازه زمانی طولانی مدت تحلیل شد و از طریق برقراری ارتباط پویا بین EPANET و MATLAB در هر حالت نصب حسگر، حجم آب آلوده مصرف شده و وسعت منطقه آلوده شده بررسی

شد. روش مورد استفاده توانست برای توابع هدف مختلف، بهترین موقعیت برای نصب حسگرها را شناسایی کند (۷). در مطالعه دیگر، Hu و همکاران (۲۰۱۵) الگوریتم ژنتیک موازی بر پایه نگاشت-کاهش (MapReduce-based Parallel Genetic Algorithm (MR-PNGA)) را برای تشخیص، شناسایی و مدیریت آلودگی ناشی از حملات عمدی به شبکه توزیع آب به کار بردند. در این پژوهش، تعیین محل، زمان و غلظت آلودگی ورودی به شبکه با توجه به ماهیت تزریق عمدی درون شبکه توزیع آب، تحت عدم قطعیت‌های موجود بررسی شده است. مطابق با نتایج، MR-PNGA نه تنها قادر به شناسایی منبع آلودگی با دقت بالا بوده بلکه خوشه یابی سرور (Server Cluster) آن برابر با هشت به دست آمده که نشان از بهره‌وری بالای این مدل دارد (۸). Bazargan-Lari (۲۰۱۸) به منظور تدوین یک برنامه واکنش اضطراری برای شناسایی سریع آلاینده‌ها در شبکه‌های توزیع آب در آلودگی‌های عمدی و یا تصادفی، یک مدل درخت تصمیم‌گیری پیشنهاد نمود. این تکنیک مبتنی بر جستجوی بهترین طرح نقاط شیرهای آتش‌نشانی و جستجوی مجموعه‌ای از قوانین ساده است که می‌تواند بی‌درنگ، زمان بهینه خروج آب از شیر آتش‌نشانی را تعیین کند (۹). همچنین Chang و همکاران (۲۰۱۲) به توسعه یک روش مبتنی بر سیستم پشتیبانی تصمیم (Rule-based Decision Support System (RBDSS)) برای تجزیه و تحلیل و تولید مجموعه‌ای از مکان‌های استقرار سنسور و مقایسه عملکرد ۱۰ مدل بهینه‌سازی شده پرداختند. یافته‌های محققان در این زمینه نشان داد که RBDSS نیازمند زمان محاسباتی کمی است و عملکرد فوق‌العاده‌ای در شرایط استفاده از تمام شاخص‌ها در هنگام برخورد با شبکه آب آشامیدنی پیچیده در مقیاس بزرگ ارائه می‌دهد (۱۰). Khorshidi و همکاران (۲۰۱۹) با توجه به ساختار طبیعی و از بالا به پایین تصمیم‌گیری در طراحی سیستم هشدار آلودگی، روشی مبتنی بر بازی پیروان رهبری (Leader-follower Game) را در شبکه توزیع آب شهر لامرد شیراز پیاده‌سازی کردند. نتایج مشخص کرد که مدل هدفمند و تجزیه‌پذیر پیشنهادی آنها، پیش‌بینی آلودگی شبکه را مطابق با معیارهای رهبری و

در علوم مختلف از جمله شناسایی گفتار، مدل‌سازی زیستی، فشرده‌سازی داده‌ها، درون‌یابی و برون‌یابی غیرخطی (به منظور پیش‌بینی)، پردازش سیگنال، تعمیم دادن و فشرده‌سازی اطلاعات برای انتقال آسان‌تر و داده‌کاوی دارد (۱۶).

الگوریتم SOM به عنوان یک ابزار برای کاهش ابعاد داده‌ها به وسیله خوشه‌بندی مطرح می‌شود، لذا روابط آماری غیرخطی پیچیده که ابعاد بالایی دارند را به معادلات ساده با ابعاد کمتر تبدیل می‌کند. در این نگاشت، مهمترین روابط متریک و توپولوژیکی مولفه‌های داده‌های اصلی حفظ می‌شود (۱۷). هر نرون در لایه خروجی از SOM شامل دقیقاً همان تعداد از متغیرهای موجود در بردارهای ورودی است، لذا برخلاف شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه، متغیرها در SOM به متغیرهای ورودی یا خروجی تقسیم نمی‌شوند. همچنین این الگوریتم خصوصیات حفاظت از همسایگی و تجزیه و تحلیل فضای ورودی متناسب با توزیع داده‌ها را دارا است (۱۸). SOM نه تنها از تعداد بسیار زیاد داده پشتیبانی می‌کند، بلکه نسبت زیاد نقص در داده‌های ورودی برای آن مشکل‌ساز نیست و با سرعت بالا، با ایجاد روابط غیرخطی میان داده‌های ورودی، موجب تخمین واقعی نقاط آلوده می‌گردد (۱۹). به دلیل تکرر سناریوهای محتمل تزریق آلودگی، فرایند زمان اجرا در هنگام مدیریت شبکه‌های توزیع آب از مسائل پیچیده و چالش برانگیز است. تکنیک SOM روشی سریع به منظور یافتن نقطه تزریق آلودگی است که با شناسایی گستره آلودگی در لحظه تشخیص، به مدیریت به هنگام حادثه کمک می‌کند تا متناسب با آن بتوان در خصوص انجام اقدامات اولیه برای اعلام هشدار، قطع آب مناطق متاثر و رفع آلودگی شبکه اقدام نمود (۲۰).

به دلیل موقعیت خاص و وجود گروهک‌های تروریستی در منطقه خاورمیانه و عناد دشمنان در جهت صدمه زدن به مردم بی‌گناه در راستای رسیدن به اهداف شوم خود، وقوع حملات بیولوژیکی به شبکه توزیع آب شرب محتمل است. استان تهران با تراکم جمعیت بالا و قلب اقتصادی، به عنوان پایتخت ایران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا تحلیل شیوه حملات تروریستی بیولوژیکی و نحوه پایش شبکه توزیع آب به منظور کاهش ریسک آلودگی شبکه توزیع آب و به تبع آن

رضایتمندی پیروان، به حداکثر می‌رساند (۱۱). از سوی دیگر، نتایج مطالعه Perelman و همکار (۲۰۱۲) نشان داد که در سیستم‌های بزرگ توزیع آب، مدل‌های مشروح با جزئیات کامل منجر به تولید حجم قابل توجهی از داده‌ها می‌شوند که این مساله مدیریت، نظارت و درک نحوه عملکرد ساختار اصلی سیستم‌ها را دشوار می‌سازد. یک راه حل ممکن برای کنار آمدن با این مشکل، دست یافتن به رفتار سیستم توزیع آب با ساده‌سازی کارکرد آن از طریق تحلیل مکان‌نگاری/سیستم اطلاعات فضایی (Topological/Connectivity Analysis) است. به همین جهت، نگارندگان پژوهشی را با هدف توسعه یک طرح مبتنی بر مکان‌نگاری برای کمک به تجزیه و تحلیل سیستم‌های توزیع آب انجام دادند. مبنای این روش بر خوشه‌بندی است و سیستم توزیع آب را با استفاده از الگوریتم جستجوی عمق اول (Depth First Search Algorithm) و الگوریتم جستجوی سطح اول (Breadth First Search Algorithm) به زیرگراف‌های مرتبط تقسیم می‌کند. جزءبندی در این روش منجر به ایجاد یک ماتریس اتصال می‌شود که نشان دهنده ارتباطات متقابل بین خوشه‌ها است و می‌تواند یک طرح مدل‌سازی پاسخ (Response Modeling Plan) را در صورت وقوع یک حادثه نفوذ آلودگی در سیستم توزیع آب، پشتیبانی کند (۱۲). بررسی پیشینه مطالعات نشان می‌دهد که پژوهش‌های معدودی در زمینه تزریق آلودگی به شبکه توزیع آب توسط محققین صورت گرفته که منجر به توسعه مدل‌هایی جهت تعیین گستره آلودگی و شناسایی نقاط تزریق آلودگی شده باشد (۱۳، ۱۴). شبکه عصبی غیر نظارت شونده نگاشت خود سامان (Self-Organizing Map (SOM)) یک روش نوظهور در طراحی سیستم اعلام خطر و پیشگیری به موقع و مطمئن وقوع آلودگی در شبکه‌هایی که احتمال آلودگی تعدمی دارند، به شمار می‌رود. در آلودگی تعدمی سیستم‌های توزیع آب شهری از طریق چند نقطه، می‌توان از تکنیک SOM برای تعیین گستره آلودگی استفاده کرد (۱۵). SOM یک مدل اکتشافی برای مجسم ساختن و کشف روابط خطی و غیرخطی در مجموعه داده‌ها با ابعاد زیاد است و کاربرد بسیار گسترده‌ای

توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ شامل بخش‌هایی از مناطق ۱۱ و ۱۲ شهرداری تهران بوده و جمعیت محدوده طرح برابر با ۱۹۲۰۸۶ نفر است. براساس اطلاعات اخذ شده از شرکت آب و فاضلاب (آبفا) تهران، میزان سرانه مصرف بدون تلفات و با تلفات در محدوده تحت پوشش مخزن ۴ به ترتیب برابر با ۲۷۱ و ۳۷۱ لیتر در شبانه روز است. همچنین شبکه تحت پوشش این مخزن دارای ۳۲۱۸۱ انشعاب آب است که تعداد ۲۳۸۳۱ آن دارای کاربری مسکونی است. ورود آب به شبکه توزیع در محدوده مخزن ۴ از سه نقطه شامل خیابان حافظ تقاطع پل کالج با فشارشکن به قطر ۶۰۰ mm، چهارراه ولیعصر با فشارشکن به قطر ۶۰۰ mm و خیابان دانشگاه با فشارشکن به قطر ۳۵۰ mm صورت می‌گیرد (۲۲).

– مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ تهران

مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب در وضعیت موجود با استفاده از نرم‌افزار Water Gems انجام شد. اطلاعات مورد نیاز جهت تهیه مدل هیدرولیکی شامل فیزیک شبکه، مصارف و غیره از بانک اطلاعاتی شرکت آبفای استان تهران دریافت و مورد استفاده قرار گرفت. مدل هیدرولیکی تهیه شده براساس مقادیر مشاهده شده (فشار و دبی) در وضعیت موجود شبکه، کالیبره شده و مشکلات هیدرولیکی در تامین آب توسط شبکه بر مبنای خروجی‌های مدل مذکور شناسایی شدند.

– فیزیک شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ تهران  
اطلاعات مربوط به پلان خطوط لوله و موقعیت شیرآلات شبکه توزیع آب و همچنین قطر و جنس لوله‌های موجود، براساس سیستم اطلاعات جغرافیایی (Geographic Information System (GIS)) و در قالب Shape File از شرکت آبفای استان تهران دریافت شد (۲۲). در فایل‌های مذکور، مشخصات مکانی اجزای شبکه بانک اطلاعاتی لینک هستند و با توجه به ماهیت اجزای شبکه از جمله لوله، شیرآلات و مخازن، فیلدهای اطلاعاتی مختلفی در بانک اطلاعاتی تعریف شده است. فیزیک شبکه برای لوله‌ها براساس اطلاعاتی شامل موقعیت لوله (طول لوله)، قطر لوله و جنس لوله در ایجاد مدل هیدرولیکی مورد استفاده قرار

وارد آمدن تلفات و خسارات سنگین به جان ساکنان این شهر، از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرفی، شناخت نقاط ضعف شبکه توزیع آب عاملی موثر در بهبود توان حفاظتی و کاهش گستره خطر در توزیع آب آشامیدنی در شهر خواهد بود (۲۱). لذا پژوهش حاضر با هدف کاربرد تکنیک SOM در تشخیص گستره آلودگی تعمدی در شبکه توزیع آب شهری تهران صورت گرفت. بدین منظور ابتدا آنالیز هیدرولیکی وضعیت موجود شبکه و کالیبراسیون آن در نرم‌افزار Water Gems ارائه می‌شود. سپس مدل‌سازی کیفی آب در محیط نرم‌افزار EPANET صورت می‌گیرد. یکی از اهداف پژوهش حاضر، لینک نمودن مدل هیدرولیکی و کیفی شبکه توزیع آب با سناریوهای تزریق آلودگی است که تعداد حالات زیادی را در بر می‌گیرد. بدین منظور سعی می‌شود تمام حالات ممکن تزریق آلودگی با استفاده از کدنویسی در محیط نرم‌افزار R جهت تسریع در انجام محاسبات، در نظر گرفته شود. در نهایت این اطلاعات به عنوان ورودی الگوریتم SOM استفاده می‌شود تا گستره آلودگی احتمالی تعیین شود. لازم به ذکر است که این تحقیق اولین نمونه داخلی در زمینه کاربرد روش SOM در زمینه تعیین نقاط آلودگی و به طور کلی شبکه توزیع آب است که در صورت دستیابی به نتایج مناسب، قابل استفاده در شبکه توزیع آب در نقاط مختلف کشور خواهد بود. همچنین کدهای برنامه‌نویسی که در این تحقیق تهیه می‌شود قابلیت گسترش و استفاده در زمینه‌های علمی دیگر را دارا هستند، چرا که برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار R بصورت متن باز (Open Source) است.

## مواد و روش‌ها

– معرفی منطقه مورد مطالعه

با توجه به گسترده بودن شبکه توزیع آب شهر تهران، منطقه مورد مطالعه به شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ (شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴) شهر تهران محدود شد. دلیل انتخاب مخزن ۴، ایزوله بودن این ناحیه از لحاظ هیدرولیکی، توپوگرافی خاص آن (تعداد فشارشکن‌ها) و در اختیار داشتن اطلاعات سایر پارامترهای تاثیرگذار در شبکه بوده است. گستره شبکه

مصارف به گره‌های مدل شبکه در وضعیت موجود اختصاص می‌یابد. این روش دقیق‌ترین شیوه تعیین مصارف و میزان جریان آب در لوله‌ها است زیرا نوع انشعاب، انواع کاربری‌ها و همچنین مکان دقیق هر اشتراک در تعیین مصارف در نظر گرفته می‌شود (۲۳). در ادامه برای تعیین الگوی مصرف آب در ساعات مختلف شبانه روز، ضرایب حداکثر ساعتی و روزانه در مدل هیدرولیکی اعمال می‌شوند. مشخصات زون‌های فشاری و همچنین شیرهای فشارشکن موجود در محدوده تحت پوشش مخزن ۴ در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق جدول ۱، محدوده مخزن ۴ (محدوده ۹۳۶ هکتاری) در جهت شیب طبیعی زمین از شمال به جنوب شامل سه زون فشاری (در سه سطح فشاری مختلف) و هفت عدد شیر فشارشکن است. اختلاف ارتفاع بالاترین و پایین‌ترین نقاط شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ در حدود ۷۷ m است (۲۲). در نهایت با اعمال ضرایب مختلف به مصارف هر گره، مدل تهیه شده به صورت ۲۴ ساعته (Extended Period Simulation (EPS)) تحلیل می‌شود.

می‌گیرد. پس از بررسی و پیش پردازش اطلاعات دریافتی، موقعیت شیرهای حدی (همواره بسته) بین محدوده مخازن و شیرهای حدی بین زون‌های فشاری (در داخل محدوده مخازن) در مدل هیدرولیکی پیاده می‌شود. همچنین اطلاعات مربوط به مخازن، شامل رقوم ارتفاعی کف مخزن، ابعاد مخزن و تراز سطح آب در روز حداکثر مصرف براساس اطلاعات دریافتی از شرکت آبفای استان تهران به مدل هیدرولیکی اضافه می‌شود (۲۲). مدل تهیه شده شامل لوله‌ها، گره‌ها، شیرهای فشارشکن و مخازن است.

عملیات مصارف مشترکین و تعیین الگوی مصرف آب تحت پوشش مخزن ۴ تهران برای تعیین میزان آب عبوری از خطوط آبرسانی و همچنین اعمال مصارف در گره‌ها، از مصارف واقعی مشترکین در سال ۱۳۹۷ استفاده می‌شود. مقادیر مصارف مشترکین با نقاط مصرف در محیط GIS لینک شده و در بانک اطلاعاتی GIS مقدار مصرف هر مشترک اضافه می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از روش نزدیک‌ترین گره (Nearest Node)، مقدار

جدول ۱- مشخصات زون‌های فشاری و فشارشکن‌های شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ شهر تهران (۲۲)

شماره	نام	ارتفاعی	قطر	فشار	مساحت	متوسط	رقوم ارتفاعی زون		فشار آب در حالت	فشار آب در حالت		
							حداکثر	حداکثر				
زون	فشارشکن	فشارشکن	فشارشکن	خروجی	زون	مصرف	فشاری	حداکثر مصرف	حداکثر مصرف			
	(mm)	(m)	(mm)	(mwater)	(ha)	(L/s)	(m)	(mwater)	(mwater)			
		(m)					حداکثر	حداکثر	حداکثر			
	کالیج	۱۱۸۴	۶۰۰	۲۱								
۱	ولیعصر	۱۱۹۰	۶۰۰	۲۱	۲۵۳	۲۴۹	۱۱۶۰	۱۱۹۱	۲۰	۵۰	۱۳	۳۶
	دانشگاه	۱۱۸۹	۳۵۰	۲۲								
۲	الوند	۱۱۶۱	۵۰۰	۲۲	۲۶۵	۲۰۳	۱۱۳۵	۱۱۶۷	۱۶	۴۸	۱۱	۳۰
	پاستور	۱۱۶۱	۶۰۰	۲۲								
۳	فرهنگ (۱)	۱۱۳۸	۵۰۰	۲۱	۴۱۸	۳۹۳	۱۱۱۴	۱۱۴۱	۱۸	۴۴	۱۳	۲۸
	فرهنگ (۲)	۱۱۳۷	۵۰۰	۱۹								

– تزریق آلودگی در نقاط مختلف شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ شهر تهران  
به منظور انجام تحلیل کیفی و پیاده‌سازی سناریوهای مختلف تزریق آلودگی، از مدل کیفی در محیط نرم‌افزار EPANET استفاده می‌شود. به این منظور از فایل تحلیل هیدرولیکی، خروجی به فرمت INP تهیه می‌شود. سپس با لینک نمودن نرم‌افزار EPANET با زبان برنامه‌نویسی R، سناریوهای مختلف تزریق آلودگی به شبکه توزیع اجرا می‌شود. پکیج EPANET Reader با هدف فراخوانی فایل (INP) EPANET در محیط نرم‌افزار R و پکیج EPANET Toolkit برای تحلیل هیدرولیکی و کیفی شبکه توزیع آب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

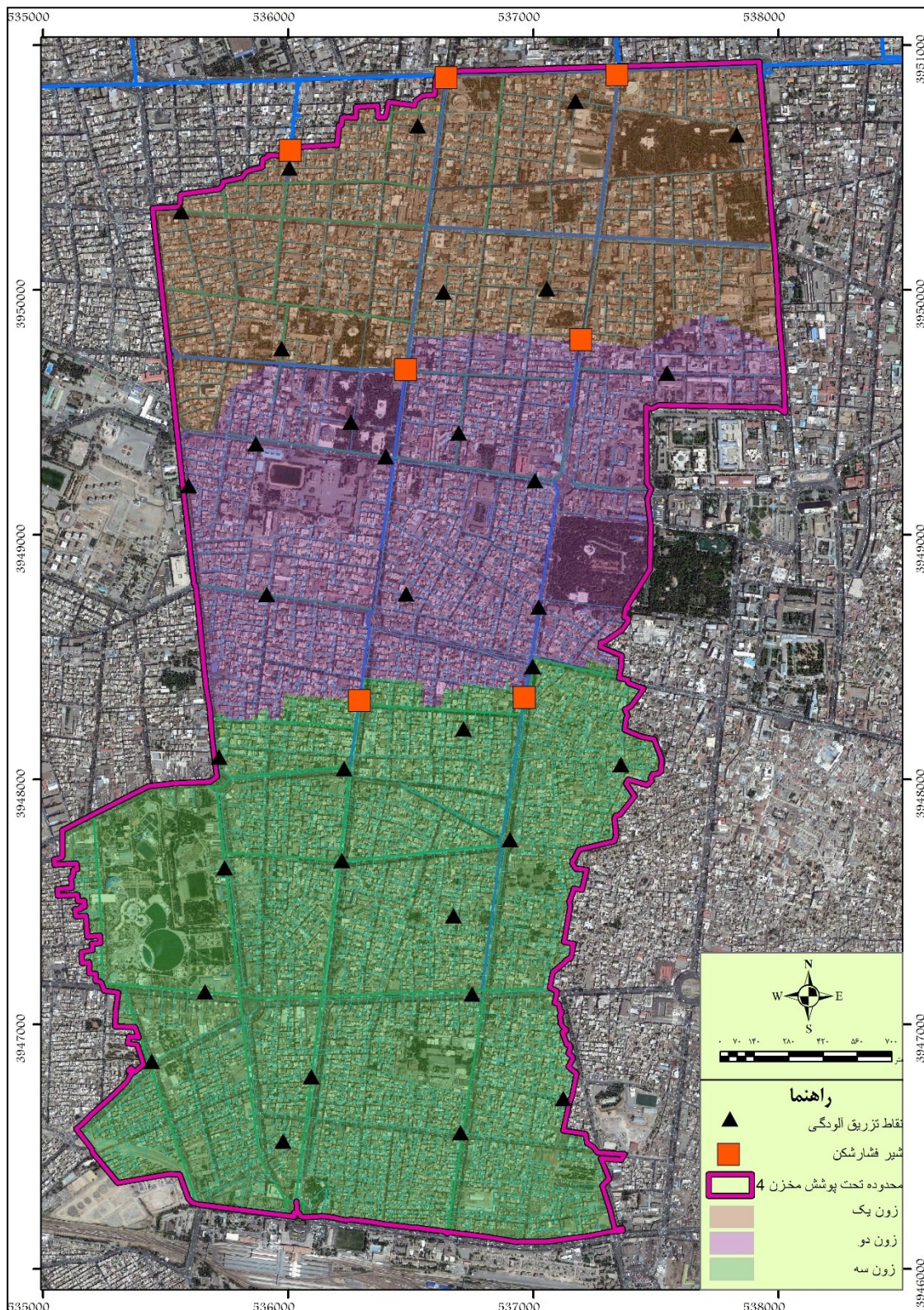
با توجه به اینکه نقاط دارای پتانسیل تزریق آلودگی در شبکه توزیع آب شامل نقاط با تقاضای آب صفر همچون شیرهای آتش‌نشانی هستند (۴)، در پژوهش حاضر فرض بر این است که ماده سمی محلول در آب از طریق شیرهای آتش‌نشانی به شبکه‌های توزیع آب و با استفاده از پمپ‌های تزریق مواد شیمیایی به آب افزوده می‌شود؛ چرا که تزریق آلودگی از طریق شیرهای آتش‌نشانی با استفاده از پمپ‌های کوچک و اتصال شلنگ به شیرهای آتش‌نشانی ایستاده به سهولت انجام می‌گیرد (۲۴). همچنین ذکر این نکته ضروری است که در شهر تهران شیرهای آتش‌نشانی بر روی خطوط لوله با قطر بالای ۱۰۰ mm نصب می‌شوند. ضمن اینکه شبکه آتش‌نشانی و آب شرب در مناطق شهری ایران مجزا نیستند (۲۲). مطابق اطلاعات دریافتی از شرکت آبفای استان تهران، تعداد نقاط شیرهای آتش‌نشانی در محدوده تحت پوشش مخزن ۴ برابر با ۲۹۰ عدد است (۲۲) که از این تعداد، ۳۴ نقطه به عنوان نقاط تزریق آلودگی انتخاب شده است. در انتخاب نقاط سعی شده تا پراکنش نقاط در بر گیرنده کل پهنه تحت پوشش مخزن ۴ باشد.

غلظت هر ماده آلاینده محلول در آب را می‌توان با تحلیل سم یا محلول دیگر در نرم‌افزار EPANET بررسی نمود. در افزودن ماده سمی به شبکه می‌بایست دو مورد در نظر گرفته شود. اولاً به میزانی از این ماده افزوده شود که موجب

بیماری و مسمومیت به هنگام تحویل به نزدیک‌ترین مصرف کننده را داشته باشد و ثانیاً باید به مقدار کافی سم به آب تزریق شود تا از اثر مسمومیت و بیماری‌زا بودن در مرزهای منطقه و یا دورترین فواصل اطمینان حاصل کنیم. از طرفی، سم تزریق شده در آب آشامیدنی بایستی به مقدار کافی زیاد باشد تا موجب بیماری و مسمومیت شود و از طرف دیگر آنقدر کم باشد تا بو و طعم آب عوض نشود (۲۵). در پژوهش حاضر، آرسنیک به عنوان یکی از آلودگی‌های رایج، سمی و سرطان‌زا برای مدل‌سازی تزریق آلودگی به شبکه توزیع آب انتخاب شد، چرا که مقدار بسیار کم آن موجب ایجاد شرایط بحرانی در مصرف‌کنندگان می‌شود. به همین جهت، سازمان بهداشت جهانی وجود حداکثر  $0.1 \text{ mg/L}$  آرسنیک را در آب شرب مجاز اعلام کرده است (۲۶). شکل ۱ نقاط تزریق آلودگی در شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ شهر تهران را نشان می‌دهد.

– تحلیل کیفی آلودگی در شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ شهر تهران

سناریوهای مختلف به ازای تزریق آلودگی در ساعات تصادفی بین ۱۸ الی ۶ صبح روز بعد در دو نقطه (Injection Points) از شبکه توزیع با ۲۰۰۰ مرتبه تکرار توسط برنامه نوشته شده در محیط R انجام و نتایج آن بصورت فایل متنی در کامپیوتر ذخیره می‌شود. دلیل تزریق آلودگی در ساعات اشاره شده، تاریک بودن هوا و در نتیجه انجام آسان‌تر حملات تروریستی است. انتخاب محل تزریق آلودگی، غلظت آلودگی و همچنین زمان آلودگی کاملاً تصادفی بوده و توسط برنامه نوشته شده تحت زبان برنامه‌نویسی R انجام می‌شود. پس از انتخاب محل، غلظت و زمان تزریق در یک سناریو، نرم‌افزار R با فراخوانی تحلیلگر EPANET، تحلیل هیدرولیکی و کیفی را برای زمان‌های مختلف انجام داده و به منظور تهیه سناریوهای متعدد تزریق آلودگی و تعیین گستره آلودگی، نتایج را بصورت فایل تکست درون هارد کامپیوتر ذخیره می‌کند. این فرایند ۲۰۰۰ مرتبه برای تهیه سناریوهای متفاوت و تصادفی توسط برنامه R انجام می‌شود.



شكل ۱- نقاط تزریق آلودگی در شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ شهر تهران

در ساعات مختلف و در نقاط مختلف شبکه توزیع آب با استفاده از بردار وزن‌های خروجی SOM صورت می‌گیرد. در بخش آموزش شبکه عصبی SOM، داده‌های چند بعدی ورودی ابتدا به وسیله کسر از میانگین و تقسیم بر انحراف از معیار استاندارد می‌شود. برای شروع، به نرون‌های لایه خروجی مقادیر تصادفی استاندارد شده ورودی به صورت تصادفی سپس یک بردار استاندارد شده ورودی به صورت تصادفی انتخاب شده و به هر یک از نرون‌های SOM معرفی می‌شود. این عمل به منظور مقایسه و شناسایی بردار وزنی که بیشترین شباهت را با بردار ورودی دارد صورت می‌پذیرد. این شناسایی با استفاده از فاصله اقلیدسی مطابق معادله ۳ انجام می‌گیرد (۱۵).

$$D_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n m_j (x_j - w_{ij})^2}; i = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

در معادله ۳ پارامتر  $D_i$  فاصله اقلیدسی بین بردار ورودی و بردار وزن  $i$ ، مولفه  $X_j$  مولفه  $j$ ام از بردار ورودی موجود،  $w_{ij}$  مولفه  $j$ ام بردار وزن و  $n$  بعد بردار ورودی است. پارامتر  $m_j$  که به آن نقاب نیز گفته می‌شود، در صورت وجود داده برابر با یک و در صورت نبود داده برابر با صفر است.

نرونی که بردار آن بیشترین مطابقت یا شباهت را با بردار داده‌های ورودی دارد (یعنی زمانی که  $D_i$  کمترین حالت ممکن شود) به عنوان گره مورد نظر برگزیده خواهد شد که به آن بهترین واحد انطباق یافته (Best Matching Unit (BMU)) نیز گفته می‌شود. بردارهای وزن گره برگزیده و نرون‌های اطراف آن برای انطباق با داده‌های ورودی به کمک معادله ۴ تعدیل می‌شوند که این عمل باعث انطباق بیشتر بردارهای وزن با بردار ورودی خواهد شد (۱۶).

$$W_i(t+1) = W_i(t) + \alpha(t)h_{ci}(t)[x(t) - w_i(t)] \quad (4)$$

در معادله ۴ پارامتر  $t$  نشان دهنده زمان،  $\alpha(t)$  نرخ یادگیری در زمان  $t$ ،  $h_{ci}(t)$  مرکز تابع همسایگی در واحد برگزیده  $c$  و زمان  $t$  است.

فرایند مقایسه و تنظیم تا زمانی که به تعداد تکرار منطقی

مدل‌سازی شبکه عصبی غیر نظارت شونده ویژگی خود سامان (SOM)

مدل‌سازی شبکه عصبی غیر نظارت شونده ویژگی خود سامان توسط جعبه ابزار SOM در محیط نرم‌افزار متلب (MATLAB) انجام می‌گیرد. این جعبه ابزار توسط آزمایشگاه اطلاعات و علوم کامپیوتر در دانشگاه هلسینکی (Helsinki University of Technology) گسترش یافته است (۱۷، ۱۹). آموزش شبکه عصبی براساس ارتباطات چند متغیره موجود بین اطلاعات ورودی انجام می‌شود و در نهایت عملکرد SOM از طریق ضریب همبستگی ( $R^2$ ) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

قبل از آموزش شبکه عصبی و با توجه به اینکه داده‌های ورودی شامل غلظت آلودگی در زمان‌ها و مکان‌های مختلف، دارای واحدها و بزرگی‌های متفاوتی نسبت به یکدیگر هستند، با کسر از میانگین و تقسیم بر انحراف معیار به مقادیر نرمال استاندارد تبدیل می‌شوند. در ادامه تعداد بهینه واحدهای نقشه خروجی نگاشت خود سامان با استفاده از معادلات (۱ و ۲) بدست می‌آید (۱۸، ۲۷).

$$M = 5\sqrt{N} \quad (1)$$

در معادله ۱ پارامتر  $N$  تعداد نمونه‌ها در مجموعه داده‌ها است. با مشخص شدن  $M$ ، می‌توان تعداد ردیف‌ها و ستون‌های شبکه SOM را محاسبه نمود. برای محاسبه ابعاد  $M$ ، از معادله ۲ استفاده می‌شود.

$$\frac{L1}{L2} = \sqrt{\frac{e1}{e2}} \quad (2)$$

در معادله ۲ پارامترهای  $L_1$  و  $L_2$  به ترتیب نشان دهنده تعداد ردیف‌ها و ستون‌ها هستند.  $e_1$  بزرگ‌ترین مقدار ویژه مجموعه داده‌های آموزشی و  $e_2$  دومین مقدار ویژه بزرگ است.

سپس یادگیری شبکه عصبی انجام می‌شود و نرونی که بردار آن بیشترین مطابقت یا شباهت را با بردار داده‌های ورودی دارد، به عنوان گره مورد نظر برگزیده و یا بهترین واحد انطباق یافته، انتخاب می‌شود. بعد از آموزش SOM و به دست آمدن وزن‌های نهایی، پیش‌بینی گستره آلودگی

ولیعصر بر روی ۲۱ m و فشارشکن دانشگاه بر روی ۲۲ m تنظیم شده است، فشار حداقل در این زون در شرایط حداکثر مصرف در نزدیک فشارشکن ولیعصر (ضلع شمالی پارک دانشجو) و همچنین تقاطع خیابان‌های کارگر جنوبی و جمهوری اسلامی تا ۱۳ m کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به شرایط بهره‌برداری، فشار حداقل ۲۶ m در این زون فشاری محقق نمی‌شود. شکل ۲-الف فشار نقاط مختلف در محدوده زون فشاری شماره ۱ را در زمان حداکثر مصرف نشان می‌دهد. همچنین با توجه به اختلاف ارتفاع ۳۱ m بالاترین و پایین‌ترین نقطه این زون فشاری و تنظیم فشار خروجی فشارشکن‌های این زون (جدول ۱)، فشار حداکثر تا ۵۰ m افزایش خواهد یافت.

– زون فشاری شماره ۲

مبادی ورودی آب به این زون فشاری از دو نقطه و از طریق فشارشکن‌های الوند و پاستور است. فشارشکن‌های مذکور به ترتیب از فشارشکن‌های کالج و چهارراه ولیعصر آگیری می‌نمایند و سطح دوم فشاری را تشکیل می‌دهند. تراز ارتفاعی نقاط مصرف در این زون فشاری از ۱۱۳۵ m تا ۱۱۶۷ m متغیر است. با توجه به آنکه میانگین فشار خروجی فشارشکن‌های ورودی آب بر روی ۲۲ m تنظیم شده است، فشار حداقل در این زون در شرایط حداکثر مصرف در حوالی کوچه خورشیدی (تقاطع خیابان ۱۲ فروردین و امام خمینی) تا ۱۱ m نیز کاهش می‌یابد. علت اصلی این موضوع، وجود مشترکین پرمصرف است. بنابراین با توجه به شرایط بهره‌برداری، فشار حداقل ۲۶ m در این زون فشاری محقق نمی‌شود. شکل ۲-ب فشار نقاط مختلف در محدوده زون ۲ را در حالت حداکثر مصرف نشان می‌دهد. همچنین با توجه به اختلاف ارتفاع ۳۲ m بالاترین و پایین‌ترین نقطه این زون فشاری و تنظیم فشار خروجی فشارشکن‌های این زون (جدول ۱) فشار حداکثر تا ۴۸ m افزایش خواهد یافت.

– زون فشاری شماره ۳

مبادی ورودی آب به این زون فشاری از دو نقطه و از طریق فشارشکن‌های فرهنگ-وحدت اسلامی و فرهنگ-ولیعصر

(بهینه) یا خطایی برسد، ادامه خواهد یافت. کیفیت آموزش SOM به وسیله خطای تدریجی میانگین کل (Total Average Quantization Error) و خطای توپوگرافیک کلی (Total Topographic Error) به ترتیب براساس معادلات ۵ و ۶ سنجیده می‌شود (۱۷).

$$q_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|X_i - W_c\| \quad (5)$$

در معادله ۵ پارامتر  $q_e$  نشان دهنده خطای تدریجی،  $X_i$  داده بردار ورودی و  $W_c$  نمونه اولیه بردار بهترین واحد انطباق یافته برای  $X_i$  است.

$$t_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u(X_i) \quad (6)$$

در معادله ۶ پارامتر  $u_i(\cdot)$  عدد صحیح دودویی است (Binary)، به گونه‌ای که اگر اولین و دومین واحد انطباق یافته برای  $X_i$  به هم نزدیک نباشند، مقدار آن برابر با یک است و در غیر این صورت مقدار صفر را می‌پذیرد.

کارایی مدل در مراحل آموزش و اعتبارسنجی با استفاده از معیار آماری  $R^2$  مورد بررسی قرار می‌گیرد. در معادلات رگرسیونی بیانگر میزان احتمال همبستگی میان دو دسته داده در آینده است. این ضریب در واقع نتایج تقریبی پارامتر مورد نظر در آینده را براساس مدل تعریف شده که منطبق بر داده‌های موجود است، بیان می‌دارد (۲۰).

## یافته‌ها

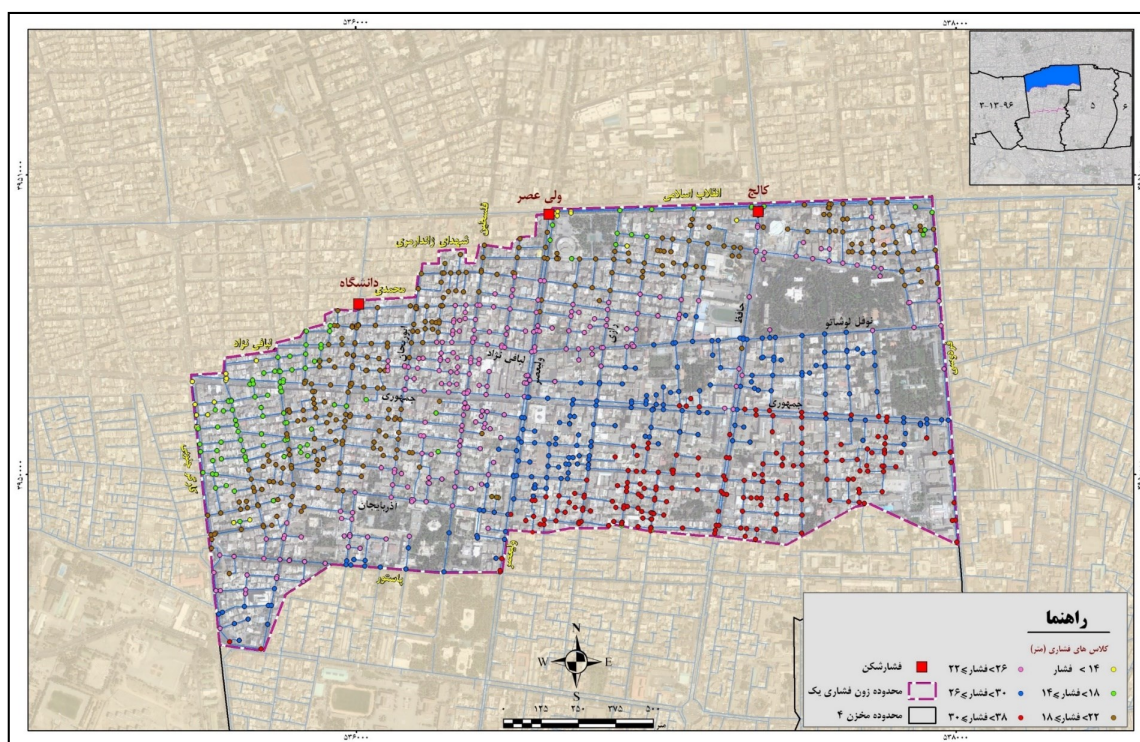
– تحلیل مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ تهران

– زون فشاری شماره ۱

مبادی ورودی آب به این زون فشاری از سه نقطه و از طریق فشارشکن‌های کالج، چهارراه ولیعصر و دانشگاه است. فشارشکن‌های مذکور مستقیماً از کلکتور انقلاب آگیری می‌نمایند و سطح اول فشاری را تشکیل می‌دهند. تراز ارتفاعی نقاط مصرف در این زون فشاری از ۱۱۶۰ m تا ۱۱۹۱ m متغیر است. با توجه به آنکه در وضعیت کنونی میانگین فشار خروجی فشارشکن‌های کالج و

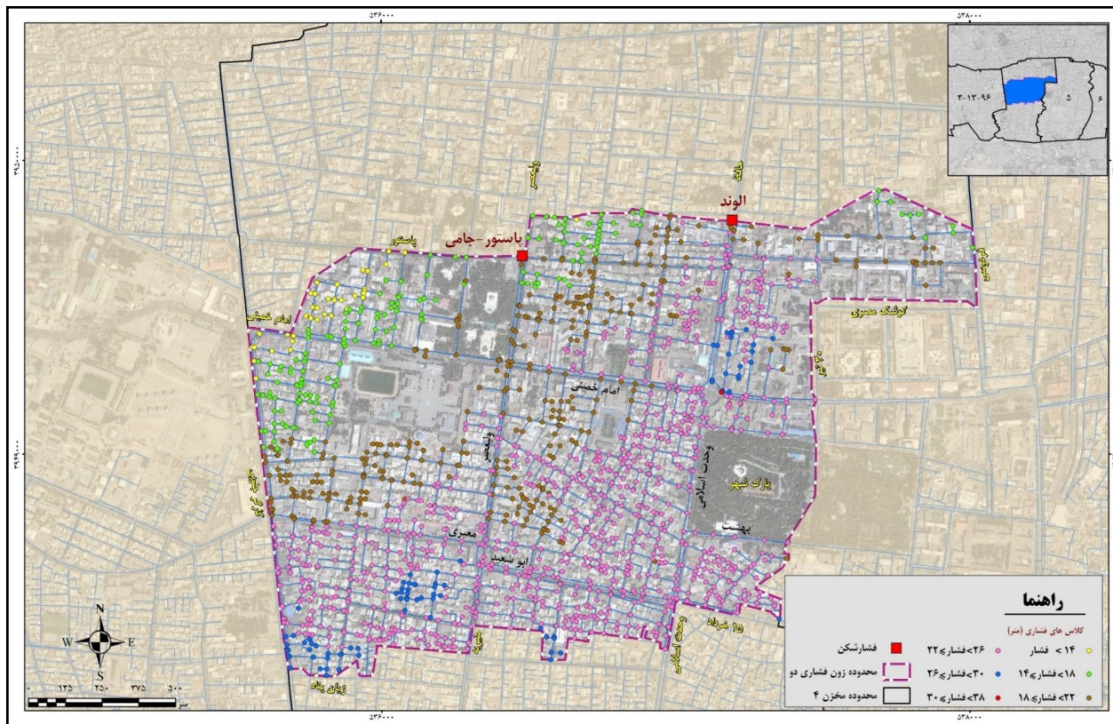
را در حالت حداکثر مصرف نشان می‌دهد. همچنین با توجه به اختلاف ارتفاع  $27\text{ m}$  بالاترین و پایین‌ترین نقطه این زون فشاری و تنظیم فشار خروجی فشارشکن‌های این زون (جدول ۱)، فشار حداکثر تا  $33\text{ m}$  افزایش خواهد یافت. بررسی فشار خروجی شیر فشارشکن فرهنگ-وحدت اسلامی نشان می‌دهد که با افزایش مصارف در زمان پیک مصرف، فشار ورودی شیر فشارشکن مذکور کمتر از مقدار مجاز می‌شود. با توجه به افت فشار ایجاد شده در شیر فشارشکن، این مساله باعث عدم تامین فشار تنظیمی در خروجی شیر فشارشکن می‌شود؛ به عبارت دیگر عملکرد شیر فشارشکن فرهنگ در خیابان وحدت اسلامی، دچار اختلال می‌شود.

است. فشارشکن‌های مذکور به ترتیب از فشارشکن‌های الوند و پاستور آگیری می‌نمایند و سطح سوم فشاری را تشکیل می‌دهند. تراز ارتفاعی نقاط مصرف در این زون فشاری از  $1114\text{ m}$  تا  $1141\text{ m}$  متغیر است. با توجه به آنکه میانگین فشار خروجی فشارشکن فرهنگ (خیابان وحدت اسلامی) روی  $21\text{ m}$  و فشارشکن فرهنگ (خیابان ولیعصر) روی  $19\text{ m}$  تنظیم شده است، فشار حداقل در این زون در شرایط حداکثر مصرف در ابتدای زون فشاری تا  $13\text{ m}$  کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به شرایط بهره‌برداری، فشار حداقل  $26\text{ m}$  در این زون فشاری محقق نمی‌شود. شکل ۲-ج فشار نقاط مختلف در محدوده زون ۳

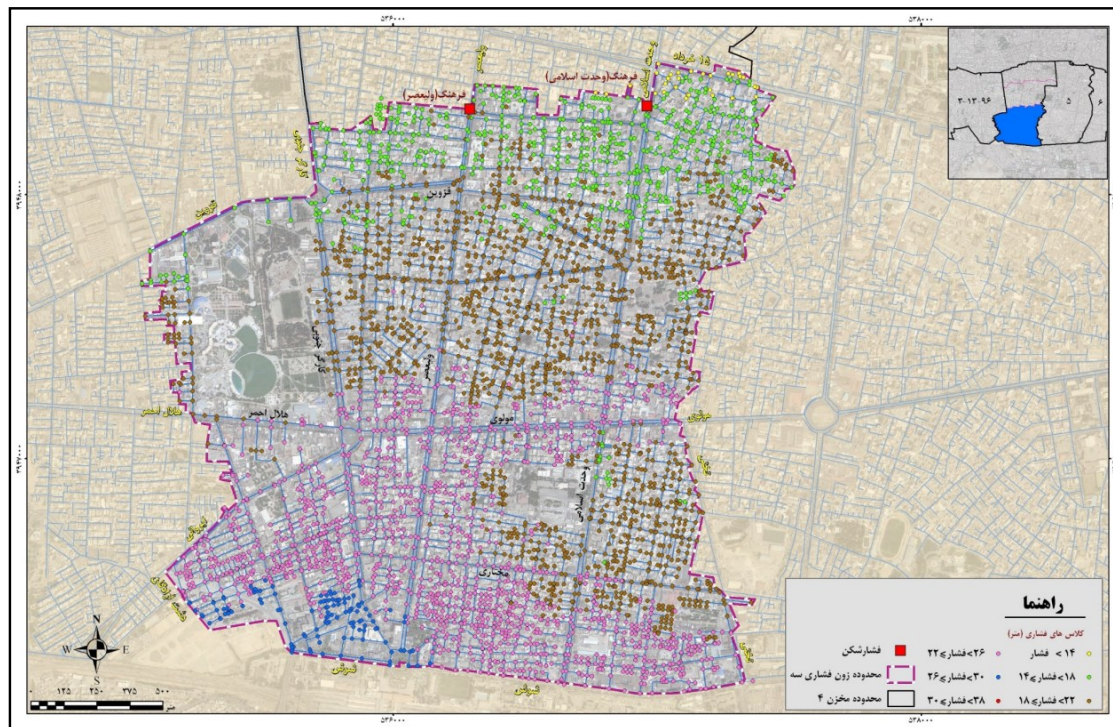


(الف)

شکل ۲- توزیع فشار در زمان حداکثر مصرف ساعتی در شبکه توزیع آب (الف: زون ۱؛ ب: زون ۲؛ ج: زون ۳) تحت پوشش مخزن ۴ تهران



(ب)



(ج)

ادامه شکل ۲- توزیع فشار در زمان حداکثر مصرف ساعتی در شبکه توزیع آب (الف: زون ۱؛ ب: زون ۲؛ ج: زون ۳) تحت پوشش مخزن ۴ تهران

EPANET نشان می‌دهد. نقاط کوچک‌تر نشان دهنده نقاط مصرف و نقاط بزرگ‌تر نشان دهنده مصارف بیشتر است. همچنین ضخامت خطوط لوله، نشان دهنده سرعت آب در خطوط لوله است.

تحلیل تزریق آلودگی در نقاط مختلف شبکه توزیع آب محدوده مخزن ۴  
 شکل ۳ شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ را در محیط



شکل ۳- مدل هیدرولیکی شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ در محیط EPANET

مدل برای محل تزریق آلودگی در نقطه شماره ۸۱۸۷۸، غلظت آرسنیک حدود  $0.08 \text{ ppm}$  را در ساعت ۲۴ محاسبه می‌کند. به عبارت دیگر پس از تزریق آلودگی در ساعت ۲۳ در نقطه ۸۲۱۵ با غلظت  $0.79 \text{ ppm}$ ، در نقطه شماره ۸۱۸۷۸ غلظت آرسنیک مشاهده شده معادل  $0.08 \text{ ppm}$  است.

نمایش گرافیکی محاسبات انجام شده و نمودار غلظت آلودگی در ساعات مختلف در گره‌های مدل، برای یک سناریو در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل مذکور به علت تعدد نقاط شبکه (بزرگ بودن شبکه توزیع آب مخزن ۴)، به صورت محدود تنها تعداد ۹۰ نقطه از شبکه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود،



شکل ۴- نمودار تزریق آلودگی برای ۹۰ نقطه شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴ در ۲۴ ساعت شبانه روز

و شماره نقاط تزریق آلودگی است. لازم به ذکر است که غلظت آلودگی در همه نقاط قرائت می‌شود. بدین ترتیب نه متغیر (به صورت ستونی) تشکیل شد. هر نقطه از شبکه که آلودگی در آن مشاهده شده است، یک بردار ورودی منفرد را (به صورت ردیف) تشکیل می‌دهد. پارامترهای ورودی عبارتند از شماره شناسه برای نقطه تزریق آلودگی، غلظت و زمان تزریق در نقاط تزریق آلودگی و نقطه مشاهداتی. جدول ۲ پنج سطر ابتدایی پارامترهای ورودی مدل SOM را نشان می‌دهد.

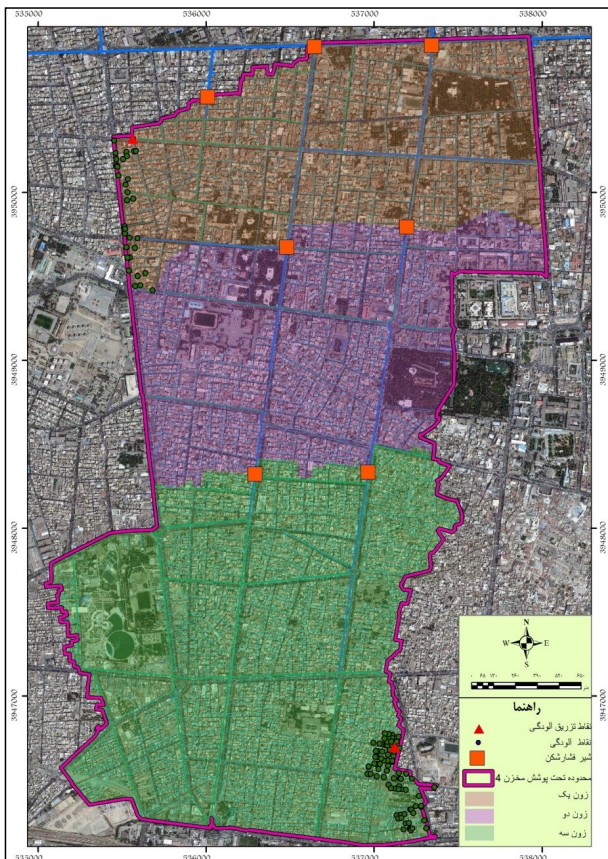
بررسی نتایج شبکه عصبی غیر نظارت شونده ویژگی خود سامان (SOM) پس از اجرای مدل‌سازی کیفی شبکه توزیع آب با استفاده از تحلیلگر EPANET در محیط برنامه‌نویسی R، نتایج سناریوهای مختلف به صورت فایل متنی (Text File) ذخیره و سپس داده‌ها به صورت ستونی مرتب شدند. هر ستون شامل شماره نقاط شبکه توزیع که آلودگی در آنها مشاهده شده است به همراه زمان آن، غلظت اولیه آلودگی تزریق شده، زمان تزریق

جدول ۲- پارامترهای ورودی مدل SOM (پنج سطر اول)

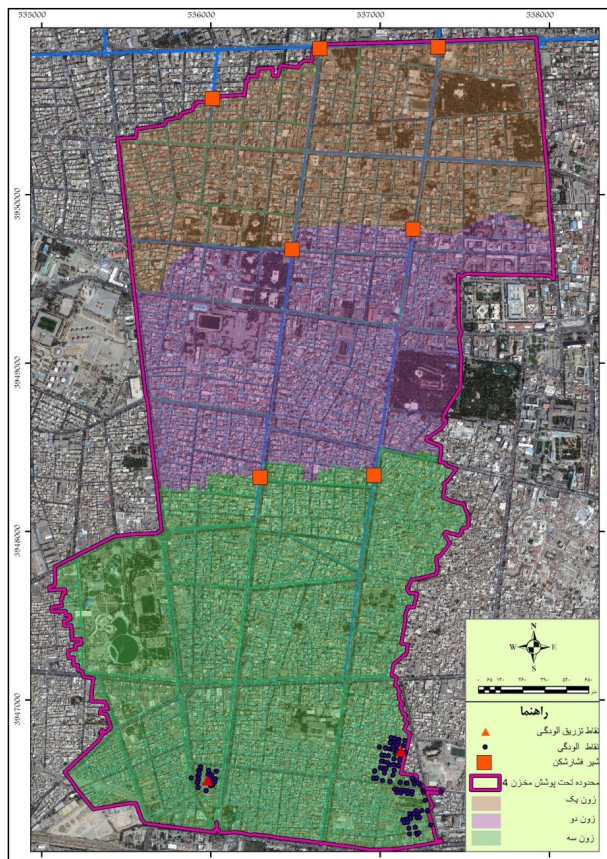
شناسه	آرسنیک (ppm)	زمان (s)	شناسه ۱	شناسه ۲	غلظت ۱ (ppm)	غلظت ۲ (ppm)	ساعت ۱	ساعت ۲
۶۷۸۷۴	۰/۷۳	۶۸۴۰۰	۶۷۰۰۱	۶۷۸۷۴	۰/۲۰۲	۰/۸۷۹	۲۲	۱۸
۶۷۸۷۵	۰/۷۳	۶۸۴۰۰	۶۷۰۰۱	۶۷۸۷۴	۰/۲۰۲	۰/۸۷۹	۲۲	۱۸
۶۸۷۲۶	۰/۲۸	۶۸۴۰۰	۶۷۰۰۱	۶۷۸۷۴	۰/۲۰۲	۰/۸۷۹	۲۲	۱۸
۶۸۷۲۷	۰/۷۳	۶۸۴۰۰	۶۷۰۰۱	۶۷۸۷۴	۰/۲۰۲	۰/۸۷۹	۲۲	۱۸
۷۰۶۰۲	۰/۲۱	۶۸۴۰۰	۶۷۰۰۱	۶۷۸۷۴	۰/۲۰۲	۰/۸۷۹	۲۲	۱۸

آلودگی در یک نقطه مشخص با گذشت زمان کاهش یافته و میان زمان و غلظت، همبستگی بالایی وجود دارد. همچنین، گستره آلودگی وابسته به میزان مصرف مشترکین و به تبع آن، ساعت تزریق آلودگی است. به عبارت دیگر، هر چه زمان تزریق آلودگی به شبکه توزیع آب نزدیک به زمان پیک مصرف آب باشد، مشترکین نزدیک محل تزریق، آب آلوده بیشتری را مصرف می‌کنند که خود موجب کاهش گستره آلودگی می‌شود. برعکس این موضوع نیز صادق است. از نقطه نظر دیگر، نوع کاربری مشترکین نیز اهمیت زیادی در تعیین گستره آلودگی دارد. به عنوان مثال در صورتی که مشترکین یک محدوده تجاری باشند و در زمان تزریق آلودگی (شب) تعطیل باشند، گستره آلودگی افزایش می‌یابد.

شکل ۵-الف یک سناریو را نشان می‌دهد که در دو نقطه از شبکه در ساعات ۵ و ۱۹ مقادیر  $0.85$  ppm و  $0.21$  ppm آرسنیک به شبکه تزریق شده است. نقاط قرمز رنگ گستره آلودگی شبکه توزیع را نشان می‌دهد که به میزان ۹۱ درصد با گستره آلودگی مشاهداتی (محاسبه شده توسط مدل کیفی) تطابق دارد. علت آنکه تزریق سم در نقطه سمت چپ شبکه، گستره کمتری را آلوده کرده است، مصارف بیشتر مشترکین در آن منطقه و غلظت کمتر تزریق آلودگی در آن نقطه بوده که به تبع آن گسترش کمتر آلودگی در آن منطقه قابل مشاهده است. شکل ۵-ب سناریوی دیگری را نشان می‌دهد که در دو نقطه از شبکه در ساعات ۱ و ۱۹ مقادیر  $0.21$  ppm و  $0.85$  ppm آرسنیک به شبکه تزریق شده است. مطابق یافته‌های تحقیق، میزان غلظت



(ب)



(الف)

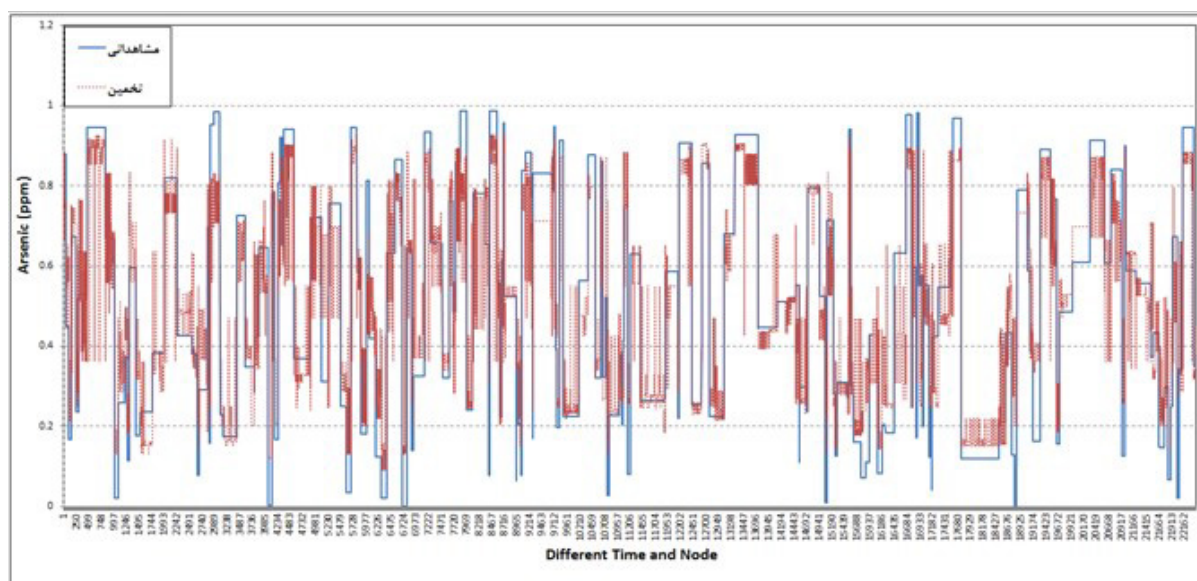
شکل ۵- نتایج مدل شبکه عصبی برای دو سناریوی تزریق آلودگی در شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴

### بحث

در نرم افزار Excel، میان داده‌های غلظت آلودگی محاسباتی توسط مدل EPENET و مقادیر پیش‌بینی توسط شبکه عصبی محاسبه شد.

همچنین به منظور بررسی بصری نتایج شبکه عصبی شکل ۶ ترسیم شد. شکل ۶ گستره آلودگی در مکان‌های مختلف شبکه توزیع آب در ۲۲۳۹۸ نقطه و زمان مختلف که توسط مدل هوش مصنوعی پیش‌بینی شده را در کنار گستره آلودگی محاسبه شده توسط مدل کیفی (مشاهداتی) نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶، مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی به یکدیگر نزدیک هستند که این موضوع تایید کننده نتایج مدل شبکه عصبی است.

کیفیت آموزش SOM به وسیله خطای تدریجی میانگین کل و خطای توپوگرافیک کل و با استفاده از معادلات (۵) و (۶) سنجیده شد و مقادیر نهایی آنها به ترتیب برابر با ۱/۰۱ و ۰/۰۷ به دست آمد. همچنین عملکرد SOM با استفاده از ضریب همبستگی مقادیر ورودی و خروجی مدل، معادل ۹۱ درصد به دست آمد. این ضریب در واقع نتایج پارامتر غلظت آلودگی در آینده را براساس مدل تعریف شده که منطبق بر داده‌های مدل کیفی است، بیان می‌دارد. به عبارت دیگر اگر خط رگرسیون از تمام نقاط بگذرد، معرف توانایی زیاد مدل شبکه عصبی و هرچه از نقاط دورتر باشد نشان دهنده توانایی کمتر است. ضریب همبستگی در این تحقیق با استفاده از دستور CORREL



شکل ۶- مقایسه مقادیر آلودگی پیش‌بینی شده و مشاهداتی در ۲۲۳۹۸ نقطه شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن ۴

می‌دهد (۲۸). نتایج نشان داد که تکنیک نگاشت خود سامانده ابزار قدرتمندی برای پیدا کردن پیش‌بینی گستره آلودگی است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، توانایی SOM در پیش‌بینی غلظت سم آرسنیک در نقاط مختلف شبکه طی زمان‌های مختلف، رضایت‌بخش است؛ لذا از قابلیت مدل‌سازی SOM می‌توان در پیش‌بینی نقاط آلودگی نقاط مختلف شبکه توزیع آب استفاده نمود.

در مطالعه مشابه صورت گرفته، Khalili و همکاران (۲۰۲۱) به تشخیص و شناسایی آلودگی در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. نگارندگان برای حل مسئله و پیدا کردن مکان و زمان آلودگی، از یک رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده کردند که در آن نرم‌افزار شبیه‌سازی شبکه‌های آب تحت فشار EPANET به عنوان شبیه‌ساز و الگوریتم ژنتیک به عنوان بهینه‌ساز به کار رفته است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل ارائه شده برای شبکه توزیع آب در حدس مکان ورود آلودگی، زمان شروع تزریق و گستره آلودگی بسیار توانمند بوده و کاملاً دقیق عمل می‌کند. غلظت‌های برآورد شده توسط بهینه‌ساز اختلاف کمی با مقدار مورد نظر  $50 \text{ mg/L}$  دارند و انحراف از معیار این

نگاشت خود سامانده نه تنها از تعداد بسیار زیاد داده پشتیبانی می‌کند، بلکه نسبت زیاد نقص در داده‌های ورودی برای آن مشکل‌ساز نیست و با سرعت بالا، با ایجاد روابط غیرخطی میان داده‌های ورودی موجب تخمین واقعی نقاط آلوده می‌شود (۲۰). با وجود سرعت در محاسبات شبکه عصبی نگاشت ویژگی خود سامان، در این تحقیق مشخص شد که این توانایی نگاشت‌های خود سامانده به علت عدم انجام مجدد تحلیل هیدرولیکی و کیفی شبکه توزیع آب است. در عمل، شبکه عصبی مصنوعی به کار رفته در تحقیق حاضر، با استفاده از نتایج تحلیل‌های قبلی به عنوان ورودی و با استفاده از تاثیر همبستگی بین داده‌ها، گستره آلودگی را پیش‌بینی می‌کند. توانایی SOM کاملاً تحت تاثیر همبستگی داده‌ها قرار دارد؛ بدین معنی که هر چه همبستگی داده‌های ورودی مدل بیشتر باشد، الگوریتم نگاشت‌های خود سامانده توانایی بیشتری در شناخت روابط خطی و غیرخطی بین داده‌ها از خود نشان می‌دهد. در واقع روش نگاشت ویژگی خود سامان، از متغیرهای مستقل و وابسته همزمان به عنوان ورودی استفاده می‌کند و هر چه همبستگی (منفی و یا مثبت) میان متغیرهای ورودی بیشتر باشد، الگوریتم آموزش شبکه عصبی بهتر عمل کرده و نتایج نزدیک به واقعیت

تهران صورت گرفت. سناریوسازی احتمالی تزریق آلودگی برای سم آرسنیک در نقاط مختلف شبکه توزیع آب با استفاده از تحلیل کیفی شبکه با کاربرد موتور تحلیلیگر EPANET و کدنویسی در محیط نرم افزار R انجام شد. به منظور تسریع در انجام تحلیل کیفی و یافتن گستره آلودگی به ازای تزریق آرسنیک در زمان‌ها و مکان‌های مختلف در شبکه توزیع، از خروجی مدل کیفی به عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی SOM استفاده شد. نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی نشان داد روش توسعه یافته در این تحقیق به میزان ۹۱ درصد با واقعیت تطابق دارد و با سرعت به مراتب بیشتری گستره آلودگی شبکه توزیع آب را مشخص می‌کند. در حالت کلی SOM ابزار بسیار قدرتمندی جهت پیش‌بینی تعداد زیادی متغیر و با حجم اطلاعات زیاد است؛ اگر چه کیفیت این پیش‌بینی به همبستگی داده‌ها بستگی دارد. همچنین این تحقیق نشان داد که قابلیت SOM در مورد پیش‌بینی گستره آلودگی در شبکه توزیع آب، محدودیتی از لحاظ زمانی ندارد و پس از آموزش شبکه عصبی با استفاده از داده‌های حاصل از مدل‌سازی هیدرولیکی و کیفی، امکان استفاده از شبکه آموزش یافته، بدون فوت وقت و کوتاه‌ترین زمان ممکنه وجود دارد. به عبارت دیگر بدون نیاز به انجام محاسبات پیچیده هیدرولیکی و کیفی، شناسایی گستره آلودگی به آسانی میسر است. با توجه به نتایج پژوهش حاضر، می‌توان از روش نگاشت ویژگی خود سامان در شبکه‌های توزیع آب مناطق حساس در مقیاس بزرگ‌تر استفاده کرد. از سوی دیگر توصیه می‌شود که از روش‌های دیگر هوش مصنوعی در پیش‌بینی گستره آلودگی استفاده و نتایج آن با روش مورد استفاده در این مطالعه مورد مقایسه قرار گیرد.

### ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل (بخشی از) پایان‌نامه با عنوان "تکنیک نگاشت

غلظت‌ها به ترتیب ۶/۶ و ۵/۱ درصد است (۲۹). در پژوهش دیگر Hu و همکاران (۲۰۱۵) الگوریتم ژنتیک طاقچه‌ای موازی مبتنی بر کاهش نقشه را برای پیدا کردن مکان ورود آلودگی در شبکه توزیع آب شهری به کار بردند. یافته‌ها مشخص کرد که مدل استفاده شده نه تنها قادر به دستیابی به دقت زیادی در شناسایی منبع آلودگی است، بلکه قادر به جستجوی محدوده منبع آلودگی برای بهبود عملکرد نیز هست. ضریب اطمینان این مدل با کاربرد روش خوشه‌بندی سرور برابر با هشت به دست آمد که نشان از کارایی و عملکرد بالای آن دارد (۸). همچنین Alfonso و همکاران (۲۰۱۰) تحقیقی را با هدف تشخیص آلودگی ماده شیمیایی در شبکه توزیع آب شهری و با تجمیع الگوریتم ژنتیک و EPANET انجام دادند. در تحقیق مذکور، مدل‌سازی برای دو شبکه شامل یک شبکه فرضی و دیگری شبکه توزیع آب شهر Villavicencio در کلمبیا صورت گرفت. نتایج حاکی از این بوده که مدل پیشنهادی می‌تواند از ابزارهای تصمیم‌گیری مفید برای کاهش اثرات آلودگی آب بر بهداشت عمومی باشد؛ چرا که الگوریتم ارائه شده قادر به تخمین مکان و غلظت ورود آلودگی بوده است (۳۰). از سوی دیگر، Najafi و همکار (۲۰۱۵) مدیریت پیامدهای حملات شیمیایی به شبکه‌های توزیع آب شهری را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها و با در نظر گرفتن دو هدف اصلی کمینه کردن تعداد گره‌های آلوده و کمینه کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی، مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های حاصل از حل مدل توسط الگوریتم جامعه مورچه‌ها، کارآمدی استفاده از این نوع الگوریتم‌های فراکاوشی در مدل‌سازی تزریق آلودگی به شبکه توزیع آب را نشان داد. نقش اساسی استفاده از پمپ‌ها در مدیریت ناشی از این گونه حملات به عنوان یکی از نتایج مهم این تحقیق مطرح شد (۳۱).

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به منظور بررسی کارایی نگاشت ویژگی خود سامان (SOM) به عنوان یک روش شبکه عصبی مصنوعی غیر نظارت شونده در تعیین گستره آلودگی شبکه توزیع آب، مدل‌سازی شبکه توزیع آب تحت پوشش مخزن شماره ۴ شهر

با حمایت پردیس بین‌المللی ارس دانشگاه تهران اجرا شده است.

خودسامان در تشخیص گستره آلودگی تعددی در شبکه توزیع آب شهری" در مقطع دکتری در سال ۱۴۰۱ است که

## References

1. Hooshmand F, Amerehi F, MirHassani S. Logic-based benders decomposition algorithm for contamination detection problem in water networks. *Computers & Operations Research*. 2020;115:104840.
2. Vrachimis SG, Lifshitz R, Eliades DG, Polycarpou MM, Ostfeld A. Active contamination detection in water-distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2020;146(4):04020014.
3. Sheykhali M, Asadollahfardi GR, Emamzadeh SS. Evaluation of the vulnerability of water supply facilities using the AHP and RAMCAP combined methods. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2020;52(5):1205-20 (in Persian).
4. Zafari N, Masoumi F, Nikoo MR. Development of multi-period response management model to suddenly contaminated urban water distribution networks. *Journal of Water and Wastewater*. 2020;31(5):25-40 (in Persian).
5. Xuesong Y, Jie S, Chengyu H. Research on contaminant sources identification of uncertainty water demand using genetic algorithm. *Cluster Computing*. 2017;20(2):1007-16.
6. Ciaponi C, Creaco E, Di Nardo A, Di Natale M, Giudicianni C, Musmarra D, et al. Reducing impacts of contamination in water distribution networks: a combined strategy based on network partitioning and installation of water quality sensors. *Water*. 2019;11(6):1315.
7. Shafiei S, Nasirian A, Nasirpour H. Optimization of water quality sensors placement in water distribution networks to detect contamination entrance from several nodes, simultaneously. *Irrigation and Water Engineering*. 2020;11(1):286-304 (in Persian).
8. Hu C, Zhao J, Yan X, Zeng D, Guo S. A MapReduce based Parallel Niche Genetic Algorithm for contaminant source identification in water distribution network. *Ad Hoc Networks*. 2015;35:116-26.
9. Bazargan-Lari MR. Real-time response to contamination emergencies of urban water networks. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2018;42(1):73-83 (in Persian).
10. Chang N-B, Prapinpongsonone N, Ernest A. Optimal sensor deployment in a large-scale complex drinking water network: Comparisons between a rule-based decision support system and optimization models. *Computers & Chemical Engineering*. 2012;43:191-99.
11. Khorshidi MS, Nikoo MR, Ebrahimi E, Sadegh M. A robust decision support leader-follower framework for design of contamination warning system in water distribution network. *Journal of cleaner production*. 2019;214:666-73.
12. Perelman L, Ostfeld A. Water-distribution systems simplifications through clustering. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2012;138(3):218-29.
13. Geranmehr M, Yousefi-Khoroaem M. Optimal quality sensor placement in water distribution networks under temporal and spatial uncertain contamination. *Journal of Water and Wastewater*. 2020;31(4):143-55 (in Persian).
14. Naserizadeh Ghamsari S, Montaseri H, Parvinnia M, Nikoo M. Optimal placement of contaminant detection sensors in water distribution systems considering conflicts of stakeholders. *Iranian Water Researches Journal*. 2019;13:137-46 (in Persian).
15. Lee K-J, Yun S-T, Yu S, Kim K-H, Lee J-H, Lee S-H. The combined use of self-organizing map technique and fuzzy c-means clustering to evaluate urban groundwater quality in Seoul metropolitan city, South

- Korea. *Journal of Hydrology*. 2019;569:685-97.
16. Orak E, Akkoyunlu A, Can ZS. Assessment of water quality classes using self-organizing map and fuzzy C-means clustering methods in Ergene River, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020;192(10):1-10.
17. Zhang Y, Liang X, Wang Z, Xu L. A novel approach combining self-organizing map and parallel factor analysis for monitoring water quality of watersheds under non-point source pollution. *Scientific Reports*. 2015;5(1):1-12.
18. Juntunen P, Liukkonen M, Lehtola M, Hiltunen Y. Cluster analysis by self-organizing maps: An application to the modelling of water quality in a treatment process. *Applied Soft Computing*. 2013;13(7):3191-96.
19. Nourani V, Alami MT, Vousoughi FD. Self-organizing map clustering technique for ANN-based spatiotemporal modeling of groundwater quality parameters. *Journal of Hydroinformatics*. 2016;18(2):288-309.
20. Rezaei F, Ahmadzadeh MR, Safavi HR. SOM-DRASTIC: using self-organizing map for evaluating groundwater potential to pollution. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2017;31(8):1941-56.
21. Palleti VR, Narasimhan S, Rengaswamy R, Teja R, Bhallamudi SM. Sensor network design for contaminant detection and identification in water distribution networks. *Computers & Chemical Engineering*. 2016;87:246-56.
22. Tehran Province Water and Wastewater Company. The 2019 Statistical Yearbook of Water and Wastewater Company District 4 of Tehran: Deputy of Planning Management and Human Resources, Tehran Province Water and Wastewater Company; 2019 (in Persian).
23. Saldarriaga J, Páez D, Salcedo C, Cuero P, López LL, León N, et al. A direct approach for the near-optimal design of water distribution networks based on power use. *Water*. 2020;12(4):1037.
24. Yan X, Gong W, Wu Q. Contaminant source identification of water distribution networks using cultural algorithm. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2017;29(24):e4230.
25. Raessler M. The arsenic contamination of drinking and groundwaters in Bangladesh: featuring biogeochemical aspects and implications on public health. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2018;75(1):1-7.
26. Even E, Masuda H, Shibata T, Nojima A, Sakamoto Y, Murasaki Y, et al. Geochemical distribution and fate of arsenic in water and sediments of rivers from the Hokusetsu area, Japan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2017;9:34-47.
27. Li J, Shi Z, Wang G, Liu F. Evaluating spatiotemporal variations of groundwater quality in northeast Beijing by self-organizing map. *Water*. 2020;12(5):1382.
28. Li T, Sun G, Yang C, Liang K, Ma S, Huang L. Using self-organizing map for coastal water quality classification: Towards a better understanding of patterns and processes. *Science of the Total Environment*. 2018;628:1446-59.
29. Khalili S, Tabesh M, Ghaemi E. Determining the contamination source in water distribution networks using genetic algorithm. *Journal of Water and Wastewater*. 2021;32(1):125-35 (in Persian).
30. Alfonso L, Jonoski A, Solomatine D. Multiobjective optimization of operational responses for contaminant flushing in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2010;136(1):48-58.
31. Najafi E, Afshar A. Consequences management of chemical intrusions in urban water distribution networks using the ant colony optimization algorithm. *Journal of Water and Wastewater*. 2013;26(2):82-94 (in Persian).



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



## Self-organizing map neural network application in detecting the extent of intentional pollution in the urban water distribution network

Naser Mehrdadi<sup>1\*</sup>, Davood Vafaei Mehr<sup>2</sup>, Gholamreza Nabi Bidhendi<sup>1</sup>, Hassan Hoveidi<sup>3</sup>

1- Department of Environmental Engineering, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Department of Environmental Engineering, Aras International Campus, University of Tehran, Jolfa, Iran

3- Department of Environmental Planning, Management and Education, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

### ARTICLE INFORMATION:

**Received:** 22 January 2022

**Revised:** 13 April 2022

**Accepted:** 17 April 2022

**Published:** 11 June 2022

### ABSTRACT

**Background and Objective:** Water distribution networks are prone to terrorist attacks by injecting toxic substances, due to their vastness and availability. The main objective of this paper was detecting the extent of intentional pollution in the urban water distribution network by self-organizing map (SOM).

**Materials and Methods:** The existing hydraulic condition of the water distribution network covered by reservoir No. 4 in Tehran was modeled as a pilot. Possible injection scenarios of contamination in different parts of the water distribution network were performed using qualitative analysis of the water distribution network, using the EPANET analyzer engine and coding in R software environment. Artificial neural network of SOM was used to find the contamination range for the injection of arsenic at different times and places in the distribution network.

**Results:** The concentration of contamination at a certain point decreased over time and a high correlation was observed between time and concentration. The extent of contamination depended on the consumption of subscribers and consequently, the time of contaminant injection. The results of the artificial neural network model showed that the method developed in this research was 91% accurate and was able to determine the extent of contamination in the water distribution network at high speed.

**Conclusion:** SOM can be used as a complement to the water quality monitoring and pollution detection system in the urban water distribution network to determine the extent of pollution when detecting potential pollution in the shortest possible time, and as an alternative to quantitative-qualitative modeling of the water network.

**Keywords:** Water distribution network, Hydraulic analysis, Artificial intelligence, Self-organizing map

### \*Corresponding Author:

mehrdadi@ut.ac.ir

Please cite this article as: Mehrdadi N, Vafaei Mehr D, Nabi Bidhendi Gh, Hoveidi H. Self-organizing map neural network application in detecting the extent of intentional pollution in the urban water distribution network. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2022;15(1):17-36.

