

مطالعه (پیش بینی) نرخ شکست لوله‌های اصلی آبرسانی شهری با استفاده از روشهای هوشمند و رگرسیونی

جابر سلطانی^۱

آرش آقایی^۲

مسعود تابش^۱

(دریافت ۸۸/۱/۲۸ پذیرش ۸۹/۲/۱۷)

چکیده

با توجه به سیاست‌های افزایش کارایی و کاهش هدررفت، یکی از اولویتهای راهبردی توسعه پایدار منابع آب، بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع آب شهری است. لذا راهبران سیستم باید همواره شناخت دقیق و صحیحی از قابلیت کاربری شبکه و انزوال و خرابی سازه‌ای (شکست) در لوله‌های اصلی آبرسانی داشته باشند. یکی از راهکارها و کلیدهای مهم مدیریت بهینه بهره‌برداری، تدوین استراتژی‌های نوسازی و بازسازی در شبکه‌های توزیع آب شهری، پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها و ارزیابی قابلیت کاربری آنها است. راه حل‌های گوناگونی برای مطالعه پیش‌بینی شکست در لوله‌ها توسط محققان مختلف خصوصاً در سالهای اخیر مطرح شده است که هر یک نیازمند داده‌های مخصوص خود می‌باشند. مدل‌های قطعی توانی بر حسب سن، مدل‌های قطعی خطی بر حسب سن، مدل‌های قطعی چندمتغیره و مدل‌های گروهی تک متغیره احتمالی، از جمله راه حل‌هایی هستند که خرابی و زوال در ساختار لوله‌ها را دائمی و به‌صورت یک روند یکنواخت با پارامترهایی مستقل از زمان (که شکست لوله‌ها را با سن، جنس و قطر آنها مرتبط می‌سازد) مطرح می‌کنند. در این مقاله علاوه بر بهره‌گیری از پارامترهای بالا به‌منظور پیش‌بینی جامع و دقیق‌تر، از دیگر پارامترهای مؤثر در شکست لوله‌ها ناشی از شرایط محیطی و اقلیمی، بارگذاری ترافیکی و شرایط بهره‌برداری مانند عمق نصب لوله‌ها و فشار آب در شبکه بهره گرفته شد و با استفاده از روشهای رگرسیون چند متغیره، هوش مصنوعی (عصبی و عصبی- فازی) و همچنین روش داده کاوی رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی (برنامه‌نویسی ژنتیک) به پیش‌بینی نرخ شکست لوله پرداخته شد. به‌منظور ارزیابی روشهای ارائه شده با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده حوادث لوله‌ها در شبکه توزیع آب یکی از شهرهای کشور، مطالعه موردی انجام گردید و نتایج اخذ شده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی و رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی ترکیبی مؤید این قابلیت بود که این روشها با ترکیب اثر نوفه‌های پارامترهای غیردائمی و روند یکنواخت شکستی که پارامترهای دائمی پدید می‌آورند و همچنین قرار دادن تعداد بیشتری از پارامترهای مؤثر، در پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها توانمندتر عمل می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع آب، انزوال و شکست لوله‌ها، مدیریت بهینه‌سازی، پیش‌بینی، رگرسیون، شبکه عصبی مصنوعی، سیستم عصبی- فازی

Study (Prediction) of Main Pipes Break Rates in Water Distribution Systems Using Intelligent and Regression Methods

Massoud Tabesh¹

Arash Aghaei²

Jaber Soltani³

(Received Apr. 7, 2009 Accepted May 7, 2010)

Abstract

Optimum operation of water distribution networks is one of the priorities of sustainable development of water resources, considering the issues of increasing efficiency and decreasing the water losses. One of the key subjects in optimum operational management of water distribution systems is preparing rehabilitation and replacement schemes, prediction of pipes break rate and evaluation of their reliability. Several approaches have been presented in recent years regarding prediction of pipe failure rates which each one requires especial data sets. Deterministic models based on age and deterministic multi variables and stochastic group modeling are examples of the solutions which relate pipe break rates to parameters like age, material and diameters. In this

1. Assoc. Prof., Center of Excellence for Eng. and Management of Infrastructures, School of Civil Eng., Tehran University, Tehran, Iran
2. Instructor, Dept. of Civil Eng., Taft Branch, Islamic Azad University (Corresponding Author) (+98 351) 8258858 aghaei@iauyazd.ac.ir
3. Assist. Prof. of Civil Eng., Zabol University, Zabol

۱- دانشیار و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیر ساختها، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۲- مدرس دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تفت، گروه مهندسی عمران، تفت (نویسنده مسئول) aghaei@iauyazd.ac.ir (۰۳۵۱) ۸۲۵۸۸۵۸
۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زابل، زابل

paper besides the mentioned parameters, more factors such as pipe depth and hydraulic pressures are considered as well. Then using multi variable regression method, intelligent approaches (Artificial neural network and neuro fuzzy models) and Evolutionary polynomial Regression method (EPR) pipe burst rate are predicted. To evaluate the results of different approaches, a case study is carried out in a part of Mashhad water distribution network. The results show the capability and advantages of ANN and EPR methods to predict pipe break rates, in comparison with neuro fuzzy and multi-variable regression methods.

Keywords: Water Distribution Networks, Pipe Break, Optimization, Prediction, Regression, ANN, Neuro-Fuzzy Systems.

۱- مقدمه

تعمیر و نگهداری پیشگیرانه در شرکتهای آب و فاضلاب که بر مبنای برنامه ریزی مدون تعمیر و سرویس دستگاهها و تجهیزات قبل از خرابی استوار است، از سال ۱۳۸۲ (۲۲۳ میلیارد ریال) به بعد، هزینهها کاهش یافته است. [۱].

به طور کلی شکست مکانیکی لولهها تحت شرایط عادی (یعنی فرسودگی طبیعی آنها) به عنوان مؤلفه اصلی شبکههای توزیع آب شهری، هنگامی رخ می دهد که تنشهای حاصل از شرایط محیطی و عملیاتی، متجاوز از قابلیت ارتجاعی محدود سازههای لوله گردد. انزوای لولهها متأثر از عوامل متعددی مانند قدمت (سن)، قطر، جنس، پایداری و خوردگی خاک و آب، شرایط نصب، اجرا و بهره برداری است که می تواند به عنوان شرایط محیطی و عملیاتی استاتیکی و یا متغیر در بازه طول لوله، بر حسب زمان تعریف شود. به سادگی مشخص است که پارامترهای ایستا در زمان، به خصوصیات لوله و شیوه نصب آنها مرتبط هستند. در حالی که پارامترهای دینامیکی، آنهایی هستند که پیرامون لوله و محیط اطراف آن قرار دارند. نکته اساسی، توجه به این مطلب است که شکست در هر مکان، شرایط به خصوصی دارد و یک مدل پیش بینی شکست، قابلیت تعمیر برای عموم را ندارد؛ لذا آنالیز دادههای شکست می تواند به مشخص نمودن دلایل اصلی شکستها در محدودههای ویژه ای از شبکه یا در لولههای خاص کمک نموده و کلیه تغییرات در طراحی و سیاستهای زیر ساخت را مشخص نماید.

برای آنالیز دادهها و شکست لولهها، روشهای مختلفی وجود دارد [۲ و ۳]. تحقیقات زیادی در زمینه آنالیز شکست و پیش بینی نرخ شکست لولهها انجام شده است اما هنوز اکثریت مدل های پیش بینی شکست، منحصراً تعمیر یافته از فاکتورهای استاتیکی و تعداد محدودی از پارامترهای مؤثر در شکست هستند و جامعیت کافی ندارند [۴ و ۵]. مدل متداول شامیر^۱ و هاوارد^۲ یک مدل نمایی برای پیش بینی نرخ شکست لولهها بر حسب زمان به صورت زیر است [۶]

$$BR = BR_{(t_0)} \times e^{K(t-t_0)} \quad (1)$$

محدودیت حجم منابع آب شیرین و افزایش تقاضا برای این کالای کمیاب و ارزشمند از یک سو و پراکندگی زمانی و مکانی ناهمگون میان منابع و نیاز آبی از سوی دیگر، موضوع آب و مدیریت بر آن را از حیثه های مهندسی گذرانده و جایگاه ویژه ای را در گسترده های اقتصاد و مدیریتی، فرهنگی و گاه حتی سیاسی و امنیتی برای آن رقم زده است. باید توجه داشت در دنیای مدرن امروری برای تغییر در مفاهیم، ادبیات و مدیریت خردمندانه آب، برنامه ریزی، توسعه و بهره برداری بهینه از زیرساختهای شبکه های توزیع آب، به عنوان گسترده ترین و پیچیده ترین بخش یک سیستم آبرسانی مطرح می گردد. تأمین و رساندن آب مورد نیاز مشترکان خانگی، مصارف عمومی، تجاری و صنعتی با کمیّت، کیفیت و فشار مناسب بر اساس استانداردهای بین المللی موجود از محل تولید به مصرف در طول دوره طرح و عمر مفید سیستم از اهم وظایف این زیرساخت است. با توجه به این مهم، حفظ و احیای این شریانها همواره به عنوان یکی از برنامه های عمده دستگاههای اجرایی مربوطه است.

عموماً برنامه ریزیها به دو گونه کوتاه مدت برای مقاصد عملیاتی و بلند مدت برای اهداف سرمایه گذاری مطرح می گردد. برنامه ریزی کوتاه مدت برای تأمین منابع کافی و نیازهای آتی به پیش بینی تعداد شکستها در لوله های اصلی آبرسانی که احتمالاً در طی چند سال آتی رخ خواهد داد، نیاز دارد [۱]. در برنامه ریزی بلند مدت، هدف، شناسایی صحیح و دقیق از نرخ فرسودگی لوله های مدفون برای یافتن زمان بهینه تعویض به جای تعمیر لوله است. بدیهی است که در تمام این برنامه ریزیها، یافتن شاخص نرخ شکست، از کلیدهای راهگشای مسئله محسوب می شود. سناریوی پیش بینی تعداد حوادث در شبکه، همگام با برنامه ریزی بهره برداری بهینه از آنها علاوه بر صرفه جویی در هزینهها و افزایش درآمدها، افزایش میزان سرویس دهی، طول عمر مفید شبکه و اطمینان پذیری سیستم را سبب خواهد شد.

در تأکید اهمیت موضوع بر اساس بررسی های انجام شده، میزان هزینه های نگهداری و تعمیرات سنتی بخش آب از ۹۴ میلیارد ریال در سال ۱۳۷۸ به ۲۳۹ میلیارد ریال در سال ۱۳۸۱، افزایش چشمگیری نشان می دهد. در حالی که با شروع نگرش و استقرار

¹ Shamir
² Howard

[۲]. از بررسی و آنالیز داده‌های شهر کرمان برای تغییرات تعداد حوادث سالانه (NB) در برابر قطر لوله آبست رابطه زیر را ارائه کرده‌اند [۲]

$$NB = 9.38e^{-0.1653De} \quad r^2 = 0.9194 \quad (۵)$$

آنها همچنین با آنالیز داده‌ها برای تغییرات نرخ شکست در مقابل قطر لوله‌های آبست نیز رابطه زیر را به دست آوردند

$$BR = \sqrt{0.01 + \frac{0.9092}{De^2}} \quad r^2 = 0.729 \quad (۶)$$

همانگونه که از روابط بالا بر می‌آید، از نرخ شکست یا شکست، تنها ارتباطات واحدی با یکی از پارامترهای مستقل از زمان بیان گشته که این محدودیتها باعث می‌شود که نرخ شکست یا شکست از جامعیت کمتری برخوردار باشد. برای حل این محدودیتها، آقایی و همکاران با استفاده از الگوی برنامه‌نویسی ژنتیک و ترکیب پارامترهای دائمی و غیردائمی در یکی از شبکه‌های توزیع آب شهری کشور، فرمول‌های پیش‌بینی تعداد شکست در لوله‌های اصلی آبرسانی را با متغیرهای قابل تشخیص صریح، بهبود دادند، هر چند که پارامتر فشار در آن به‌طور مستقیم در نظر گرفته نشده بود [۱۰]. در این مقاله با استفاده از چهار روش پیشرفته محاسباتی یعنی روشهای شبکه‌های عصبی، سیستم‌های عصبی-فازی، برنامه‌نویسی ژنتیک تکاملی و رگرسیون چندمتغیره، با بهره‌گیری از مجموع پارامترهای قابل پیش‌بینی صریح در مدل‌سازی که از داده‌های ثبت حوادث قابل استخراج است (عمق، طول، قطر، سن و فشار)، به پیش‌بینی نرخ حوادث در شبکه‌های توزیع آب (لوله‌ها) پرداخته شد. همچنین با توجه به کیفیت و کمیت داده‌های در دسترس، نقاط ضعف و قوت این روشها بررسی گردید. نتیجه این تحقیق در مدیریت بهینه بهره‌برداری و اطمینان‌پذیری زیرساخت شبکه‌های توزیع آب شهری کاربرد مستقیم داشته و باعث بهبود نتایج آنها خواهد گردید.

۲- روش تحقیق

۲-۱- شبکه‌های عصبی مصنوعی^۷

شبکه‌های عصبی، سیستم‌های دینامیکی هستند که با پردازش داده‌های تجربی، دانش و یا قانون نهفته در داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند. این الگوریتم‌ها با ساختار پرسپترون، از چندین لایه (طبق تحقیقات قبلی معمولاً سه لایه) و هر لایه از تعدادی واحد پردازشگر به نام نرون تشکیل شده است [۱۱ و ۱۲]. نرون مصنوعی می‌تواند یک تابع ریاضی غیر خطی باشد و به‌طور مستقل

^۷ Artificial Neural Network (ANN)

که در آن

BR مشخصه نرخ شکست در سال t (بر حسب yr / 1000ft / تعداد شکست)، t₀ سال پایه آنالیز، BR_(t0) نرخ شکست در سال K و t₀ نرخ رشد (1/ yr) است. ضریب K بر حسب جنس و قطر لوله‌ها بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ متغیر است.

کنترل^۱ و گولتر^۲، نیز با استفاده از شاخص تعداد کل شکست‌های سالانه، مطالعاتی را برای بیان تغییرات تعداد حوادث سالانه در برابر سن و قطر لوله‌های چدنی و آبست در شهر وینپگ^۳ کانادا انجام داده و رابطه‌ای به شرح ذیل ارائه دادند [۷]

$$NB = K_0 \times Ae \quad (۲)$$

که در این رابطه

NB تعداد شکست در سال، K₀ پارامتر رگرسیونی و Ae سن لوله بر حسب سال است. طبق این تحقیق روند تغییرات سن برای هر دو مورد خطی بوده و نشان دهنده افزایش ثابت تعداد شکست در هر سال است که معمولاً در واقعیت به این صورت نخواهد بود، زیرا با گذشت زمان، لوله‌ها فرسوده شده و مقاومت آنها کاهش می‌یابد و آسیب پذیری آنها بیشتر می‌شود. در نتیجه با طولانی شدن عمر استفاده از لوله‌ها، تعداد شکست‌های سالانه افزایش بیشتری خواهد یافت. آنها همچنین برای نرخ شکست (BR) رابطه زیر را ارائه کردند

$$BR = (2.002 - 0.0064De) \quad (۳)$$

که در این رابطه

BR بیانگر تعداد حوادث سالیانه در هر کیلومتر لوله ۱ام و De قطر لوله بر حسب میلی‌متر است. رابطه بالا در لوله‌های چدنی از قطر ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر تعریف شده است.

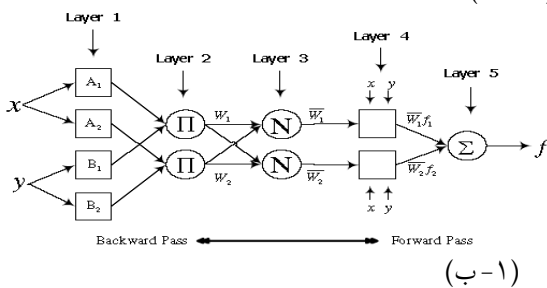
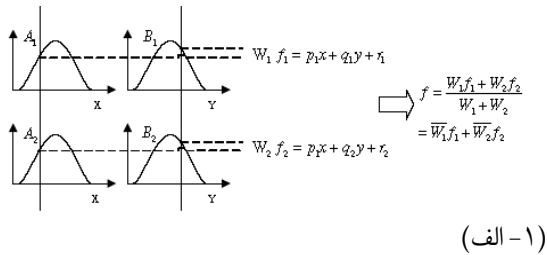
سو و همکاران^۴ بر اساس داده‌های شکست لوله‌های شبکه توزیع آب شهر سنت لوئیس^۵ رابطه زیر را برای نرخ شکست لوله ۱ام (تعداد شکست در هر مایل لوله ۱ام) استخراج کردند [۸]

$$BR = \frac{0.6858}{De^{3.28}} + \frac{2.7158}{De^{1.3131}} + \frac{2.7658}{De^{3.5792}} + 0.42 \quad (۴)$$

در پژوهشی دیگر ساکلوتی^۶ با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی، پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها در شبکه توزیع آب یکی از شهرهای کانادا را با توجه به تأثیر عمده شرایط اقلیمی و یخبندان در شکست لوله‌ها مورد بررسی قرار داده است [۹]. در طی سالهای اخیر نیز تابش و عابدینی با توجه به آمار حوادث برخی شبکه‌های آبرسانی شهری کشور، تحقیقاتی بر روی نرخ شکست لوله‌ها انجام داده‌اند

^۱ Kettler
^۲ Goulter
^۳ Winnipeg
^۴ Su et al.
^۵ St. Louis
^۶ Sacluti

یک مجموعه فازی است و خروجی هر گره برابر درجه عضویت متغیر ورودی در این مجموعه فازی است. در لایه دوم هر گره درجه فعالیت یک قانون را محاسبه می‌کند. لایه سوم لایه عملگر است که میانگین وزن هر قانون را محاسبه می‌کند. لایه چهارم خروجی هر گره در این لایه است و در لایه پنجم، هر گره مقدار خروجی نهایی از ANFIS را محاسبه می‌کند.



شکل ۱- سیستم استنتاج فازی نوع سوگنو به صورت یک ساختار شبکه جلو رونده و معماری شبکه ANFIS آن

الگوریتم یادگیری ترکیبی در مدل ANFIS اجازه می‌دهد که سیستم‌های فازی در مباحث آموزش پارامترها از الگوریتم آموزش گسترش برگشتی تطابقی استفاده نمایند. در این روش با استفاده از الگوریتم شیب نزولی خطا، مقدار خطا به سمت ورودی‌ها پخش شده و پارامترها تصحیح می‌شوند. این روش آموزش دقیقاً همانند روش پس‌انتشار خطای مورد استفاده در شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) است. طبق ساختار شبکه ANFIS که در شکل ۱ ملاحظه می‌گردد، می‌توان خروجی کل (f) را به صورت ترکیب خطی پارامترهای نتیجه نوشت

$$f = \bar{w}_1 \bar{f}_1 + \bar{w}_2 \bar{f}_2 = (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2 \quad (7)$$

که در این رابطه w_i درجه فعالیت نرمال شده قانون i ام و p_i, q_i, r_i پارامترهای تطبیقی این لایه هستند که پارامترهای نتیجه نیز خوانده می‌شوند. به این ترتیب پیاده‌سازی یک سیستم فازی به گونه‌ای انجام می‌شود که قابلیت یادگیری داشته باشد. بنابراین مقادیر پارامترهای نتیجه با استفاده از روش کمترین مجموع مربعات خطا به دست می‌آیند. با

عمل می‌کند. در نتیجه یک شبکه عصبی که از اجتماع این نرون‌ها تشکیل می‌شود نیز می‌تواند یک سیستم کاملاً پیچیده و غیر خطی باشد.

در این تحقیق به عنوان یک روش هوشمند، مدلی برای بررسی نرخ شکست مکانیکی لوله‌ها از طریق جمع‌آوری داده‌های واقعی و مدل کردن تعداد زیادی از پارامترهای مؤثر در حوادث به منظور مدیریت بهینه بهره‌برداری از شبکه‌ها ارائه گردید.

۲-۲- سیستم استنتاج فازی - عصبی تطابقی^۱

سیستم‌های استنتاج فازی - عصبی تطابقی با ترکیب عملکرد منطقی سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی و با اتکا به ترکیب قدرت یادگیری و توان آموزش‌پذیری شبکه‌های عصبی، رابطه بین متغیرهای مختلف را شناسایی می‌نمایند و در اینجا به پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها می‌پردازد. سیستم فازی از جمله روش‌های هوش مصنوعی مبتنی بر قواعد منطقی اگر - آنگاه است. نقطه شروع یک سیستم فازی به دست آوردن پایگاه قواعد آن است. این پایگاه، مجموعه‌ای از قوانین منطقی اگر آنگاه فازی از دانش فرد خبره یا دانش حوزه مورد نظر است که رابطه بین متغیرهای فازی را بیان می‌دارند. برای پیاده‌سازی یک سیستم فازی توسط شبکه‌های عصبی ساختارهای مختلفی پیشنهاد شده است که یکی از قدرتمندترین این ساختارها، ساختار شبکه فازی - عصبی موسوم به ANFIS است. از قابلیت‌های مهم این ساختار استفاده آن در مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های پیچیده است. به طور کلی هر پدیده‌ای که بتوان آن را با مجموعه‌ای از مشاهدات رفتار ثبت کرد، بدون نیاز به فرمول یا مدل خاص ریاضی برای طراحی، به کمک این روش قابل شبیه‌سازی است. ویژگی بسیار مهم این نوع سیستم‌ها این است که نیازی به فرمول یا مدل ریاضی برای طراحی ندارند. لذا در مورد طراحی سیستم‌هایی که نتوان عملکرد آنها را به صورت مدل ریاضی بیان کرد، بسیار مفید و مناسب به نظر می‌رسند. شکل ۱ ساختار یک سیستم استنتاج فازی - عصبی ۵ لایه، با دو متغیر ورودی که هر ورودی دارای یک تابع عضویت است را نشان می‌دهد. در شکل ۱- الف سیستم فازی سوگنو با دو ورودی (x, y) و یک خروجی (f) به همراه دو قانون و در شکل ۱- ب معماری سیستم ANFIS معادل آن ترسیم شده است.

چنانچه خروجی هر لایه شبکه به صورت O_i (خروجی i امین گره در i امین لایه) نشان داده شود، آنگاه می‌توان عملکرد لایه‌های مختلف شکل ۱ را به صورت زیر بیان نمود:

لایه اول لایه ورودی است به طوری که هر گره در این لایه، معادل

^۱ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots & X_{1K} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \dots & X_{2K} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & \dots & X_{3K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{N1} & X_{N2} & X_{N3} & \dots & X_{NK} \end{bmatrix} = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ \dots \ X_K] \quad (9)$$

جمله زام رابطه ۸ می تواند به صورت زیر نوشته شود

$$z_{n+1}^j = [(X_1)^{ES(j,1)} (X_2)^{ES(j,2)} (X_3)^{ES(j,3)} \dots (X_K)^{ES(j,K)}] \quad \forall j=2 \dots d \quad (10)$$

که در آن

z^j ، زامین بردار ستونی حاصل ورودی های کاندید شده (x_i) و ES ماتریس توان هاست. بنابراین بر مبنای ماتریس اصلی روش برنامه نویسی ژنتیک قاعده ای می توان نوشت

$$Y = a_0 + a_1 \cdot Z_1 + a_2 \cdot Z_2 + a_3 \cdot Z_3 + a_4 \cdot Z_4 = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_1 X_2 + a_3 \cdot X_3 / X_1 + a_4 \cdot X_2 / X_3 \quad (11)$$

با توجه به آنچه در مورد ساختار و پروسه رگرسیون ترکیبی - تکاملی بیان شد، برای توابع زیر ساخت مدل، از جعبه ابزار GA موجود در نرم افزار Matlab 6.5 بهره گرفته شد و پروسه به صورت رابط گرافیکی در محیط نرم افزار اجرا گردید.

۲-۴- رگرسیون غیر خطی^۴

رگرسیون چند متغیره روشی برای مطالعه سهم چند متغیر مستقل در پیش بینی متغیر وابسته است. هدف از کاربرد روش رگرسیون چند متغیره برای پیش بینی نرخ شکست لوله ها در شبکه توزیع آب، لحاظ کردن تعداد عوامل بیشتری است که در شکست لوله ها مؤثر هستند که تا حد امکان بتوان مدل جامع تری در مقایسه با تحقیقات قبلی به منظور پیش بینی های دقیق تر انجام داد. رگرسیون چند متغیره در این تحقیق از طریق نوشتن کد در نرم افزار Matlab 7.04 استفاده شد. در این مطالعه نرخ شکست به عنوان متغیر وابسته و عوامل مؤثر در شکست لوله ها نظیر قطر، طول، سن، عمق نصب و فشار هیدرولیکی به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند.

۳- معیارهای ارزیابی

از جمله توابع هدف و معیارهای ارزیابی شبکه عصبی مصنوعی که در این پژوهش به کار رفته، میانگین مجذورات خطا^۵، جذر میانگین مجذورات خطا^۶ و شاخص تطابق^۷ است. روابط به کار رفته شده

⁴ Non-Linear Regression (NLR)

⁵ Mean Squared Error (MSE)

⁶ Root Mean Squared Error (RMSE)

⁷ Index of Accordance (IOA)

ترکیب این روش و روش پس انتشار خطا، یک روش آموزشی ترکیبی ایجاد می شود که به صورت زیر عمل می کند: در هر دو آموزش هنگام حرکت رو به جلو، خروجی گره ها به صورت عادی تا لایه چهارم محاسبه می شوند و سپس پارامترهای نتیجه توسط روشهای محاسبه خطا نظیر کمترین مجموع مربعات خطا محاسبه می شوند. در ادامه پس از محاسبه خطا در بازگشت رو به عقب، نسبت خطا بر روی پارامترهای شرط، پخش شده و با استفاده از روش شیب نزولی خطا، مقدار آنها تصحیح می شود. استفاده از این روش در حل مسائل شبکه های توزیع آب در سالهای اخیر در حال گسترش است [۱۳ و ۱۴].

۲-۳- روش برنامه نویسی ژنتیک الگویی در رگرسیون ترکیبی - تکاملی

تلفیق رگرسیون عددی و نمادین به یک رگرسیون چند جمله ای ترکیبی - تکاملی برای نخستین بار توسط گیوستولیسی^۱ و ساویچ^۲ ارائه گردید [۱۵]. در این روش با الگوی برنامه نویسی ژنتیک^۳، برنامه های کامپیوتری برای حل مسئله داده شده، استنتاج می شود. به دلیل استراتژی استفاده از ساختارهای چند جمله ای مشابه قواعد GP، علاوه بر اینکه در این روش نیازی به تعیین مدل رگرسیون از قبل نیست، پیچیدگی عبارتهای برآورد شده و همچنین مشکلات مرتبط با GP کلاسیک نیز کاهش می یابد. تمام عبارتهای حاصله با استفاده از فرایند تکاملی به صورت طرف راست رابطه زیر در می آیند

$$y = \sum_{j=1}^m a_j \cdot Z_j + a_0 \quad (8)$$

که در این رابطه

y تخمین حداقل مربعات مقادیر هدف، a_j یک پارامتر قابل تنظیم برای جمله j ام، a_0 یک بایاس (ثابت) انتخابی، m تعداد ترم های عبارت و Z_j یک متغیر تغییر شکل یافته است. ثابت j پیامد متغیرهای مستقل پیش گویی کننده ورودی است $(x_1 \ x_2 \ \dots \ x_k)$ که k تعداد متغیرهای مستقل پیش گویی کننده است. مبنای روش رگرسیون چند جمله ای ترکیبی - تکاملی، انجام یک جستجوی پویا است که از طریق قیاس مرحله به مرحله ی رگرسیون ها به تکامل می رسد. به عنوان مثال چنانچه ماتریس ورودی X به صورت زیر باشد

¹ Giustolisi

² Savic

³ Genetic Programming (GP)

به صورت زیر است

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{\text{actual},i} - y_{\text{prediction},i})^2 \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{\text{actual},i} - y_{\text{prediction},i})^2} \quad (13)$$

$$IOA = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n |y_{\text{prediction},i} - y_{\text{actual},i}|^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (|y_{\text{prediction},i} - y_{\text{average}}| + |y_{\text{actual},i} - y_{\text{average}}|)^2 \right]} \quad (14)$$

که در آن

y_{actual} داده‌های واقعی (مشاهده شده)، $y_{\text{prediction}}$ داده‌های پیش‌بینی شده، y_{average} متوسط داده‌های واقعی و n تعداد مشاهدات است.

۴- ارزیابی روش

همانگونه که بیان گردید، هدف اصلی این تحقیق پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها در چارچوب یک سیاست بهینه مدیریت بهره‌برداری با استفاده از انواع روش‌های هوش مصنوعی و رگرسیون چند متغیره و مقایسه توانمندی‌های هر یک از آنها بود. برای پیشبرد این منظور، استراتژی‌های زیر انجام پذیرفت:

۱- بررسی و آنالیز حوادث در شبکه‌ها: هدف از انجام آنالیز حوادث، یافتن ارتباطات قابل فهم و آشکار بین نرخ شکست و مشخصاتی از لوله است که بیشتر قابل دسترسی است زیرا رفتار حوادث در لوله‌ها تحت تأثیر پارامترهای غیر مشخص، مشترک و پیچیده است. چه پارامترهایی که به خصوصیات لوله و کیفیت نصب آنها مرتبط هستند و چه آنهایی که به محیط پیرامون لوله و شرایط عملیاتی شبکه لوله‌ها وابسته‌اند.

۲- جمع‌آوری حتی‌المقدور تمام پارامترهای مؤثر و دخیل در مسئله در یک پایگاه داده: در راستای انجام آنالیز جامع، لازم است که مشخصات لوله‌ها مانند جنس، قطر، طول، سن، عمق نصب لوله و شرایط بهره‌برداری (فشار هیدرولیکی) که اطلاعات آن در شرایط موجود کشور قابل دسترس باشد را در نظر گرفت و نسبت به جمع‌آوری و ذخیره آن در یک پایگاه داده اقدام نمود. در این راستا به بررسی تعداد زیادی از شهرهای کشور که احتمال وجود آمار مناسب در آنها وجود داشت، اقدام گردید و در نهایت ناحیه چهار آبفای مشهد به‌عنوان محدوده مطالعاتی در این مرحله انتخاب شد.

۳- انتخاب شاخص مبنای آنالیز: از بین داده‌های جمع‌آوری شده و با توجه به سوابق مطالعات، شاخصهای مختلفی به‌عنوان مبنای

آنالیز، بررسی شدند که در نهایت شاخص نرخ شکست (تعداد حوادث سالانه در واحد طول) که به خوبی بیانگر تمام جوانب مسئله است به‌عنوان یک پارامتر شاخص انتخاب شد. ویژگی شاخص این است که می‌توان بر اساس آن قضاوت یا مقایسه‌های لازم را انجام داد [۲].

برای ارزیابی روش ارائه شده و بررسی شاخصهای مؤثر در شکست لوله‌ها، علاوه بر کیفیت دسترسی داده‌ها، میزان صحت و دقت آنها نیز مد نظر است. برای این منظور از پایگاه داده‌های خطوط اصلی شبکه توزیع آب در ناحیه چهار شهر مشهد که از لوله‌های با قطرهای ۸۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۴۰۰ میلی‌متر ختم می‌شد، استفاده گردید. برای پرهیز از محاسبات طولانی و تکراری و به دلیل در اختیار نداشتن اطلاعات دقیق و مناسب از انشعابات فرعی، تنها برای شبکه لوله‌های اصلی از قطر ۸۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر که روند شکست و خرابی در آنها به‌صورت محسوسی تحت تأثیر عوامل گفته شده بود، پیش‌بینی نرخ شکست انجام شد. در مدل‌سازی، از لوله‌های آزیست قطر ۸۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر، آمار حوادث روزانه ثبت شده در سالهای ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۵ (۲۴۳۸ رکورد بررسی شده) و اطلاعات فشار طی این سالها استفاده شد. لازم به ذکر است که بیشترین نرخ حوادث در شبکه خطوط اصلی در محدوده قطری مذکور بوده است. همچنین در زمان این مطالعه براساس فشارهای ثبت شده در واحد حوادث ناحیه چهار، بیشینه فشار در ناحیه ۸/۵ اتمسفر و حداقل آن نیز در بعضی ساعات ۱/۲ اتمسفر بود. همچنین با توجه به این مطلب که لوله‌ها با مشخصات ساختاری یکسان از نظر قدمت، قطر، جنس، باید نرخ شکست یکسانی داشته باشند، به‌منظور استخراج پارامترهای اصلی مدل شکست از کل لوله‌های منطقه مطالعاتی خواه دچار حادثه شده باشند یا خیر، استفاده گردید. گستره محدوده مطالعاتی در شکل ۲ نمایان است [۱۰].

۵- نتایج مدل‌سازی پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های

شبکه توزیع آب

انجام مدل‌سازی پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های شبکه توزیع آب نیز مانند تمام برنامه‌های مدل‌سازی نیازمند مجموعه داده‌ها و اطلاعاتی است که پارامترها و ضرایب مدل توسط آنها شکل می‌گیرند. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد در مدل‌های حاضر، ورودی‌ها شامل تعداد زیادی از پارامترهای مؤثر در شکست لوله‌ها مانند قطر، طول، سن، عمق نصب و فشار هیدرولیکی لوله‌های آزیست از قطر ۸۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر و خروجی، نرخ شکست در هر لوله است.

۵-۱- مدل شبکه عصبی مصنوعی

در این مقاله از شبکه عصبی مصنوعی با ساختار پرسپترون چند لایه پیش‌خور با انتشار به عقب خطاها استفاده شد. تعداد داده‌های جمع‌آوری شده برای لوله‌های آزیست در منطقه مورد مطالعه ۳۳۸ رکورد بوده که از این تعداد، ۸۰ درصد برای آموزش شبکه، ۱۵ درصد برای تست و ۵ درصد برای صحت‌سنجی نتایج پیش‌بینی، مورد استفاده قرار گرفت.

برای انتخاب مدل مناسب برای پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها بر اساس شبکه عصبی مصنوعی چندین مدل مختلف شبکه عصبی با تعداد لایه‌ها، نرون‌ها و توابع محرک مختلف ایجاد شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین برای رسیدن به بهترین جواب، شبکه‌های عصبی منتخب با تعداد گام‌های مختلف بین ۵۰۰ تا

۱۰۰۰۰ گام، تحت آموزش قرار گرفتند.

جدول ۱، جزئیات بعضی از مهم‌ترین ساختار مدل‌ها را در نه حالت نشان می‌دهد. در نهایت با توجه به معیارهای میزان خطا و مدت زمان اجرای مدل، گزینه ۵ با ۲۰۰۰ فرایند آموزش به همراه ۵ پارامتر ورودی و یک پارامتر خروجی برگزیده شد که دارای دو لایه پنهان به ترتیب با ۵ و ۱۰ نرون بود و توابع محرک لایه اول و دوم آن تانژانت سیگموئید و تابع محرک لایه خروجی، خطی بود.

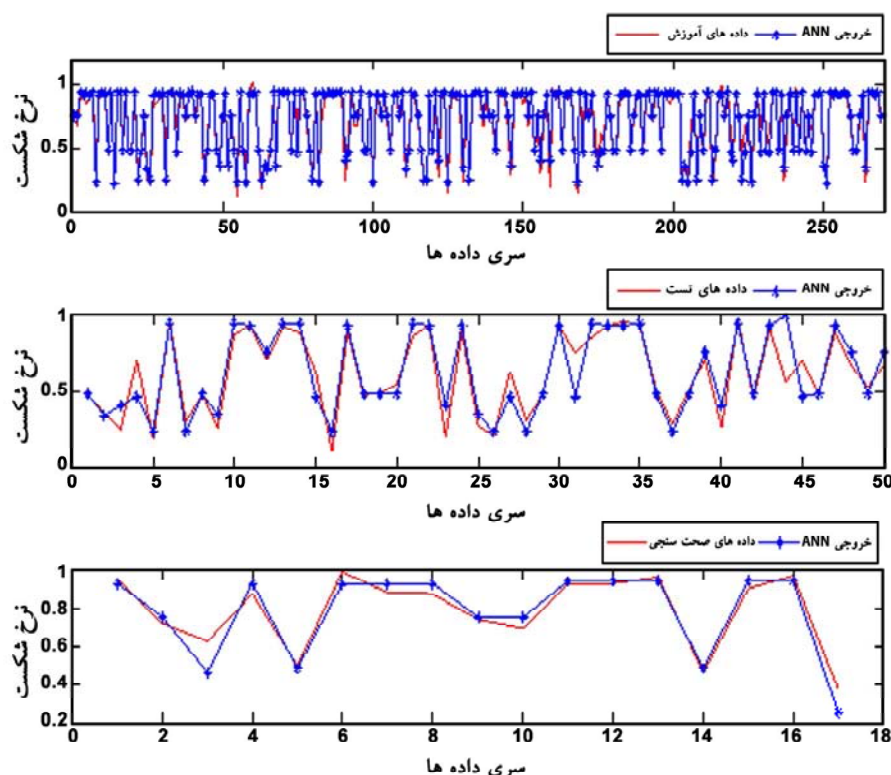
پس از تعیین بهترین ساختار ممکن برای شبکه عصبی باید صحت و همچنین کارایی آن نیز بررسی شود. برای این منظور نتایج حاصل از تست و صحت‌سنجی شبکه منتخب در مقایسه با داده‌های



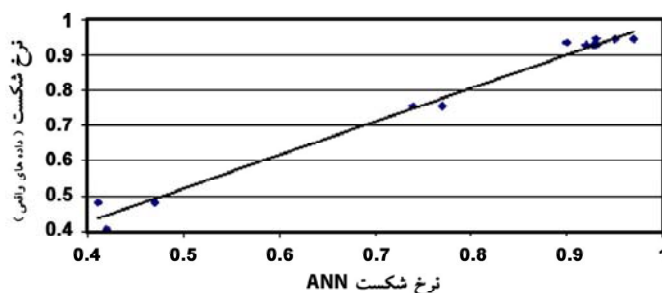
شکل ۲- کروکی محدوده‌ها و خطوط هم فشار در منطقه مطالعاتی [۱۶]

جدول ۱- مشخصات ساختارهای مختلف مدل‌های شبکه عصبی

شماره حالت	تابع محرک در هر یک از لایه‌ها		تعداد نرون‌ها در هر یک از لایه‌ها		تایم
	لایه اول	لایه دوم	لایه خروجی	لایه اول	
۱	تانژانت سیگموئید	-	خطی	۵	۱
۲	تانژانت سیگموئید	-	خطی	۱۰	۱
۳	تانژانت سیگموئید	-	خطی	۱۵	۱
۴	تانژانت سیگموئید	تانژانت سیگموئید	خطی	۵	۱
۵	تانژانت سیگموئید	تانژانت سیگموئید	خطی	۱۰	۱
۶	تانژانت سیگموئید	تانژانت سیگموئید	خطی	۱۵	۱
۷	تانژانت سیگموئید	تانژانت سیگموئید	خطی	۵	۱
۸	تانژانت سیگموئید	تانژانت سیگموئید	خطی	۱۰	۱
۹	تانژانت سیگموئید	تانژانت سیگموئید	خطی	۱۵	۱



شکل ۳- نتایج شبکه عصبی مصنوعی برای مقادیر شبیه‌سازی شده و واقعی در سه مرحله آموزش، تست و صحت سنجی



شکل ۴- مقایسه نرخ شکست پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و داده‌های واقعی [۱۶]

مورد مطالعه، بر اساس قطر، طول، سن، عمق نصب و فشار هیدرولیکی مطابق رابطه زیر به دست آمد

$$BR_L = \text{Purelin} \left(w_3 \tan \text{sig} \left(w_2 \tan \text{sig} \left(w_1 \times \begin{bmatrix} De/De_{\max} \\ Lt/Lt_{\max} \\ Pr/Pr_{\max} \\ Hi/Hi_{\max} \\ Ae/Ae_{\max} \end{bmatrix} + b_1 \right) + b_2 \right) + b_3 \right) \times BR_{\max} \quad (15)$$

که در این رابطه

مقدار BR_L نرخ شکست لوله L ام، De قطر، Lt طول، Pr فشار هیدرولیکی، Hi عمق نصب، Ae سن لوله L ام و

مشاهده‌ای برای محاسبه نرخ شکست لوله‌ها در شکل ۳ نمایش داده شد. بررسی‌ها کاملاً مشخص می‌کند که نتایج، بسیار نزدیک به داده‌های مشاهده‌ای بوده و دارای خطاهای بسیار اندک و قابل قبولی بود. این موضوع، آموزش مناسب و توانایی شبکه را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهده شده، نرخ شکست‌های شبیه‌سازی شده برای شبکه عصبی منتخب و داده‌های مشاهده‌ای با شیب خط ۱:۱ در شکل ۴ ترسیم شد. با توجه به ضریب همبستگی بالای داده‌ها، می‌توان گفت که شبکه به خوبی از پس یادگیری برآمده و می‌تواند خود را به حالت‌های مختلف تعمیم دهد. در نهایت معادله نرخ شکست لوله‌های آزرست برای منطقه

۵ پارامتر ورودی، یک پارامتر خروجی، ۲۷۰ جفت اطلاعات ورودی برای آموزش، ۵۱ جفت اطلاعات ورودی برای تست، ۱۷ جفت اطلاعات ورودی برای صحت‌سنجی از نوع FIS genfis1، اندازه گامها بین ۱۰ تا ۱۵۰، نوع روش بهینه‌سازی، تابع عضویت هیبرید و انواع توابع عضویت مورد بررسی شامل gbellmf، trimf، trapmf، gaussmf، gauss2mf. مشابه روش عصبی برای بررسی جوابها از روابط ۱۲ تا ۱۴ استفاده شد. برای انتخاب مدل مناسب نیز با توجه به روشهای مختلف اشاره شده، مقدار خطا محاسبه و با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج محاسبات در جدول ۲ ارائه شده است.

همان‌طور که از جدول ملاحظه می‌شود با هر یک از روشهای محاسبه خطا، تابع عضویت Gaussmf بهترین جواب را داده است. در ادامه برای صحت کاربرد و کارایی، مدل مورد صحت‌سنجی قرار گرفت که نتایج هر سه مرحله در شکل ۵ ارائه شده است. بررسی

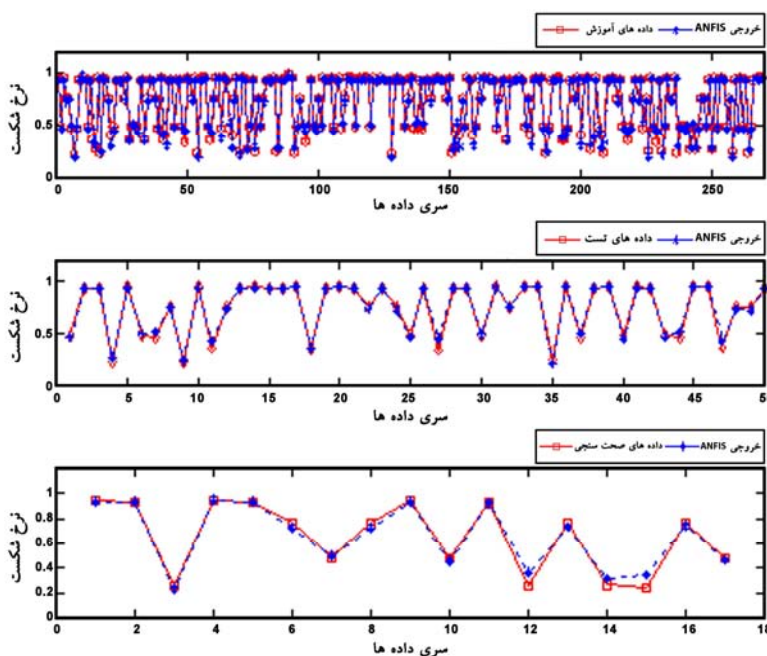
مشخصات BR_{max} ، Ae_{max} ، Hi_{max} ، Pr_{max} ، Lt_{max} ، De_{max} مقادیر حداکثر مربوط به لوله‌های آزیست در شبکه مورد مطالعه است. همچنین w_1 ، w_2 ، w_3 ماتریس‌های وزن و b_1 ، b_2 ، b_3 ماتریس مقادیر ثابت به دست آمده از شبکه عصبی برای لایه مختلف شبکه عصبی منتخب هستند [۱۱].

۲-۵- مدل سیستم عصبی-فازی

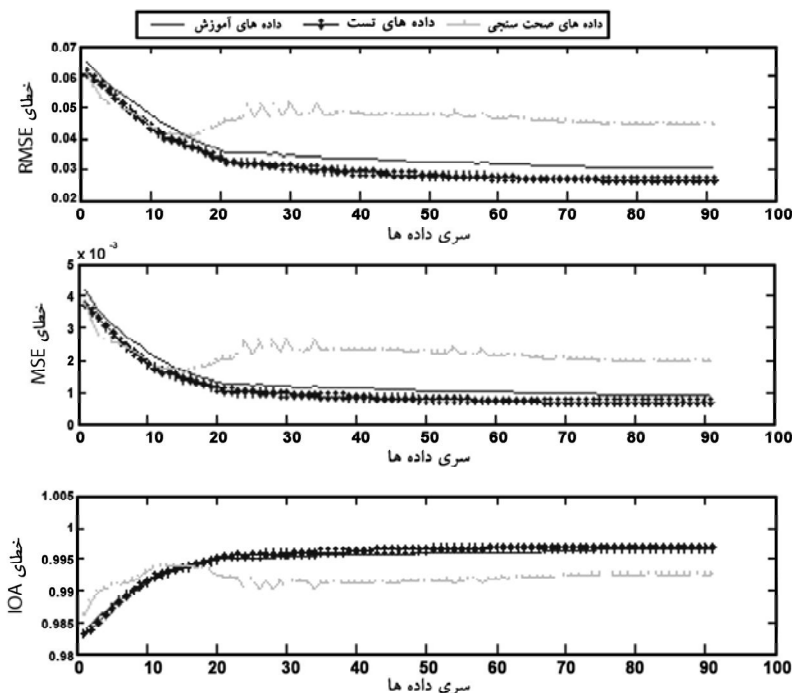
مطابق روش شبکه عصبی، سیستم ANFIS طراحی شده نیز متشکل از پنج ورودی به شبکه شامل قطر، طول، سن، عمق نصب و فشار هیدرولیکی از لوله‌های آزیست با قطر ۸۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر و خروجی شامل نرخ شکست در هر لوله بود. تعداد داده‌های جمع‌آوری شده همان داده‌ها برای روش پیشین بود که ۸۰ درصد از آنها برای آموزش شبکه، ۱۵ درصد آن برای تست و ۵ درصد برای صحت‌سنجی نتایج پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات ساختار مدل در نظر گرفته شده برای این تحقیق عبارت بود از تعداد

جدول ۲- مقادیر متوسط مربعات خطای آموزش، تست و صحت‌سنجی مدل شبکه عصبی-فازی با انواع توابع عضویت

مرحله صحت‌سنجی شبکه			مرحله تست شبکه			مرحله آموزش شبکه			نوع تابع عضویت
RMSE	MSE	IOA	RMSE	MSE	IOA	RMSE	MSE	IOA	
۰/۰۵۰۲۸۸	۰/۰۰۲۵۲۹	۰/۹۸۸	۰/۰۲۳۰۵۱	۰/۰۰۰۵۳۱	۰/۹۹۷۹۹	۰/۰۲۴۶۴۲	۰/۰۰۰۶۰۷	۰/۹۹۶۸۲	Gaussmf
۰/۰۳۲۱۴۸	۰/۰۰۱۰۳۴	۰/۹۹۱۳۱	۰/۰۲۴۱۸۱	۰/۰۰۰۵۸۵	۰/۹۹۷۰۴	۰/۰۲۹۲۹۷	۰/۰۰۰۸۵۸	۰/۹۹۷۶۴	Gauss2mf
۰/۰۴۶۸۵۸	۰/۰۰۲۱۹۶	۰/۹۸۷۱۹	۰/۰۳۶۵۳۳	۰/۰۰۱۳۳۵	۰/۸۸۴۹۱	۰/۰۲۶۳۵	۰/۰۰۰۶۹۴	۰/۹۹۷۳۲	Gbellmf
۰/۰۵۷۸۳۳	۰/۰۰۳۳۴۵	۰/۹۹۵۵۱	۰/۰۲۰۷۸۵	۰/۰۰۰۴۳۲	۰/۹۹۸۰۲	۰/۰۲۵۶۷۳	۰/۰۰۰۶۵۹	۰/۹۹۷۵۵	Trimf



شکل ۵- نتایج شبکه عصبی-فازی برای مقادیر شبیه‌سازی شده و واقعی در سه مرحله آموزش، تست و صحت‌سنجی



شکل ۶- نتایج شبکه عصبی- فازی با روشهای مختلف محاسبه خطا

NB تعداد حوادث در سال آینده و ترم‌های سمبلیک Ae, De, Lt, Pr و Hi به ترتیب شاخصهای طول کلی، قطر، سن، فشار متوسط و عمق نصب لوله معادل هر کلاس هستند. ورودی‌های انتخاب شده در ساختار این چند جمله‌ای دارای یک توان صحیح هستند. برای پذیرش مدل‌های پیش‌بینی از بین ۲۴۰ مدل تولید شده، معیار بیشینه و میانگین خطا، در کنار شاخص آماری ضریب تعیین^۲ به کار گرفته می‌شود تا کارایی هر مدل ارزیابی گردد. ضریب CoD به عنوان عمده‌ترین شاخص کارایی مدل به صورت رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود

$$CoD = 1 - \frac{N-1}{N} \cdot \frac{\sum_{N} (NB - NB_{exp})^2}{\sum_{N} (NB_{exp} - NB_{exp}^*)^2} \quad (17)$$

که در آن

N تعداد پردازش داده‌ها، NB تعداد شکست‌های پیش‌بینی شده توسط مدل، NB_{exp} تعداد شکست‌های ثبت شده برای هر کلاس لوله و NB_{exp}^* میانگین تعداد شکست‌های ثبت شده برای هر کلاس است.

از بین تمام مدل‌های پیش‌بینی شکست که برای محدوده‌های

شکلها و مقایسه بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در هر سه مرحله آموزش، تست و صحت‌سنجی شبکه نشان از مناسب بودن مدل انتخابی برای محدوده مورد نظر دارد. همچنین نتایج به‌کارگیری شبکه‌های عصبی- فازی معرفی شده در پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های شبکه آبرسانی، با استفاده از روشهای مختلف محاسبه خطا با یکدیگر مقایسه شد (شکل ۶). از بررسی‌ها کاملاً مشخص است که نتایج، بسیار نزدیک به داده‌های مشاهداتی و دارای خطاهای بسیار اندک و قابل قبول و مطلوبی بودند.

۳-۵- مدل رگرسیونی چند جمله‌ای تکاملی^۱

با پهنه‌بندی منطقه مطالعاتی، کل مجموعه داده‌های استخراج شده از مشخصات شبکه و آمار حوادث به چندین محدوده تقسیم می‌شود. در همین راستا هر یک از کلاس‌های قطری اصلی شش‌گانه (۸۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر) در پهنه‌بندی‌ها با لوله‌های فرضی معادل، مدل شدند. با توجه به پارامترهای انتخاب شده، ساختار کلی چندجمله‌ای زیر با الگوی رگرسیونی تکاملی، ارائه شد

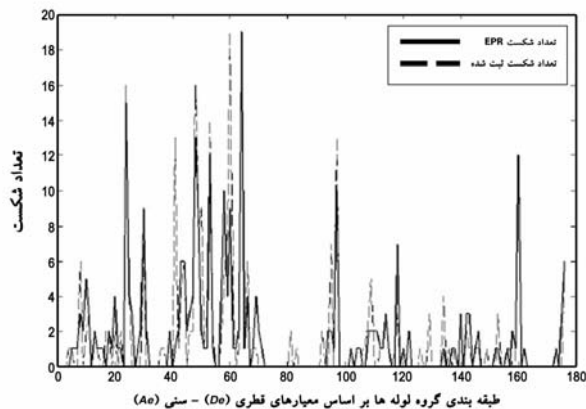
$$NB = Ae^{\alpha} \cdot Lt^{\gamma} \cdot De^{\delta} \cdot Pr^{\mu} \cdot Hi^{\eta} + a_0 \quad (16)$$

که در این رابطه

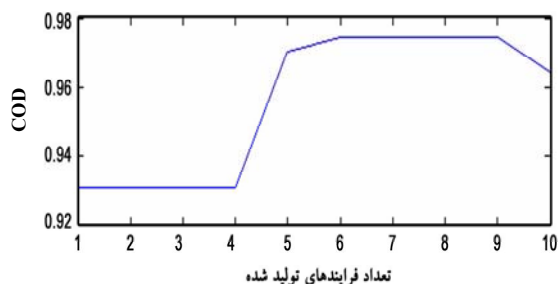
² Coefficient of Determination

¹ Evolutionary Polynomial Regression (EPR)

عصبی- فازی در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به نمودارهای شکل ۹ و منحنی نرخ شکست واقعی، موارد زیر مشاهده می‌شود:



شکل ۷- نمایش پیش‌بینی شکست رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی در مقابل شکست‌های ثبت شده



شکل ۸- شاخص برازش COD در طی فرایند تولید

۱- جوابهای روش ANFIS برای سری داده‌های شهر مشهد دارای نوسانات پی در پی است و تفاوت مقدار نرخ شکست محاسبه شده در مدل ANFIS با مقدار حقیقی در بسیاری موارد معنی‌دار است، لذا استفاده از این گزینه پیشنهاد نمی‌شود.

۲- تفاوت معنی‌داری بین نرخ شکست محاسبه شده در مدل ANN و مدل EPR با مقدار حقیقی وجود ندارد، بنابراین این روشها در ارجحیت بیشتری نسبت به دیگر روشهای معمول در مدل‌سازی شکست در لوله‌ها قرار می‌گیرند.

۳- روند تغییرات نرخ شکست در مدل‌سازی NLR تقریباً مشابه حالت واقعی است ولی محدوده تغییرات در آن بیشتر از دو روش EPR و ANN بوده و نزدیک به ANN است.

۴- نرخ شکست محاسبه شده در مدل ANN و مدل EPR در قطرهای کوچک یعنی کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر، از تطابق بسیار خوبی با میزان حقیقی برخوردار است که این موضوع بهره‌گیری از این

منطقه مطالعاتی تأیید گردیده بود، مدل پیش‌بینی شکست زیر انتخاب گردید. سپس با استفاده از طول مجموع لوله‌های هر کلاس قطری، نرخ شکست لوله‌های منطقه محاسبه گردید (۱۸)

$$BR = \text{round}(0.097846 \cdot De^{-1} \cdot Lt + 0.0012545 \cdot Ae^2 \cdot Pr^2)$$

که در این رابطه

Ae سن لوله، Lt طول لوله، De قطر لوله و Pr فشار است.

براساس رابطه ۱۸، سن لوله تنها فاکتوری نیست که به‌طور عمده بر خرابی و زوال لوله‌ها تأثیر می‌گذارد، بلکه طول لوله، قطر و فشار نیز در تعیین شکست‌های یک لوله مؤثر هستند و دیگر پارامترهای ثبت شده، در شکست لوله‌های منطقه بدون تأثیراند. در شکل ۷ داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل برگزیده در مقابل داده‌های واقعی ثبت شده شکست، ترسیم شده‌اند. در عبارتهای چند جمله‌ای، فرمول‌هایی که پارامترهایی با تأثیر شناخته شده دارند و از ضریب CoD مناسب (بالا تر از ۰/۸۵) برخوردارند، برگزیده می‌شوند [۱۲]. شکل ۸ مقدار محاسبه شده ضریب COD در برابر شماره روند تولید شده را نشان می‌دهد.

۴-۵- مدل رگرسیون چند متغیره غیر خطی

مدل‌سازی رگرسیونی چند متغیره برای پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های شبکه توزیع آب در منطقه مورد مطالعه و براساس داده‌های جمع‌آوری شده از طریق نوشتن کد M-file در نرم افزار Matlab 7.04 انجام گرفت. در نهایت رابطه نرخ شکست لوله‌های آریست برای منطقه مورد مطالعه به‌صورت زیر به‌دست آمد

$$BR = -1.1775 (De^{0.16287}) + 0.0076 (Lt^{0.2668}) - 2.7178 (Pr^{0.169}) + 2.271(Hi^{0.0196}) + 0.1381(Ae^{0.00028}) \quad (19)$$

جدول ۳ مقایسه جوابهای گرفته شده با داده‌های مشاهداتی برای محاسبه نرخ شکست لوله‌ها با معیارهای ارزیابی مختلف را نمایش داده است.

جدول ۳- متوسط مربعات خطای مدل رگرسیون چند متغیره			
نوع تابع	معیارهای خطای مدل		
	RMSE	MSE	IOA
NLR	۰/۲۷۷۸۹	۰/۰۷۷۲۲۲۸۵۴	۰/۹۳۸۳۳

۶- نتایج و بحث

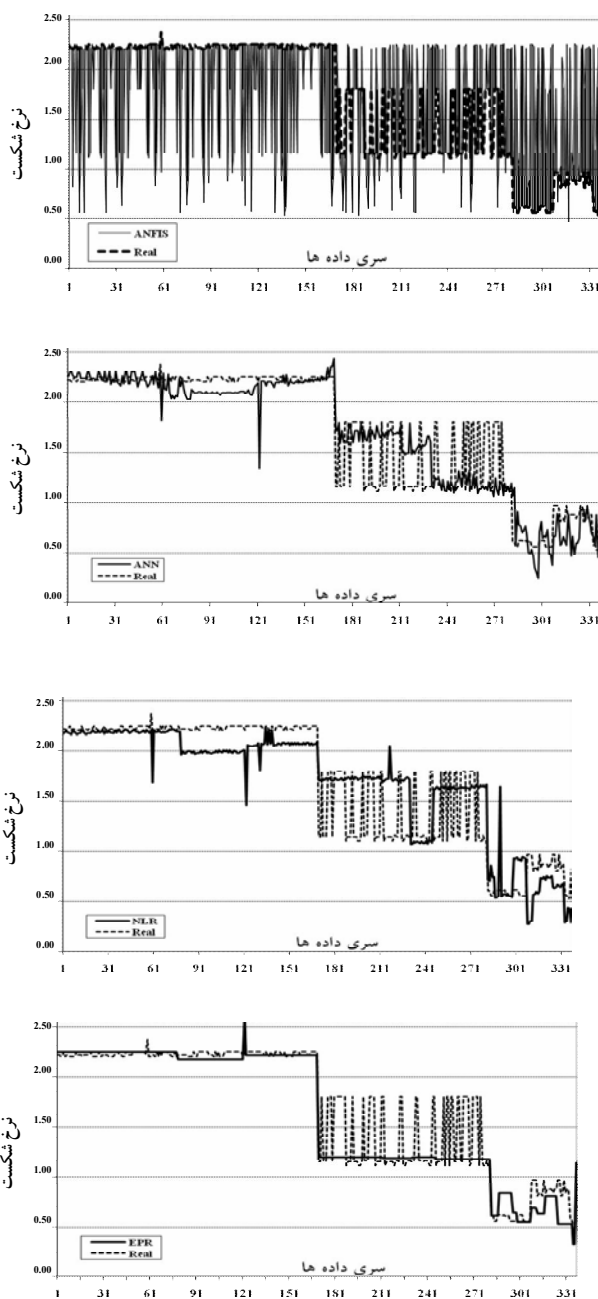
نتایج به‌دست آمده از مدل‌های برنامه‌نویسی ژنتیک و رگرسیون غیرخطی و روابط استخراجی از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و

روشها را نسبت به سایر روشها ممتاز می‌کند. لازم به ذکر است که تعداد و نوع پارامترهای موثر شبکه در پیش‌بینی نرخ شکست برای همه مدل‌ها یکسان بود.

۷- نتیجه‌گیری

مدفون بودن شبکه‌های توزیع آب در زیر خاک سبب شده که از لحاظ بصری قابل پایش نباشند. همچنین علاوه بر مشکلات حفظ سلامت و نگهداری آنها، معایبشان نیز تا حد مزنم و بحرانی از دید مدیران و بهره‌برداران پنهان می‌ماند و بروز مشکلات فنی پیچیده در شبکه را باعث می‌شود. پدیده شکست در لوله‌های آبرسانی در سالیان گذشته توسط مدل‌های آماری زیادی مورد مطالعه قرار گرفته که تنها تعداد محدودی از این مدل‌ها که اطمینان‌پذیری مکانیکی را تشریح می‌کردند، توسعه داده شده‌اند. ولی نکته قابل تأمل در این جا است که هر یک از این مدل‌ها فقط با تک پارامترهای مؤثر در شکست بیان می‌شوند، لذا از جامعیت کمتری برخوردار بوده و قابلیت تعمیم به تمامی مسائل مطرح شده در بهینه‌سازی مهندسی سیستم‌های آبرسانی را دارا نیستند.

در این مقاله به‌عنوان یک کار جدید، تعیین نرخ شکست مکانیکی از طریق ارائه مدل شبکه عصبی مصنوعی، مدل سیستم استنتاج فازی، برنامه‌نویسی ژنتیک قاعده‌ای و رگرسیون چند متغیره غیرخطی مطرح گردید. برای این منظور با بهره‌گیری از مجموعه متغیرهای قابل اندازه‌گیری در یک سیستم آبرسانی (جنس، سن، طول، قطر، عمق نصب و فشار) به منظور مدیریت بهینه بهره‌برداری از شبکه که لازمه اصلی آن تحلیل و دریافت صحیح از نرخ حوادث در شبکه آبرسانی خصوصاً لوله‌ها است، روابط و مدل‌هایی استخراج شد. همچنین با توجه به بررسی‌های انجام شده از کیفیت خروجی مدل‌ها، قابلیت روشهای شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌نویسی ژنتیک در مدل‌سازی شکست لوله‌ها مورد تأیید قرار گرفت که این روشها برای استفاده در محاسبات اطمینان‌پذیری و امکان‌کاربری در شبکه‌های توزیع آب معرفی می‌شوند.



شکل ۹- نمودارهای نرخ شکست پیش‌بینی شده با روشهای متفاوت

۸- مراجع

- 1- Elahi Panah, N. A. (1998). "Subsequent water distribution networks in the country until 1400." *J. of Water and Environment*, 28, 4-15. (In Persian)
- 2- Tabesh, M., and Abedini, A.A. (2005). "Analysis of pipe failure in water distribution network." *J. of Iran Water Resources Research*, 1(1), 78-79. (In Persian)
- 3- Tabesh, M., Jafari, H., and Delavari, M. R. (2005). "Management model of accidents and breaks in water distribution system using GIS." *J. of Water and Wastewater*, 70, 2-15. (In Persian)

- 4- Newport, R. (1981). "Factors influencing the occurrence of bursts in iron water mains." *Water Supply and Management*, 3, 274-278.
- 5- Walski, T. M., and Pelliccia, A. (1982). "Economic analysis of water main breaks." *J. of AWWA*, 74, 140-147.
- 6- Shamir, U., and Howard, C.D.D. (1979). "An analytical approach to scheduling pipe replacement." *J. of AWWA.*, 71, 248-258.
- 7- Kettler, A.J., and Goulter, L.C. (1985). "An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks." *Can. J. Civ. Eng.*, 12(2), 286-293.
- 8- Su, Y.C., Mays, L.W., Duan, N., and Lansey, K.E. (1987), "Reliability based optimization model for water distribution systems." *J. Hydr. Eng.*, 114(12), 1539-1556.
- 9- Sacluti, F. R. (1999). "Modeling water distribution pipe failures using artificial neural networks." M.Sc. Thesis, Department of Civil and Envir. Eng., University of Alberta, Canada.
- 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." *J. of Faculty of Engineering (Special issue on: Civil Engineering)*, 42(6), 691-703. (In Persian)
- 11- 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.
- 12- Farmani, R., Walters, G.A., and Savic, D. (2005). "Trade off between total cost and reliability for anytown water distribution network." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 131(3), 161-171.
- 13- Tabesh, M., and Dini, M. (2009). "Fuzzy and neuro- fuzzy models for short-term water demand forecasting in Tehran." *Iranian J. of Science and Technology, Transaction B: Engineering*, 33(B1), 61-77.
- 14- Karamoz, M., Tabesh, M., Nazif, S., and Moridi, A. (2005). "Predict the water pressure in water supply networks and fuzzy inference." *J. of Water and Wastewater*, 53, 3-14. (In Persian)
- 15- Giustolosi, O., and Savic, D.A. (2004). "A novel genetic programming strategy: Evolutionary polynomial Regression." *6th International Conference on Hydro Informatics, Liang, Phoon and Babovic (eds.)*, Singapore, 1, 787-794.
- 16- Tabesh, M., and Soltani, J. (2007). "Optimal operational management of water supply systems by evaluation of mechanical reliability using artificial neural networks (ANN)." *Proc. of the 2nd National Conference on Iran Water Resources, (2WRM 2007)*, Faculty of Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, 23-24. (In Persian)