

Journal of Water and Wastewater, Vol. 31, No.1, pp: 86-98

# Number of Blockage Prediction for Sanitary Sewer Networks (Case Study: Isfahan Region 2)

P. Hoseingholi<sup>1</sup>, R. Moeini<sup>2</sup>, M. R. Zare<sup>3</sup>

1. MSc Student, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran  
(Corresponding Author) r.moeini@eng.ui.ac.ir
3. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran

(Received Aug. 7, 2018 Accepted March 3, 2019)

#### To cite this article:

Hoseingholi, P., Moeini, R., Zare, M. R., 2020, "Number of blockage prediction for sanitary sewer networks (Case study: Isfahan Region 2)." Journal of Water and Wastewater, 31(1), 86-98.  
Doi: 10.22093/wwj.2019.143553.2731. (In Persian)

#### Abstract

Wastewater network is an inseparable part of urban life. Due to the importance of this network as one of the urban infrastructures, the failure of this system will lead to stopping service, causing many social, economic and environmental consequences. Hence, assessing the wastewater networks condition and its failure is an important approach for managing it. Generally, failure of system means any condition which leads to stopping service. In general, artificial intelligence methods are used as a low-cost method to predict failure. In this research, genetic programming (GP) is used to predict the number of blockage (hydraulic failure) in the wastewater network and its results are compared with the results of the artificial neural network (ANN). As a case study, here, a part of Isfahan wastewater network is investigated. The parameters such as age, pipe length, slope and depth as input data and the number of blockage are considered as the output data of the model. In this research, the number of blockage data in the wastewater network in 1394 and 1395 are used, in which the 70% of the data is used for training and 30% for the test. These data are classified in three ways leading to three models. In the first model, data are classified based on the slope and in two other models the data are classified according to the cover depth. The results show that all models predict the number of blockage with good accuracy. In addition, the accuracy of the result of GP model is better than the ANN model. For example, for GP model, the values of  $R^2$  and RMSE for the second model at the training stage are 0.97 and 0.8 and at the test stage are equal to 0.94 and 0.69, respectively. However, these values for ANN model are 0.96 and 0.95 at the training stage and 0.87 and 0.96 at the test stage respectively. These results show the superiority of the GP model in comparison with ANN model in which the results of second proposed model are better. The results of these proposed models can be used for preventive maintenance, prioritization of sewage network repairs and inspections, and finally to prevent the occurrence of sudden accidents.

**Keywords:** Hydraulic Failure Prediction, Genetic Programming, Wastewater Network, Number of Blockage, Artificial Neural Network.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۱، صفحه: ۸۶-۹۸

## پیش‌بینی تعداد گرفتگی در شبکه فاضلاب شهری (مطالعه موردی: منطقه دو اصفهان)

پگاه حسینی<sup>۱</sup>، رامتین معینی<sup>۲</sup>، محمدرضا زارع<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲- استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران (نویسنده مسئول) r.moeini@eng.ui.ac.ir

۳- استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت ۹۷/۵/۱۶ پذیرش ۹۷/۱۲/۱۲)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

حسینی، پ.، معینی، ر.، زارع، م. ر.، ۱۳۹۹، "پیش‌بینی تعداد گرفتگی در شبکه فاضلاب شهری (مطالعه موردی: منطقه دو اصفهان)

"مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۱)، ۸۶-۹۸. Doi: 10.22093/wwj.2019.143553.2731

### چکیده

امروزه شبکه فاضلاب بخش جدایی‌ناپذیر زندگی شهری محسوب می‌شود. با توجه به اهمیت این شبکه به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های شهری، وقوع شکست در این سیستم علاوه بر توقف سرویس‌دهی، منجر به ایجاد پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی زیادی می‌شود. از این‌رو ارزیابی وضعیت شبکه‌های فاضلاب و شکست‌هایی که در شبکه اتفاق می‌افتد یک رویکرد مهم در مدیریت آن است. در حالت کلی منظور از شکست، کلیه حالاتی است که عملکرد سیستم با مشکل مواجه می‌شود. به‌طور کلی روش‌های هوش مصنوعی به‌عنوان روشی کم‌هزینه به‌منظور پیش‌بینی شکست مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش از برنامه‌ریزی ژنتیک به‌منظور پیش‌بینی تعداد گرفتگی (شکست هیدرولیکی) در شبکه فاضلاب، استفاده و نتایج آن با نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی مقایسه شد. به این منظور قسمتی از شبکه فاضلاب شهر اصفهان به‌عنوان مطالعه موردی بررسی شد. با توجه به پارامترهای تأثیرگذار بر شکست هیدرولیکی، پارامترهایی نظیر سن، طول، شیب و عمق دفن لوله‌ها به‌عنوان ورودی و تعداد گرفتگی به‌عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شد. در این پژوهش از اطلاعات مربوط به گرفتگی در شبکه فاضلاب مربوط به سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ استفاده شد که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمایش به‌کار رفت. اطلاعات به سه شکل دسته‌بندی شد و سه مدل مختلف ارائه شد. در مدل اول اطلاعات بر اساس شیب و در دو مدل دیگر اطلاعات بر اساس عمق دفن، دسته‌بندی شدند و نتایج تحلیل شد. بررسی نتایج نشان داد که هر سه مدل دارای نتایج قابل قبولی هستند. همچنین مقایسه نتایج دو مدل نشان داد که دقت روش برنامه‌ریزی ژنتیک نسبت به شبکه عصبی بهتر است. به‌طور نمونه، در برنامه‌ریزی ژنتیک مقدار  $R^2$  و RMSE برای مدل دوم در مرحله آموزش، ۰/۹۷ و ۰/۸ و در مرحله آزمایش به ترتیب برابر ۰/۹۴ و ۰/۶۹ بود که این مقدار در شبکه عصبی در مرحله آموزش، ۰/۹۶ و ۰/۹۵ و در مرحله آزمایش به ترتیب برابر ۰/۸۷ و ۰/۹۶ بود. با بررسی نتایج به‌دست آمده، برتری روش برنامه‌ریزی ژنتیک نسبت به شبکه عصبی مشهود است. همچنین مدل دوم نتایج بهتری داشت. نتایج حاصل از این مدل‌ها را می‌توان در زمینه تعمیرات پیشگیرانه، اولویت‌بندی تعمیرات و بازرسی‌های شبکه فاضلاب به‌کار برد و در نتیجه از وقوع حوادث ناگهانی در شبکه جلوگیری نمود.

**واژه‌های کلیدی:** پیش‌بینی شکست هیدرولیکی، برنامه‌ریزی ژنتیک، شبکه فاضلاب، تعداد گرفتگی، مدل شبکه عصبی مصنوعی

### ۱- مقدمه

فاضلاب موجود به دلیل وجود عواملی نظیر ساخت و ساز ضعیف، استفاده بیش از حد ظرفیت، بالا بودن سن، شرایط محیطی و مدیریت نامناسب، رو به وخامت می‌رود. به‌علت مدفون بودن و

شبکه فاضلاب از جمله مهم‌ترین زیرساخت‌های شهری است که به‌منظور حفظ بهداشت و سلامت عموم و محیط‌زیست انتظار می‌رود که بدون وقفه کار کند. در طول سالیان، وضعیت شبکه‌های



در زمینه پیش‌بینی وضعیت شبکه فاضلاب پژوهش‌های متعددی انجام شده است. در این راستا، هان و همکاران یک سیستم خیره برای اولویت‌بندی بازرسی فاضلاب‌بروها پیشنهاد کردند. در پژوهش ایشان از شبکه بیزین استفاده شد که در آن دو پارامتر جنس لوله و دمای محیط برای بررسی میزان خوردگی منظور شد (Hahn et al., 1999).

روتج و ایریگ سیستم طبقه‌بندی جدیدی را به منظور ارزیابی نشت در شبکه فاضلاب بررسی کردند. آنها به منظور طبقه‌بندی، از اطلاعاتی شامل جنس، طول، قطر، سطح آب زیرزمینی، نوع خاک و سن لوله‌ها استفاده نمودند (Rutsch and Uibrig, 2000).

ایریاراتنام و همکاران با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک<sup>۱</sup>، احتمال ایجاد نقص یا خرابی در شبکه فاضلاب شهر ادمونتون<sup>۲</sup> را پیش‌بینی کردند. در این مدل پارامترهایی از جمله عمر لوله، قطر، جنس، نوع فاضلاب، عمق نصب در نظر گرفته شد. بررسی نتایج نشان داد که سه متغیر سن، قطر و نوع فاضلاب بر شکست شبکه تأثیر زیادی دارد و تأثیر دو پارامتر عمق دفن و جنس شبکه ناچیز است. خروجی این مدل برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی بازرسی‌ها و انجام تعمیرات به کار می‌رود (Ariaratnam et al., 2001).

مک دونالد و ژاو وضعیت فاضلاب‌بروها و پیش‌بینی عمر باقیمانده لوله‌ها را بررسی کردند. آنها به منظور ارزیابی وضعیت شبکه، شش پارامتر مکان، نوع خاک، عمق دفن، ابعاد لوله، نوع فاضلاب و قابلیت لرزه‌ای منطقه را در نظر گرفتند. در پژوهش ایشان، تصمیم‌گیری برای بازسازی لوله‌ها بر اساس درجه‌بندی شرایط شبکه انجام شد (McDonald and Zhao, 2001).

باور و هرز بازرسی شبکه فاضلاب را به کمک پیش‌بینی وضعیت شبکه برنامه‌ریزی کردند. در پژوهش ایشان به منظور پیش‌بینی زمان ورود شبکه به شرایط بحرانی، پارامترهایی نظیر سن، جنس، قطر، شیب و نوع فاضلاب استفاده شد. تابع پیشنهادی آنها بر اساس سرعت فرسوده شدن لوله‌ها بود که از آن برای برنامه‌ریزی تاریخ‌های بازرسی شبکه استفاده شد (Baur and Herz, 2002).

رونپورا و همکاران با استفاده از روش زنجیره مارکوف شرایط زیرساخت‌های شبکه فاضلاب را پیش‌بینی کردند. ایشان روشی

دیده نشدن این شبکه‌ها، بازسازی آن اغلب نادیده گرفته می‌شود تا زمانی که شبکه به خاطر شکست، دچار مشکل شود. وقوع شکست در شبکه منجر به ایجاد پیامدهای اجتماعی، محیط‌زیستی و هزینه‌های بازسازی بسیار سنگین می‌شود (Ariaratnam et al., 2001).

عموماً دو رویکرد کلی به منظور برنامه‌ریزی بازسازی شبکه فاضلاب وجود دارد:

۱- جمع‌آوری اطلاعات کافی از شرایط حال حاضر شبکه فاضلاب به وسیله بازرسی‌های منظم و اطلاع از وضعیت تمام قسمت‌های شبکه.

۲- پیش‌بینی نقص در شبکه پیش از وقوع شکست به منظور زمان‌بندی تعمیرات و بازرسی‌ها (Ariaratnam et al., 2001).

به‌طور کلی عدم آگاهی از شرایط لوله‌ها منجر به وقوع شکست و حوادث ناگهانی و غیرقابل پیش‌بینی می‌شود که علاوه بر توقف سرویس‌دهی، اختلال در فعالیت‌های روی سطح زمین را با خود به همراه دارد. برای جلوگیری از تخریب و فروریزی شبکه، وضعیت آن باید در زمان‌های مناسب و قبل از ایجاد حادثه بررسی شود. در اکثر کشورها، شبکه‌های فاضلاب یک مرتبه در ده سال نیاز به بازرسی دارند. این بدان معنی است که به‌طور متوسط یک فاضلاب‌برو باید در طول عمر خود هشت تا ده مرتبه بازرسی شود (Baur and Herz, 2002).

در بسیاری از موارد، تعمیر و نگهداری از زیرساخت‌ها به دلیل زیاد بودن هزینه و محدودیت بودجه به تعویق می‌افتد که نادیده گرفتن آن باعث کاهش عملکرد و در مواردی توقف کامل سرویس‌دهی می‌شود. از طرفی برنامه تعمیر و نگهداری منظم در شبکه منجر به افزایش عمر مفید شبکه می‌شود که در اغلب موارد به دلیل محدودیت بودجه، باید بازرسی، تعمیر و بازسازی شبکه اولویت‌بندی شود. پارامترهای مختلفی از جمله نوع فاضلاب، قطر، شیب لوله، عمق دفن لوله‌ها و موارد دیگر بر روی شرایط شبکه تأثیرگذار است. به منظور جلوگیری از ایجاد شکست، باید شرایط فاضلاب‌برو در زمان‌های مناسب بررسی شود که این امر مستلزم پیش‌بینی درست شرایط شبکه است. از طرفی با توجه به اینکه فرسودگی و آسیب‌های موجود در شبکه فاضلاب بر روی عملکرد آن تأثیر چشم‌گیری می‌گذارد، پیش‌بینی وضعیت آن به‌عنوان روشی کم هزینه، مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است.

<sup>1</sup> Logistic regression models

<sup>2</sup> Edmonton



رویداد شکست به دست آمده از مدل، فاضلاب‌روها در پنج گروه با توجه به اولویت برنامه‌های بازرسی و نگهداری تقسیم شدند. خروجی این مدل، احتمال رویداد شکست در هر فاضلاب‌رو بود (Anbari and Tabesh, 2015).

قدام و همکاران با استفاده از رگرسیون خطی شرایط شبکه فاضلاب را پیش‌بینی کردند. به این منظور از اطلاعاتی مانند جنس و سن لوله استفاده و عوامل مهم و تأثیرگذار در پیش‌بینی وضعیت شکست شبکه بررسی شد. نتایج نشان داد که از مدل پیشنهادی، به منظور پیش‌بینی وضعیت شبکه‌های دیگر نیز می‌توان استفاده کرد (Gedam et al., 2016).

لاکسو و همکاران در پژوهشی با ترکیب نتایج بازرسی شبکه، خصوصیات شبکه و عوامل مربوط به محیط، وضعیت شبکه فاضلاب و عوامل تأثیرگذار بر آن را بررسی کردند. ایشان با استفاده از الگوریتم بروکا<sup>۱</sup> به مدل‌سازی شرایط لوله و ارزیابی اهمیت متغیرها پرداختند. در ادامه، میزان تأثیر متغیرهای مختلف بر خرابی وضعیت شبکه بررسی شد (Laakso et al., 2018).

کبیر و همکاران با توسعه یک مدل رگرسیون لجستیک بیزین، وضعیت ساختاری شبکه فاضلاب را بررسی کردند. همچنین، تأثیر هر یک از پارامترها بر تخریب شبکه نیز بررسی شد. نتایج پژوهش نشان داد که سن و طول فاضلاب‌رو بر تخریب لوله‌های شبکه‌های بتنی و سیمانی و همچنین سن و قطر بیشترین تأثیر را بر تخریب فاضلاب‌روهای فلزی و پلی‌اتیلن دارد (Kabir et al., 2018).

بررسی سوابق پژوهش نشان می‌دهد که تعیین احتمال شکست و پیش‌بینی شکست سازه‌ای و هیدرولیکی شبکه‌های فاضلاب یکی از موضوعات مورد توجه پژوهشگران در زمینه آب و فاضلاب است که برای تعیین آن روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در این پژوهش، با توجه به اینکه تا به امروز از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک<sup>۲</sup> به منظور پیش‌بینی و تعیین وضعیت شبکه فاضلاب استفاده نشده است و همچنین قابلیت‌های ویژه این مدل، از آن برای تعیین تعداد گرفتگی لوله‌های شبکه فاضلاب به‌عنوان یکی از شاخص‌های شکست هیدرولیکی استفاده شد. به‌عنوان مطالعه موردی، شبکه فاضلاب شهر اصفهان بررسی شد. شایان ذکر است که با توجه به اینکه بیشتر حوادثی که در این مناطق رخ داده است از نوع گرفتگی

برای پیش‌بینی شرایط لوله‌های فاضلاب و هزینه‌های تعمیرات مرتبط با آن ارائه و سه مدل به‌منظور ارائه برنامه نگهداری و تعمیرات پیشنهاد دادند که در مدل اول شرایط حال حاضر لوله با توجه به سن، جنس و طول لوله پیش‌بینی و امتیازدهی شد. در مدل دوم، پیش‌بینی شرایط آینده لوله‌ها و در مدل سوم هزینه‌های تعمیرات و بازسازی بررسی شد (Ruwanpura et al., 2004).

نجفی و کولاندایول شرایط خطوط لوله جمع‌آوری فاضلاب را با استفاده از شبکه عصبی پیش‌بینی کردند. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش شامل طول، قطر، جنس، سن، عمق پوشش، شیب لوله‌ها و نوع شبکه بود. این مدل می‌تواند باعث بهینه شدن تعداد بازرسی‌ها و هزینه‌های بازسازی و تعمیرات شود (Najafi and Kulandaivel, 2005).

بایک و همکاران شرایط سیستم فاضلاب را با استفاده از مدل زنجیره مارکوف ارزیابی کردند. متغیرهای منظور شده در این مدل شامل طول، قطر، جنس، سن و شیب لوله بود. شایان ذکر است که مزیت روش پیشنهادی سهولت کاربرد، دقت در تخمین‌ها و امکان تولید ماتریس‌ها براساس تجربیات کارکنان است (Baik et al., 2006).

چاگتای و زائد با ارائه مدلی برای بررسی وضعیت زیرساخت‌ها، شرایط لوله‌های فاضلاب را پیش‌بینی کردند. آنها با استفاده از روش رگرسیون چندگانه و داده‌های تاریخی، شرایط عملکردی و ساختاری شبکه فاضلاب را بررسی و ارزیابی کردند. پارامترهایی، از جمله جنس لوله، مصالح بستر، نوع خیابان و دیگر ویژگی‌های لوله در نظر گرفته شد. در نهایت بر اساس جنس لوله‌ها، مدل‌های رگرسیون مختلف پیشنهاد و پیش‌بینی انجام شد (Chughtai and Zayed, 2008).

مشغورد و همکاران نیز از ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی شرایط شبکه فاضلاب استفاده کردند و شبکه را با توجه به شرایط آن از ۱ تا ۵ درجه بندی کردند. در پژوهش ایشان برای مدل‌سازی، از پارامترهایی همانند سن، قطر، جنس لوله، مشخصات خاک و سطح آب زیرزمینی استفاده شد (Mashford et al., 2011).

عبری و تابش احتمال رویداد شکست در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب را با استفاده از شبکه بیزین محاسبه کردند. در این پژوهش، از شبکه بیزین با توجه به قابلیت‌ها و کارایی بالای آن و ویژگی‌های سیستم فاضلاب، استفاده شد. با استفاده از احتمال

<sup>1</sup> Brouvka

<sup>2</sup> Genetic Programming (GP)



فرسایش، خوردگی، تغییر شکل سطح مقطع و ترک خوردگی است. هر یک از شکست‌های هیدرولیکی و سازه‌ای، به پارامترهایی نظیر سن، طول، قطر، جنس، عمق و غیره وابسته هستند (Anbari and Tabesh, 2015).

در انتها ذکر این نکته ضروری است که گرفتگی یکی از انواع شکست هیدرولیکی محسوب می‌شود. گرفتگی در مسیر جریان فاضلاب می‌تواند ناشی از ته‌نشینی رسوبات و چربی و یا نفوذ ریشه درخت باشد. از جمله عوامل مؤثر بر احتمال رویداد گرفتگی در شبکه فاضلاب می‌توان به سن لوله، جنس، قطر، عمق دفن و تعداد اتصالات اشاره کرد (Anbari and Tabesh, 2015).

## ۲-۲- روش برنامه‌ریزی ژنتیک

برنامه‌ریزی ژنتیک به‌عنوان یکی از روش‌های هوش مصنوعی اولین بار توسط کوزا<sup>۱</sup> مطرح شد که از آن به‌عنوان روشی برای یافتن رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی استفاده می‌شود. این روش از جمله روش‌های کارآمد جستجوی تکاملی است که به‌دلیل دارا بودن دقت کافی، به‌عنوان یک روش کاربردی معرفی شده است. ذکر این نکته ضروری است که جمعیت در برنامه‌ریزی ژنتیک، برنامه‌های کامپیوتری با فرم درختی هستند در حالی که در الگوریتم ژنتیک، رشته‌هایی از اعداد به‌عنوان جمعیت در نظر گرفته می‌شوند. فرم درختی افراد از ترمینال‌ها<sup>۲</sup> و توابع<sup>۳</sup> تشکیل شده است. ترمینال‌ها شامل اعداد ثابت و پارامترهای ورودی هستند و توابع نیز شامل کلیه توابع ریاضی هستند (Koza, 1992).

مراحل حل یک مسئله با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک به شرح زیر است:

- ۱- جمعیتی از افراد با توابع و ترمینال‌های تصادفی تولید می‌شود.
- ۲- هر یک از افراد ارزیابی شده و مؤثرترین فرد بر اساس میزان شایستگی آنها شناسایی می‌شود.
- ۳- افراد مؤثر به‌عنوان والد انتخاب و عملگرهای ژنتیکی شامل تزویج<sup>۴</sup> و جهش<sup>۵</sup> بر روی افراد به‌منظور ایجاد نسل جدید اعمال می‌شود.

است، در این پژوهش تعداد گرفتگی در شبکه با ارائه مدل‌های مختلف پیش‌بینی شد. به این منظور، با ترکیب پارامترهای تأثیرگذار بر گرفتگی لوله‌ها، سه مدل معرفی شد که در آن تعداد گرفتگی لوله‌های بخشی از شبکه فاضلاب شهر اصفهان پیش‌بینی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از روش برنامه‌ریزی ژنتیک به‌منظور تعیین تعداد گرفتگی لوله‌ها استفاده شد. در این بخش، ابتدا پارامترهای تأثیرگذار در شکست لوله‌های فاضلاب معرفی می‌شود و در ادامه با ترکیب آنها سه مدل برای استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک معرفی می‌شود.

## ۲-۱- پارامترهای تأثیرگذار در شکست لوله‌های شبکه فاضلاب

به‌طور کلی عوامل و پارامترهای مختلفی بر روی شکست شبکه فاضلاب تأثیرگذار هستند که می‌توان آنها را به سه قسمت عوامل محیطی، عملکردی و فیزیکی تقسیم نمود. عوامل محیطی شامل پارامترهایی مثل نوع خاک، نوع فاضلاب، شرایط بستر، یخ زدگی، مجاورت سایر تأسیسات زیرزمینی، حجم ترافیک و سطح آب زیرزمینی است. همچنین، عوامل عملکردی شامل استراتژی‌های تعمیر و نگهداری و عوامل فیزیکی نیز شامل سن، قطر، طول، جنس، عمق و شیب می‌باشد (Chughtai and Zayed, 2008).

در حالت کلی انواع شکست در شبکه را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: شکست سازه‌ای و شکست هیدرولیکی. شکست سازه‌ای مرتبط با شرایط فیزیکی لوله است در حالی که شکست هیدرولیکی به عدم توانایی لوله برای تأمین ظرفیت طراحی مربوط است و ناشی از خطا در طراحی قطر و شیب لوله است. یکی دیگر از عوامل شکست‌های هیدرولیکی می‌تواند نفوذ جریان‌های خارجی باشد که منجر به کاهش ظرفیت هیدرولیکی شبکه می‌شود. گاهی کاهش ظرفیت هیدرولیکی می‌تواند ناشی از ورود ریشه درخت یا ایجاد گرفتگی در مسیر لوله باشد (Abraham and

Wirahadikusumah, 1998)

شکست سازه‌ای نیز به هر نوع شکستی که به فیزیک و ساختمان شبکه وابسته است، اطلاق می‌شود. انواع شکست‌های سازه‌ای شامل

<sup>1</sup> Koza  
<sup>2</sup> Terminal  
<sup>3</sup> Function  
<sup>4</sup> Crossover  
<sup>5</sup> Mutation



برنامه‌ریزی ژنتیک ایجاد رابطه بین متغیرها و نمایش آنها امکان‌پذیر است (Soltani et al., 2009).

در این پژوهش از تولباکس GPLAB در محیط MATLAB به منظور مدل‌سازی به روش برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده شد (Silva, 2007). در شکل ۱ خلاصه مراحل حل یک مسئله با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک ارائه شده است.

### ۲-۳- مطالعه موردی

در این پژوهش بخشی از شبکه فاضلاب منطقه دو شهر اصفهان به عنوان مطالعه موردی به منظور ارزیابی مدل‌های پیشنهادی استفاده شد. در سال ۱۳۳۵ طرحی برای سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهر اصفهان ارائه شد. این طرح شامل اجرای حدود ۵۵ کیلومتر شبکه با لوله‌هایی با قطر ۲۵۰ میلی‌متر بود. در مرحله دوم

۴- این فرایند تا حصول بهترین پاسخ یا برآورده شدن شرط خاتمه تکرار می‌شود و بهترین عضو ایجاد شده به عنوان پاسخ نهایی انتخاب می‌شود.

روش GP نسبت به سایر مدل‌ها از جمله شبکه عصبی مزیت‌هایی دارد؛ به عنوان مثال در GP ابتدا متغیرهای ورودی، خروجی و مجموعه توابع تعریف می‌شوند و در ادامه ساختار بهینه مدل و در نهایت ضرایب طی فرایند آموزش تعیین می‌شوند. در حالی که در مدل شبکه عصبی ابتدا باید ساختار تعیین شود و سپس ضرایب طی فرایند آموزش تعیین می‌شود. علاوه بر این روش GP می‌تواند به طور خودکار متغیرهای ورودی که در خروجی مدل بیشترین تأثیر را دارند، انتخاب کند، در حالی که در سایر مدل‌ها این مورد امکان‌پذیر نیست. همچنین در مقایسه با روش‌های داده کاوی جعبه سیاه از جمله روش شبکه عصبی مصنوعی، در روش

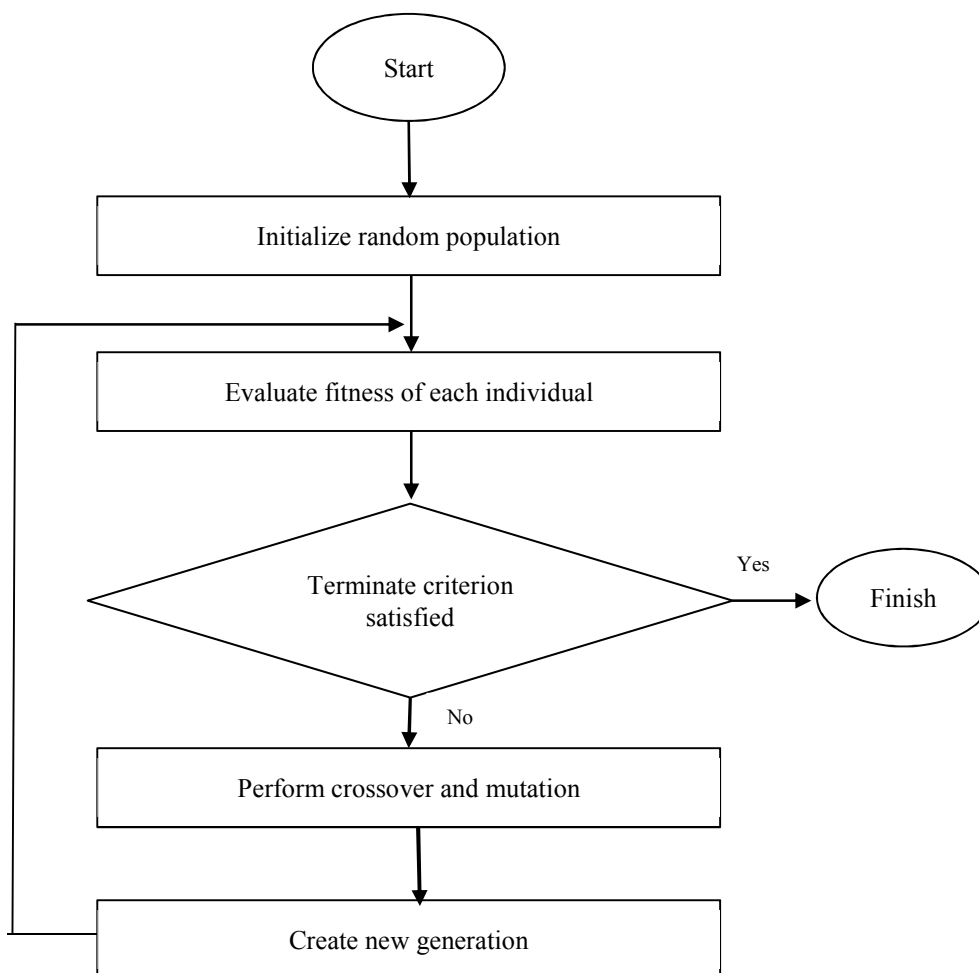


Fig. 1. Genetic programming flowchart

شکل ۱- مراحل روش برنامه‌ریزی ژنتیک



است، بنابراین در این پژوهش فقط حوادث مربوط به گرفتگی به‌عنوان معیاری از شکست هیدرولیکی بررسی شد. پارامترهایی نظیر شیب، سن، طول و عمق دفن، به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شد و از در نظر گرفتن پارامترهای تأثیرگذار دیگر نظیر سطح آب زیرزمینی، نوع خاک، تعداد انشعابات و نوع فاضلاب به‌علت در دست نداشتن اطلاعات کافی صرف نظر شد. شایان ذکر است جنس لوله‌های شبکه، بتنی و قطر آن ۲۵۰ میلی‌متر و همچنین فواصل بین آدم‌روها ۶/۵ تا ۵۹ متر و سن لوله‌ها ۴۲ تا ۵۰ سال است.

با توجه به اطلاعات حوادث موجود از گزارش سامانه ۱۲۲، حدود ۲۴۸ ردیف داده مربوط به تعداد گرفتگی رخ داده در شبکه بود که ۷۰ درصد آن برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمایش در نظر گرفته شد. به‌عبارت دیگر ۱۶۷ ردیف داده برای آموزش مدل‌ها و ۸۱ ردیف داده برای آزمایش منظور شد. با دسته‌بندی داده‌ها بر اساس پارامترهایی نظیر شیب و عمق کارگذاری سه مدل معرفی شد. در مدل اول اطلاعات بر اساس شیب دسته‌بندی شده و پارامترهایی مانند مجموع طول (L)، عمق (D) و سن (A) به‌عنوان ورودی و تعداد گرفتگی به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شد. مشخصات اطلاعات طبقه‌بندی شده مدل اول، در جدول ۱ نشان داده شده است.

نیز ۱۲۸ کیلومتر شبکه به مرحله اجرا و بهره‌برداری رسید. در حال حاضر شبکه فاضلاب شهر اصفهان با قدمتی ۵۰ ساله و طولی در حدود ۳۵۰۰ کیلومتر وظیفه جمع‌آوری و هدایت فاضلاب تولیدی حدود ۳۸۰۰۰۰ انشعاب را بر عهده دارد. قدمت ۵۰ ساله شبکه فاضلاب اصفهان باعث فرسودگی و بحرانی شدن وضعیت آن شده است (Saleh and Khakivatan, 2009). در این پژوهش بخشی از شبکه فاضلاب منطقه دو آبفا اصفهان به‌عنوان مطالعه موردی برای تعیین تعداد گرفتگی لوله‌های موجود در نظر گرفته شد. در شکل ۲ نقشه هوایی مناطق شش‌گانه شهر اصفهان ارائه شده است. در این شکل موقعیت و محدوده منطقه دو و تصفیه‌خانه‌ها نیز نشان داده شده است. شایان ذکر است که مساحت این منطقه ۲۲۷ کیلومتر مربع و طول در دست بهره‌برداری شبکه تا پایان سال ۹۵ حدود ۶۹۹/۹۴ کیلومتر می‌باشد.

#### ۲-۴- ساختار مدل پیشنهادی

در این پژوهش حوادث بخشی از شبکه که شامل اطلاعاتی نظیر طول لوله، عمق دفن، شیب، سن و حوادثی که بر روی شبکه در سال‌های ۹۴ و ۹۵ رخ داده است، بررسی شد. بر اساس اطلاعات دریافتی از سامانه ۱۲۲ که مربوط به حوادث رخ داده در شبکه فاضلاب است، اغلب حوادث رخ داده در این دوره از نوع گرفتگی



Fig. 2. Airplane map of six areas of Isfahan city (scale 1/154000)

شکل ۲- نقشه هوایی مناطق شش‌گانه شهر اصفهان (مقیاس ۱/۱۵۴۰۰۰)



جدول ۱- اطلاعات دسته‌بندی شده مدل پیشنهادی اول

Table 1. Data classification of first model

Slope [S] (m/m)	Length [L] (m)	Age factor [A] (year)	Depth factor [D] (m)	Number of blockage [B]
0.02	286.5	48.4	1.74	8
0.013	573.1	43.9	1.62	14
0.01	2414	45.9	1.84	68
0.006	742.5	46.6	2.1	17
0.005	1043.9	44.4	2.37	26
0.004	297.4	48.5	2.33	9
0.0033	296	44.2	3.18	8
0.0025	838.8	46.4	3.03	17

آن داده منظور شود. در همین راستا اطلاعات عمق در بازه ۰/۱ و ۰/۵ متر دسته‌بندی و دو مدل متفاوت معرفی شد و بنابراین در ادامه، مدل دوم و سوم پیشنهادی ارائه شد. در این دو مدل نیز با توجه به مقدار سن و شیب متفاوت در هر دسته، دو فاکتور سن (A) و فاکتور شیب ( $\bar{S}$ ) برای مدل‌ها تعریف شدند.

در مدل دوم اطلاعات بر اساس عمق کارگذاری و با فاصله ۰/۱ متر دسته‌بندی شدند که در جدول ۲ ارائه شده است. در این مدل، پارامترهایی نظیر عمق، فاکتور شیب ( $\bar{S}$ )، فاکتور سن (A) و مجموع طول (L) به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شد. در نهایت مدل سوم، مشابه مدل دوم، معرفی شد با این تفاوت که دسته‌بندی عمق با فاصله ۰/۵ انجام شد که اطلاعات آن در جدول ۳ ارائه شده است. خروجی هر دو مدل دوم و سوم نیز تعداد گرفتگی لوله‌ها بود. در مدل دوم و سوم مقادیر فاکتور شیب ( $\bar{S}$ ) بر اساس معادله زیر محاسبه می‌شود

$$\bar{S} = \frac{\sum(SPLP)}{\sum LP} \quad (3)$$

که در این معادله  $S_p$  سن هر لوله و  $L_p$  طول هر لوله است.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش تعداد گرفتگی لوله‌های بخشی از شبکه فاضلاب منطقه دو اصفهان با استفاده از سه مدل پیشنهادی و روش GP تعیین و نتایج، تحلیل شد. در ادامه به منظور نشان دادن قابلیت‌های مدل پیشنهادی، نتایج آن با نتایج مدل شبکه عصبی

در مدل اول پیشنهادی اطلاعات فقط بر اساس یک پارامتر دسته‌بندی شدند و بنابراین شیب لوله‌ها به عنوان پارامتر ورودی در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر تمامی لوله‌هایی که دارای شیب یکسان بودند در یک دسته قرار گرفتند. با توجه به اینکه در هر دسته، لوله‌هایی با سن و عمق متفاوت وجود دارد و به منظور امکان قرارگیری لوله‌ها با خصوصیات یکسان در یک دسته، لازم است یک مقدار مشخص سن و عمق برای آنها منظور نمود. بنابراین دو پارامتر سن و عمق لوله برای هر دسته تعریف شد. در این مدل تعداد گرفتگی مربوط به تعداد لوله‌هایی بود که دارای شیب یکسان بودند. در این مدل‌ها سن و عمق لوله بر اساس معادلات زیر محاسبه می‌شود

$$A = \frac{\sum(APLP)}{\sum LP} \quad (1)$$

$$D = \frac{\sum(DPLP)}{\sum LP} \quad (2)$$

که در این معادلات

$A_p$  سن هر لوله،  $L_p$  فاصله بین دو آدم‌رو و  $D_p$  عمق هر لوله، A فاکتور سن و D فاکتور عمق است.

در مدل پیشنهادی دوم و سوم کلیه اطلاعات بر اساس پارامتر عمق کارگذاری لوله دسته‌بندی شد، بنابراین تمامی لوله‌هایی که دارای عمق یکسان بودند در یک گروه قرار گرفتند. لازم به ذکر است که مقادیر عمق دارای بازه گسترده‌ای است، بنابراین برای دسته‌بندی اطلاعات بر اساس عمق به ناچار باید بازه‌های مختلف عمق در یک گروه دسته‌بندی شده و میانگین آنها به عنوان نماینده





جدول ۲- اطلاعات دسته‌بندی شده مدل پیشنهادی دوم  
**Table 2.** Data classification of second model

Depth (m)	Average depth [D] (m)	Slope factor $[\bar{S}]$ (m/m)	Length (L) (m)	Age factor [A] (year)	Number of blockage [B]
1.08-1.1	1.09	0.05	50	60	1
1.1-1.2	1.15	0.01	39.5	95.8	2
1.3-1.4	1.35	0.01	462.7	44.8	12
1.4-1.5	1.45	0.009	573	45.9	16
1.5-1.6	1.55	0.007	536.3	45.1	13
1.6-1.7	1.65	0.008	528	45.9	14
1.7-1.8	1.75	0.007	314.4	43.5	10
1.8-1.9	1.85	0.007	548.5	45.2	13
1.9-2	1.95	0.006	250	43.8	6
2-2.1	2.05	0.007	207	43.3	5
2.1-2.2	2.15	0.006	411.3	44.5	10
2.2-2.3	2.25	0.007	167	47.3	6
2.3-2.4	2.35	0.004	407.5	48.3	10
2.4-2.5	2.45	0.004	141.5	47.3	4
2.5-2.6	2.55	0.004	312	44	8
2.6-2.7	2.65	0.005	214.5	43.7	5
2.7-2.8	2.75	0.01	22	43	1
2.8-2.9	2.85	0.003	218.2	44.1	7
2.9-3	2.95	0.003	79	51.5	2
3-3.1	3.05	0.002	200	43.2	4
3.1-3.2	3.15	0.006	174	47.8	4
3.2-3.3	3.25	0.005	50	43	1
3.3-3.4	3.35	0.003	150	53.6	3
3.5-3.6	3.55	0.004	122	49.6	3
3.6-3.7	3.65	0.002	50	57	1
3.8-3.9	3.85	0.002	49	38.6	1
3.9-4	3.95	0.003	49	57.2	1
4-4.1	4.05	0.003	102	50.3	2
4.4-4.5	4.45	0.002	41.8	45	1
4.5-4.61	4.57	0.003	28	43	1

جدول ۳- اطلاعات دسته‌بندی شده مدل پیشنهادی سوم  
**Table 3.** Data classification of third model

Depth (m)	Average depth [D] (m)	Slope factor $[\bar{S}]$ (m/m)	Length (L) (m)	Age factor [A] (year)	Number of blockage [B]
1.08-1.5	1.29	0.01	1125.2	46.06	31
1.5-2	1.75	0.007	2177.2	44.9	56
2-2.5	2.25	0.005	1334.3	46.1	35
2.5-3	2.75	0.004	808.7	43.9	22
3-3.5	3.25	0.003	611	48.1	13
3.5-4	3.75	0.003	264	49.2	6
4-4.61	4.3	0.003	171.8	47.8	4



در ادامه، معادلاتی به منظور پیش‌بینی تعداد گرفتگی براساس نتایج این پژوهش تعیین شد که این معادلات برای مدل‌های اول، دوم و سوم به ترتیب در معادلات ۶، ۷ و ۸ ارائه شده است. لازم به ذکر است که با استفاده از آنها می‌توان تعداد گرفتگی را پیش‌بینی نمود

$$B = \frac{L+A}{A} + (S^2 \times L \times (\frac{L}{A} + D)) \quad (۶)$$

$$B = \frac{1.11503 \times L}{A \times (\frac{0.5573 \times D^2}{A})} \bar{S} \quad (۷)$$

$$B = \frac{L}{A - 5.959} + \frac{L \bar{S}}{D \times 0.237} - 0.99 \quad (۸)$$

که در این معادلات

B تعداد گرفتگی، L طول لوله، S شیب لوله،  $\bar{S}$  فاکتور شیب، D فاکتور عمق کارگذاری و A فاکتور سن لوله است. در نهایت در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ به ترتیب نتایج مدل‌های اول، دوم و سوم پیشنهادی ارائه شده است. شایان ذکر است که در این شکل‌ها نقاط، نماینده تعداد گرفتگی پیش‌بینی شده در هر دسته از مدل‌ها با ویژگی یکسان است.

لازم به ذکر است که از موقعیت پارامترهای مستقل در معادلات ۶، ۷ و ۸ هیچ برداشتی مبنی بر میزان تأثیر آن پارامتر در رفتار فیزیکی یا هیدرولیکی شبکه و یا تأثیر آن در تعداد گرفتگی، نمی‌توان داشت. به عبارت دیگر حضور پارامترهای مختلف در معادله فقط به منظور میزان تطابق خروجی با داده‌های مشاهده‌ای است. به طور مثال اگر پارامتر سن لوله در صورت یا مخرج رابطه ظاهر شود، نمی‌توان از آن، میزان تأثیر مستقیم یا معکوس سن لوله را در شکست استنباط نمود.

در نهایت، به منظور نشان دادن قابلیت مدل‌های پیشنهادی با استفاده از روش GP، این سه مدل با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی نیز حل و نتایج بررسی و مقایسه شد. برای مدل‌های پیشنهادی شبکه عصبی نیز آنالیز حساسیت انجام شد و مدل‌ها به ازای بهترین مقدار پارامترها حل شدند. در این مدل‌ها تعداد لایه‌های شبکه عصبی برابر با دو، تعداد نرون‌های لایه آخر (تعداد خروجی) برابر با یک و تعداد نرون‌های

مقایسه شد. در این پژوهش، به منظور ارزیابی نتایج حاصل، از معیارهای سنجش خطا، نظیر مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> و ضریب تعیین استفاده شد که معادلات آن به شرح زیر است

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (۴)$$

$$R^2 = \frac{(\sum (y_i - \bar{y}_i)(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i))^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2 \sum (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i)^2} \quad (۵)$$

که در این معادلات

مقادیر  $y_i$ ،  $\hat{y}_i$  و  $\bar{y}_i$  به ترتیب نشان دهنده داده‌های مشاهده‌ای، مقادیر پیش‌بینی شده و میانگین داده‌های مشاهده‌ای است. شایان ذکر است که هرچه ضریب تعیین به یک نزدیک‌تر و مقدار مجذور میانگین مربعات خطا کمتر و به صفر نزدیک‌تر باشد، نتایج قابل قبول است. در روش GP پارامترهایی وجود دارد که لازم است به منظور تعیین مقدار مطلوب آنها آنالیز حساسیت انجام و مقدار مطلوب پارامترها تعیین شود. در این پژوهش دو عملگر تزویج و جهش با احتمال وقوع ۰/۹ و ۰/۱ منظور شد. همچنین، تعداد جمعیت و تعداد نسل برای هر سه مدل به ترتیب ۱۰۰ و ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. نتایج مدل‌های پیشنهادی در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد با استفاده از هر سه مدل پیشنهادی نتایج قابل قبولی برای مسئله حاصل می‌شود که نتایج مدل دوم دقیق‌تر است. به عبارت دیگر در مدل دوم، مقدار RMSE در مرحله آموزش و آزمایش نسبت به مدل اول، به ترتیب ۳۷/۴ و ۵۵/۱ درصد کمتر شده است و نسبت به مدل سوم نیز مقادیر RMSE در مرحله آموزش و آزمایش به ترتیب ۱۴/۵ و ۷۰/۶ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۴- نتایج مدل‌های پیشنهادی با استفاده از روش برنامه‌ریزی

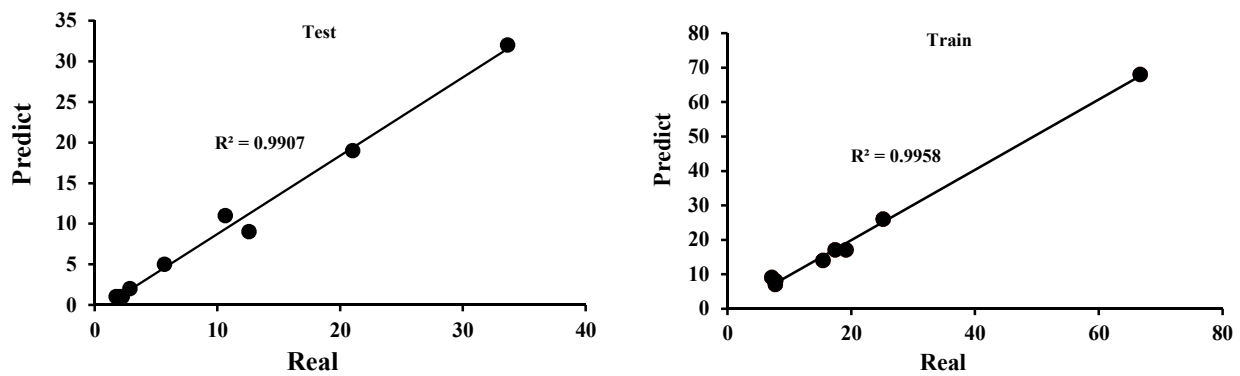
ژنتیک

Table 4. Result of proposed model using genetic programming

Model	Data	RMSE	R <sup>2</sup>
First	Training	1.286	0.995
	Testing	1.629	0.991
Second	Training	0.804	0.971
	Testing	0.695	0.944
Third	Training	0.941	0.997
	Testing	3.209	0.987

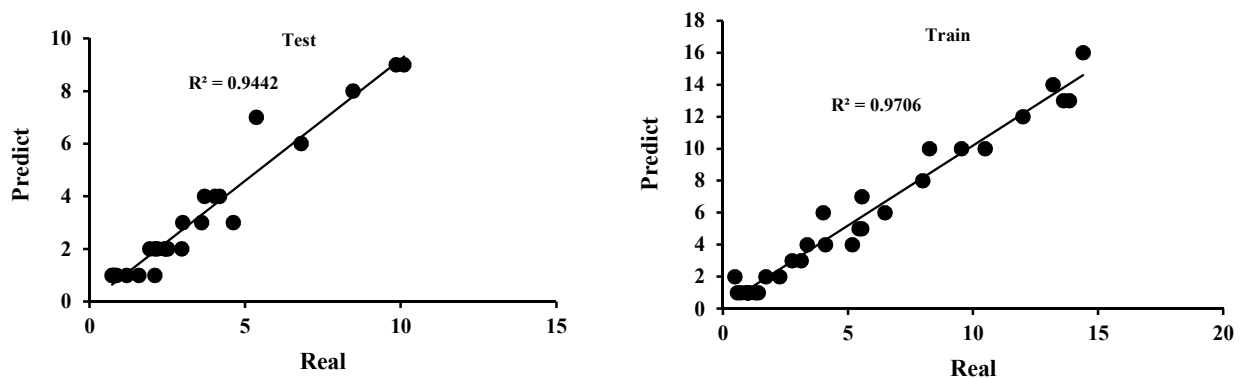
<sup>1</sup> Root Means Squared Error (RMSE)





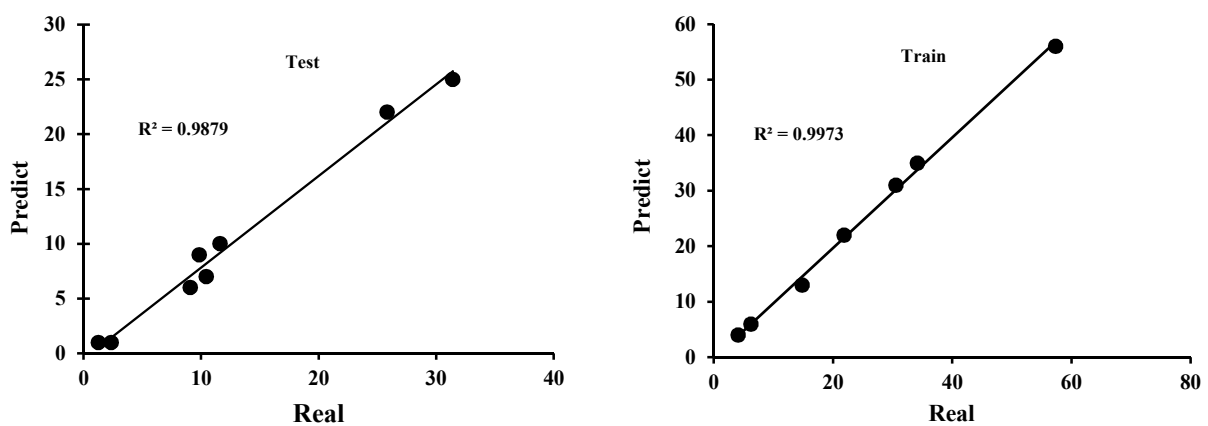
**Fig. 3.** Actual and predicted number of blockage for training and testing data of first model (classification based on slope)

شکل ۳- مقدار پیش‌بینی شده و واقعی تعداد گرفتگی برای داده‌های آموزش و آزمایش مدل اول (دسته‌بندی بر اساس شیب)



**Fig. 4.** Actual and predicted number of blockage for training and testing data of second model (classification based on depth in range of 0.1 meter)

شکل ۴- مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی تعداد گرفتگی برای داده‌های آموزش و آزمایش مدل دوم (دسته‌بندی بر اساس عمق کارگذاری در بازه ۰/۱ متر)



**Fig. 5.** Actual and predicted number of blockage for training and testing data of third model (classification based on depth in range of 0.5 meter)

شکل ۵- مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی تعداد گرفتگی برای داده‌های آموزش و آزمایش مدل سوم (دسته‌بندی بر اساس عمق کارگذاری در بازه ۰/۵ متر)



تعداد گرفتگی استفاده و نتایج حاصل با خروجی شبکه عصبی مقایسه شد. به این منظور از اطلاعات بخشی از شبکه فاضلاب منطقه دو شهر اصفهان به عنوان مطالعه موردی استفاده شد.

با توجه به حوادث رخ داده در سال‌های ۹۴ و ۹۵ و اطلاعات موجود از شبکه فاضلاب منطقه دو شهر اصفهان، اطلاعات به سه روش، دسته‌بندی شدند و در نهایت سه مدل پیشنهاد شد. در ادامه، نتایج مدل‌های پیشنهادی بررسی شد.

مقایسه نتایج، روش برنامه‌ریزی ژنتیک را به عنوان روشی مناسب به منظور پیش‌بینی تعداد گرفتگی در شبکه پیشنهاد می‌کند. به عبارت دیگر، بر اساس مقایسه دو معیار ارزیابی  $R^2$  و RMSE، برتری این روش نسبت به شبکه عصبی مشهود است. نتایج حاصل از این مدل را می‌توان در زمینه تعمیرات پیشگیرانه، اولویت‌بندی تعمیرات و بازرسی‌های شبکه فاضلاب به‌کار برد و در نتیجه از وقوع حوادث ناگهانی جلوگیری کرد و به عملکرد بهتر سیستم کمک نمود.

#### ۵- قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های دانشگاه اصفهان تشکر می‌کنند. همچنین از اداره آب و فاضلاب اصفهان که اطلاعات لازم برای انجام این پژوهش را در اختیار پژوهشگران قرار دادند نیز قدردانی می‌شود.

#### References

- Abraham, D. M. & Wirahadikusumah, R. 1998. Optimization modeling for sewer network management. *Construction Engineering Management*, 124, 402-410.
- Anbari, M. J. & Tabesh, M. 2015. Calculate the probability of failure event in wastewater collection networks using the Beisian network. *Journal of Water and Wastewater*, 27(3), 48-61. (In Persian)
- Ariaratnam, S. T., El-Assaly, A., Members, A. & Yang, Y. 2001. Assessment of infrastructure inspection needs using logistic models. *Journal of Infrastructure Systems*, 7, 160-165.
- Baik, H. S., Jeong, H. S. & Abraham, D. M. 2006. Estimating transition probabilities in markov chain-based deterioration models for management of wastewater systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132, 15-24.
- Baur, R. & Herz, R. 2002. Selective inspection planning with ageing forecast for sewer types. *Water Science and Technology*, 46, 389-396.
- Chughtai, F. & Zayed, T. 2008. Infrastructure condition prediction models for sustainable sewer pipelines. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 22, 333-341.
- Gedam, A., Mangulkar, S. & Gandhi, B. 2016. Prediction of sewer pipe main condition using the linear regression approach. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 4, 100-105.

لایه اول برابر ۲ در نظر گرفته شد. در جدول ۵ نتایج حاصل از شبکه عصبی برای هر سه مدل ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از روش GP در مقایسه با روش شبکه عصبی مصنوعی، جواب‌های دقیق‌تری برای مسئله حاصل می‌شود. به عبارت دیگر با استفاده از روش GP در مقایسه با روش شبکه عصبی مصنوعی مقدار  $R^2$  در مرحله آموزش و تست در مدل اول به ترتیب به میزان ۵/۰۵ و ۳۸/۷۹ درصد، در مدل دوم ۴/۰ و ۸/۲ درصد و در مدل سوم نیز ۳/۰ و ۱۷/۰۸ درصد بیشتر شده است. علاوه بر این با استفاده از روش GP معرفی معادلاتی برای تعیین تعداد گرفتگی لوله‌ها مانند معادلات ۶، ۷ و ۸ امکان‌پذیر است در حالی که این امکان در شبکه عصبی وجود ندارد.

#### جدول ۵- نتایج معیارهای سنجش خطا در شبکه عصبی

Table 5. Result of proposed model using artificial neural network

Model	Data	RMSE	$R^2$
First	Training	4.415	0.945
	Testing	8.919	0.714
Second	Training	0.955	0.967
	Testing	0.960	0.874
Third	Training	0.050	1
	Testing	10.091	0.843

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش از الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیک به منظور پیش‌بینی



- Hahn, M., Palmer, R. N. & Merrill, M. S. 1999. Prioritizing sewer line inspection with an expert system. In: TEMPE (ed.) *29<sup>th</sup> Annual Water Resources Planning and Management Conference*, Arizona, United States.
- Kabir, G., Balekelay, N., Balek, C., Tesfamariam, S. & Asce, M. 2018. Sewer structural condition prediction integrating bayesian model averaging with logistic regression. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32, 1-10.
- Koza, J. 1992. *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*, MIT Press, USA
- Laakso, T., Kokkonen, T., Mellin, I. & Vahala, R. 2018. Sewer condition prediction and analysis of explanatory factors. *Water*, 10, 1-17.
- Mashford, J., Marlow, D., Tran, D. & May, R. 2011. Prediction of sewer condition grade using support vector machines. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 25, 283-290.
- Mcdonald, S. E. & Zhao, J. Q. 2001. Condition assessment and rehabilitation of large sewers. *International Conference on Underground Infrastructure Research*, University of Waterloo, Canada.
- Najafi, M. & Kulandaivel, G. 2005. Pipeline condition prediction using neural network models. *Pipeline Division Specialty Conference*, Houston, Texas, United States.
- Rutsch, M. & Uibrig, H. 2000. Classification system to estimate the leakage of sewers. <<apuss.insa-lyon.fr>> (July 2018).
- Ruwanpura, J., Ariaratnam, S. T. & El-Assaly, A. 2004. Prediction models for sewer infrastructure utilizing rule-based simulation. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 21, 169-189.
- Saleh, M. & Khakivatan, R. 2009. Problems of sewage networks operation and the role of video meter in better operation of networks. *Second National Water and Wastewater Conference with Operation Approach*, University of Water and Power Industry, Tehran, Iran. (In Persian)
- Silva, S. 2007. *Gplab a genetic programming toolbox for Matlab*, Envolutinary and Complex Systems group, University of Coimbra, Portugal.
- Soltani, A., Ghorbani, M., Fard, A., Darbandi, S. & Farsadizade, D. 2009. Genetic planning and its application in modeling the runoff rainfall process. *Journal of Water and Soil Scinece*, 20.1 (4), 61-71. (In Persian)

