Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 7, No. 3, PP. 28-43, Autumn 2022
DOI: 10.22112/JWWSE.2022.307076.1288

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هفتم، شماره ۳، صفحات ۲۸-۴۳، پاییز ۱۴۰۱

Research Paper

Developing a Model of Estimating the Failure Rate for Main Urban Water Pipes Using Gene Expression Programming

Seyed Azim Hosseini[1*] and Hossein Maleki Toulabi[2]
1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2- Young Researchers and Elite Club, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran.
*Corresponding Author, Email: azim_hosseini@azad.ac.ir

Received: 03/10/2021
Revised: 13/04/2022
Accepted: 13/05/2022
© IWWA

Abstract

One of the major problems with urban water supply networks is the large volume of water wastage due to various incidents that cause damage. These damages are mainly irreversible and costly; thus, it is increasingly important to understand the causes of such incidents to prevent and reduce water wastage. This research aims to estimate the failure rate of main urban water supply pipes. In terms of nature, this research is applied, while in terms of administration, it is a combination of descriptive-analytical methods based on library sources. In addition to interviewing experts in the study area, the research uses findings of other research and data provided by Tehran's Water and Wastewater Organization, which pertain to District 1. The research identifies major criteria affecting failure rates of main pipes of various types. Then, it uses Gene Expression Programming (GEP) software to perform computations and provide the model. Findings conclude that as the working pressure, age, and length of the pipe and the number of service lines increase, the number of incidents increases also. On the other hand, with the increase in the diameter of the pipes and the depth at which they are installed, their failure rates decrease. The type of soil also buried directly impacts the gradual loss of the pipes. Because the proposed models in this research have no limited input parameters and take into account all the effective components, they are highly useful and reliable tools to predict failure rates of the main urban water supply pipes.

Keywords: Failure rate, Urban water system, Gene expression programming, Events and happenings.

مقاله پژوهشی

ارائه مدل برآورد نرخ شکست لوله‌های اصلی آب‌رسانی شهری با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

سیدعظیم حسینی[1*] و حسین ملکی طولابی[2]
۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران.
*نویسنده مسئول، ایمیل: azim_hosseini@azad.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۱
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۳
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

از مشکلات عمده در شبکه آب‌رسانی شهری، هدررفت حجم زیادی از آب در اثر وقوع حوادث مختلف است که وقوع این پدیده، در اکثر موارد باعث ایجاد خساراتی می‌شود که عمدتاً برگشت‌ناپذیر و پرهزینه‌اند. لذا شناخت علل حوادث و میزان اهمیت آن‌ها، می‌تواند در پیشگیری و کاهش حوادث و اتلاف آب، سهم بسیار مؤثری داشته باشد. ازاین‌رو، هدف از این پژوهش، ارائه مدل برآورد نرخ شکست لوله‌های اصلی آب‌رسانی شهری است. پژوهش حاضر از لحاظ ماهیت، از نوع کاربردی و به لحاظ اجرا، ترکیبی از روش‌های توصیفی- تحلیلی بر پایه مطالعات کتابخانه‌ای محسوب می‌شود. در این پژوهش، علاوه‌بر مصاحبه با کارشناسان و خبرگان مربوطه درزمینه موردمطالعه، از نتایج مطالعات صورت‌گرفته توسط سایر پژوهشگران و نیز استفاده از آمار و اطلاعات موجود در شرکت آب و فاضلاب استان تهران که مربوط به منطقه یک شهر تهران است، بهره گرفته و معیارهای مهم بر نرخ شکست لوله‌های اصلی با جنس‌های مختلف، شناسایی شد. سپس برای انجام محاسبات و ارائه مدل، از نرم‌افزار برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، استفاده شد. یافته‌های حاصل از پژوهش حاضر، نشان داد که با افزایش فشار کاری، سن، طول لوله و نیز افزایش تعداد انشعابات؛ میزان حوادث هم بیشتر خواهد شد. از طرفی، با افزایش قطر لوله‌ها و نیز افزایش عمق نصب آن‌ها، میزان نرخ شکست کاهش می‌یابد. نوع خاک مدفون‌شده، نیز تأثیر مستقیمی بر از بین رفتن تدریجی لوله خواهد داشت. مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش، به‌دلیل عدم محدودیت در پارامترهای ورودی و نیز توجه به کلیه مؤلفه‌های مؤثر، ابزاری بسیار مفید و قابل‌اعتماد برای پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های اصلی آب‌رسانی شهری هستند.

کلمات کلیدی: نرخ شکست، شبکه آب‌رسانی شهری، برنامه‌ریزی بیان ژن، حوادث و اتفاقات.

۱- مقدمه

کشور ایران به‌عنوان یک منطقه خشک و نیمه‌خشک، دارای میانگین بارندگی درازمدت ۲۴۰ میلی‌متر در سال است که کمتر از یک‌سوم میانگین بارندگی ۸۶۰ میلی‌متری جهان است. ازاین‌رو بسیاری از شهرها در معرض بحران کمبود منابع آبی هستند (غیبی و شایق، ۱۳۹۶). شبکه آب‌رسانی، ازجمله مهم‌ترین شریان‌های حیاتی هر شهر است (فرخی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۰). لوله‌های شبکه توزیع آب در دوران بهره‌برداری به‌دلایل مختلفی نظیر مشخصات لوله‌ها، شرایط محیطی و بهره‌برداری دچار شکست فیزیکی می‌شوند (جعفری و همکاران، ۱۳۹۹). بسیاری از شبکه‌های توزیع آب در معرض بحران کمبود منابع آبی، محدودیت‌های اقتصادی برای بهره‌برداری بهینه و کهنگی و فرسودگی اجزای خود قرار داشته و فرسودگی آن‌ها باعث ایجاد شکست در اجزای شبکه می‌شود (ساقی، ۱۳۹۶). لذا شناخت علل حوادث شبکه می‌تواند در پیشگیری و کاهش حوادث و اتلاف آب سهم مؤثری داشته باشد. یکی از دغدغه‌های متولیان شبکه آب آن است که عمر مفید لوله‌ها را تخمین بزنند تا در زمان مناسب و با بهترین استراتژی ممکن، به بازسازی و نوسازی شبکه بپردازند. برای دستیابی به این مطلوب، پیشگویی رفتار یک لوله در طی زمان و روند تغییرات نرخ شکست لوله‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. با استفاده از رابطه میان نرخ حوادث و پارامترهای شبکه می‌توان مدل‌های پیشگویی‌کننده وضعیت شبکه را برای سال‌های آتی ارائه نمود (جلیلی قاضی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷).

یکی از اولین تلاش‌ها در پیشگویی رفتار لوله‌ها به سال ۱۹۷۹ میلادی، بازمی‌گردد (سلطانی و محمدرضاپورطبری، ۱۳۹۱). برخی از محققین با در نظر داشتن هر دو پارامتر نرخ واقعی شکست لوله‌ها و عوامل مؤثر بر شکست لوله‌ها، به ارائه مدل‌های تلفیقی پرداختند (Boxall et al., 2004). در نمونه دیگری از این مدل، محققین به کمک روش‌های نوین حل مسائل نظیر الگوریتم ژنتیک توانسته‌اند توابع مختلفی را برای توصیف تأثیر پارامترها ارائه کنند (Berardi et al., 2008). Berardi and Giustolisi (2021) رابطه‌ای را برای پیش‌بینی تعداد شکست لوله‌ها در شبکه توزیع مبتنی بر روش چندجمله‌ای تکاملی و داده‌کاوی ارائه نموده‌اند که در آن فقط متغیرهای سن، قطر و طول لوله انتخاب‌شده‌اند.

Creaco and Walski, (2017) آنالیز اقتصادی شکستگی‌ها در شبکه آب را انجام دادند. در این تحقیق، با توجه به نتایج قبلی و پارامترهای مؤثر در ایجاد و گسترش حوادث، تحلیل حوادث در شبکه‌های توزیع آب و انشعابات مشترکین انجام‌شده است. طی پژوهش Farmani et al., (2017) مشخص شد که با توجه به هزینه‌های بالای اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی ناشی از ترکیدگی لوله در سیستم‌های توزیع آب، ارائه یک مدل با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، ضروری است.

Winkleret et al. (2018) مدل‌سازی خرابی لوله شبکه توزیع آب بر مبنای شبکه‌های عصبی را ارائه کردند. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از شبکه‌های عصبی موجب برنامه‌ریزی دقیق برای بهبود عملکرد و مدیریت شبکه لوله‌های آب شهری خواهد شد. طی پژوهش Motiee and Ghasemnejad (2019) صورت گرفت، با استفاده از مدل‌های رگرسیون، به تجزیه‌وتحلیل متغیرهای آسیب‌پذیر لوله‌های آب شهری باهدف یافتن معادلات برای پیش‌بینی حوادث احتمالی لوله در آینده، پرداختند. Kerwin et al., (2019) به مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی و بیان ژن در پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های آب‌رسانی پرداختند و اعلام نمودند که استفاده از این نوع شبکه‌ها، دارای نتایج رضایت‌بخشی است. Weeraddana et al. (2020) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدل نرخ شکست خرابی لوله‌های آب‌رسانی استرالیا را ارائه دادند و مشخص شد که پیش‌بینی خرابی لوله، راه‌حلی مقرون‌به‌صرفه برای این مشکل خواهد بود.

Barton et al. (2020) اثرات مخرب بر لوله‌های شبکه‌های آب شهری را بررسی کردند و درنهایت با ارائه مدلی، اعلام نمودند که استفاده از مدل‌ها و توسعه آن‌ها، موجب کاهش نشت و برنامه‌ریزی بهتر در شبکه‌های توزیع آب شهری خواهد شد. Gonzalez et al. (2020) مدل‌های خرابی لوله در شبکه‌های توزیع آب را مقایسه کردند و مشخص شد که شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، عملکرد بهتری در پیش‌بینی وضعیت خرابی لوله‌ها از خود نشان می‌دهند. Dawood et al. (2020) یک مدل پیش‌بینی شکست خطوط لوله آب‌رسانی ارائه کردند. هدف این مقاله، توسعه یک سیستم مدل‌سازی؛ مبتنی بر هوش مصنوعی برپایه بیان ژن بوده که زیربنای تحلیلی را برای پیش‌بینی خرابی‌های لوله آب‌رسانی شهری را فراهم می‌کند. Kerwin et al. (2020) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و نظرات متخصصان که مبتنی بر بیان ژن صورت پذیرفت، مدل پیش‌بینی نرخ شکست در لوله‌های آب‌رسانی شهری را ارائه کردند و مشخص شد که استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مبتنی بر بیان ژن، عملکرد پیش‌بینی قابل قبولی دارند. Amiri Ardakani and Najafzadeh (2021) طی پژوهشی با استفاده از

مدل‌های آماری، عوامل مؤثر بر نرخ شکست در لوله‌های آب شهری با جنس‌های مختلف را بررسی کرده و با ارائه مدل، مشخص شد که استفاده از آن، موجب کاهش نشت و بهبود سطح خدمات در شرکت‌های توزیع آب خواهد شد. Jafari et al. (2021) در پژوهشی بررسی و پیش‌بینی میزان خرابی لوله‌های شبکه توزیع آب با استفاده از شش مدل مبتنی بر شبکه عصبی را انجام دادند. یافته‌ها نشان داد که مدل پیشنهادی می‌تواند دقت پیش‌بینی میزان شکست لوله‌ها را در مقایسه با سایر مدل‌های موجود، به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد.

از تحقیق‌های مرجعی که در این زمینه در داخل کشور انجام‌شده است می‌توان به تابش و عابدینی (۱۳۸۴)، اشاره کرد. در این تحقیق به برخی روش‌های تحلیل اطلاعات حوادث و شکست لوله‌ها اشاره شده است. تابش و همکاران (۱۳۸۸) مدلی به‌منظور مدیریت حوادث شبکه‌های توزیع آب با استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، توسعه دادند. تحلیل نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که استفاده از این مدل باعث افزایش کارایی سیستم و کاهش هزینه‌ها می‌شود. طی پژوهش امیدوار و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری، ارزیابی و ارائه مدلی برای پیش‌بینی نشت لوله انجام شد. تابش و عارف‌خانی (۱۳۸۸) مدل پیش‌بینی فشار شبکه‌های آب‌رسانی را ارائه کردند. هدف این مقاله، توسعه یک سیستم مدل‌سازی مبتنی بر نرم‌افزار کامپیوتری بوده که امکان پیش‌بینی میزان نشت لوله آب‌رسانی شهری را فراهم می‌کند. تابش و عطایی‌کیا (۱۳۸۸) طراحی بهینه شبکه‌های آب‌رسانی را انجام دادند و مشخص شد که در بررسی عملکرد شبکه‌های آب‌رسانی، هرچه تعداد قیود مربوط به قطر، فشار و سرعت در نظر گرفته شود، عملکرد شبکه پیش‌بینی شده دارای اطمینان بیشتری خواهد بود. تابش و عابدینی (۱۳۷۹) طی پژوهشی شکست لوله‌ها در شبکه‌های آب‌رسانی شهری را آنالیز کردند و مشخص شد که با افزایش قطر لوله، تعداد حوادث سالانه لوله‌ها کاهش می‌یابد. در مقابل با افزایش سن لوله‌ها، تعداد حوادث سالانه افزایش می‌یابد. گاوشانی و همکاران (۱۳۸۹) طی پژوهش خود به بررسی تأثیر قطر لوله‌ها در میزان حوادث شبکه توزیع آب شهری پرداختند که این تحلیل تأثیر عوامل دیگر در ایجاد حادثه را درنظر نگرفته است. سلطانی و پورطبری (۱۳۹۰) عوامل مؤثر بر نرخ شکست لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تلفیق شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک را بررسی نمودند.

روش‌های مختلف بهینه‌سازی و ارائه مدل شامل الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی، توسط محققین مختلف، در شبکه‌های توزیع آب، مورداستفاده قرارگرفته است. تابش و همکاران طی (۱۳۸۴) پژوهش خود با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی مصنوعی و استنتاج فازی فشار در شبکه‌های آب‌رسانی را پیش‌بینی کردند. معین‌الدینی و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، قطر لوله‌های شبکه آب‌رسانی شهری را بهینه کرده و اعلام نمودند که به‌دلیل پیچیدگی غیرخطی و منحصربه‌فرد بودن طراحی شبکه‌های آب‌رسانی، در سال‌های اخیر استفاده از هوش مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، مهندسان طراح را مطمئن می‌سازد که بهترین گزینه بهینه‌یابی را بیابند. طی پژوهش سرکمریان و همکاران (۱۳۹۸)، با استفاده از شبیه‌سازی ریاضی شبکه خطوط لوله آب‌رسانی بررسی و اعلام شد که اعتمادپذیری این روش‌ها بالا بوده و می‌تواند برای طراحی و مدیریت عملکرد شبکه‌های آب‌رسانی، مورداستفاده قرار گیرد. جعفری و همکاران (۱۳۹۹) رویکرد جدیدی در پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های شبکه توزیع آب شهر گرگان با استفاده از مدل هوشمند ارائه نمودند که موجب پیش‌بینی دقیق‌تر نرخ شکست در این نوع لوله‌ها خواهد شد.

ازآن‌جا که دسترسی به‌تمامی داده‌های موردنیاز برای تعیین میزان نرخ شکست لوله‌ها در اکثر موارد در دسترس نبوده و یا به‌آسانی قابل‌استخراج نیستند، لذا بررسی اهمیت پارامترهای مؤثر بر نرخ شکست و تعیین تعداد آن‌ها به‌منظور ارائه رابطه‌ای که بتواند با داده‌های مؤثر قابل‌دسترس به پیش‌بینی صحیح نرخ شکست بپردازد، از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است (سلطانی و محمدرضاپورطبری، ۱۳۹۱). لذا پژوهش حاضر ازلحاظ ماهیت، از نوع کاربردی و به لحاظ اجرا، ترکیبی از روش‌های توصیفی-تحلیلی بر پایه مطالعات کتابخانه‌ای محسوب می‌شود. در این پژوهش، علاوه‌بر مصاحبه با کارشناسان و خبرگان مربوطه درزمینه مورد مطالعه، برای انجام محاسبات و ارائه مدل پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های اصلی آب‌رسانی شهری، از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP[1]) که براساس نرم‌افزار GeneXproTools 5.0 صورت می‌گیرد، استفاده خواهد شد. هم‌چنین فرضیات موردبحث در پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

- روش برنامه‌ریزی بیان ژن می‌تواند الگویی دقیقی از پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های اصلی آب‌رسانی شهری ارائه کند؛
- به‌روز کردن و بررسی همه عوامل تأثیرگذار، موجب کاهش آسیب‌پذیری شبکه آب‌رسانی شهری خواهد شد.

در سال‌های اخیر، تحقیقات فراوانی توسط پژوهشگران در زمینه لوله‌های اصلی شبکه‌های آب‌رسانی انجام‌شده است که با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی،

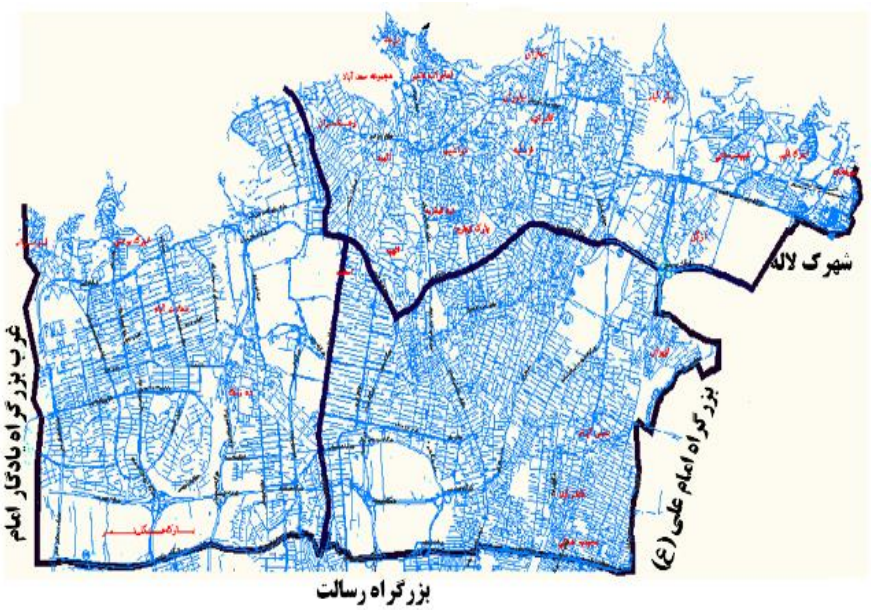
فرایندهای تصمیم‌گیری چندمعیاره، و روش‌های فراابتکاری صورت پذیرفته است. الگوریتم‌های موجود، قادر به یافتن جواب بهینه به‌صورت دقیق هستند اما در مورد مسائل بهینه‌سازی و طراحی‌های پیچیده، کارایی کافی نداشته و زمان اجرای آن‌ها متناسب با ابعاد مسائل به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. به‌تبع آن، موجب می‌شود که مدل‌های ارائه شده، دارای خطای محاسباتی و محدودیت استفاده در شرایط مختلف محیطی را داشته باشند. ازاین‌رو، نیاز به ارائه مدل جدیدی است که بتواند ضمن سهولت استفاده و کاهش خطای محاسباتی، محدودیت‌های مدل‌های قبلی را نداشته باشد. اگرچه با پیشرفت فناوری‌های اطلاعاتی و کامپیوتری، امکانات گسترده‌تری برای بهینه‌سازی و طراحی شبکه‌های آب‌رسانی شهری به‌وجود آمده است، اما به‌علت حجم گسترده اطلاعات شبکه‌های آب‌رسانی، بهینه‌سازی و طراحی شبکه‌های آب‌رسانی شهری، همچنان بسیار وقت‌گیر و دشوار است، لذا شناسایی و استفاده از روش‌ها و نرم‌افزارهای جدید برای ارائه مدل، ضروری است. از جمله این سیستم‌های کامپیوتری، الگوریتم تکاملی است. الگوریتم‌های تکاملی، روش‌هایی بر مبنای جستجوی تصادفی‌اند که از مدل‌سازی بیولوژیکی طبیعی الگوبرداری شده‌اند. آن‌ها بر روی پاسخ‌های ممکنی کار می‌کنند که از ویژگی برتری برخوردارند و بقای نسل بیشتری دارند، لذا تخمین نزدیک‌تری از پاسخ بهینه به‌دست می‌دهند. الگوریتم تکاملی، تفاوت اساسی با دیگر روش‌های بهینه‌سازی دارد چرا که تنها یک نقطه را جستجو نمی‌کند، بلکه جمعیتی از نقاط را به‌صورت موازی بررسی می‌نماید و نیاز به اطلاعات ضمنی و دیگر دانش‌های مکمل ندارد؛ فقط تابع هدف و شایستگی مربوطه در جهت‌های جستجو تأثیر گذارند. هم‌چنین هیچ‌گونه محدودیتی برای تعریف تابع هدف وجود ندارد و از قوانین در حالِ تغییر احتمالی، بهره می‌برند؛ نه موارد مشخص و معین. ازآن‌جایی‌که روش برنامه‌ریزی بیان ژن، جزء جدیدترین شیوه از میان روش‌های الگوریتم تکاملی است و هم‌چنین به‌دلیل دارابودن دقت کافی و انعطاف‌پذیری بالا، از کاربرد بیشتری برخوردار است، لذا در تحقیق حاضر، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. این روش با استفاده از اطلاعات موجود در داده‌ها و بدون هیچ فرضیه‌ای در ساختار رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته، رابطه‌ای مناسب بین آن‌ها برقرار کرده و نمودار خروجی را پیش‌بینی می‌کند. بر همین اساس نوآوری اصلی این تحقیق، شامل استفاده از نرم‌افزار بیان ژن (GEP) برای شناسایی و ارائه مدل برآورد نرخ شکست لوله‌های اصلی آب‌رسانی شهری است؛ چراکه علی‌رغم کامل و جامع بودن این نرم‌افزار، به‌دلیل جدید بودن آن، بسیاری از پژوهشگران به این شیوه قدرتمند، توجه کافی ننموده‌اند و تنها در سال‌های اخیر این موضوع موردتوجه تعداد کمی از علاقه‌مندان و پژوهشگران حوزه آب و فاضلاب قرارگرفته است. به‌نظر می‌رسد این تحقیق که در ارتباط با ارائه مدل برآورد نرخ شکست لوله‌های اصلی آب‌رسانی شهری است، می‌تواند کمک شایانی در بحث تعمیر و نگهداری لوله‌های اصلی آب‌رسانی شهری داشته باشد.

۲- مواد و روش‌ها

روش گردآوری اطلاعات در پژوهش حاضر، از نوع توصیفی-تحلیلی بر پایه مطالعات کتابخانه‌ای است. اطلاعات لازم در این پژوهش، با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای و همچنین، ضمن تکمیل چک‌لیست به‌صورت کیفی جمع‌آوری‌شده و سپس برای تحلیل و تعیین پارامترهای ورودی نرم‌افزار، از نظرات کارشناسان خبره درزمینه سامانه‌های آب‌رسانی، استفاده شد. سپس با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) مدل نهایی نرخ شکست لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری، ارائه شده است.

۲-۱- منطقه موردمطالعه

ناحیه موردمطالعه، منطقه یک شهر تهران است. شکل ۱ موقعیت محدوده موردمطالعه است. مساحت منطقه موردمطالعه، برابر ۱۱۸/۵ کیلومترمربع و جمعیت ساکن در این منطقه در حدود ۱/۶۵۹/۰۰۰ نفر است. تعداد انشعابات این منطقه بیش از ۱۱۲۰۰۰ فقره و طول کل شبکه توزیع آب آن در حدود ۱۶۶۵ کیلومتر است. میزان آب مصرفی منطقه در طول یک سال برابر ۱۴۰ میلیون مترمکعب و نیز دارای حوادث ثبت‌شده بالایی است. به‌عنوان‌مثال، تعداد حوادث در یک دوره زمانی از مردادماه ۱۳۹۳ تا بهمن‌ماه ۱۳۹۶ بیش از ۷۳۰۰ مورد بوده است. در منطقه مورد مطالعه، عمدتاً از لوله‌هایی با جنس‌های آزبست، پلی‌اتیلن، گالوانیزه و چدن استفاده‌شده است و میانگین سن لوله‌ها حدود ۲۵ سال است (شرکت آب و فاضلاب استان تهران، ۱۴۰۰). محدوده زمانی موردبررسی، مربوط به سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ بوده است که داده‌ها بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای و آمار و اطلاعات موجود در شرکت آب و فاضلاب استان تهران است.



شکل ۱- موقعیت منطقه موردمطالعه (شرکت آب و فاضلاب استان تهران، ۱۴۰۰)

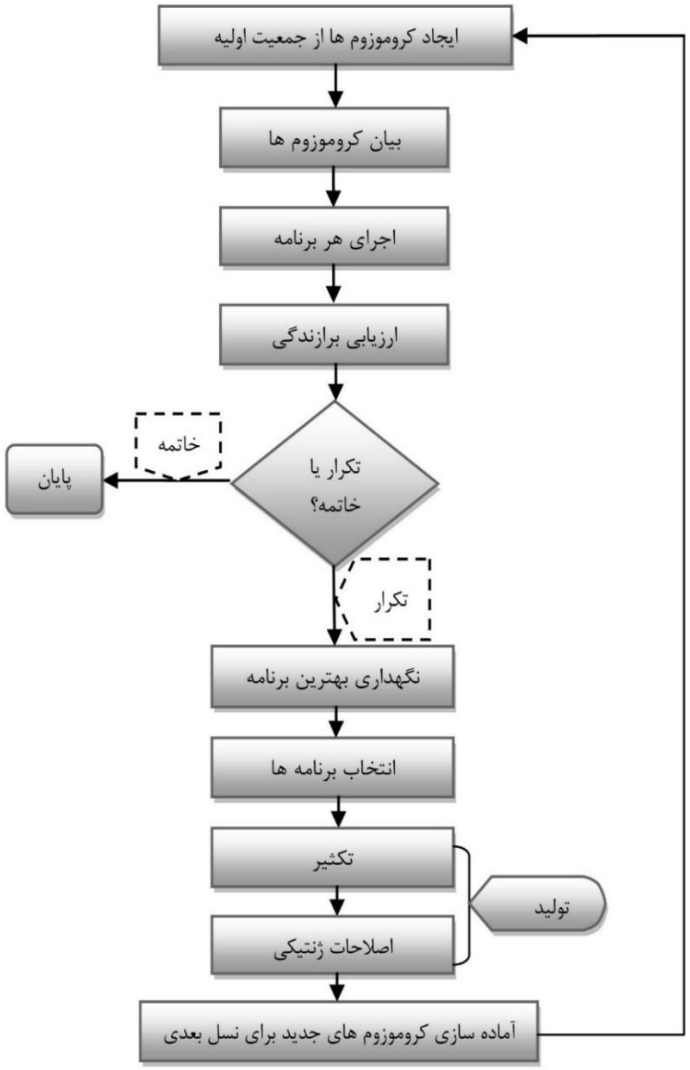
۲-۲- برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

برنامه‌نویسی بیان ژن، روشی برای توسعه برنامه‌های رایانه‌ای و مدل‌سازی ریاضی، مبتنی بر محاسبات تکاملی و الهام گرفته از تکامل طبیعی است (Hajihassani et al., 2019). این روش، با استفاده از یکسری مجموعه داده‌ها، یک مدل ریاضی به شکل ساختار درختی ارائه می‌دهد (Mansouri et al., 2016). این روش در سال ۱۹۹۹ توسط Ferria اختراع و به‌طور رسمی در سال ۲۰۰۱ معرفی شد (Ferria, 2001). برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) نیز همانند الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)، یک الگوریتم ژنتیکی است که از جمعیتی از افراد استفاده کرده و آن‌ها را مطابق برازندگی انتخاب می‌کند و تغییرات ژنتیکی را با استفاده از یک یا چند عملگر ژنتیکی، اعمال می‌نماید. اساس الگوریتم مورداستفاده در GEP، ادغام دو الگوریتم وراثتی پیش از خود (الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌ریزی ژنتیکی (GP) باهدف غلبه بر نقاط ضعف خود، است. برای این‌منظور، در الگوریتم GEP، کروموزوم‌ها به‌عنوان یک درخت بیان (ET) بیان می‌شوند (Hajihassani et al., 2019). ET، مشابه پروتئینی در یک سلول طبیعی است که تعیین می‌کند فنوتیپ چیست (Ferria, 2006). تفاوت اساسی بین این سه الگوریتم، مربوط به ماهیت افراد آن‌ها است. در GEP، افراد به‌صورت رشته‌های خطی با طول ثابت (کروموزوم) کدگذاری شده (مشابه با الگوریتم ژنتیک) و سپس به شکل نهادهای غیرخطی با اندازه‌ها و اشکال متفاوت (یعنی نمایش دیاگرام ساده یا بیان درختی مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک) اظهار می‌شوند. Ferria برای بیان ژن‌ها و تولید ET، زبانی ساده و کارآمد به‌نام کاروا[۳] ابداع کرد که با استفاده از آن یک معادله (برنامه) ریاضی متشکل از پایانه‌ها و عملکردهای تصادفی، ایجاد شده و از هر کروموزوم استخراج می‌شود (Mansouri et al., 2016).

پنج مرحله اساسی در طراحی الگوریتم GEP عبارت‌اند از (Hajihassani et al., 2019):

- تعریف تابع برازش؛
- تعریف پایانه‌ها و عملکردها؛
- تعیین ساختار کروموزوم‌ها (تعداد نسل‌ها، طول و تعداد ژن‌ها)؛
- تعیین تابع پیوند؛
- تعیین ویژگی‌های عملگرها و درنهایت پیاده‌سازی الگوریتم.

اولین مرحله در الگوریتم GEP، تولید جمعیت اولیه از راه حل‌ها است. این موضوع می‌تواند به‌وسیله فرآیند تصادفی و یا با استفاده از مقداری اطلاعات درباره مسئله انجام شود. سپس کروموزوم‌ها به‌صورت بیان درختی (ETs) نشان داده شده، که این‌هم مطابق با یک تابع برازش ارزیابی می‌شود. اگر کیفیت رضایت‌بخش از یک راه حل پیدا شود و یا نسل‌ها به تعداد معینی برسد، تکامل متوقف می‌شود و بهترین راه‌حل گزارش داده می‌شود. در غیراین‌صورت، بهترین راه‌حل از نسل حاضر نگه داشته می‌شود و بقیه راه‌حل‌ها به فرآیند گزینشی واگذار می‌شوند. براساس گزینش، بهترین افراد شانس بیشتری برای تولید فرزندان دارند. کل این روند برای چندین نسل تکرار می‌شود و با پیش رفتن نسل به جلو، انتظار می‌رود که کیفیت جمعیت نیز به‌طور متوسط، بهبود یابد (Ferria, 2006). مراحل اصلی برنامه‌ریزی بیان ژن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- فلوچارت برنامه‌ریزی بیان ژن (Ferria, 2006)

محدوده متغیرهای مختلف مورداستفاده در این مطالعه برای لوله‌های با جنس پلی‌اتیلن، آزبست، گالوانیزه و چدن در جدول ۱ را نشان داده‌شده است.

جدول ۱- محدوده متغیرهای مختلف مورداستفاده در این مطالعه

نماد نام‌گذاری	متغیر	محدوده
d_0	طول لوله	۲۸۹۷۰ – ۷۴۳۸۰ (متر)
d_1	قطر لوله	۸۰ – ۳۰۰ (میلی‌متر)
d_2	تعداد حوادث	۵ – ۱۶۶۴۴ (عدد)
d_3	فشار کاری	۲/۷ – ۶/۸۹ (اتمسفر)
d_4	سن لوله	۵ – ۲۶ (سال)
d_5	نوع خاک لوله مدفون‌شده	I - IV
d_6	تعداد انشعابات	۱۰۷۴۴۱ – ۱۱۲۲۹۴ (عدد)
d_7	عمق نصب	۱/۲ – ۲ (متر)
d_8	نرخ شکست	۰/۱۰ – ۲/۵ (تعداد شکست در سال در واحد طول (کیلومتر))

در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار GeneXproTools 5.0 دقت داده‌ها بررسی شد. به این‌منظور، برای بررسی دقت داده‌ها و ارزیابی مدل خروجی نرم‌افزار با مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، از شاخص‌های R^2، RMSE و NSE استفاده شد. سپس برای هریک از لوله‌های با جنس پلی‌اتیلن، آزبست، گالوانیزه و چدن، یک مدل برای تخمین نرخ شکست لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری ارائه شد. برای محاسبه نرخ شکست (مشاهداتی)، تعداد شکست در سال در واحد طول (کیلومتر) مدنظر قرارگرفته می‌شود. هم‌چنین برای محاسبه مقدار نرخ شکست (پیش‌بینی‌شده) توسط نرم‌افزار، ابتدا داده‌های ورودی[۴]، تعریف‌شده و سپس نرخ شکست (پیش‌بینی‌شده) به‌عنوان هدف[۵]، به نرم‌افزار معرفی شد. در ادامه، نرم‌افزار نرخ شکست (پیش‌بینی‌شده) را برای هر لوله با جنس مختلف، محاسبه نمود که در شکل‌های ۳، ۵، ۷ و ۹ نشان داده‌شده است. از چهار عملیات اساسی حساب (+,-,×,/) و چندین توابع ریاضی اولیه استفاده و محدودیت RMSE، به‌عنوان

تابع برازش، تعیین شد.

توابع برازش باهدف بیشینه‌سازی برازش و کاهش خطای تخمین، به‌صورت شاخص ضریب تعیین R^2 و یا جذر میانگین مربعات خطا RMSE و نیز ضریب ناش- ساتکلیف NSE مطابق روابط (۱) تا (۳) استفاده‌شده است. این معیارها نتیجه‌بخش بودن و توانایی مدل برای ایجاد پیش‌بینی با ارزش را مشخص می‌کند.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(x_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{y})^2}} \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}{n}} \quad (۲)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_{m.i} - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m.i} - \bar{Q}_m)_i^2} \quad (۳)$$

که x: مقادیر مشاهداتی، y: مقادیر محاسباتی، $\bar{x}$: میانگین مشاهداتی، $\bar{y}$: میانگین محاسباتی، i: شماره داده، n: کل داده‌ها، $Q_{m,i}$: مقادیر مشاهداتی، Q_s: مقادیر محاسباتی و $\overline{Qm}$ میانگین مشاهداتی است.

نکته مهم این است که قابلیت تعمیم GEP[۶]، به مقدار بسیار زیادی تحت تأثیر انتخاب پارامترها است (Azim et al., 2020).

جدول ۲ پیکربندی GEP را نشان می‌دهد که برای شبیه‌سازی نرخ شکست لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری استفاده‌شده است. تنظیمات پیکربندی جدول ۲، براساس پیشنهاد شرکت سازنده نرم‌افزار، تعریف شده است (Gepsoft, 2020).

۲-۳- معیارهای ارزیابی لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری

در این مقاله، ابتدا کلیه مدل‌های آماری رگرسیونی ازنظر تئوری موردمطالعه قرار گرفت و سپس با جمع‌آوری آمار و اطلاعات لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری، مدل آماری فرمول‌بندی و رابطه‌ای تهیه شد که شامل کلیه معیارهای مهم مرتبط باشد. معیارهای مورد ارزیابی در لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری با توجه به جنس لوله، شامل: طول لوله، تعداد حوادث، قطر لوله، فشار کاری، سن لوله، نوع خاک لوله مدفون‌شده، تعداد انشعابات و عمق نصب لوله است (جدول ۱).

جدول ۲- تنظیمات پیکربندی برای الگوریتم GEP (Gepsoft, 2020)

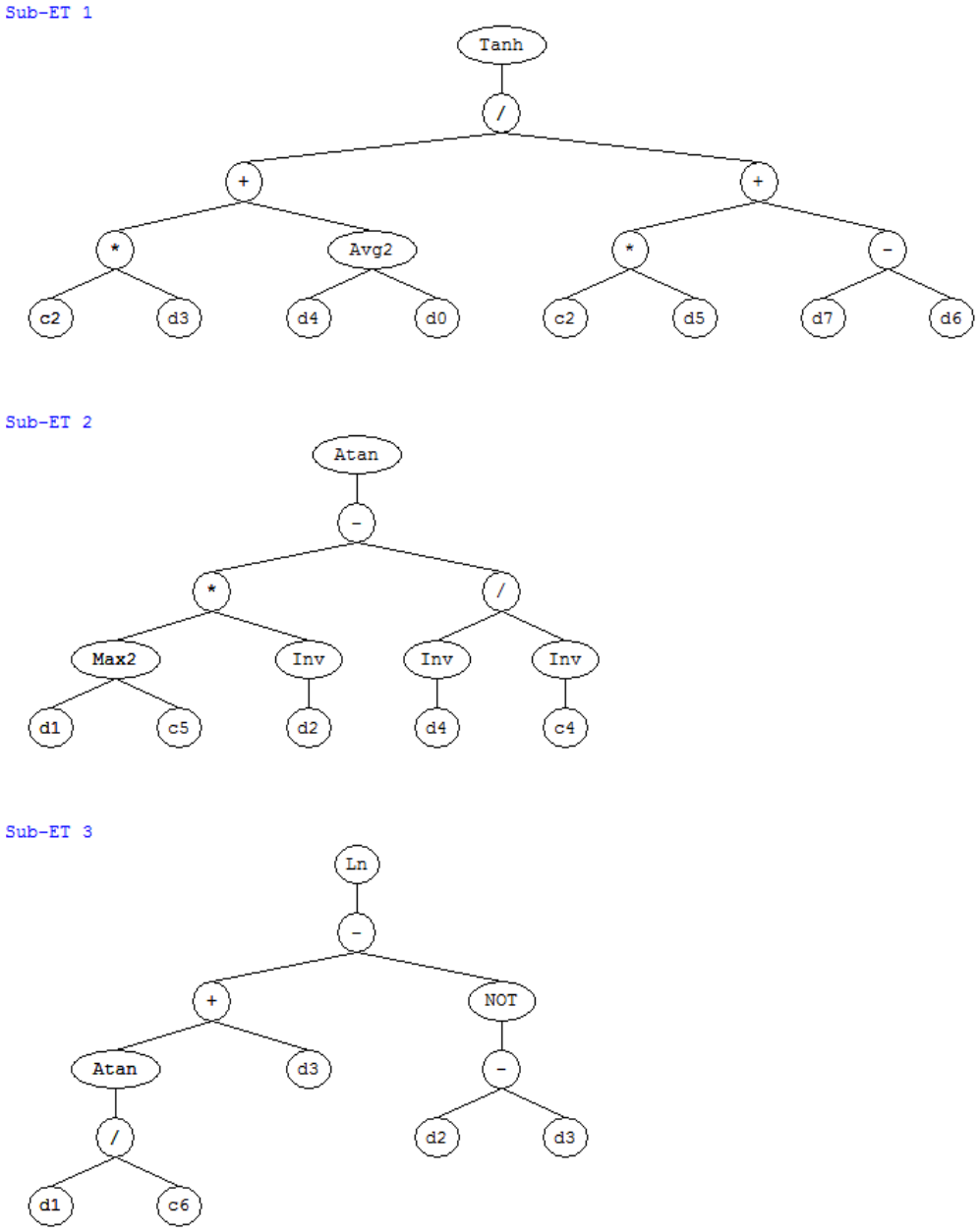
	پارامتر	تعریف
کلیات	Fitness Function	RMSE
	Number of chromosomes	۳۰
	Linking function	Addition
اپراتورهای ژنتیک	IS Transposition rate	۰/۰۰۵۴۶
	RIS Transposition rate	۰/۰۰۵۴۶
	Inversion rate	۰/۰۰۵۴۶
	Gene transposition	۰/۰۰۲۷۷
ثابت‌های عددی	Constants per gene	۱۰
	Data type	Floating-Point
	Lower bound	-۱۰
	Upper bound	+۱۰

۳- نتایج و بحث

درخت بیان نهایی (ET) از مدل GEP در شکل‌های ۳، ۵، ۷ و ۹، نشان داده‌شده است که شامل زیرET است که توسط عملکرد جمع (+) به هم متصل شده‌اند. درواقع، این شکل روابط استخراج‌شده بین داده‌های ورودی و خروجی را با استفاده از الگوریتم GEP نشان می‌دهد. با استفاده از شکل‌های ۳، ۵، ۷ و ۹، می‌توان معادله مبتنی بر GEP که یک ترکیب پیچیده از عملگرهای ریاضی، ثابت‌ها و متغییرها است را برای پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری (FRF)، را برای جنس‌های مختلف لوله، به‌دست آورد (معادله‌های (۴) تا (۷)).

۱-۳- لوله با جنس پلی‌اتیلن

محاسبه نرخ شکست برای لوله اصلی آب‌رسانی شهری با جنس پلی‌اتیلن (FRF_{PE}) در معادله (۳)، ارائه شده است.



شکل ۳- درخت بیان (ET) از مدل GEP برای لوله اصلی آب‌رسانی شهری با جنس پلی‌اتیلن

$$FRF_{PE} = \left(\mathrm{Tanh}\left(\frac{((c_2\times(d_3))+(\frac{d_4+d_0}{2}))}{((c_2\times(d_5))+(d_7-d_6))}\right)\right) + \left(\mathrm{Atan}\left(\left(\max(d_1.C_5)\times\left(\frac{1}{d_2}\right)\right)-\left(\frac{\frac{1}{d_4}}{\frac{1}{c_4}}\right)\right)+\left(\log\left(\left(\mathrm{Atan}\left(\frac{d_1}{c_6}\right)\right)+d_3\right)-(1-(d_2-d_3))\right)\right) \quad (۴)$$

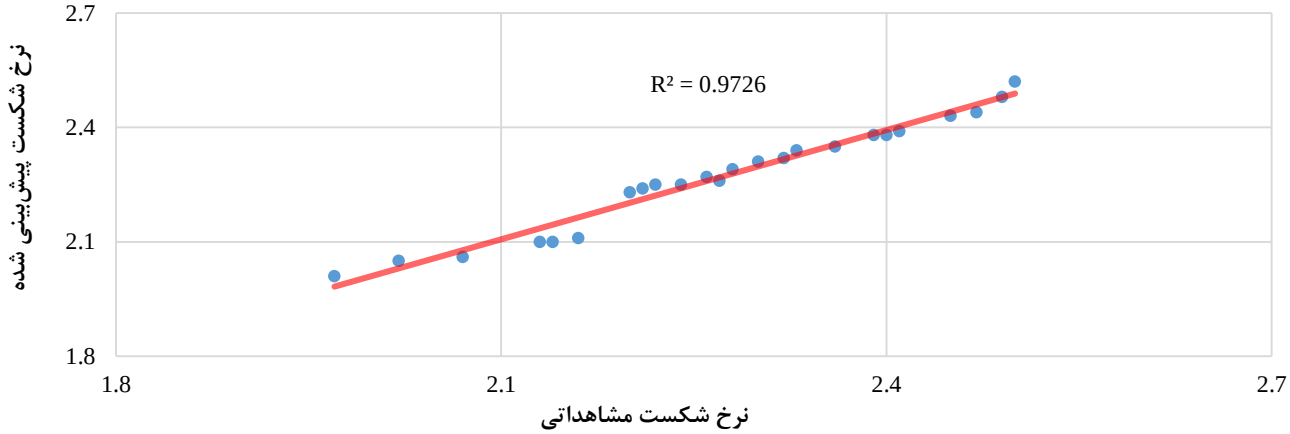
که *Tanh*: تابع تانژانت هیپربولیک، *Atan*: تابع آرک‌تانژانت، *max*: مقدار بیشینه بین دو پارامتر و *log*: لگاریتم است. مقادیر پارامترهای ثابت در شکل ۳ و معادله (۴)، در جدول ۳ ذکرشده است.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای ثابت در شکل ۳ و معادله (۴) برای لوله اصلی آب‌رسانی شهری با جنس پلی‌اتیلن

پارامتر	مقدار
C_2	-۸/۵۰۲۱
C_4	۷/۴۸۶۶
C_5	۳/۹۸۲۷
C_6	۳۰/۰۹۱۶

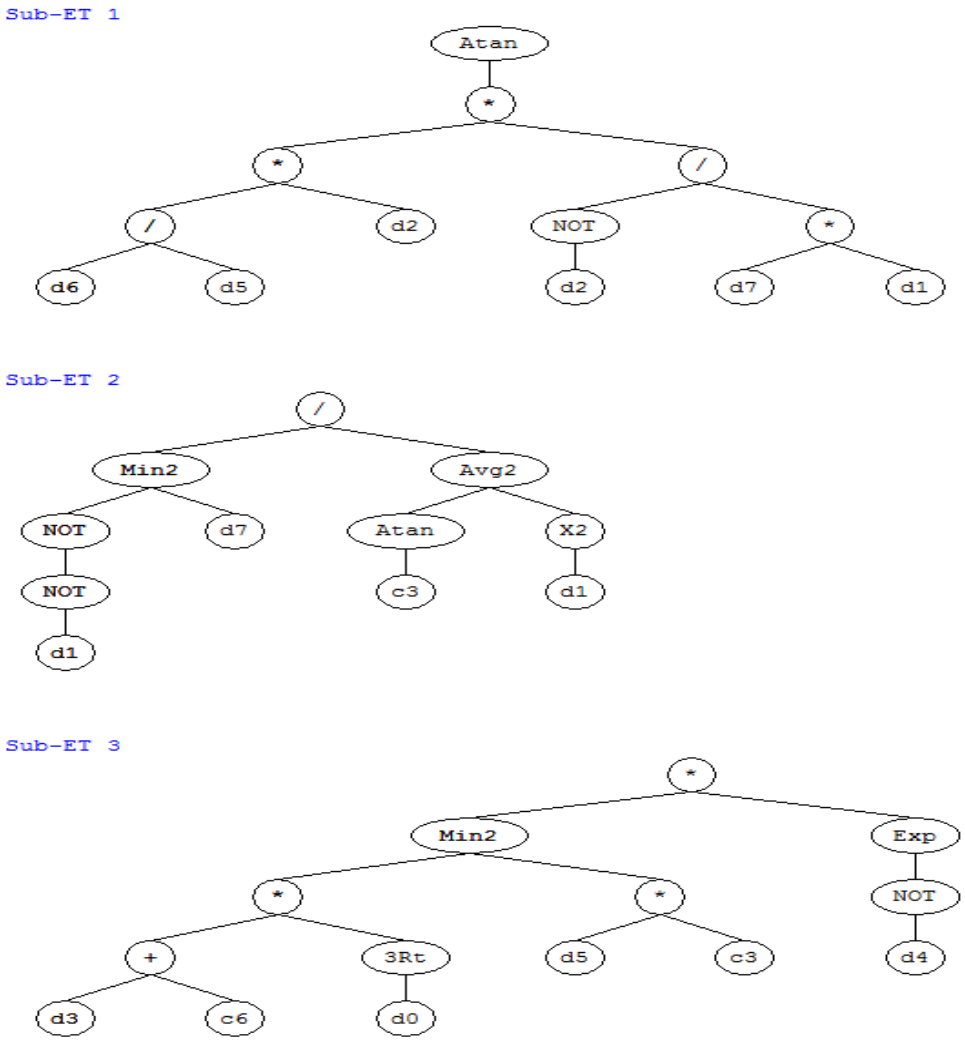
در شکل ۴، تحلیل عملکرد و اعتبار مدل GEP و مقایسه آن بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برنامه‌ریزی بیان ژن، نشان داده‌شده است. مقدار R^2 برای پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری با جنس پلی‌اتیلن، برابر ۰/۹۷۲۶

مشخص شد. با توجه به نزدیکی آن به عدد ۱، نشان‌دهنده همبستگی بسیار خوب بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی و نشان از دقت بالای مدل است. هم‌چنین مقدار RMSE برابر ۰/۰۴۶۱ (میانگین مربع خطا برحسب تعداد شکست در سال در واحد طول (کیلومتر)) و مقدار NSE نیز برابر ۰/۹۱۳۵ است.



شکل ۴- مقایسه نتایج مشاهداتی و محاسباتی برنامه‌ریزی بیان ژن برای لوله با جنس پلی‌اتیلن

۳-۲- لوله با جنس آزبست



شکل ۵- درخت بیان (ET) از مدل GEP برای لوله اصلی آب‌رسانی شهری با جنس آزبست

محاسبه نرخ شکست برای لوله اصلی آب‌رسانی شهری با جنس آزبست (FRF_{AS}) در معادله (۵)، ارائه شده است.

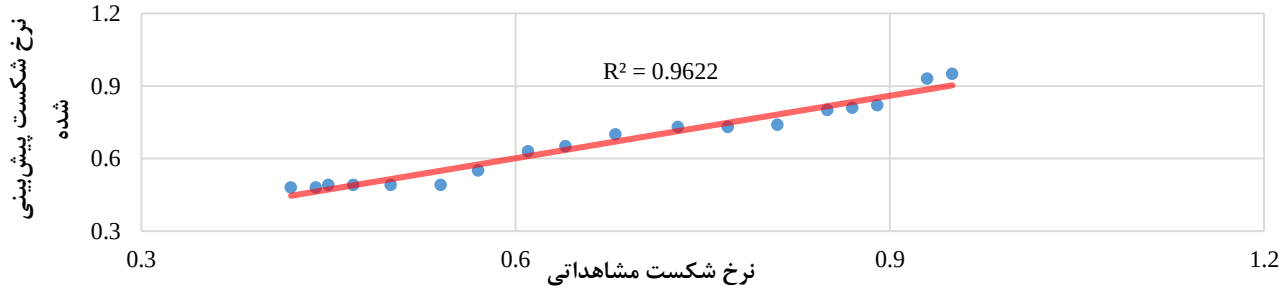
$$FRF_{AS} = \left(\text{Atan}\left(\left(\frac{d_6}{d_5} \times d_2\right) \times \left(\frac{\left(\frac{1}{d_2}\right)}{(d_7 \times d_1)}\right)\right) + \left(\frac{\min\left((1-(1-d_1)).d_7\right)}{\left(\frac{(\text{Atan}\, c_3(\text{GeneII}))+(d_1)^2}{2}\right)} + \min\left(\left((d_3 + c_6) \times \sqrt[3]{d_0}\right)\right).(d_5 \times c_3(\text{GeneIII})\right) \times (\exp(1-d_4))\right) \quad (۵)$$

که *Atan*: تابع آرک‌تانژانت، *min*: مقدار کمینه بین دو پارامتر و *exp*: تابع‌نمایی است. مقادیر پارامترهای ثابت در شکل ۵ و معادله (۵)، در جدول ۴ ذکرشده است.

جدول ۴- مقادیر پارامترهای ثابت در شکل ۵ و معادله (۵) برای لوله اصلی آب‌رسانی شهری با جنس آزبست

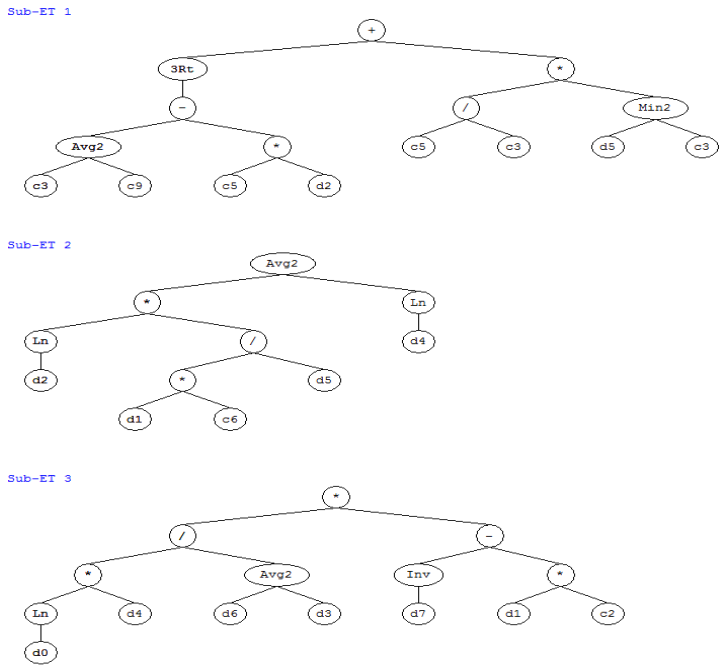
پارامتر	مقدار
C_3 (Gene II)	-۱/۷۳۱۹
C_3 (Gene III)	۹/۷۳۵۰
C_6	۴/۲۹۷۱

در شکل ۶، تحلیل عملکرد و اعتبار مدل GEP و مقایسه آن بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برنامه‌ریزی بیان ژن، نشان داده‌شده است. مقدار R^2 برای پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری با جنس آزبست، برابر ۰/۹۶۲۲ مشخص شد و با توجه به نزدیکی آن به عدد ۱، نشان‌دهنده همبستگی بسیار خوب بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی و نشان از دقت بالای مدل است. همچنین مقدار RMSE نیز برابر ۰/۰۳۳۴ (میانگین مربع خطا برحسب تعداد شکست در سال در واحد طول (کیلومتر)) و مقدار NSE نیز برابر ۰/۸۹۳۷ است.



شکل ۶- مقایسه نتایج مشاهداتی و محاسباتی برنامه‌ریزی بیان ژن برای لوله با جنس آزبست

۳-۳- لوله با جنس گالوانیزه



شکل ۷- درخت بیان (ET) از مدل GEP برای لوله اصلی آب‌رسانی شهری با جنس گالوانیزه

محاسبه نرخ شکست برای لوله اصلی آب‌رسانی شهری با جنس گالوانیزه (FRF_{GA}) در معادله (۶)، ارائه شده است.

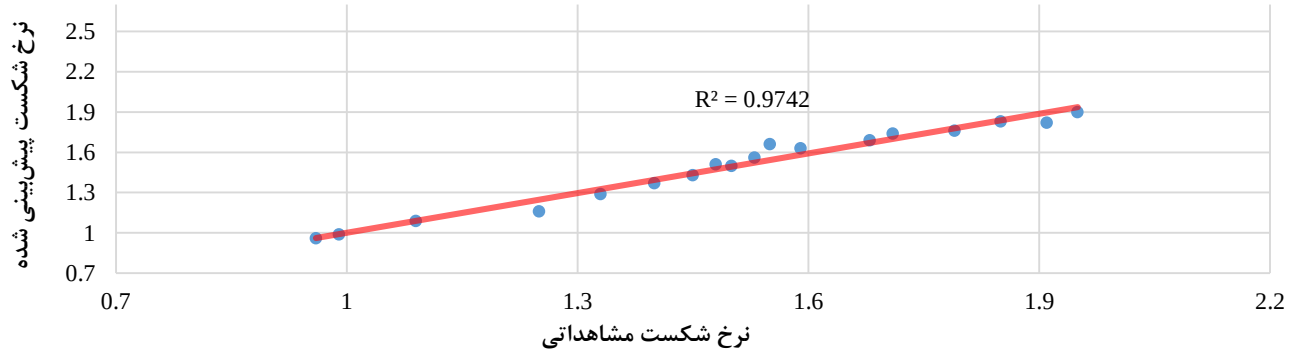
$$FRF_{GA} = \left(\sqrt[3]{\left(\frac{c_3+c_9}{2}\right) - (c_5 \times d_2)} + \left(\left(\frac{c_5}{c_3}\right) \times (\min(d_5 . c_3))\right)\right) + \left((\log d_2) \times \left(\frac{(d_1 \times c_6)}{d_5}\right) + \left(\log\left(\frac{d_4}{2}\right)\right)\right) + \left(\left(\frac{(\log(d_0) \times d_4))}{\left(\frac{d_6+d_3}{2}\right)}\right) \times \left(\frac{1}{d_7} - (d_1 \times c_2)\right)\right) \quad (۶)$$

که *min*: مقدار کمینه بین دو پارامتر و *log*: لگاریتم است. مقادیر پارامترهای ثابت در شکل ۷ و معادله (۶)، در جدول ۵ ذکرشده است.

در شکل ۸، تحلیل عملکرد و اعتبار مدل GEP و مقایسه آن بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برنامه‌ریزی بیان ژن، نشان داده‌شده است. مقدار R^2 برای پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری با جنس گالوانیزه، برابر ۰/۹۷۴۲ مشخص شد و با توجه به نزدیکی آن به عدد ۱، نشان‌دهنده همبستگی بسیار خوب بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی و نشان از دقت بالای مدل است. هم‌چنین مقدار RMSE نیز برابر ۰/۰۳۷۸ (میانگین مربع خطا برحسب تعداد شکست در سال در واحد طول (کیلومتر)) و مقدار NSE نیز برابر ۰/۹۲۰۵ است.

جدول ۵- مقادیر پارامترهای ثابت در شکل ۷ و معادله (۶) برای لوله اصلی آب‌رسانی شهری با جنس گالوانیزه

پارامتر	مقدار
C_2	-۷/۱۱۳۱
C_3	۴/۲۴۱۱
C_5	۰/۶۱۷۹
C_6	-۳/۵۶۷۰
C_9	-۸/۵۷۷۷



شکل ۸- مقایسه نتایج مشاهداتی و محاسباتی برنامه‌ریزی بیان ژن برای لوله با جنس گالوانیزه

۳-۴- لوله با جنس چدن

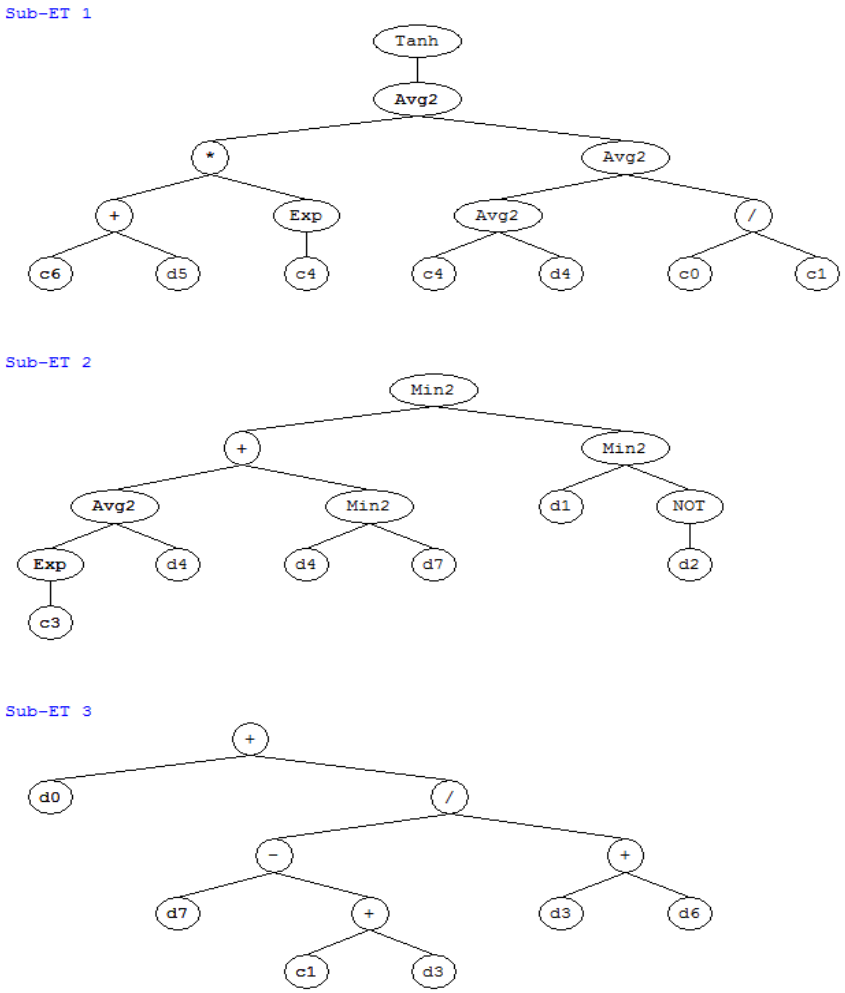
محاسبه نرخ شکست برای لوله اصلی آب‌رسانی شهری با جنس چدن (FRF_{CI}) در معادله (۷)، ارائه شده است.

$$FRF_{CI} = \left(\text{Tanh}\left(\left(\frac{(c_6+d_5)\times(\exp(c_4))}{2}\right) + \left(\frac{c_4+d_4}{2}\right) + \left(\frac{c_0}{c_1(\text{GeneI})}\right)\right) + \left(\min\left(\left(\frac{(\exp(c_3))+(d_4)}{2}\right) + (\min(d_4 . d_7))\right)\right) + \left(\min(d_1 . (1-d_2)) + \left((d_0) + \left(\frac{(d_7-(c_1(\text{GeneIII})+d_3))}{(d_3+d_6)}\right)\right)\right)\right) \quad (۷)$$

که *Tanh*: تابع تانژانت هیپربولیک، *exp*: تابع‌نمایی و *min*: مقدار کمینه بین دو پارامتر است. مقادیر پارامترهای ثابت در شکل ۹ و معادله (۷)، در جدول ۶ ذکرشده است.

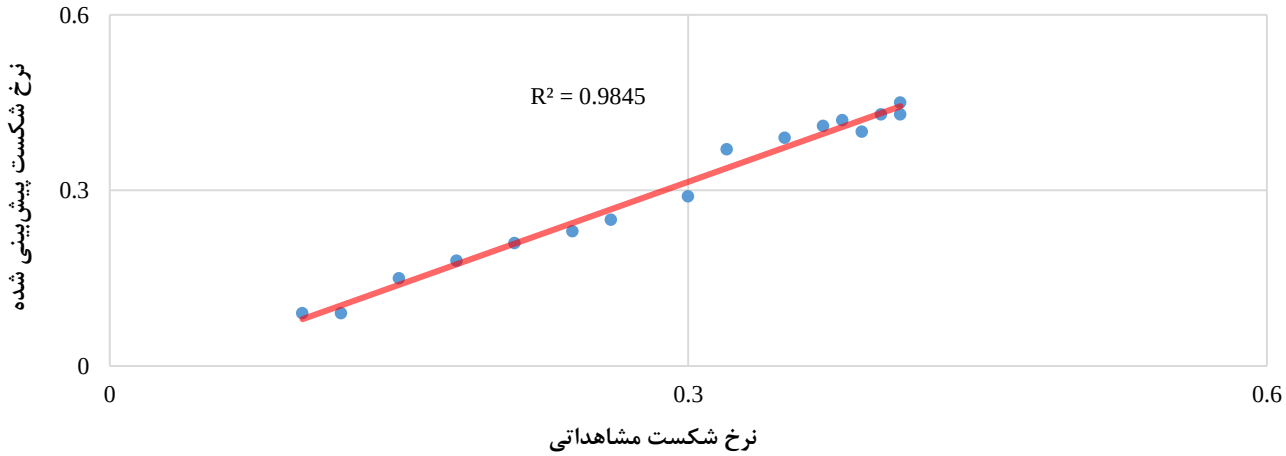
جدول ۶- مقادیر پارامترهای ثابت در شکل ۹ و معادله (۷) برای لوله اصلی آب‌رسانی شهری با جنس چدن

پارامتر	مقدار
C_0	-۱/۱۰۴۴
C_1 (Gene I)	-۰/۸۴۹۳
C_1 (Gene III)	-۸/۸۰۹۷
C_3	-۴/۲۷۶۵
C_4	-۶/۶۰۵۱
C_6	-۶/۶۲۶۴



شکل ۹- درخت بیان (ET) از مدل GEP برای لوله اصلی آب‌رسانی شهری با جنس چدن- منبع: یافته‌های تحقیق

در شکل ۱۰، تحلیل عملکرد و اعتبار مدل GEP و مقایسه آن بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برنامه‌ریزی بیان ژن، نشان داده‌شده است. مقدار R^2 برای پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری با جنس چدن، برابر ۰/۹۸۴۵ مشخص شد و با توجه به نزدیکی آن به عدد ۱، نشان‌دهنده همبستگی بسیار خوب بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی و نشان از دقت بالای مدل است. هم‌چنین مقدار RMSE نیز برابر ۰/۰۲۲۱ (میانگین مربع خطا برحسب تعداد شکست در سال در واحد طول (کیلومتر)) و مقدار NSE نیز برابر ۰/۹۳۰۱ است.



شکل ۱۰- مقایسه نتایج مشاهداتی و محاسباتی برنامه‌ریزی بیان ژن برای لوله با جنس چدن

۴- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت روشی است که در آن با استفاده از مدل‌سازی یک سیستم، روابط بین پارامترهای ورودی تعیین‌شده و سپس تأثیر هریک از این پارامترها بر نتیجه و خروجی مدل سنجیده می‌شود تا پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر نتیجه دارند به‌عنوان حساس‌ترین و مهم‌ترین متغیرهای ورودی شناسایی شوند. درواقع آنالیز حساسیت رابطه بین متغیرها و میزان تأثیر آن‌ها بر یکدیگر را مشخص نموده، پارامترهای مرتبط با متغیرهای خروجی را شناسایی و میزان تأثیر هریک از متغیرهای ورودی بر خروجی مدل را تعیین می‌کند و تأثیرگذارترین پارامترها را معرفی می‌کند. هدف از انجام آنالیز حساسیت را می‌توان بررسی میزان شباهت یک مدل با یک سیستم واقعی، یافتن پارامترهای ورودی مرتبط با متغیرهای خروجی، یافتن پارامترهایی کم‌اهمیت و حذف آن‌ها، یافتن رابطه بین متغیرها و میزان تأثیر آن‌ها بر یکدیگر و... دانست. در نمودار گردبادی[۷] نتایج تأثیر تغییر کلیه پارامترهای ورودی که برای آن‌ها دامنه تغییر تعریف‌شده بر روی خروجی مدل، هم‌زمان بر روی یک نمودار نشان داده می‌شود تا متغیرهایی که بیشتر تأثیر را روی خروجی دارند، به‌راحتی مشخص شوند. میزان تأثیر مقادیر خروجی مورد انتظار بر روی محور X و متغیرها بر روی محور Y نشان داده می‌شوند (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۰). در این پژوهش، آنالیز حساسیت، با استفاده از روش سوبول[۸] و بهره‌گیری از نرم‌افزار MATLAB R2021b انجام شد.

آنالیز حساسیت به روش سوبول از این‌جهت که حساسیت پارامترها را با درنظرگرفتن اثرات متقابل آن‌ها می‌سنجد، در انتخاب پارامترهای حساس بسیار موفق عمل می‌کند. درنظرگرفتن اثرات متقابل پارامترها در آنالیز حساسیت مدل‌های بزرگ و با تعداد پارامتر زیاد، ضروری است (رضائیان و همکاران، ۱۳۹۹). در این روش برای مدل تعریف‌شده با تابع $Y = f(X)$، که Y خروجی مدل و $X(x_1.x_2 \dots .x_n)$ بردار پارامترهای ورودی است، و واریانس خروجی مدل (V) به صورت مجموع واریانس‌های هرجمله تجزیه‌شده به‌صورت معادله (۸) است (قریشی و همکاران، ۱۳۹۷).

$$V(Y) = \sum_{i=1}^{n} V_i + \sum_{i \le j \le n}^{n} V_{ij} + \cdots + V_{1\dots.n} \qquad (۸)$$

که V_i: تاثیر مرتبه اول، V_{ij}: تاثیر مرتبه دوم برای هر تعداد فاکتور ورودی n: را نشان می‌دهد.

شاخص‌های حساسیت به‌صورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به‌دست می‌آیند ($S_i = \frac{V_i}{V}$ شاخص حساسیت مرتبه اول، $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}$ شاخص حساسیت مرتبه دوم و...). شاخص حساسیت کلی (S_{Ti}) یا همان تاثیرکلی هر پارامتر به‌صورت مجموع همه مرتبه‌های شاخص حساسیت برای آن پارامتر به‌صورت معادله (۹) به‌دست می‌آید (قریشی و همکاران، ۱۳۹۷).

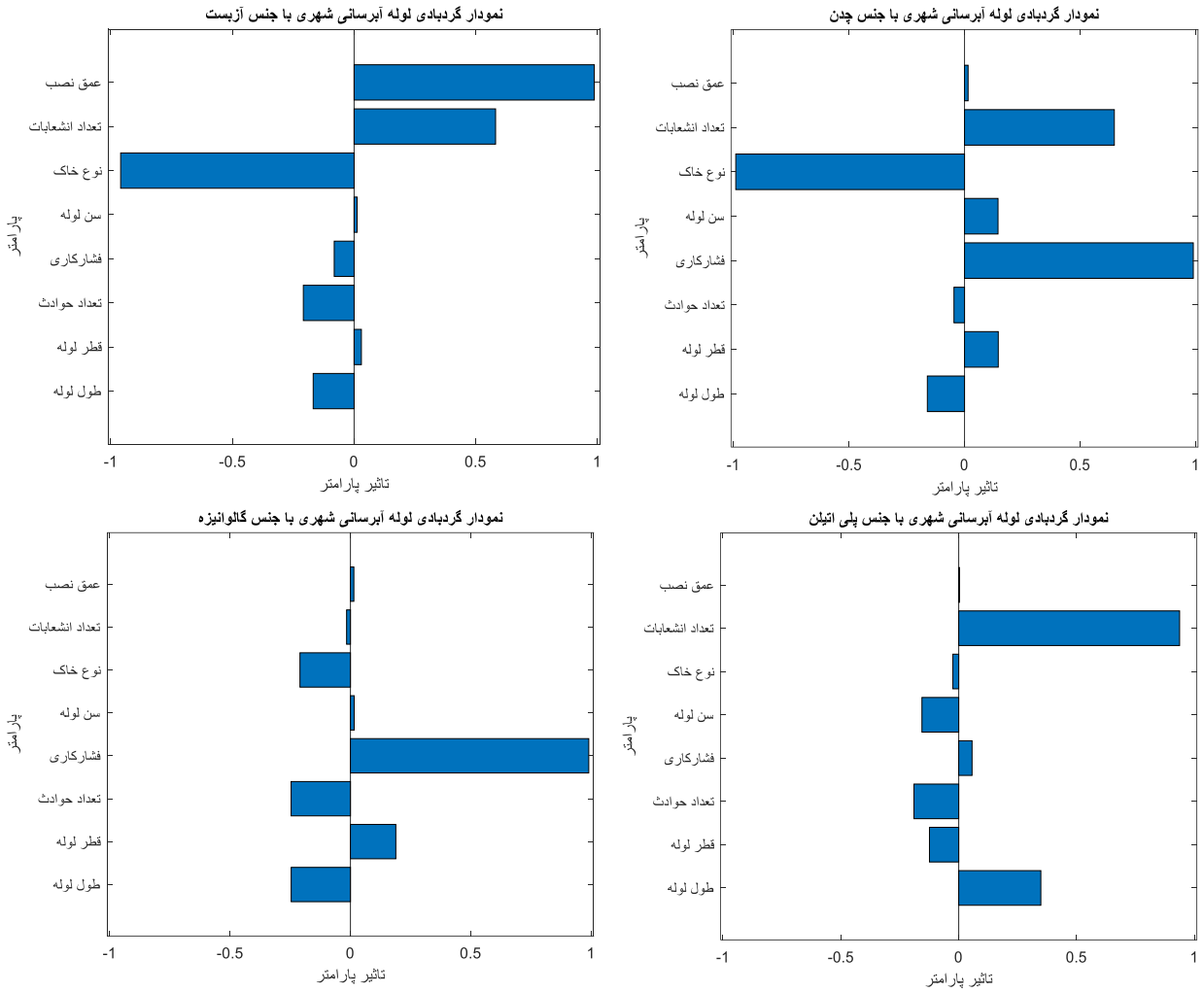
$$S_{Ti} = S_i + \sum_{i \neq j} S_{ij} + \cdots \qquad (۹)$$

نتایج آنالیز حساسیت لوله‌های آب‌رسانی شهری با جنس‌های مختلف، در شکل ۱۱ نشان‌داده‌شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، نرخ شکست لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، موردبررسی و ارزیابی قرارگرفته و مؤلفه‌های مهم در آن شناسایی‌شده است. نتایج حاصل از این پژوهش در ذیل بیان‌شده است:

- در پژوهش حاضر، مؤلفه‌های مؤثر بر نرخ شکست لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری معرفی‌شده است. با شناخت این مؤلفه‌ها و میزان اهمیت آن‌ها، امکان کنترل و کاهش حوادث در لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری وجود دارد که می‌توان گفت، با افزایش طول خط لوله، میزان حوادث نیز افزایش می‌یابد، ضمناً با افزایش فشار کاری لوله‌ها نیز امکان بروز حوادث افزایش خواهد یافت. بیشترین نرخ شکست باتوجه‌به جنس لوله، به ترتیب در پلی‌اتیلن، گالوانیزه، آزبست و چدن رخ می‌دهد. با افزایش قطر لوله‌ها، میزان نرخ شکست کاهش می‌یابد. بدیهی است با افزایش سن لوله‌ها، خطر شکست آن‌ها نیز افزایش خواهد یافت. افزایش تعداد انشعابات هم موجب افزایش شکست در لوله‌های اصلی آب‌رسانی شهری می‌شود. با افزایش عمق نصب، اگرچه هزینه و مدت‌زمان تعمیرات افزایش می‌یابد، ولی موجب کاهش خسارات به لوله‌ها خواهد شد. نوع خاک مدفون‌شده، نیز تأثیر مستقیمی بر ازبین‌رفتن تدریجی لوله خواهد داشت و محیط‌های قلیایی و اسیدی، مستعد بروز حوادث خواهند شد. این نتایج، با نتایج پژوهش‌های صورت‌گرفته محققان قبلی (تابش و عابدینی، ۱۳۷۹. تابش و عابدینی، ۱۳۸۴. تابش و همکاران، ۱۳۸۴. تابش و عارف‌خانی، ۱۳۸۸. تابش و عطایی‌کیا، ۱۳۸۸. سلطانی و محمدرضاپورطبری، ۱۳۹۱. معین‌الدینی و همکاران، ۱۳۹۵. Amiri Ardakani and Najafzadeh, 2021; Barton et al., 2020; Dawood et al., 2020; Farmani et al., 2017; Kerwin et al., 2019; Kerwin et al., 2020) دارای مطابقت است.



شکل ۱۱- نتایج آنالیز حساسیت

از طرفی در پژوهش‌های قبلی، عوامل شکست لوله‌های آب‌رسانی شهری به‌صورت کامل مورد بررسی قرار نگرفته و هر پژوهشگر، به‌صورت پراکنده و با عدم درنظرگرفتن همه عوامل مؤثر، اقدام به ارائه مدل نموده است. این در حالی است که در این پژوهش، کلیه عوامل مؤثر به‌صورت کامل مورد بررسی قرار گرفت و برای هر نوع لوله با جنس مختلف، یک مدل جداگانه ارائه شد. استفاده از نرم‌افزار GEP و مدل‌های ارائه شده در این پژوهش، ضمن افزایش سهولت استفاده و کاهش خطای محاسباتی، هیچ‌گونه محدودیتی در پارامترهای ورودی را نیز ندارند.

- روابطی برای پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های اصلی شبکه آب‌رسانی شهری با جنس‌های مختلف، ارائه شد. از مزایای این مدل‌ها، عدم محدودیت در پارامترهای ورودی و نیز توجه به کلیه مؤلفه‌های مؤثر است که در مطالعات پژوهشگران قبلی، کمتر موردبررسی قرارگرفته است.

با توجه به اهمیت موضوع شبکه آب‌رسانی شهری در هر کشور، برای کاهش و پیش‌بینی نرخ شکست این لوله‌ها، پیشنهاد می‌شود که بازسازی و اصلاح تدریجی لوله‌ها بر اساس اولویت، انجام گیرد تا مشکلات اقتصادی و اجتماعی کمتری به‌بار آید. باید به این نکته نیز توجه داشت که ارزیابی این موضوع، نیاز به مهارت بالایی دارد. بنابراین، توصیه می‌شود ازنظر کارشناسانی با علم لازم و شناخت کافی از سیستم موردمطالعه، استفاده شود. امید است که با انجام به‌موقع و مناسب مدل‌های ارائه‌شده در این پژوهش، نرخ شکست لوله‌های اصلی آب‌رسانی شهری، موردتوجه بیشتر قرارگرفته و به کمترین میزان برسد.

۶- پی‌نوشت‌ها

1- Gene Expression Programming
2 - Winnipeg
3- Karva
4- Inputs
5- Target
6- Generalization Capability
7- Tornado
8- Sobol

۷- قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان مقاله از شرکت محترم آب و فاضلاب استان تهران به‌خاطر همکاری در جمع‌آوری اطلاعات و آمار موردنیاز این مقاله، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۸- مراجع

امیدوار، ب.، اردستانی، م.، و نوروزی، پ.، (۱۳۹۹)، "ارزیابی ریسک نشت آلودگی به آب زیرزمینی بر اثر شکست لرزه‌ای خطوط لوله"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

بدیعی، ح.، امامی، ا.، غلامی، ر.، و یوسفی، م.، (۱۳۹۰)، "استنتاج پارامترهای تاثیرگذار در شاخص سودآوری پروژه‌های سرمایه‌گذاری ریسک‌پذیر صنعتی و معدنی با استفاده از تحلیل"، *مجله مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار*، ۸(۱)، ۱۶۹-۱۵۵.

تابش، م.، جعفری، ه.، و دلاور، م.، (۱۳۸۸)، "مدل مدیریت حوادث شبکه‌های توزیع آب با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۰(۲)، ۱-۱۵.

تابش، م.، و عابدینی، ا.، (۱۳۷۹)، "آنالیز شکست لوله‌ها در شبکه‌های آب‌رسانی شهری"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تابش، م.، و عابدینی، ا.، (۱۳۸۴)، "تحلیل شکست لوله‌ها در شبکه‌های آب‌رسانی شهری"، *نشریه منابع آب ایران*، (۱)۱، ۸۹-۷۸.

تابش، م.، و عارف‌خانی، و.، (۱۳۸۸)، "تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار شبکه‌های آب‌رسانی با روش گرادیان"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تابش، م.، و عطایی‌کیا، ب.، (۱۳۸۸)، "طراحی بهینه شبکه‌های آب قابل اطمینان با روش دسته مورچگان"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تابش، م.، کارآموز، م.، نظیف، س.، و مریدی، ع.، (۱۳۸۴)، "پیش‌بینی فشار در شبکه‌های آب‌رسانی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و استنتاج فازی"، *مجله آب و فاضلاب*، ۱۶(۱)، ۳-۱۱.

جعفری، م.، ظهیری، ع.، بزرگ‌حداد، ا.، و محمدرضاپورطبری، م.، (۱۳۹۹)، "رویکرد جدید پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌های شبکه توزیع آب با استفاده از مدل هیبرید هوشمند (مطالعه موردی: شبکه توزیع آب شهر گرگان)"، *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۷(۵)، ۱۴۹-۱۶۶.

جلیلی قاضی‌زاده، م.، حنیفی یزدی، س.، و راستی اردکانی، ر.، (۱۳۸۷)، "ارائه روابط پیش‌بینی وقوع حوادث در شبکه‌های توزیع آب شهری"، *دومین همایش ملی آب و فاضلاب (بارویکرد بهره‌برداری)*، تهران، ایران.

رضائیان، ج.، جهانبخشی، س.، و جمشیدی، س.، (۱۳۹۹)، "آنالیز حساسیت پارامترهای تولیدی یکی از میادین نفتی ایران با استفاده از روش جامع سوبول"، *نشریه پژوهش نفت*، ۳۰(۴-۹۹)، ۳۷-۴۶.

ساقی، ح.، (۱۳۹۶)، "ارائه روشی نوین جهت تخمین میزان نشت در شبکه‌های آب‌رسانی با استفاده از تحلیل فشار گرهی"، *نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۱(۱)، ۱۲۷-۱۴۳.

سرکمریان، س.، حقیقی، ع.، و ادیب، ا.، (۱۳۹۸)، "واسنجی چند شاخصه شبکه خطوط لوله آبرسانی تحت جریان غیرماندگار"، *مجله مهندسی منابع آب*، ۱۲(۴۰)، ۲۷-۳۷.

سلطانی، ج.، و محمدرضاپورطبری، م.، (۱۳۹۱)، "تعیین عوامل مؤثر بر نرخ شکست لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تلفیق شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۳(۳)، ۲-۱۵.

شرکت آب و فاضلاب استان تهران، (۱۴۰۰)، "مشخصات فنی خطوط لوله آب‌رسانی منطقه یک شهر تهران"، *واحد انفورماتیک شرکت آب و فاضلاب استان تهران*، تهران، ایران.

غیبی، م.، و شایق، س.، (۱۳۹۶)، "تحلیل حوادث شبکه توزیع و انشعابات آب شرکت آب و فاضلاب منطقه چهار شهر تهران و راه‌های کاهش آن"، *اولین همایش ملی مدیریت مصرف و هدررفت آب*، تهران، ایران.

فرخی‌زاده، س.، باقری، م.، و ملکی طولابی، ح.، (۱۴۰۰)، "بررسی و ارزیابی شبکه آب‌رسانی شهری از منظر پدافند غیرعامل با استفاده از روش DEMATEL فازی"، *دانش پیشگیری و مدیریت بحران*، ۱۱(۱)، ۶۷-۸۰.

قریشی، م.، ذوالفقاری، م.، و طهماسبی، و.، (۱۳۹۷)، "استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل، مدل‌سازی و بهینه‌سازی آماری پارامترهای مؤثر در رفتار نیرو در فرآیند سوراخ‌کاری استخوان"، *مجله مهندسی مکانیک*، ۴۸(۲)، ۲۲۹-۲۳۷.

گاوشانی، م.، فاضلی، م.، جلیلی قاضی‌زاده، م.، و پزیرا بروجنی، م.،

(۱۳۸۹)، "تأثیر قطر لوله بر میزان حوادث لوله‌های شبکه آب شهری"، *اولین همایش ملی یافته‌های نوین در مهندسی عمران*، نجف‌آباد، ایران.

معین‌الدینی، ا.، محمدرضاپور، ا.، و زینلی، م.، (۱۳۹۵)، "بهینه‌سازی قطر لوله‌های شبکه آب‌رسانی شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک سریع آشفته و کرم شب‌تاب در مدل Relopt (مطالعه موردی: شهرک شهرداری کرمان)"، *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۳(۴)، ۴۵-۶۴.

Amiri Ardakani, Y., and Najafzadeh, M., (2021), "Pipe break rate assessment while considering physical and operational factors: A methodology based on global positioning system and data driven techniques", *Water Resources Management*, 35(1), 1-28.

Azim, I., Yang, J., Javed, M.F., Iqbal, M.F., Mahmood, Z., Wang, F., and Liu, Q.F., (2020), "Prediction model for compressive arch action capacity of RC frame structures under column removal scenario using gene expression programming", *Structures*, 25(1), 212-228.

Barton, N., Farewell, T., and Hallet, S., (2020), "Using generalized additive models to investigate the environmental effects on pipe failure in clean water networks", *Clean Water*, 31(3), 1-12.

Berardi, L., Kapelan, Z., Giustolisi, O., and Savic, D.A., (2008), "Development of pipe deterioration models for water distribution systems using EPR", *Journal of Hydroinformatics*, 10(2), 113-126.

Berardi, L., and Giustolisi, O., (2021), "Calibration of design models for leakage managementof water distribution networks", *Water Resources Management*, 35(2), 2537-2551.

Boxall, J,B., Saul, A,J., and Skipworth, P.J., (2004), "Modelling the impact of reduced hydrauliccapacity of pipes in distribution systems", *Journal of the American Water Works Association*, 96(4), 161-169.

Creaco, E., and Walski, T., (2017), "Economic analysis of pressure control for leakage and pipe burst reduction", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(12), 1-10.

Dawood, T., Elwakil, E., Novoa, H.M., and Gárate Delgado, J.F., (2020), "Pressure data-driven model for failure prediction of PVC pipelines", *Engineering Failure Analysis*, 116(8), 1-11

Farmani, R., Kakoudakis, K., Behzadian, K., and Butler, D., (2017), "Pipe failure prediction in water distribution systems considering static and dynamic factors", *Procedia Engineering*, 186(1), 117-126.

Ferreira, C., (2001), "Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems", *Springer: Amsterdam*, the Netherlands, 13(2), 87-129.

Ferreira C., (2006), *Gene expression programming: Mathematical modeling by an Artificial Intelligence*, Springer: Amsterdam, the Netherlands.

Gepsoft., (2020), "Gene Expression Programming (GEP)", Viewed 1 Dec 2020, http://www.gepsoft.com/

Gonzalez, M., and Rodríguez, J., (2020), "Comparison of statistical and machine learning models for pipe failure modeling in water distribution networks", *Water*, 12(4), 1-22.

Hajihassani, M., Abdullah, S., Asteris, P.G., and Armaghani, D.J., (2019), "A Gene expression programming model for predicting tunnel convergence", *Applied Sciences*, 9(1), 1-22.

Jafari, M., Zahiri, A., Bozorg Hadad, O., and Mohammad Rezapour Tabari, M., (2021), "A hybrid of six soft models based on ANFIS for pipe failure rate forecasting and uncertainty analysis: a case study of Gorgan city water distribution network", *Soft Computing*, 25(11), 7459-7478.

Kerwin, S., Garcia de Soto, B., Adey, B., Sampatakaki, K., and Heller, H., (2020), "Combining recorded failures and expert opinion in the development of ANN pipe failure prediction models", *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 27(2), 1-23.

Kerwin, S., Garcia de Soto, B., and Adey, B., (2019), *Performance comparison for pipe failure prediction using artificial neural networks*, CRC Press/Balkema: Belgium.

Mansouri, I., JW. Hu., and Kisi, O., (2016), "Novel predictive model of the debonding strength for masonry members retrofitted with FRP", *Applied Sciences*, 6(11), 1-13,

Motiee, H., and Ghasemnejad, S., (2019), "Prediction of pipe failure rate in Tehran water distribution networks by applying regression models", *Water Supply*, 19(3), 695-702.

Winkler, D., Haltmeier, M., Kleidorfer, M., Rauch, W., and Tscheikner-Gratl, F., (2018), "Pipe failure modelling for water distribution networks using boosted decision trees", *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(10), 1-10.

Weeraddana, D., MallawaArachchi, S., Warnakula, T., Li, Z., and Wang, Y., (2020), "Long-term pipeline failure prediction using nonparametric survival analysis", *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases: Applied Data Science Track*, 1(4), 139-156.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.