

تعیین عوامل مؤثر بر نرخ شکست لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تلفیق شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک

جابر سلطانی^۱

محمود محمد رضا پور طبری^۲

دریافت ۸۹/۱/۲۱ آخرین اصلاحات دریافتی ۹۰/۷/۳۰ پذیرش ۹۰/۸/۳

چکیده

در سامانه‌های توزیع آب حوادث ایجاد شده در لوله‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در شکست لوله‌ها عوامل متعددی همچون سن، قطر، جنس، شرایط اجرا و نصب، شرایط بهره‌برداری و غیره دخیل بوده و بررسی‌ها نشان دهنده عدم جامعیت روابط ارائه شده در پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها است. در این تحقیق، ساختاری با استفاده از ترکیب مدل‌های نوین بهینه‌سازی و شبیه‌سازی تدوین گردید. در این ساختار برای شبیه‌سازی نرخ شکست لوله‌ها از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شد. با توجه به عدم توانایی شبکه‌های عصبی در مشخص نمودن تأثیر هر متغیر مستقل بر متغیر وابسته، در این تحقیق برای تعیین پارامترهای ورودی مؤثر در نرخ شکست و همچنین مناسب‌ترین پارامترهای مرتبط با ساختار شبکه عصبی مصنوعی، از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با هدف ارائه ساختاری با کمترین میزان خطای شبیه‌سازی، استفاده گردید. متغیرهای تصمیم در این الگوریتم مشخصات شبکه عصبی و پارامترهای مؤثر بر نرخ شکست هستند. با اجرای ساختار پیشنهادی، علاوه بر پارامترهای مؤثر در شکست لوله، بهترین ساختار شبکه عصبی تعیین گردید. با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان مناسب‌ترین رابطه نرخ شکست لوله‌ها را با توجه به پارامترهای تأثیرگذار بر آن استخراج نمود. نتایج این تحقیق بیانگر آن است که روش ترکیبی پیشنهادی قادر است پارامترهای بهینه و مؤثر در نرخ شکست لوله‌ها را از میان عوامل متعدد مؤثر در شکست، استخراج کند و باعث ارتقای قابلیت و قدرت تعمیم شبکه عصبی گردد که این امر نشان دهنده کارایی بالای روش پیشنهادی در شبیه‌سازی روابط غیرخطی و پیچیده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک، نرخ شکست لوله‌ها، سامانه آبرسانی

Determination of Effective Parameters in Pipe Failure Rate in Water Distribution System Using the Combination of Artificial Neural Networks and Genetic Algorithm

Jaber Soltani¹

Mahmoud Mohammad Rezapour Tabari²

(Received Apr. 10, 2010 Revised Oct. 22, 2011 Accepted Oct. 25, 2011)

Abstract

In water supply systems, the accidents occurring in pipes are of the utmost importance and sensitivity. Failure of the pipes is not necessary with the end of their life and different factors namely age, diameter, material, stability and corrosion of soil and water, execution, installation and operational conditions such as hydraulic pressure are effective on it. At the same time studies show non comprehensiveness of presented relations in prediction of pipes failure rate. In this research, with regards to the available software and hardware, a structure was developed using combination of new optimization and simulation models. In this structure, the artificial neural networks were used for simulation of the pipes failure rate. Considering the point that neural networks are always consider as a black box and unable to provide the effect of each independent variable on the dependent variable, on the other hand, they are prone to incorrect training. Therefore, in this study to determine the input parameters affecting failure rate and the most appropriate structure of artificial neural network (as well as bias vectors, layers adjusting weights and the number of neurons), Genetic algorithm has been used with the aim of presentation of a structure which has the minimum error rate of simulation. In this algorithm, decision variables and properties of neural networks are the parameters affecting the failure rate. By running the developed optimization model, in addition to the effective parameters on pipe failure, the best neural network structure for simulation pipe failure rate can be determined. The advantage of the proposed method is full coordination

1. Assist. Prof. of Irrigation and Drainage, Abu Rayhan Pardis, Tehran University, Tehran (Corresponding Author) (+98 711) 6280901 Jsoltan45@gmail.com

۱- استادیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) ۶۲۸۰۹۰۱ (۰۷۱۱) Jsoltani45@gmail.com

2. Assist. Prof. of Civil Eng., College of Eng., Shahrekord University, Shahrekord

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

between the input parameters and network structure in prediction of the pipes failure rate. The results of this study can be used to find the most appropriate relationship failure rate pipes with regards to the effective parameters and take necessary actions for decision making lead to resolve problems due to it. The results of this research indicating that the proposed combination method is able to extract the optimal and effective parameters on the pipes failure rate amongst the factors affecting failure rate, and also have been caused improve power capabilities and expansion of neural network structure that indicate high efficiency of the proposed method in simulation of nonlinear and complex relations.

Keywords: Artificial Neural Networks, Genetic Algorithm, Pipes Failure Rate, Water Distribution Systems.

۱- مقدمه

حوادث ایجاد شده در لوله‌های سامانه‌های توزیع آب، ضمن اینکه سبب هدر رفتن مقادیر متناهی از آب تصفیه شده می‌گردد، باعث اتلاف سرمایه مادی و انسانی نیز می‌شود. در این زمینه و با توجه به نقش حیاتی آب در زندگی بشر، کمبود منابع آب قابل شرب و هزینه‌های گزاف تعمیر و بازسازی شبکه، یکی از فعالیتها و تصمیم‌های مدیریتی، کاهش تعداد حوادث و اتفاقات سامانه‌های آبرسانی شهری است که این امر منجر به کاهش تلفات آب و همچنین کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و بازسازی می‌شود. به منظور دستیابی به اهداف مذکور لازم است بررسی کاملی از حوادث و اتفاقات شبکه، عوامل موثر در ایجاد حادثه و تأثیر مشخصات لوله‌ها در تعداد حوادث و اتفاقات صورت گیرد تا با استفاده از آن و اعمال روشهای مناسب مدیریتی، تعداد حوادث و نرخ شکست لوله‌ها در سامانه‌های توزیع با دقت خوبی پیش‌بینی شود و در جهت رفع آن اقدامات لازم را به عمل آید. با اعمال سیاست‌های بهینه بازسازی و نوسازی شبکه، علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه‌ها و افزایش درآمدها، افزایش میزان سرویس‌دهی و طول عمر مفید شبکه و قابلیت اطمینان شبکه نیز به وجود آمده به طوری که مدیران و تصمیم‌گیران خواهند توانست از حوادث غیرمنتظره جلوگیری نمایند. در تأکید اهمیت موضوع می‌توان اعلام نمود که در سال ۱۳۷۷، حدود ۱ میلیون حادثه در سامانه‌های توزیع آب کشور رخ داده که بیش از ۲۰ درصد از کل درآمدهای شرکتهای آب و فاضلاب کشور را برای تعمیر، بازسازی و اصلاح به خود اختصاص داده است که حدود ۳۰ درصد این حوادث روی لوله‌های سامانه توزیع بوده است [۱]. از طرفی دیگر، بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سنتی بخش آب، از ۹۴ میلیارد ریال در سال ۱۳۷۸ به ۲۳۹ میلیارد ریال در سال ۱۳۸۱ افزایش یافته است [۲].

به طور کلی در وقوع حوادث و شکست مکانیکی لوله‌ها، به عنوان مؤلفه اصلی سامانه‌های توزیع آب شهری، عوامل متعددی همانند قدمت، قطر جنس لوله‌ها، پایداری و خوردگی^۱ خاک و آب، شرایط

اجرا و نصب، شرایط اقلیمی، شرایط بهره‌برداری^۲ مانند فشار هیدرولیکی و غیره دخیل هستند که به عنوان نمونه به نقش مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود.

با توجه به اینکه گذشت زمان منجر به فرسودگی و کاهش ظرفیت حمل لوله‌های آبرسان می‌شود، لذا برای جلوگیری از شکست‌های متوالی، نوسازی آنها ضروری است. همچنین با توجه به رابطه عکس بین تلفات آب و قطر لوله، افزایش قطر لوله‌ها می‌تواند باعث کاهش نرخ شکست و افزایش مقاومت آنها شود که این امر به نوعی وابسته به حرکت خاک دور لوله‌ها و استفاده از مصالح نامناسب برای پوشش و زیرسازی لوله‌ها نیز است. از آنجا که لوله‌ها معمولاً دارای ساختار فلزی هستند لذا قرارگیری آنها در معرض املاح موجود در آب و خاک باعث خوردگی و سوراخ شدن آنها می‌گردد. فشار زیاد آب و ضربه از جمله عوامل دیگری هستند که عموماً در نتیجه طراحی نادرست شبکه، از کار افتادن شیرهای فشارشکن و حفاری مجدد خیابان توسط ارگان‌های مختلف دیگر ایجاد می‌شوند. شرایط اقلیمی محل که شاخصهای آن پارامترهایی نظیر حداقل و حداکثر دمای هوا، نوع خاک، بارندگی، یخبندان و غیره است نیز نقش قابل توجهی در شکست لوله‌ها دارند [۳].

به طور کلی آنالیز داده‌های شکست می‌تواند به مشخص نمودن دلایل اصلی برای شکست‌ها در مناطق ویژه‌ای از شبکه یا در لوله خاص کمک نموده و کلیه تغییرات در طراحی و سیاست‌های ساخت را مشخص نماید به طوری که در آنالیزهای آماری از بین داده‌ها، شاخصهایی به عنوان مبنای آنالیز انتخاب می‌شوند که به خوبی بیانگر تمام جوانب مسئله باشند. برای نمونه تعداد حوادث در واحد طول در واحد زمان (نرخ شکست) را می‌توان به عنوان یکی از پارامترهای شاخص در نظر گرفت.

با توجه به پارامترهای مؤثر بر شکست لوله‌ها، مدل‌های مختلفی توسط محققان برای پیش‌بینی میزان نرخ شکست لوله‌های شبکه ارائه گردیده که هر کدام به برخی از پارامترهای مؤثر بر نرخ شکست اشاره نموده‌اند. کوکس^۳ مدلی بر پایه احتمال اینکه لوله‌ای ممکن است در زمانی معین شکسته شود، ارائه نموده که زمان

² Operating Conditions

³ Cox

¹ Soil Corrosively and Stability

نخستین شکست و عمر مفید لوله را تعیین می‌کند. این مدل چند متغیره وابسته به مشخصات ذاتی و محیطی لوله‌ها است و برای مراحل نخستین فرسودگی سیستم تا سومین شکست کاربرد دارد [۴]. شامیر^۱ و هووارد^۲ برای فراهم کردن یک مدل پیش‌بینی شکست لوله‌ها که فاکتور شکستگی لوله‌ها را با سن آنها ارتباط دهد، بر روی مجموعه لوله‌های دارای مشخصات ذاتی یکسان از نظر قطر، جنس و سن، تحلیل رگرسیونی را مورد استفاده قرار داده و یک مدل نمایی برای افزایش شکست لوله‌ها بر حسب زمان ارائه نموده‌اند [۵].

والسکی^۳ و پلیسیا^۴ یک روش مشابه شامیر و هووارد ارائه داده‌اند که در آن بین نرخ شکست با سن لوله یک رابطه توانی برقرار است. آنها یک نرخ شکست بحرانی را تعریف نموده‌اند که در زمان تجاوز نرخ شکست از این میزان، لوله‌ها باید بازسازی و نوسازی شوند. در این تحقیق علاوه بر سن لوله، دو عامل دیگر در نظر گرفته شد. عامل اول برای شناسایی شکستگی‌های قبلی در لوله و عامل دوم برای مشاهده تفاوت نرخ شکستگی‌ها در لوله‌های با قطر بزرگ است [۶].

کتلر^۵ و گولتر^۶ و همچنین گولتر و کاظمی مطالعاتی را با استفاده از شاخص تعداد کل شکست‌های سالانه برای بیان تغییرات تعداد حوادث سالانه در برابر سن و قطر لوله‌های چدنی و آذبت در شهر وینیپگ^۷ کانادا انجام داده و رابطه خطی بر حسب زمان را ارائه داده‌اند [۷].

سو و همکاران^۸ برای بررسی تغییرات تعداد شکست با قطر لوله، از نرخ شکست در برابر قطر لوله استفاده کرده‌اند. با افزایش قطر لوله نرخ شکست کاهش می‌یابد. استفاده از نرخ شکست در آنالیز، نتایج بهتری نسبت به استفاده از تعداد شکست‌های سالانه می‌دهد زیرا با در نظر نگرفتن طول لوله‌ها در آنالیز می‌توان گفت که هر چه طول یک لوله در شبکه بیشتر باشد، انتظار حوادث بیشتری نیز می‌رود و برعکس. لذا با در نظر گرفتن طول لوله یعنی استفاده از نرخ شکست، این ابهام از بین می‌رود [۸].

تابش و عابدینی، اولین بررسی و آنالیز شکست لوله‌ها در شبکه‌های آبرسانی را در تعدادی از شهرهای کشور انجام دادند. در این تحقیق به برخی روشهای تحلیل اطلاعات حوادث و شکست

لوله‌ها اشاره گردیده است. هدف این تحقیق ارائه روشی برای جمع‌آوری اطلاعات و تحلیل حوادث متناسب با شرایط ثبت اطلاعات حوادث کشور بود. در نهایت روابطی بر اساس قطر و سن لوله‌ها و یا هر دو عامل برای تعدادی از شهرهای کشور ارائه شده است [۹].

تابش و همکاران، تحقیقی پیرامون عوامل مؤثر در شکست لوله‌های شبکه آبرسانی و روشهای پیش‌بینی آن انجام داده‌اند. در این تحقیق با مبنا قرار دادن رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی^۹ با استفاده از الگوی برنامه‌نویسی ژنتیک و ترکیب پارامترهای دائمی و غیردائمی در بخشی از شبکه توزیع آب یکی از شهرهای کشور، رابطه پیش‌بینی تعداد شکست در لوله‌های اصلی آبرسانی با اعمال برخی پارامترهای مؤثر همچون طول، قطر و تعداد مشترکان به‌طور مستقیم و فشار متوسط هیدرولیکی به‌طور غیرمستقیم در منطقه مورد مطالعه بهبود یافته است. در مطالعه مذکور، ابتدا منطقه مطالعاتی پهنه‌بندی و سپس کل مجموعه داده‌های استخراج شده از مشخصات شبکه و آمار حوادث به چندین محدوده تقسیم‌بندی شده است. در همین زمینه هر یک از کلاس‌های قطری اصلی شش‌گانه (۸۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر) در پهنه‌بندی‌ها با لوله‌های فرضی معادل، مدل شدند [۱۰].

تابش و همکاران اقدام به تدوین مدلی به‌منظور مدیریت حوادث شبکه‌های توزیع آب با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و با توجه به نرخ شکست لوله‌ها نموده‌اند. در مطالعه مذکور بر اساس تعداد حوادث سالانه و طول لوله‌های موجود در یک شبکه توزیع، اقدام به محاسبه نرخ شکست به‌طور نسبی گردید. نتایج تحقیق نشان داده است که مناطقی که از ساختار و مدیریت نامناسب شبکه برخوردارند دارای نرخ شکست بالایی هستند [۱۱].

پروندیشو و همکاران^{۱۰} برای آموزش شبکه‌های عصبی تأخیری از ترکیب الگوریتم ژنتیک و الگوریتم لونیگ-مارگارت استفاده نموده‌اند. این تحقیق که برای شبیه‌سازی جریان رودخانه انجام شد، نشان داد که الگوریتم‌های رایجی که برای آموزش شبکه به‌کار می‌روند، نمی‌توانند از دقت بالایی در شبیه‌سازی و کاهش خطا برخوردار باشند و لازم است برای این مطالعه از روش ترکیبی اشاره شده استفاده گردد [۱۲].

گواستولسی^{۱۱} برای نخستین بار با تبدیل رگرسیون عددی به یک رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی (EPR) شکست لوله‌ها را در شبکه‌های توزیع آب به‌صورت رابطه‌ای مدل‌سازی نموده است. در

⁹ Evolutionary Polynomial Regression (EPR)

¹⁰ Prudencio et al.

¹¹ Giustolosi

¹ Shamir

² Howard

³ Waleski

⁴ Pelliccia

⁵ Kettler

⁶ Goulter

⁷ Winnipeg

⁸ Su et al.

این رابطه نیز پارامترهای مؤثر اعمال شده در مدل، محدود به متغیرهای سن، قطر و طول معادل است [۱۳].

آهن و همکاران^۱ اقدام به پیش‌بینی شکست لوله‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی نموده‌اند. در تحقیق مذکور تنها به برخی از پارامترهای مؤثر در شکست لوله‌ها اشاره و از آنها در پیش‌بینی شکست استفاده شده است [۱۴].

ماوریزیو و همکاران^۲ از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی نرخ شکست پمپ‌های سانتریفیوژ در پالایشگاه نفت استفاده نموده‌اند. در مطالعه مذکور از شبکه پرسپترون چند لایه برای شبیه‌سازی استفاده شده است. با استفاده از نتایج تحقیق، پمپ‌ها بر اساس احتمال شکست و درجه تغییرپذیری دسته‌بندی شده و بر پایه آن، برنامه تعمیر و نگهداری تدوین شده است [۱۵].

براردی و همکاران^۳ رابطه‌ای را برای پیش‌بینی تعداد شکست لوله‌ها در شبکه توزیع مبتنی بر روش EPR و داده کاوی ارائه نموده‌اند که در آن فقط متغیرهای سن، قطر و طول لوله انتخاب شده‌اند [۱۶].

با توجه به مطالعات انجام شده قبلی می‌توان دریافت که برای پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها لازم است اطلاعات قابل توجهی جمع‌آوری گردد تا با استفاده از آن بتوان به پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها پرداخت (جدول ۱). از آنجا که دسترسی به تمامی داده‌های مورد نیاز برای تعیین میزان نرخ شکست لوله‌ها در اکثر موارد در دسترس نبوده و یا به آسانی قابل استخراج نیستند، لذا بررسی اهمیت پارامترهای مؤثر بر نرخ شکست و تعیین تعداد آنها به‌منظور ارائه رابطه‌ای که بتواند با داده‌های مؤثر قابل دسترس به پیش‌بینی صحیح نرخ شکست بپردازد از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. به‌منظور دستیابی به اهداف تحقیق حاضر، مطالعه سلطانی که در واقع کامل‌کننده سوابق مطالعاتی مرتبط با این زمینه است، مبنای تحقیقاتی این پژوهش قرار گرفت [۱۷]. در مطالعه مذکور، بر اساس تحقیقات قبلی برای ارائه راهبردهای بازسازی و نوسازی لوله‌های شبکه‌های توزیع آب و روش مدیریت بهره‌برداری بهینه در شرایط عادی و غیر عادی، روش پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها بر مبنای شبکه عصبی مصنوعی به‌دلیل انعطاف‌پذیر بودن، دقت بیشتر و امکان استخراج رابطه ریاضی، انتخاب و توصیه گردید. به‌منظور تکمیل مطالعه قبلی صورت گرفته، در این تحقیق بهبود در دقت پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها رویکرد جدیدی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی در نظر گرفته شد.

هدف این تحقیق، ارائه مدل پیش‌بینی نرخ شکست در سامانه‌های توزیع آب که قابلیت تعمیم برای شرایط زمانی و مکانی مشابه را دارا هستند، بود. بر پایه این هدف هر مکان شرایط به‌خصوصی دارد و یک مدل پیش‌بینی شکست، قابلیت تعمیم برای عموم را ندارد. بنابراین آنالیز داده‌های شکست می‌تواند به مشخص نمودن دلایل و پارامترهای اصلی شکست‌ها در محدوده‌های ویژه‌ای از سامانه آبرسانی یا در لوله‌ای خاص کمک نموده و کلیه تغییرات در طراحی و سیاست‌های بهره‌برداری از زیرساخت را مشخص نماید. به این ترتیب در هر سال با پیش‌بینی نرخ شکست و تعداد حوادث می‌توان تسهیلات و تجهیزات لازم را برای مقابله با حوادث فراهم کرد.

۲- ساختار مدل ترکیبی پیشنهادی

در سامانه‌های توزیع آب عوامل متعددی در نرخ شکست لوله‌ها تأثیرگذار هستند که شناخت و در نظر گرفتن آنها در روابط پیش‌بینی نرخ شکست، می‌تواند تأثیر قابل توجهی در پیش‌بینی صحیح تعداد حوادثی که در آینده برای شبکه مورد مطالعه اتفاق می‌افتد، ایفا نماید. از آنجا که تعیین عوامل مؤثر و ارائه ساختاری که با توجه به پیچیده و غیرخطی بودن رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل از قابلیت مطلوبی در پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها برخوردار باشد، نیاز به سعی و خطا و اجرای متعدد مدل‌های شبیه‌سازی دارد، لذا در این تحقیق، ساختاری با توجه به مدل شبیه‌سازی شبکه عصبی بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک پیشنهاد گردید. هدف مدل پیشنهادی، ارائه بهترین ساختار شبکه عصبی برای پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها با توجه به پارامترهای ورودی مؤثر و محدودیت‌های مرتبط با پارامترهای شبکه بود. تابع هدف

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^n (F_i - \hat{F}_i)^2 / n \quad (1)$$

$$F_{n_1 \times 1}^1 = \tan \text{sig}(W_{n_1 \times m}^1 \times P_{m \times 1} + b_{n_1 \times 1}^1) \quad (2)$$

$$F_{n_2 \times 1}^2 = \tan \text{sig}(W_{n_2 \times n_1}^2 \times F_{n_1 \times 1}^1 + b_{n_2 \times 1}^2) \quad (3)$$

$$F_{n_3 \times 1}^3 = \tan \text{sig}(W_{n_3 \times n_2}^3 \times F_{n_2 \times 1}^2 + b_{n_3 \times 1}^3) \quad (4)$$

$$\hat{F}_i = F_{n_4 \times 1}^4 = \text{purelin}(W_{l \times n_3}^4 \times F_{n_3 \times 1}^3 + b_{l \times 1}^4) \quad (5)$$

$$\tan \text{sig}(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (6)$$

$$\text{Purelin}(x) = x \quad (7)$$

محدودیتها

$$-1 \leq W_r^1 \leq 1 \quad (8)$$

$$-1 \leq b_r^1 \leq 1 \quad (9)$$

¹ Ahn et al.

² Mavryzyv et al.

³ Berardi et al.

جدول ۱- مدل‌های پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها در تحقیقات گذشته

اطلاعات مورد نیاز	مؤلفه‌ها	مدل پیش‌بینی نرخ شکست	مرجع	ردیف
مشخصات ذاتی و محیطی لوله‌ها	$FR(t:z)$ تابع خطر یا نرخ شکست، FR_0 تابع خطر یا نرخ شکست پایه، Z بردار چند متغیره معرف مشخصات سیستم و b بردار ضرایب که از آنالیز رگرسیون تعیین می‌گردد.	$FR(t:z) = FR_0(t)e^{zb}$	[۵]	۱
طول لوله، اطلاعات مرتبط با نصب و شکست لوله، قطر لوله، نوع خاک	T زمان تعویض، t_0 سال پایه آنالیز، $FR(t)$ مشخصه نرخ شکست در سال t (بر حسب yr / Km / تعداد شکست)، $FR(t_0)$ نرخ شکست در سال پایه و A نرخ رشد شکست ($1/yr$)	$FR(t) = FR(t_0)e^{A(t+t_0)}$	[۶]	۲
طول لوله، اطلاعات مرتبط با نصب و شکست لوله، قطر لوله، نوع خاک و روش تولید لوله	C_1 نسبت بین فراوانی شکست ناشی از خوردگی لوله‌های چدن به فراوانی تمام شکست‌های قبلی ناشی از خوردگی، C_2 نسبت بین فراوانی شکست ناشی از خوردگی لوله‌های چدن با قطر ۲۰ اینچ به فراوانی تمام شکست‌های قبلی ناشی از خوردگی و سایر پارامترها مشابه ردیف ۲ است.	$FR(t) = C_1 \times C_2 \times FR(t_0)e^{A(t+t_0)}$	[۷]	۳
طول لوله، اطلاعات مرتبط با نصب و شکست لوله، قطر لوله، نوع خاک	NF تعداد شکست در سال، K_0 پارامتر رگرسیونی و Age به‌عنوان سن لوله	$NF = K_0 \times Age$	[۸]	۴
طول و قطر لوله	FR تعداد حادثه سالیانه در هر مایل طول لوله ۱ ام و D_1 قطر لوله ۱ ام بر حسب اینچ	$FR = \frac{0.6858}{D_1^{3.26}} + \frac{2.7158}{D_1^{1.3131}} + \frac{2.7685}{D_1^{3.5792}} + 0.042$ ، $\forall l=1,2,3,\dots,mp$	[۹]	۶
سن و قطر لوله	D_1 قطر لوله لوله ۱ ام بر حسب میلی‌متر و Age سن لوله	$NF = (0.0501 + 0.0948 \times Age)^2$ ، $r^2 = 0.96$ $NF = 9.38 \times e^{-0.1653D_1}$ ، $r^2 = 0.92$	[۱۰]	۷
تعداد کل انشعاب، طول کلی، قطر، سن و فشار متوسط	NF تعداد شکست در سال، مؤلفه‌های P_r^μ ، A_e^α ، D_e^δ ، L_t^γ ، P_s^β ترتیب متغیرهای تعداد کل انشعاب، طول کلی، قطر، سن و فشار متوسط لوله معادل هر کلاس و a_0 ضریب ثابت معادله	$NF = A_e^\alpha \cdot P_s^\beta \cdot L_t^\gamma \cdot D_e^\delta \cdot P_r^\mu + a_0$	[۱۱]	۸
سن، قطر و طول لوله	NF تعداد شکست‌ها، A_e سن معادل لوله، D_e قطر معادل لوله و L_t طول معادل لوله‌ها که در یک کلاس قطری است.	$NF = \text{Round} \left[\left(6.15 \times 10^{-3} \times \frac{L_t}{D_e} \right) A_e^2 + 0.436 \right]$	[۱۲]	۹
سن، قطر و طول لوله	NF تعداد شکست در سال، A_e سن معادل لوله، L_t طول لوله در زمان t و D_e قطر معادل لوله	$NF = 0.0849 \times \frac{A_e \times L_t}{D_e^{1.5}}$	[۱۳]	۱۰

ژن های معرف پارامترهای ورودی			ژن های معرف تعداد نرون			ژن های معرف تعداد لایه شبکه			ژن های معرف پارامترهای تنظیم کننده شبکه									
قطر	طول	سن	فشار	عمق نصب	تعداد نرون لایه اول	تعداد نرون لایه دوم	تعداد نرون لایه سوم	معرف شبکه دو لایه	معرف شبکه سه لایه	معرف شبکه چهار لایه	بردار وزن لایه اول	بردار اریب لایه اول	بردار وزن لایه دوم	بردار اریب لایه دوم	بردار وزن لایه سوم	بردار اریب لایه سوم	بردار وزن لایه چهارم	بردار اریب لایه چهارم

شکل ۱- ژن ها (متغیرهای تصمیم) مدل ترکیبی پیشنهادی

۲-۴- پارامترهای تنظیم کننده شبکه

با توجه به تعداد لایه ها و نرون های واقع در هر لایه، لازم است بردارهای وزن و اریب به شبکه معرفی شوند. از آنجا که این پارامترها نقش قابل توجهی در ارائه ساختار مناسب شبیه سازی برای پیش بینی دارا هستند، لذا این پارامترها به عنوان متغیرهای تصمیم که لازم است توسط الگوریتم بهینه سازی مشخص شود، تعیین شدند. بسته به تعداد نرون های هر لایه و پارامترهای ورودی، ابعاد ژن های در نظر گرفته شده برای این بردارهای تنظیم کننده متفاوت است. مقدار عددی ژن ها برای این متغیرهای تصمیم بین ۱ و ۱- در نظر گرفته شد.

با توجه به متغیرهای تصمیم تعریف شده، تعداد ژن های در نظر گرفته شده برای هر کروموزوم برابر با حالتی از شبکه است که از هر ۵ پارامتر ورودی برای شبیه سازی استفاده شود و همچنین تعداد لایه ها برابر با ۴ باشد. بنابراین متناسب با چنین شبکه ای لازم است ۹۸۱ ژن به منظور در نظر گرفتن بردارهای وزن و اریب برابر در هر کروموزوم لحاظ شود. لذا تعداد کل ژن های هر کروموزوم برابر با ۹۹۲ خواهد بود.

در روابط ارائه شده ۱ تا ۱۱، رابطه ۱، مجموع میزان اختلاف نرخ شکست شبیه سازی شده با مقدار واقعی برای تمامی داده های جمع آوری شده مرتبط با نرخ شکست لوله ها را محاسبه نموده و به عنوان تابع هدف مورد توجه قرار می دهد. در این رابطه برای محاسبه نرخ شکست شبیه سازی لازم است با توجه به ساختار شبکه عصبی و روابط حاکم بر لایه ها، از روابط ۲ تا ۷ استفاده شود. در روابط ۲، ۳، ۴ و ۵ با توجه به بردارهای وزن و اریب، مقدار خروجی از لایه اول، دوم، سوم و آخر مورد شبیه سازی قرار می گیرد. رابطه ۶، تابع محرک مورد استفاده در لایه های میانی را نشان می دهد. این تابع در واقع به عنوان جمع کننده بردارهای وزن، اریب و پارامترهای ورودی است.

با توجه به اینکه لازم است بازه وسیعی از مقادیر در خروجی مورد شبیه سازی قرار گیرد لذا نوع تابع محرک در لایه آخر به صورت خطی و مطابق رابطه ۷ در نظر گرفته شد. در روابط ۸ و ۹ محدودیت مرتبط با پارامترهای تنظیم کننده شبکه ارائه شده است. از آنجا که لازم است تعداد بهینه پارامترهای ورودی مشخص شوند بر اساس داده های جمع آوری شده، این تعداد حداکثر تا ۵

$$1 \leq m \leq 5 \quad (10)$$

$$3 \leq n_1 \leq 20 \quad (11)$$

که در این روابط

\hat{F}_i مقدار نرخ شکست شبیه سازی شده با استفاده از شبکه منتخب برای داده i ام، F_i مقدار نرخ شکست واقعی برای داده i ام، F_r^1 بردار خروجی لایه ۱ با ابعاد l با ابعاد W_r^1 بردار وزنی تنظیم کننده لایه ۱ با ابعاد l با ابعاد r (متغیر تصمیم)، $P_{m \times 1}$ بردار ورودی شبکه با ابعاد $m \times 1$ بردار اریب مرتبط با لایه ۱ با ابعاد r (متغیر تصمیم)، n_1 تعداد نرون های لایه ۱ ام، n تعداد داده های شکست جمع آوری شده، m تعداد ورودی های شبکه است.

در این روابط، اندیس بالا، شماره لایه و اندیس پایین ابعاد ماتریس را مشخص می نماید.

در این تحقیق متغیرهای تصمیم های در نظر گرفته شده عبارتند از (شکل ۱):

۲-۱- تعداد پارامترهای ورودی

تعداد ۵ ژن (به ترتیب برای پارامترهای قطر، طول، سن، فشار و عمق نصب) برای این منظور لحاظ شده است. هر یک از ژن ها می توانند مقادیر ۱ یا صفر را به خود بگیرند. مقدار ۱ به معنی در نظر گرفتن این پارامتر به عنوان یکی از ورودی های شبکه و صفر به معنی عدم احتمال این پارامتر به عنوان یکی از ورودی های شبکه است.

۲-۲- تعداد نرون لایه ها

با توجه به اینکه در این تحقیق حداکثر تعداد لایه های شبکه برابر با ۴ در نظر گرفته شد و تعداد نرون های لایه آخر باید معادل تعداد خروجی باشد، لذا تعداد ۳ ژن به ترتیب برای لایه های اول، دوم و سوم در نظر گرفته شد که هر ژن می تواند مقدار ۲ تا ۲۰ نرون را به خود بگیرد.

۲-۳- تعداد لایه های شبکه

تعداد ۳ ژن به ترتیب معرف شبکه دو لایه، سه لایه و چهار لایه در کروموزوم ها لحاظ شد. این ژن ها می توانند مقادیر صفر یا یک را در خود جای دهند. مقدار یک، وجود آن لایه در شبکه و صفر عدم وجود آن را نمایه می کند.

پارامتر است. بنابراین در فرایند بهینه‌سازی، شبکه می‌تواند حداقل ۱ و حداکثر ۵ پارامتر را به‌عنوان متغیرهای مستقل ورودی مدنظر قرار داشته باشد.

تعداد نرون‌های هر لایه در شبکه‌های عصبی، به‌عنوان پارامتری که نقش عمده‌ای در آموزش شبکه ایفا می‌نماید، لازم است به درستی به مدل معرفی شده و در استخراج مقدار پارامتر خروجی مورد استفاده قرار گیرد. از آنجا که حداقل تعداد نرون قابل استفاده، با توجه به رابطه غیرخطی و پیچیده مورد استفاده در این تحقیق، ۳ در نظر گرفته شد و اینکه نرون‌های زیاد نیز در اکثر شبکه‌ها مدنظر نیست، لذا در این مقاله محدودیت حداقل و حداکثر به ترتیب ۳ و ۲۰ برای نرون‌های لایه‌های مختلف مورد توجه قرار گرفت.

در بخش‌های مذکور تابع هدف، محدودیتها و متغیرهای تصمیم مسئله مورد بررسی، ارائه و توضیحات مرتبط بیان گردید. از آنجا که به‌منظور یافتن مقادیر بهینه هر یک از متغیرهای تصمیم لازم است ساختاری با توجه به یکی از الگوریتم بهینه‌سازی مطرح، مورد توجه قرار گیرد، لذا در این قسمت از تحقیق، اجزای الگوریتم ترکیبی پیشنهادی بیان گردید.

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است ابتدا لازم است آمار و اطلاعات مرتبط با تعداد حوادث رخ داده برای لوله‌های شبکه مورد مطالعه جمع‌آوری و بر طبق آن نرخ شکست سالانه محاسبه شود. همچنین لازم است پارامترهای مورد نیاز الگوریتم بهینه‌سازی که در این تحقیق الگوریتم ژنتیک است و مشتمل بر تعداد تکرارهای لازم برای دستیابی به همگرایی، تعداد کروموزوم‌ها، ضرایب تزویج و جهش است به درستی مشخص شوند. در گام دیگر تابع هدف، متغیرهای تصمیم و محدودیت‌های مدل ترکیبی تعریف می‌شوند. با توجه به اینکه برای شروع فرایند بهینه‌سازی لازم است مقادیر اولیه به مدل معرفی شوند، لذا در این بخش بر پایه محدودیت‌های هر یک از متغیرهای تصمیم، نسل اولیه‌ای مشتمل بر تعدادی کروموزوم تولید می‌شود.

از آنجا که ژن‌های هر کروموزوم، مشخصات شبکه را نمایه می‌کنند، لذا بر پایه آن مشخصه‌ها، ساختار شبکه شکل گرفته و مقدار نرخ شکست برای هر کروموزوم مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد.

با اعمال عملگرهای انتخاب، تزویج و جهش بر روی نسل اولیه تولید شده، نسل بهبود یافته‌ای تولید می‌شود که با توجه به تابع هدف تعریف شده از عملکرد بالاتری نسبت به نسل اولیه برخوردار است. مراحل تشریح شده به‌عنوان تکرار اول در الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک در نظر گرفته می‌شود. در انتهای تکرار اول، کروموزوم برتر شناسایی شده و ذخیره می‌شود. برای تکرار دوم به‌جای استفاده از نسل اولیه که به‌صورت تصادفی تولید می‌شود، نسل بهبود یافته تکرار قبل در طی فرایند بهینه‌سازی مورد توجه قرار می‌گیرد. این

روند تا زمانی که کروموزوم برتر شناسایی شده در طی دو تکرار متوالی اختلاف قابل توجهی را نشان ندهند، ادامه می‌یابد. با محقق شدن این شرط می‌توان دریافت که مدل به جواب نزدیک به بهینه کلی، همگرا شده است. با اتمام فرایند بهینه‌سازی و انتخاب کروموزوم برتر، می‌توان با توجه به مقادیر بهینه ژن‌ها (متغیرهای تصمیم) بهترین ساختار شبکه عصبی و پارامترهای مؤثر در نرخ شکست لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب را مشخص نمود.

لازم به‌ذکر است، از بین داده‌های اولیه جمع‌آوری شده بخشی برای کالیبراسیون (۱۵ درصد کل داده‌ها) و بخشی برای صحت‌سنجی (۵ درصد کل داده‌ها) جدا شده و در هر تکرار از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، میزان خطای هر دسته مورد محاسبه قرار می‌گیرد. روند بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم مورد استفاده در این مطالعه تا جایی ادامه می‌یابد که خطای داده‌های واقع در دو دسته مورد اشاره افزایش نیابد. این امر از ارائه بردارهای وزن و ارببی که منجر به حفظ نمودن شبکه و یا آموزش بیش از حد می‌شود، جلوگیری به‌عمل می‌آورد.

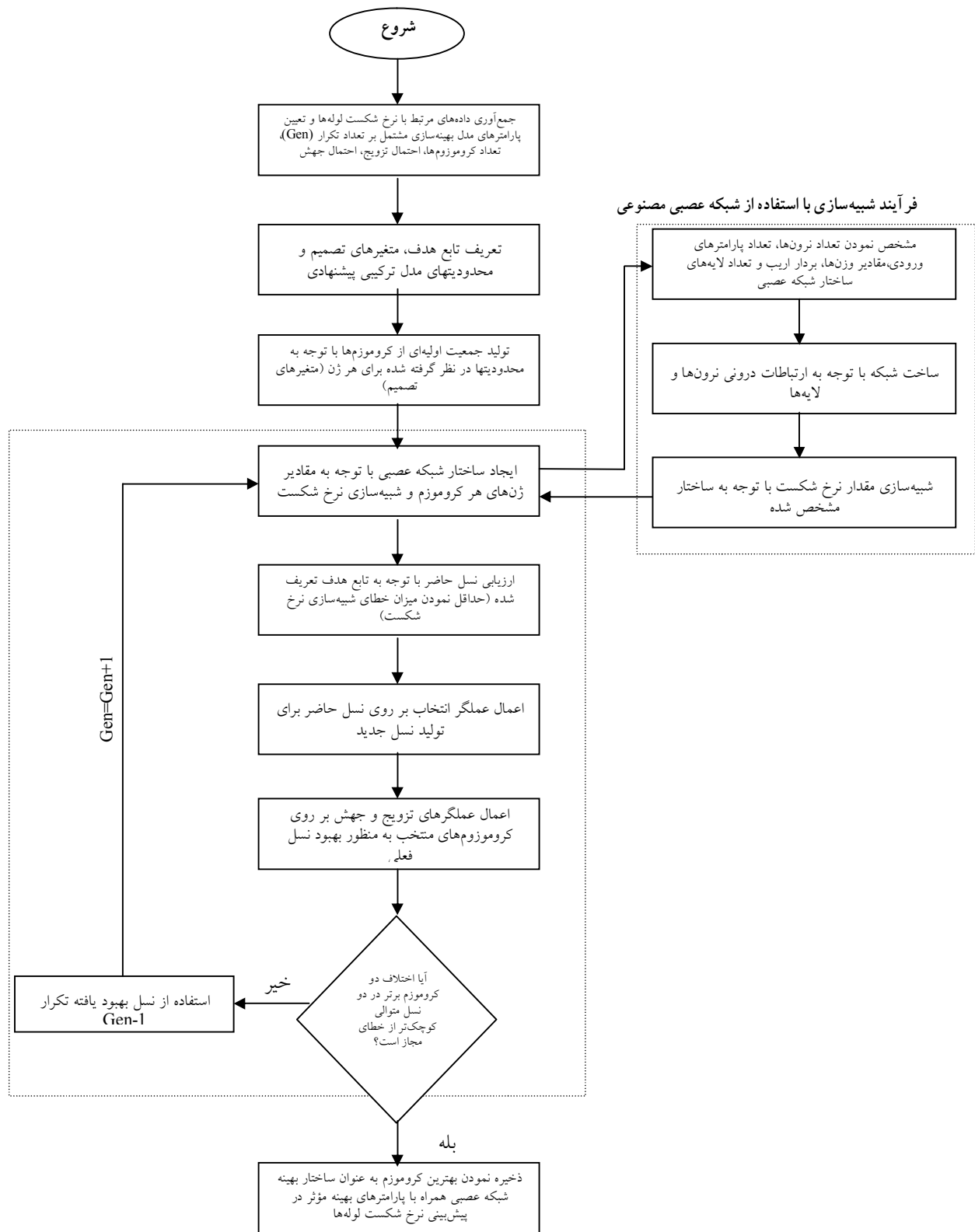
روشی که به‌منظور اعمال عملگر تزویج در الگوریتم ژنتیک استفاده شد تحت عنوان تزویج پراکنده^۱ است. در این روش برای تولید فرزندان با استفاده از نسل والد به این صورت عمل می‌شود که ابتدا به ترتیب کروموزوم‌های والد اول و دوم برای اعمال عملگر تزویج انتخاب می‌شوند. سپس به تعداد ژن‌های کروموزوم اعداد تصادفی تولید می‌شود. اگر اعداد تصادفی تولید شده کمتر از ۰/۵ باشند از مقادیر ژن کروموزوم اول و در غیر این صورت از مقادیر ژن کروموزوم دوم برای تولید کروموزوم فرزند استفاده می‌شود. این روند بر روی تمامی جفت کروموزوم‌ها صورت گرفته و نسل فرزند متناسب با آن تولید می‌شود. لازم به ذکر است که موجه بودن کروموزوم فرزند تولید شده پس از تولید مورد بررسی قرار می‌گیرد که در صورت ارائه جوابهایی خارج از محدودیت‌های تعریف شده، با استفاده از میانگین حسابی ژن‌های واقع در کروموزوم‌های والد کروموزوم فرزند، تولید شده و در فرایند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین از روش جهش موجه تطبیقی^۲ برای اعمال عملگر جهش بر روی کروموزوم‌ها استفاده شده است [۱۸].

با توجه به اینکه پارامترهای عملگرهای مورد استفاده مطابق روشهای مذکور مشخص است، لذا نیازی به تحلیل حساسیت برای تعیین مناسب‌ترین مقدار برای آنها نیست.

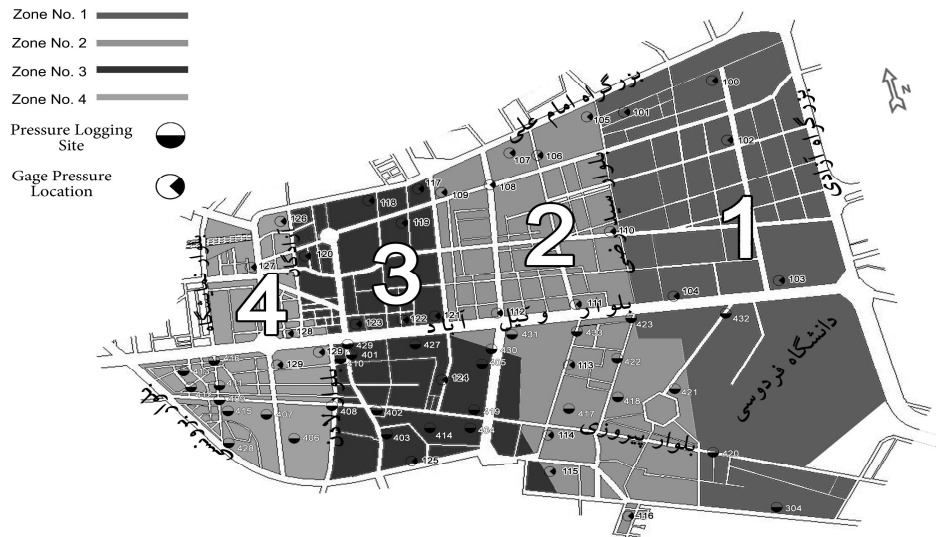
۳- کاربرد مدل

به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی ارائه شده و بررسی عوامل مؤثر

¹ Crossover Scattered
² Mutation Adapt Feasible



شکل ۲- ساختار ترکیبی پیشنهادی برای پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها



شکل ۳- کروکی محدوده‌ها و نقاط اندازه‌گیری فشار در منطقه مطالعاتی [۱۷]

روزانه ثبت شده در طی سالهای ۸۴ تا ۸۵ بالغ بر ۲۴۳۸ رکورد که دارای اطلاعاتی همچون قطر، طول، سال اجرا، عمق نصب، تعداد حوادث اتفاق افتاده و فشار هیدرولیکی متوسط لوله‌ها بوده از واحد انفورماتیک شرکت آب و فاضلاب اخذ و مورد بررسی قرار گرفت. یکی دیگر از ویژگی‌های این ناحیه وجود دستگاههای فشارسنج دستی و ثبات روی برخی از لوله‌ها است. بر اساس آمار ثبت شده در واحد حوادث ناحیه چهار، حداکثر و حداقل اطلاعات فشار هیدرولیکی لوله‌ها طی این سالها و در زمان این تحقیق به ترتیب ۸/۵ و ۲/۱ اتمسفر بود که بر این اساس منطقه به چهار زون فشاری تقسیم گردید. بر پایه اطلاعات جمع‌آوری شده و اینکه لوله‌های با مشخصات ساختاری یکسان (قدمت، قطر و جنس) باید نرخ شکست یکسانی داشته باشند، لذا از کل لوله‌های منطقه مطالعاتی تنها ۳۳۷ مورد پارامترهای اصلی مدل شکست، استخراج گردید و مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲).

با توجه به تعداد شکست‌های جمع‌آوری شده برای لوله‌های شبکه، برای محاسبه نرخ شکست لوله در هر کلاس قطری، ابتدا تعداد کل شکست‌های در یک کلاس قطری در طول یک سال در هر زون فشاری استخراج شد، سپس طول کل لوله‌های همان کلاس قطری در شبکه بر حسب کیلومتر محاسبه شد. سپس طبق تعریف نرخ شکست لوله در هر کلاس قطری که عبارت است از تعداد کل شکست‌های در یک کلاس قطری در طول یک سال به طول کل لوله‌های همان کلاس قطری در شبکه بر حسب کیلومتر، محاسبات انجام شد. به عنوان نمونه برای کلاس قطری ۸۰ میلی‌متری در

در شکست لوله‌های سامانه آبرسانی، علاوه بر کیفیت دسترسی داده‌ها، میزان صحت و دقت آنها نیز مد نظر قرار گرفت. در این زمینه پس از بررسی اطلاعات مرتبط با شکست لوله‌ها در تعداد زیادی از شهرهای کشور و کفایت آنها، در نهایت ناحیه چهار آب و فاضلاب مشهد به عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب گردید (شکل ۳). این ناحیه دارای مساحتی حدود ۲۴۱۸ هکتار، جمعیتی معادل ۹۳۷۱۹ نفر، طول کل لوله‌های شبکه توزیع ۵۷۹۸۶۰ متر شامل لوله‌های فلزی با اقطار ۷۰۰، ۸۰۰، ۶۰۰ میلی‌متر و لوله‌های آزیست و چدن با قطرهای ۴۰۰، ۳۰۰، ۲۵۰، ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰ و ۸۰ میلی‌متر، حداقل و حداکثر تراز ارتفاعی از سطح دریا به ترتیب ۱۰۲۱ و ۱۲۱۴ متر است. در این ناحیه نصب و اجرای لوله‌های شبکه عموماً از سال ۱۳۶۰ شروع شده است.

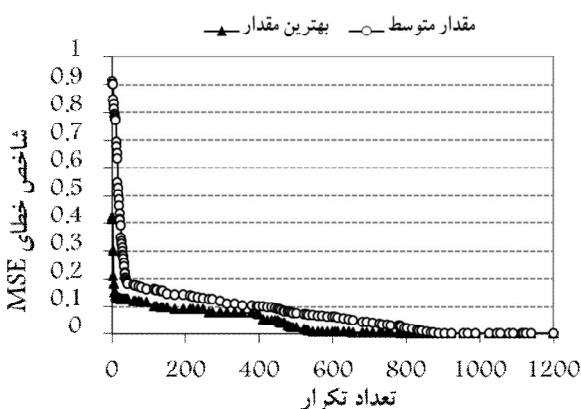
به دلیل حساسیت و اهمیت نقش لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب شهری و همچنین به علت در اختیار نداشتن اطلاعات دقیق و مناسب از انشعابات فرعی، روند پیش‌بینی نرخ شکست تنها برای لوله‌های اصلی شبکه که روند شکست و خرابی در آنها به صورت محسوسی تحت تأثیر عوامل مؤثر ذکر شده است، انجام گرفت. بر اساس آمار ثبت شده، این ناحیه دارای بیشترین نرخ شکست بوده و داده‌های قابل دسترس به خصوص روی لوله‌های آزیست سیمانی تا اقطار ۳۰۰ میلی‌متر موجود بود. همچنین لازم به ذکر است با توجه به ترکیب جنس لوله‌های شبکه مورد مطالعه، در این تحقیق به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی در خصوص لوله‌های فلزی و چدنی، تنها از لوله‌های آزیست سیمانی در فرایند مدلسازی استفاده شد. به منظور مدلسازی نرخ شکست لوله‌های آزیست، آمار حوادث

جدول ۲- نمونه‌ای از داده‌های اطلاعات جمع‌آوری شده برای لوله‌های آزیست سیمانی

قطر لوله (میلی‌متر)	طول (متر)	سن (سال)	فشار متوسط (اتمسفر)	عمق نصب (متر)	تعداد شکست	نرخ شکست (تعداد شکست در سال در واحد طول (کیلومتر))
۸۰	۵۰	۲۲	۶/۴۲	۱/۵	۳	۲/۲۲
۸۰	۵۵	۲۲	۶/۴۲	۱/۲	۱	۲/۲۲
۸۰	۶۰	۲۶	۴/۰۷۵	۱/۲	۱	۲/۲۵
۸۰	۱۰۰	۲۰	۶/۴۲	۲/۰	۳	۲/۲۲
۸۰	۱۰۰	۲۶	۴/۰۷۵	۱/۸	۲	۲/۲۵
۸۰	۱۱۰	۲۲	۶/۴۲	۱/۸	۶	۲/۲۲
۸۰	۱۱۵	۲۳	۵/۰۸۶	۱/۲	۱	۲/۲۰۶
۱۰۰	۵۴	۱۴	۳/۹۵	۱/۲	۱	۱/۱۶
۱۰۰	۸۰	۲۳	۳/۱۳۷	۱/۲	۱	۱/۸۰۱
۱۰۰	۹۰	۲۰	۵/۲	۲/۰	۳	۱/۱۵۲
۱۵۰	۴۲۰	۱۳	۶/۵۹	۲/۰	۱	۰/۵۶
۱۵۰	۵۰۰	۱۳	۶/۵۹	۱/۵	۲	۰/۵۶
۲۰۰	۲۶۰	۱۶	۲/۷	۲/۰	۱	۰/۸۶
۲۰۰	۳۰۵	۱۱	۵/۴۲	۱/۸	۱	۰/۹۷
۲۰۰	۳۱۰	۱۳	۳/۶۸	۱/۸	۱	۰/۸۴
۲۰۰	۳۲۰	۱۳	۶/۸۹	۱/۸	۱	۰/۸۷۷
۲۵۰	۹۵۰	۱۰	۳/۱۱۶	۱/۲	۱	۰/۵۳
۳۰۰	۴۳۰	۱۰	۶/۳۷۴	۲	۱	۰/۸۳

یافتن مقدار بهتر وجود ندارد. بنابراین جواب مشخص شده در تکرار ۱۲۰۰ به عنوان جواب بهینه مطرح است.

هر یک از زون‌های چهارگانه فشاری، می‌توان مطابق جدول ۳ نرخ شکست را به دست آورد.



شکل ۴- روند بهینه‌یابی مقدار تابع هدف با توجه به بهترین مقدار و مقدار متوسط تابع هدف در هر تکرار

مدل با توجه به این مقادیر بهینه، شبکه‌ای با سه لایه که به ترتیب تعداد نرون‌ها در لایه‌های اول و دوم برابر با ۱۰ و ۵ است، پیشنهاد نمود. پارامترهای ورودی مؤثر بر نرخ شکست لوله‌ها عبارت‌اند از قطر، طول و فشار. مقادیر بهینه پارامترهای تنظیم‌کننده شبکه که بردارهای وزن و اریب هستند به صورت زیر تعیین شدند.

جدول ۳- نمونه محاسبات نرخ شکست لوله‌ها در منطقه مورد مطالعه

کلاس قطری (mm)	زون فشاری	طول کل لوله (Km)	تعداد کل شکست	نرخ شکست
۸۰	۱	۳۴/۶۷	۷۸	۲/۲۵
	۲	۱۹/۴۹	۴۳	۲/۲۰۶
	۳	۲۱/۱۷	۴۷	۲/۲۲
	۴	۱/۶۹	۴	۲/۳۷

۴- نتایج و بحث

بر مبنای اجرای مدل ترکیبی پیشنهادی و استخراج مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم، ساختار شبکه عصبی بهینه و پارامترهای ورودی مؤثر بر آن مشخص گردید. روند همگرایی در دستیابی به جواب بهینه در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است مدل ترکیبی پس از ۱۲۰۰ تکرار به جواب بهینه رسید که معیار همگرایی، مقایسه با مقدار متوسط نسل نهایی است. به عبارت دیگر با توجه به اینکه متوسط مقادیر کروموزم‌های واقع در نسل نهایی برابر با مقدار بهینه شده است، لذا هیچ‌گونه پراکندگی در جوابها برای

شکست لوله‌ها بر خوردار است اما چنانچه داده‌های در دسترس دارای فراوانی و دامنه تغییرات محدودی باشد، نتایج استخراجی قابل تعمیم به سایر شبکه‌های مشابه نیست. بر پایه ساختار بهینه شبکه مشخص شده می‌توان صحت کارکرد آن را با مقایسه مقادیر واقعی نرخ شکست تعیین نمود. به منظور ارزیابی کارایی و برتری مدل تدوین شده از شاخص متوسط مجذور خطا^۱ که عمومیت بیشتری دارد، استفاده گردید:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{mi} - X_{ci})^2}{n} \quad (12)$$

که در این رابطه

متغیرهای X_{ci} و X_{mi} به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هستند. نحوه ارزیابی مدل‌ها بر اساس این شاخص به این صورت است که هر چه این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد، آن مدل از مطلوبیت بالاتری برخوردار است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، شبکه پیشنهادی توسط مدل بهینه‌سازی از قابلیت بالایی (شاخص خطای MSE برابر ۰/۰۰۲۶) در پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها برخوردار بوده و با توجه به پارامترهای ورودی مؤثر بهینه می‌تواند به عنوان مدل شبیه‌ساز در مدل‌های مدیریت بهینه باسازی و نوسازی شبکه‌های توزیع آب مورد استفاده قرار گیرد. به منظور ارائه برتری روش پیشنهادی در محاسبه نرخ شکست لوله‌ها روشهای دیگری همچون ANN، ANFIS، EPR و NLP نیز بر روی داده‌های مورد استفاده اعمال گردید و نتایج در قالب شکل ۷ (الف تا د) ارائه شد. همان‌طور که در این شکلها مشخص است روشهای مورد اشاره از دقت پایینی در پیش‌بینی نرخ شکست برخوردار بوده و دارای خطای بالایی در شبیه‌سازی هستند (جدول ۴).

روش پیشنهادی در مطالعه حاضر نشان می‌دهد که برای شبیه‌سازی نرخ شکست لوله‌ها نیازی به تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر در نرخ شکست نبوده و تنها بر پایه داده‌ها و اطلاعات قابل اندازه‌گیری از وضعیت شبکه می‌توان مناسب‌ترین و بهترین ساختاری را که از توانایی بالایی در شبیه‌سازی نرخ شکست لوله‌ها برخوردار باشد، تدوین نمود. نکته قابل توجه دیگر در این مطالعه، سادگی به‌کارگیری روش ارائه شده به منظور استفاده در شبکه‌هایی با اندازه‌های متفاوت است.

¹ Mean Square Error (MSE)

$$W^1 = \begin{bmatrix} -0.4739 & -0.2119 & 0.7301 \\ 0.0657 & -0.9311 & 0.2709 \\ 0.2724 & -0.9003 & 0.8057 \\ -0.0592 & 0.8197 & -0.6051 \\ 0.1431 & 0.05246 & 0.7548 \\ -0.0847 & -0.8829 & 0.1703 \\ 0.1578 & 0.7122 & -0.7795 \\ 0.2258 & 0.1394 & 0.6597 \\ -0.9698 & -0.9014 & -0.7603 \\ -0.1148 & 0.6431 & 0.3028 \end{bmatrix}$$

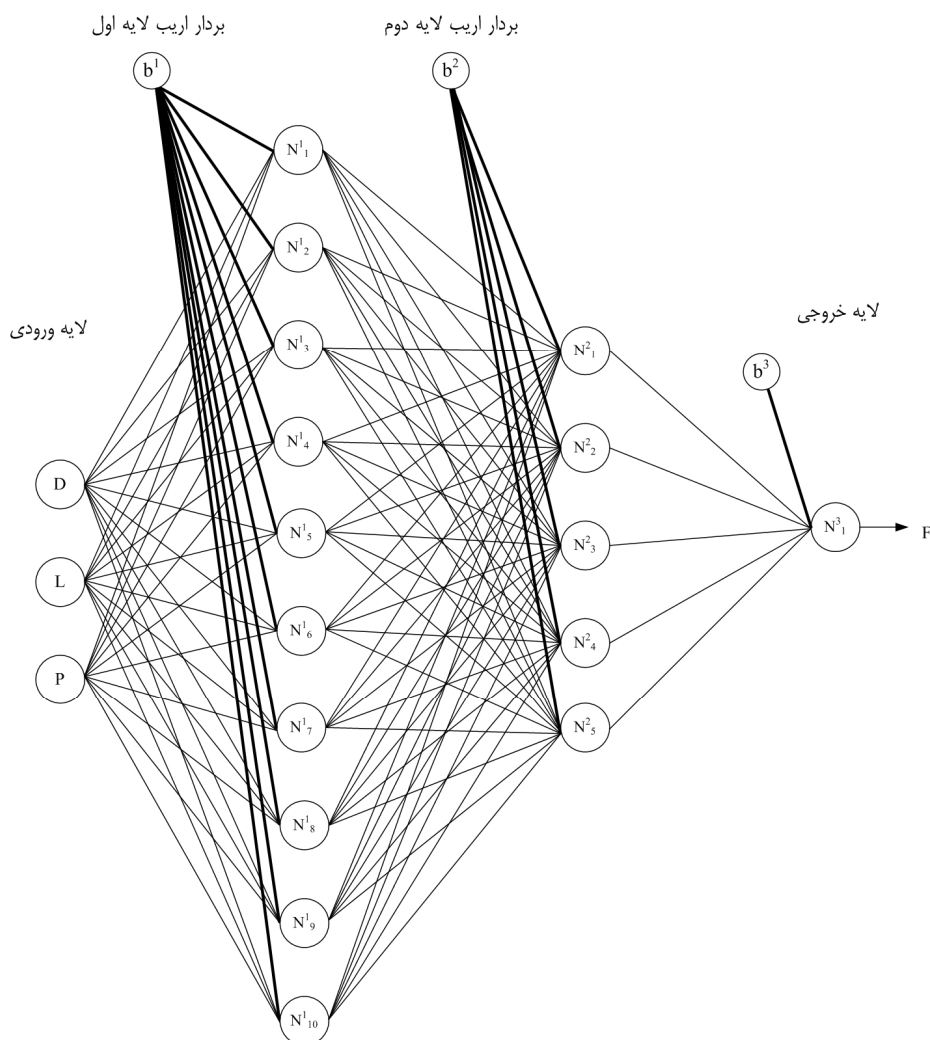
$$W^2 = \begin{bmatrix} 0.4984 & -0.1282 & 0.9695 & -0.295 & 0.4955 & -0.6982 & -0.1079 & -0.892 & 0.7522 & -0.767 \\ -0.2206 & 0.9229 & 0.3564 & 0.057 & 0.9402 & -0.7495 & -0.5521 & 0.2962 & 0.2601 & 0.9211 \\ 0.3598 & 0.6158 & 0.9956 & 0.2885 & 0.7322 & 0.8329 & 0.5885 & 0.2772 & 0.6147 & 0.9676 \\ 0.6317 & 0.7964 & -0.2542 & 0.9998 & 0.1850 & 0.9994 & 0.7614 & -0.7561 & 0.9995 & -0.2512 \end{bmatrix}$$

$$W^3 = [0.4421 \quad -0.726 \quad -0.8262 \quad 0.1974]$$

$$b^1 = \begin{bmatrix} -0.9480 \\ 0.9588 \\ 0.7856 \\ 0.7283 \\ 0.9348 \\ 0.1890 \\ 0.4720 \\ 0.8821 \\ 0.6018 \end{bmatrix} \quad b^2 = \begin{bmatrix} -0.5226 \\ 0.6943 \\ 0.1055 \\ 0.5617 \end{bmatrix}$$

$$b^4 = 0.434$$

با توجه به مشخصات بهینه شبکه که در بخش مذکور به آن اشاره گردید، ساختار شبکه عصبی برای پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها به صورت شکل ۵ است. مقایسه مطالعات قبلی انجام شده توسط سلطانی و تابش و ساختار بهینه مشخص شده در این مطالعه (شکل ۵) نشان می‌دهد که از بین پارامترهای متعدد ورودی تنها قطر، طول و فشار برای تعیین میزان نرخ شکست لوله‌ها به عنوان عوامل بهینه مؤثر توسط ساختار پیشنهادی معرفی شده‌اند در صورتی که پارامترهای دیگری نظیر سن لوله و عمق نصب نیز بر نرخ شکست لوله‌ها تأثیرگذار هستند [۱۹-۲۱]. علت این تفاوت را می‌توان در کمبود داده‌های آماری جمع‌آوری شده از این پارامترها و همچنین نبود فراوانی لازم از هر پارامتر دانست. همچنین لازم به ذکر است که روش پیشنهادی ارائه شده در صورت وجود اطلاعات قابل توجه از تمامی پارامترهای ورودی و خروجی، از کارایی بالایی در مشخص نمودن بهترین ساختار و کارآمدترین رابطه پیش‌بینی نرخ



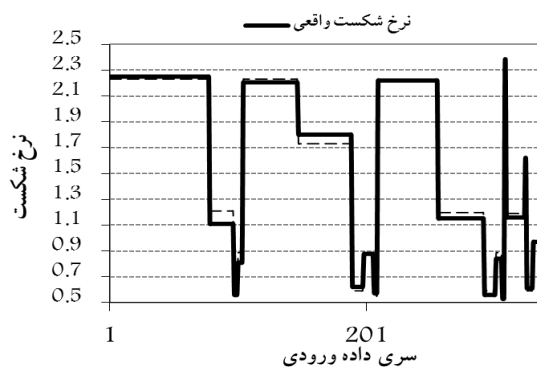
شکل ۵- ساختار بهینه شبکه عصبی با توجه به پارامترهای مؤثر ورودی

جدول ۴- مقایسه شاخص خطای MSE برای روشهای مختلف پیش‌بینی

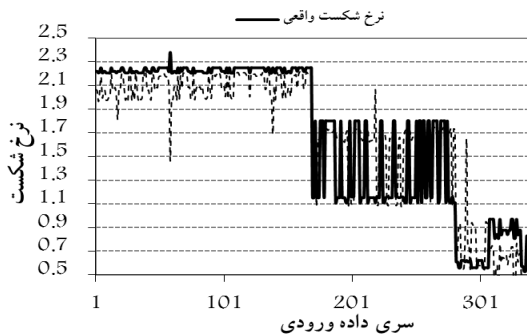
روش پیشنهادی	NLR	ANFIS	ANN	روش MSE
نرخ شکست	۰/۰۰۲۶	۰/۰۷۷	۰/۸	۰/۰۳



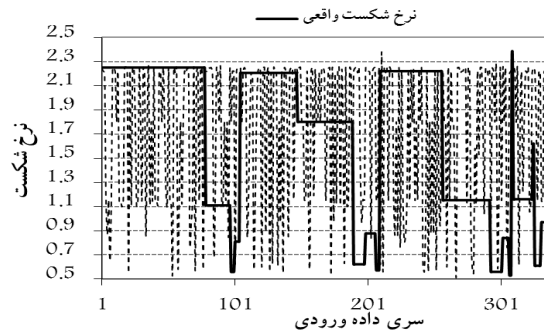
شکل ۷- الف- نمودار نرخ شکست پیش‌بینی شده با روش ANN



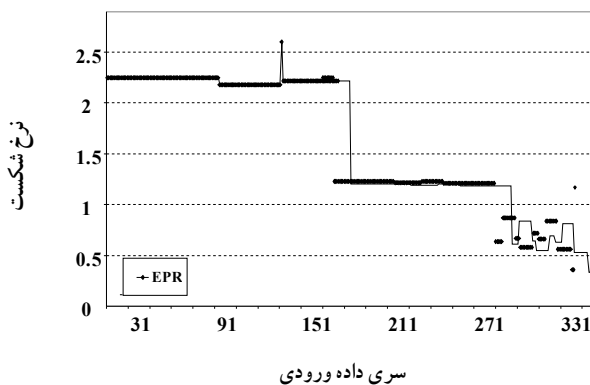
شکل ۶- مقایسه نرخ شکست شبیه‌سازی شده با استفاده از ساختار بهینه با مقادیر واقعی



شکل ۷-ج- نمودار نرخ شکست پیش‌بینی شده با روش NLR



شکل ۷-ب- نمودار نرخ شکست پیش‌بینی شده با روش ANFIS



شکل ۷-د- نمودار نرخ شکست پیش‌بینی شده با روش EPR

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت شبکه‌های توزیع آب در تأمین نیازهای آبی هر محدوده مطالعاتی و لزوم توجه به آسیب‌هایی که ممکن است در طی فرایند بهره‌برداری از آن رخ دهد، در این تحقیق روشی برای ارائه پیش‌بینی میزان نرخ شکست لوله‌های شبکه تدوین و پیشنهاد گردید. در مدل پیشنهادی از شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور ارتباط دادن پارامترهای مؤثر در نرخ شکست لوله‌ها با میزان شکست استفاده شد. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک تابع هدف، ساختار پیشنهادی که حداقل نمودن میزان خطای شبیه‌سازی شده با استفاده از ساختار شبکه عصبی مصنوعی است، حداقل شده و مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم که مشخصات شبکه عصبی و پارامترهای مؤثر در نرخ شکست هستند، تعیین گردید. از آنجا که بخش قابل توجهی از اطلاعات مؤثر در نرخ شکست لوله‌ها قابل اندازه‌گیری نبوده و یا دسترسی به داده‌های آن مشکل است لذا در این تحقیق از پارامترهای طول، قطر، عمق نصب، فشار و سن به‌عنوان عوامل تأثیرگذار در نرخ شکست لوله‌ها استفاده و در فرایند بهینه‌سازی دخالت داده شد.

از آنجا که پارامتر خروجی در ساختار بهینه شبکه عصبی، نرخ شکست لوله‌ها است لذا لازم است بر پایه داده‌ها و آمار موجود، این

میزان محاسبه و به‌عنوان مقادیر واقعی شکست در تعیین بهترین ساختار شبکه، مورد استفاده قرار گیرد. شبکه آب شرب مشهد به‌عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب و مدل پیش‌بینی نرخ شکست برای آن تدوین گردید. با اجرای مدل پیشنهادی، مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم که مشتمل بر مشخصات شبکه و پارامترهای مؤثر در نرخ شکست هستند مشخص و با توجه به آن رابطه پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها استخراج گردید. نتایج حاصل از روش ترکیبی پیشنهادی نشان می‌دهد که می‌توان در مدت زمان کوتاهی با توجه به شبکه مورد مطالعه و اطلاعات موجود از آن، وضعیت آسیب‌هایی را که ممکن است در آینده بر شبکه اعمال شود و اثرات سوء در تأمین نیازها بگذارد را مشخص کرد. مهم‌ترین دستاوردهای حاصل از این مطالعه را می‌توان به‌صورت زیر ارائه نمود:

- ۱- ارائه روش ترکیبی بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی؛
- ۲- تعیین پارامترهای مؤثر بر نرخ شکست لوله‌های واقع در شبکه‌های توزیع آب بدون نیاز به تحلیل حساسیت و مشخص کردن تأثیر هر یک بر روی پارامتر خروجی؛
- ۳- ارائه بهترین ساختار شبکه عصبی مصنوعی که از قابلیت بالایی در پیش‌بینی نرخ شکست برخوردار باشد.

- 1- Beigi, F. (1999). "Pathology of urban water distribution networks." *J. of Water and Environment*, 78(37), 17-25.
- 2- Tashayoei, H. (2005). "Implementation of preventive maintenance system for water facilities, challenges and achievements resulting." *3rd National Conference on Repair and Maintenance*, Hall Summit, Tehran. (In Persian)
- 3- Sacluti, F. (1999). "Modeling water distribution pipe failures using Artificial Neural Networks." MSc. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Canada.
- 4- Cox, D. (1972). "Regression models and life tables." *J. of the Royal Statistical Society*, 34 (2), 187-220.
- 5- Shamir, U., and Howard, C. (1979). "A analytical approach to scheduling pipe replacement." *J. of AWWA.*, 71(5), 248-258.
- 6- Walski, T., and Pelliccia, A. (1982). "Economic analysis water main breaks." *J. of AWWA.*, 74(3), 140-147.
- 7- Kettler, A., and Goulter, L. (1985). "An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks." *Canadian J. of Civil Engineering*, 12(2), 286-293.
- 8- Su, Y., Mays, L., Duan, N., and Lansey, K.E. (1987). "Reliability based optimization model water distribution systems." *J. Hydraulic Engineering Division, ASCE*, 114(12), 1539-1556.
- 9- Tabesh, M., and Abedini, A. (2005). "Failure analysis of pipes in the urban water distribution system." *IRAN-Water Resources Research*, 1(1), 78-89. (In Persian)
- 10- Tabesh, M., Aghaei, A., and Abrishami, J. (2008). "Investigation of the effects of influential parameters on pipe burst in water distribution systems using evolutionary polynomial regression method." *University College of Engineering Journal, Tehran University*, 42(6), 691-703. (In Persian)
- 11- Tabesh, M., Jafari, H., and Delavar, M. (2009). "A water distribution network accident management model using GIS." *J. of Water and Wastewater*, 70, 2-15. (In Persian)
- 12- Prudencio, R., Ludermir, T., and Carvalho, F. (2002). "Neural network hybrid learning: Genetic algorithms and levenberg-marquadt." *26th Annual Conference of the Gesellschaft fur Klassifikation, Germany, Mannheim*, 464-472.
- 13- Giustolisi, O., Savic, D., and Doglioni, A. (2004). "Data reconstruction and forecast by evolutionary polynomial regression (EPR)." *6th International Conference on Hydroinformatics, Liong, Phoon and Babovic* (eds.), Singapore.
- 14- Ahn, J., Kim, H., Lee, H., Park, S., Yu, M., Cho, S., and Koo, J. (2004). "Predicting water pipe breaks using neural network." *Zenkoku Suido Kenkyu Happyokai Koenshu*, 55(1), 702-703.
- 15- Bevilacqua, M., Braglia, M., Frosolini, M., and Montanari, R. (2005). "Failure rate prediction with artificial neural networks." *J. of Quality in Maintenance Engineering*, 11(3), 279-294.
- 16- Berardi, L., Giustolisi, O., and Primativo, F. (2007). "Exploiting multi-objective strategies for optimal rehabilitation planning." *In Proceedings of Computer and Control in Water Industry (CCWI) - Water Management Challenges in Global Changes-Ulaniki*, Taylor and Francis Group, London, 23-30.
- 17- Soltani, J. (2009). "An intelligent model for reliable optimal rehabilitation and replacement of water distribution networks considering pressure dependency of demand." Ph.D. Dissertation, Tehran University, Tehran. (In Persian)
- 18- Help MATLAB 7.5. Software (R2007b). The MathWorks Incorporation.
- 19- Tabesh, M., and Soltani, J. (2006). "Mechanical reliability of urban water distribution system using artificial neural networks to optimal operation management." *2nd Conference on Water Resources Management*, Isfahan University of Technology, Isfahan. (In Persian)
- 20- Tabesh, M., and Soltani, J. (2007). "Failure modeling in pipe urban water distribution system using neural networks-fuzzy in order to optimal operation management." *3rd National Congress of Civil Engineering*, Tabriz University, Tabriz. (In Persian)
- 21- Tabesh, M., Soltani, J., Farmani, R., and Savic, D. (2009). "Assessing pipe failure rate and mechanical reliability of water distribution networks using data driven modeling." *J. of Hydroinformatics*, 11(1), 1-17.