نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب

Journal of Water and Wastewater
Science and Engineering (JWWSE)
DOI: 10.22112/JWWSE.2023.389324.1356

محاسبه احتمال شکست کیفیت شبکه‌های توزیع آب به منظور برآورد ریسک با استفاده از شبکه‌های بیزین

سارا مشهدی تفرشی[۱]، مسعود تابش[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی محیط‌زیست، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران،
tafreshi.sara@ut.ac.ir

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، mtabesh@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹

چکیده

شبکه‌های توزیع آب یکی از زیرساخت‌های حیاتی هر کشور است که از جمله وظایف اصلی آن رساندن آب با کیفیت مناسب به‌دست مصرف‌کننده است. این شبکه‌ها همواره در معرض انواع مختلفی از تهدیدها هستند، و از آن‌جا که در انتهای زنجیره تامین آب قرار دارند و در ارتباط مستقیم با مصرف‌کننده هستند، وقوع شکست کیفیت در آن می‌تواند منجر به خسارات بهداشتی، جانی و اجتماعی جبران‌ناپذیری شود. عملکرد قابل‌قبول شبکه‌های آبرسانی از نظر کیفیت، وابسته به برنامه‌های بهره‌برداری و نگهداری است که از محاسبه و مدیریت ریسک می‌توان به‌عنوان یکی از این برنامه‌ها اشاره کرد. یکی از اجزای اصلی ریسک در اثر وقوع شکست کیفیت، احتمال شکست است. در این تحقیق به‌منظور محاسبه احتمال شکست کیفیت شبکه‌های آب در ابتدا عوامل اثرگذار بر رخداد شکست کیفیت شناسایی شده و به‌کمک شبکه‌های بیزین احتمال شکست کیفیت هر لوله محاسبه می‌شود. این‌کار در چهار گام اساسی آماده‌سازی داده‌های ورودی، آموزش شبکه بیزین، صحت‌سنجی آن و دریافت نتایج خروجی انجام می‌شود. این مدل بر روی بخشی از شبکه توزیع آب شهر تهران تحلیل شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که ۳۱ درصد از لوله‌ها دارای احتمال شکست خیلی کم و ۶۹ درصد دارای احتمال شکست کم بوده‌اند. علاوه‌بر این با انجام تحلیل حساسیت، چهار عامل جنس لوله، فشار آب، سن آب و سرعت آب به‌عنوان اثرگذارترین عوامل بر وقوع شکست کیفیت در این منطقه شناسایی شده‌اند؛ که با کنترل آن‌ها توسط مدیران و تصمیم‌گیرندگان شرکت‌های آب و فاضلاب در قالب برنامه‌های مدیریت ریسک، می‌توان میزان احتمال وقوع شکست کیفیت را به مقدار قابل‌توجهی کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: شکست کیفیت، شبکه بیزین، احتمال شکست کیفیت، شبکه توزیع آب، عوامل اثرگذار

Evaluating the Failure Probability of the Water Distribution Networks Quality in Order to Estimate Risk Using Bayesian Networks

Sara Mashhadi Tafreshi[1], Masood Tabesh [2]

1- M.Sc. Student, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, tafreshi.sara@ut.ac.ir

2- Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, mtabesh@ut.ac.ir

Received: 12/03/2023
Revised: 17/06/2023
Accepted: 20/08/2023

Abstract

Water distribution networks are one of the vital infrastructures of any country, which one of its main tasks is to deliver good quality water to consumers. These networks are always exposed to various types of threats, and since they are at the end of the water supply chain and are in direct contact with the consumer, the occurrence of quality failure in it can lead to irreparable health, life and social damages. The acceptable performance of water supply networks in terms of quality is dependent on operation and maintenance programs, and risk analysis and management can be mentioned as one of these programs. One of the main components of risk due to the occurrence of quality failure is the probability of failure. In this research, in order to calculate the probability of failure of the quality of water networks, at first, the factors affecting the occurrence of quality failure are identified and with the help of Bayesian networks, the probability of failure of the quality of each pipe is calculated. This work is done in four basic steps: preparing input data, training the Bayesian network, validating it and receiving the output results. In addition, by carrying out sensitivity analysis, four factors consist of pipe type, water pressure, water age and water velocity have been identified as the most effective factors on the occurrence of water quality failure in this area; which controlling them by managers and decision makers of water and sewage companies in the form of risk management programs, the probability of quality failure can be significantly reduced.

Keywords: Quality failure, Bayesian network, Probability of quality failure, Water distribution network, Influencing factors

۱- مقدمه

طبق گزارش وزارت نیرو در سال ۱۳۹۹، در حدود ۹۹/۸۲ درصد شهرها و ۸۲/۹۵ درصد روستاها آب آشامیدنی خود را از طریق شبکه آبرسانی دریافت می‌کنند (وزارت نیرو، ۱۴۰۰). سه هدف اصلی این شبکه‌ها رساندن آب کافی، با فشار مناسب و کیفیت مطلوب به‌دست مصرف‌کننده است (تابش، ۱۳۹۵). زنجیره تامین آب آشامیدنی شامل منابع آب خام، شبکه انتقال، تصفیه‌خانه‌ها و شبکه توزیع آب است. هرکدام از این بخش‌ها در معرض تهدیدات گوناگون هستند، اما به خطر افتادن کیفیت آب در شبکه توزیع به‌دلیل قرارگرفتن در انتهای این زنجیره و نبود هیچ فرآیند تصفیه موثر (به‌جز

گندزدایی ثانویه) تا رسیدن به‌دست مصرف‌کننده، می‌تواند عواقب جبران‌ناپذیری به‌همراه داشته باشد (Islam et al., 2015; Sadiq et al., 2004). به‌دلیل افزایش جمعیت، فعالیت‌های صنعتی و یا کشاورزی و به تبع آن آلودگی بیشتر منابع آب و هم‌چنین فرسودگی زیرساخت‌های آبی و ضعف در برنامه‌های بهره‌برداری و نگهداری، بسیاری از شهرها حتی در کشورهای توسعه یافته موارد متعددی از شیوع بیماری ناشی از آب را تجربه کرده‌اند و برخلاف باور عموم صرفا وجود پیشرفته‌ترین سیستم‌های تصفیه نمی‌تواند تضمینی برای سلامت کیفی آب آشامیدنی باشد (Lee et al., 2009; Islam et al., 2013).

Sadiq et al. (2004) یک چهارچوب کلی برای ارزیابی جامع ریسک، مرتبط با شکست کیفیت در شبکه‌های توزیع آب ارائه کردند. آن‌ها راه‌هایی که ممکن است کیفیت آب شبکه در معرض خطر قرارگیرد را به پنج طبقه دسته‌بندی کردند که عبارتند از: ورود آلودگی به شبکه، نقص در تصفیه آب، رشد میکروارگانیزم‌ها در لوله‌ها و منبع ذخیره آب، ورود مواد شیمیایی به داخل لوله‌ها به‌دلیل خوردگی لوله‌ها و یا مخزن ذخیره و نفوذ مواد از لوله‌ها به داخل شبکه. سپس این پنج نوع ریسک آلودگی درنظر گرفته شده را تا رسیدن به ریسک‌های پایه گسترش دادند. چهارچوب ارائه شده یک مدل سلسله مراتبی است که با محاسبه ریسک‌های پایه به ارزیابی ریسک تجمعی می‌پردازد. در نهایت از این چهارچوب ساده برای محاسبه ریسک تجمعی یک مدل فرضی استفاده شد.

Sadiq et al. (2007) در مطالعه جدید خود که بر پایه مطالعه قبلی آن‌ها در سال ۲۰۰۴ بود؛ به چهار جنبه مهم در تحلیل ریسک پرداختند که عبارت بودند از: فازی کردن ریسک، تجمیع ریسک، به‌هنگام کردن ریسک و غیرفازی کردن ریسک. چهارچوب کلی روش کاملا مشابه مطالعه قبلی است، با این تفاوت که به هنگام ورود داده‌های جدید از تئوری گواه برای برآورد مجدد ریسک در هر سطح از ساختار سلسله مراتبی، استفاده کردند. هم‌چنین برای غیرفازی کردن ریسک تجمعی، با کمک روش میانگین وزنی مرتب شده نمایی، دیدگاه تصمیم‌گیرندگان (میزان خطرپذیری آن‌ها) را در محاسبه عدد نهایی ریسک دخیل کردند.

Sadiq et al. (2008) با کمک درخت خطای فازی که گسترش یافته ساختار سلسله مراتبی مطالعات قبلی خود در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۷ بوده است، به ارزیابی ریسک شکست کیفیت در شبکه‌های توزیع آب پرداختند. آن‌ها به عدم قطعیت‌های ناشی از دو ایراد مقادیر دقیق احتمالی و مستقل درنظر گرفتن عوامل ریسک، پاسخ دادند. روش پیشنهاد شده برای محاسبه ریسک دو شبکه توزیع آب واقعی در کانادا که پیشتر دچار شکست کیفیت شده بودند استفاده شد. در هر دو مطالعه موردی، سه سناریو شکست با مقادیر احتمالاتی ثابت، اما شدت وابستگی متفاوت درنظر گرفته شد، چرا که هدف از این مطالعه به‌طور خاص بررسی تاثیر میزان همبستگی میان عوامل بر نتایج تحلیل ریسک بود.

Cordoba et al. (2014) با استفاده از داده‌های آماری شامل کلر اولیه، pH، دبی جریان، کدورت و کلر باقی‌مانده برای سه گره از شبکه توزیع آب، توانستند مدلی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی در ترکیب با روش مونت کارلو توسعه دهند که بتواند غلظت کلر در این سه گره را پیش‌بینی کند. از مزایای این مدل می‌توان به کاربرد ساده و دقت بالای آن در پیش‌بینی میزان کلر اشاره کرد. علاوه‌بر این، با کمک مدل محاسباتی EPANET می‌توان زوال کلر برای سایر نقاط شبکه توزیع آب را نیز تخمین زد و به این ترتیب، نواحی آسیب‌پذیر شبکه از نظر سطوح بالا و یا پایین کلر مشخص می‌شود.

Chalchisa et al. (2017) کیفیت آب آشامیدنی در مخازن ذخیره آب در نواحی شهری اتیوپی را ارزیابی کردند. نمونه‌های جمع‌آوری شده قبل از ورود به مخزن و در مخزن از نظر میزان pH، دما و کدورت در محدوده حداکثر مجاز تعریف شده سازمان بهداشت جهانی بود، اما تمامی نمونه‌ها از نظر وجود کلیفرم کل و کلیفرم مدفوعی مثبت بودند که بیانگر وجود آلودگی میکروبی در تمامی نقاط نمونه‌برداری است. هم‌چنین سطح آلودگی میکروبی از قبل از ورود به مخزن ذخیره تا پس از خروج از مخزن افزایش یافته است که نشان‌دهنده وجود نشتی در سیستم توزیع و آلودگی در مخازن ذخیره است. این مطالعه نشان می‌دهدکه اتصال متقابل[1] در سیستم توزیع و مخازن ذخیره غیراستاندارد از جمله عوامل بروز بیماری‌های منتقله از آب هستند.

Şener et al. (2017) کیفیت آب رودخانه آکسو در کشور ترکیه را مطالعه میزان مناسب بودن آن برای آشامیدن را بررسی کردند. در این مطالعه ۲۱ ایستگاه نمونه‌برداری مشخص شد و برای یک بازه هشت ماهه، ۲۴ پارامتر کیفیت آب اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل شد. نتایج این تحلیل با مقادیر مجاز توصیه شده توسط سازمان بهداشت جهانی و استانداردهای آب آشامیدنی ترکیه مقایسه و در نهایت کیفیت آب رودخانه با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI)[۲] ارزیابی و نقشه‌ای از آن در قالب GIS[۳] ارائه شد. آن‌ها هم‌چنین دریافتند که دو پارامتر COD[۴] و Mg از جمله موثرترین پارامترها برای تعیین شاخص کیفیت آب هستند.

فقیهی (۱۳۹۵) رتبه‌بندی پارامترهای موثر بر آب بدون درآمد را با استفاده از شبکه‌های بیزین انجام داد. در این مطالعه ابتدا به‌کمک مراجع مختلف و تجربه کارشناسان این حوزه پارامترهای اثرگذار شناسایی شدند و سپس میزان شدت رخداد هر پارامتر در قالب پرسشنامه و به تفکیک تلفات ظاهری و تلفات واقعی مورد پرسش قرارگرفت. نتایج مدل‌سازی در این تحقیق بیانگر تاثیر بیشتر "انشعابات غیرمجاز" و "نشت مرئی" به‌ترتیب در بخش تلفات ظاهری و تلفات واقعی بود.

پورسعید اصفهانی (۱۳۹۷) در مطالعه خود ریسک شکست کیفیت آب ناشی از آلودگی‌های تصادفی در شبکه نمونه فرضی Anytown را بررسی کرد. در این تحقیق ابتدا معیارها (مانند تشکیل بیوفیلم، عدم دستیابی به تصفیه موردنظر، انتشار مواد خورنده در شبکه و غیره) و زیرمعیارهایی (pH، دما، اکسیژن محلول و غیره) که منجر به بروز شکست کیفیت در شبکه می‌شود، انتخاب و در مرحله بعد احتمال هرکدام از زیرمعیارها به‌کمک شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه (توسط EPANET) محاسبه شد. برای داده‌هایی که نمی‌توان از شبیه‌سازی به‌دست آورد از مقادیر فرضی استفاده شد.

Li et al. (2020) مدلی از شبکه بیزین با استفاده از پارامترهای مختلف کیفیت آب برای پیش‌بینی تشکیل تری‌هالومتان‌ها در شبکه توزیع آب استرالیا ارایه کردند. این مدل بر مبنای داده‌های جمع‌آوری شده از ۱۵ شبکه توزیع آب و با استفاده از پارامترهای کیفیت آب هم‌چون غلظت تری‌هالومتان‌های کل و منفرد، گونه‌های مربوط به گندزدا (کلر آزاد، مونوکلرامین، دی‌کلروامین و کلر کل)، گونه‌های نیتروژن (آمونیاک آزاد، آمونیاک کل، نیترات و نیتریت)، پارامترهای شیمیایی (دما، pH، کربن آلی محلول، کل جامدات محلول، هدایت و کدورت) و غیره توسعه داده شد. این مدل تا ۹۴٪ دقت پیش‌بینی را دارد و هم‌چنین نشان می‌دهد که با این‌که کلر باقی‌مانده از جمله پارامترهای کلیدی در تشکیل تری‌هالومتان‌ها است، اما طیف وسیع‌تری از متغیرهای کیفیت آب در احتمال تشکیل تری‌هالومتان‌ها موثر هستند.

Odhiambo et al. (2023) با استفاده از مدل‌سازی هیدرولیکی و ارزیابی کمی ریسک میکروبی (QMRA)[۵]، خطرات سلامتی ناشی از نفوذ آلودگی به یک شبکه توزیع آب در سوئد را بررسی کردند. سه سناریوی خطر به شرح زیر در این مطالعه ارزیابی شد: ۱- شکست لوله بدون نفوذ آلودگی از محل شکستگی؛ ۲- شکست لوله و نفوذ آلودگی از محل شکست و ۳- کمبود فشار آب با وجود شکستگی. نتایج این مدل‌سازی بیانگر خطر بالای آلودگی شبکه توسط پاتوژن در سناریو سوم بود که این نتایج با بار تخمینی سالانه بیماری‌های حاد گوارشی در سوئد مطابقت دارد. نتیجه این مطالعه می‌تواند بخش‌های آسیب‌پذیر و نیازمند سرمایه‌گذاری شبکه توزیع آب را شناسایی کند.

سیستم‌های تصفیه آب هرچه هم پیشرفته باشد باز هم نمی‌تواند تضمینی برای رسیدن آب با کیفیت لازم به‌دست مصرف‌کننده باشد. Tchórzewska-Cieślak et al. (2019) احتمال وقوع این آلودگی ثانویه در شبکه را به‌کمک درخت خطا توصیف و محاسبه کردند؛ که از آن می‌توان در ارزیابی ریسک و یا تعیین حدود قابل‌قبول استفاده کرد. این شرایط به‌طور خلاصه می‌تواند به‌علت ایجاد رسوب یا بیوفیلم و انتشار آن‌ها در اثر وقوع تغییرات شدید هیدرولیکی و یا تغییر در خواص خورندگی آب و پخش این آلودگی در لوله‌ها رخ دهد، که احتمال وقوع هرکدام از آن‌ها با توجه به شاخص‌هایی قابل تخمین است.

با توجه به اهمیت بالای شبکه‌های توزیع آب ازنظر رساندن آب با کیفیت لازم به‌دست مصرف‌کننده و ارتباط مستقیم آن به سلامت افراد، ارائه یک روش مناسب برای مشخص کردن ریسک شکست کیفیت شبکه از اهمیت بالایی برخوردار

است. امروزه لازم است تا با انجام مطالعات پیش‌بینانه، نقاط ضعف شبکه از نظر بروز شکست کیفیت از پیش شناسایی شده و با برطرف کردن آن موارد، تا حد امکان از بروز حوادث آلودگی شبکه جلوگیری شود. با توجه به مطالب عنوان شده در بالا، ضرورت تحلیل ریسک شبکه‌های توزیع آب از نظر شکست کیفیت دوچندان می‌شود. باتوجه به آن که استفاده از ابزارهای پایش کیفیت شبکه‌های آبرسانی هزینه زیادی به‌همراه دارد، توانایی پیش‌بینی شکست شبکه به کمک داده‌های وابسته به شکست که دردسترس است، اهمیت پیدا می‌کند. لازم‌به ذکر است که آسیب‌پذیری در شبکه‌های آبرسانی به‌دلیل پراکندگی، اجزای گوناگون و ساختار پیچیده را نمی‌توان به صفر رساند، اما با مطالعه دقیق می‌توان احتمال وقوع شکست را پیش‌بینی و فرکانس آن را کاهش داد.

در این مطالعه ابتدا عوامل اثرگذار بر اجزای مختلف شکست کیفیت شبکه با کمک مراجع، استانداردها و نظرات کارشناسان شناسایی و دسته‌بندی منطقی برای مقادیر آن تعریف شده است. سپس با استفاده از شبکه‌های بیزین و آموزش آن توسط داده‌های دردسترس، بخشی از شبکه توزیع آب شهر تهران احتمال شکست کیفیت هر لوله در شبکه مذکور به‌دست آمده است. هم‌چنین تحلیل حساسیت عوامل اثرگذار بر روی پارامتر احتمال شکست کیفیت شبکه انجام شده تا عوامل با اثرگذاری بیشتر اولویت‌بندی شود.

۲- مواد و روش‌ها

هدف از انجام این تحقیق محاسبه احتمال شکست کیفیت شبکه‌های آب با استفاده از شبکه‌های بیزین در راستای ارزیابی ریسک آن است. به این منظور لازم است تا عوامل اثرگذار بر شکست کیفیت شبکه‌های آب شناسایی شده و دسته‌بندی برای مقادیر آن تعریف شود. تعاریف متعددی برای برآورد ریسک وجود دارد که از کامل‌ترین آن‌ها می‌توان به رابطه (۱) اشاره کرد (Torres et al., 2009):

ریسک = احتمال وقوع بحران × شدت اثرات وقوع بحران × آسیب‌پذیری سیستم در برابر بحران (۱)

در تعاریف ساده‌تر، معادله ریسک تنها به‌صورت یک عاملی تعریف شده و آن عامل احتمال وقوع بحران است. در حقیقت بخش اصلی در تعریف ریسک، احتمال وقوع بحران است و حتی در بسیاری از مطالعات، ریسک را تنها به‌همین بخش مرتبط کرده‌اند. هدف اصلی این مطالعه نیز برآورد همین بخش از تعریف ریسک یعنی احتمال وقوع بحران (احتمال وقوع شکست کیفیت آب) است.

Sadiq et al. (2008) شکست کیفیت آب را در هفت دسته زیر تعریف کردند: ۱- ورود آلودگی با شبکه از طریق اجزای مختلف سیستم که یکپارچگی لازم را ندارند؛ ۲- به‌خطر افتادن کیفیت آب به‌دلیل عدم دستیابی با تصفیه لازم در تصفیه‌خانه؛ ۳- زوال مواد تشکیل‌دهنده اجزای شبکه توزیع از طریق خوردگی و یا نشت مواد؛ ۴- تشکیل فراورده‌های جانبی گندزداها و یا از بین رفتن ماده گندزدا؛ ۵- تشکیل بیوفیلم و رشد میکروارگانیزم‌ها در شبکه توزیع آب؛ ۶- نفوذ ترکیبات آلی در خاک به داخل شبکه از طریق اجزای پلاستیکی و ۷- آلودگی عمدی شبکه توزیع آب.

۲-۱- شناسایی عوامل اثرگذار بر هر یک از اجزای شکست کیفیت آب

به‌منظور تخمین احتمال شکست کیفیت آب با کمک شبکه‌های بیزین، لازم است تا عوامل موثر بر هر جزء شناسایی شوند. به این منظور با مرور استانداردها و مطالعات مرتبط و استفاده از تجارب کارشناسان آب و فاضلاب در این زمینه بخش عمده‌ای از این عوامل موثر شناسایی شد که در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- عوامل موثر بر هریک از اجزای شکست کیفیت آب

اجزای مرتبط با شکست کیفیت آب	عوامل موثر بر احتمال شکست هر جزء
ورود آلودگی به شبکه	طول لوله، قطر لوله، نوع راه، سن لوله، جنس لوله، فشار آب، نزدیکی به محل‌های مستعد آلودگی (فضاهای سبز و پمپ‌بنزین‌ها)، شدت آلایندگی فاضلابروهای عبوری در محدوده هر لوله آب (طول فاضلابرو و قطر فاضلابرو)
تشکیل بیوفیلم	سن لوله، جنس لوله، کلر باقی‌مانده، سرعت آب، سن آب
آلودگی ناشی از ماده گندزدا	سن آب
زوال مواد	سن لوله، جنس لوله، کلر باقی‌مانده، سرعت آب، سن آب
آلودگی عمدی	نزدیکی به منابع ذخیره آب (مخزن‌های ذخیره و خروجی تصفیه‌خانه)

۲-۲- شبکه‌های بیزین

روابط احتمالی میان عوامل اثرگذار بر شکست کیفیت شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شبکه‌های بیزین قابل مدل‌سازی هستند. این شبکه‌ها از خانواده مدل‌های گرافیکی احتمالی هستند. این ساختار گرافیکی برای نشان‌دادن اطلاعات دارای عدم قطعیت استفاده می‌شود. به‌طوری‌که هر گره در این شبکه نشان‌دهنده یک متغیر تصادفی است و کمان بین گره‌ها (متغیرها) نشان‌دهنده وابستگی‌های احتمالی میان متغیرهای تصادفی است (Pearl, 1988). این شبکه‌ها براساس تئوری بیز گسترش پیدا کرده‌اند. این تئوری به این‌صورت بیان شده است که برای n رویداد $E_1, E_2, \ldots E_n$ که $P(Ei)\neq 0$ باشد، برای $1\leq i\leq n$ از رابطه (۲) استفاده می‌شود (Neapolitan, 2004):

$$P(E_i|F) = \frac{P(F|E_i)P(E_i)}{P(F|E_1)P(E_1) + P(F|E_2)P(E_2) + \cdots P(F|E_n)P(E_n)} \qquad (۲)$$

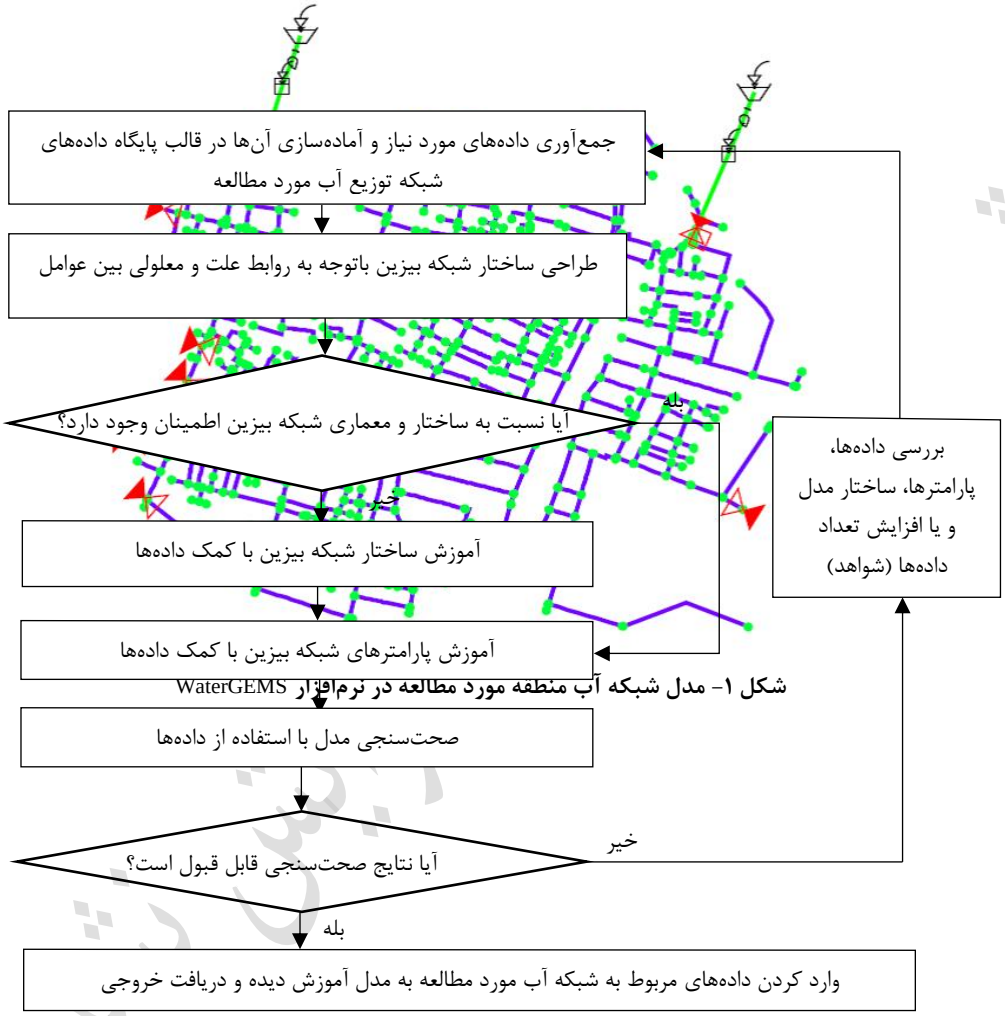
که $P(E_i|F)$: بیانگر احتمال وقوع پسین E با توجه به شرایطی است که F رخ می‌دهد و $P(E)$: نشان‌دهنده احتمال وقوع پیشین E است. احتمال پیشین درحقیقت میزان احتمال وقوع یک رخداد بدون اطلاع از پیشامدهای وابسته دیگر است. هم‌چنین احتمال پسین بیانگر میزان احتمال وقوع یک رخداد با اطلاع از احتمال وقوع پیشامدهای وابسته به آن رخداد است که برآورد دقیق‌تری از احتمال وقوع رخداد موردنظر به‌دست می‌دهد.

در این مطالعه احتمال شکست کیفیت آب در شبکه توزیع، احتمال شکست کیفیت آب در اثر وقوع هر (یا چند) جزء از شکست و احتمال وقوع هر جز شکست به‌ترتیب بیانگر احتمال پیشین، احتمال پسین و احتمال پیشامدهای وابسته، در رابطه (۲) است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مطالعه موردی

شبکه مورد مطالعه در این تحقیق بخشی از یکی از مناطق آب و فاضلاب شهری تهران است، که توسط دو مخزن آب‌دهی می‌شود. مساحت تقریبی این محدوده ۱/۱۷ کیلومترمربع و محیط آن در حدود ۴/۱۹ کیلومتر است. جنس لوله‌های این محدوده شامل چهار دسته کلی چدن نشکن (DI)، چدن (CI)، پلی‌اتیلن (PE) و پی‌وی‌سی (PVC) و بازه سنی آن‌ها (برحسب سال) به ترتیب (۱۸- ۳۸)، (۳۸- ۵۳)، (۰- ۱۸) و (۰- ۱۸) است. این شبکه شامل ۷۵۰ گره و ۸۳۳ لوله است که ساختار آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- مدل شبکه آب منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار WaterGEMS

شکل ۲- الگوریتم مدل محاسبه شکست کیفیت شبکه توزیع آب با کمک شبکه بیزین در این تحقیق

مراحل محاسبه احتمال شکست کیفیت آب لوله‌ها در منطقه مورد مطالعه شامل چهار گام آماده‌سازی داده‌های ورودی، آموزش شبکه بیزین، صحت‌سنجی مدل و دریافت خروجی مدل است که در شکل ۲ کلیه این مراحل ارائه شده است.

۳-۲- انتخاب عوامل موثر و دسته‌بندی آن‌ها در منطقه مورد مطالعه

با توجه به محدودیت‌های موجود در دسترسی به داده‌ها به‌علت حساسیت بالای شرکت‌های آب و فاضلاب در ارائه این داده‌ها و محرمانه تلقی کردن آن (به‌خصوص در رابطه با داده‌های کیفیت آب)، به‌ناچار شبکه بیزین با تعداد محدودی

از داده‌های موجود که قابل‌دسترس بودند توسعه داده شده است. دوازده عامل طول، قطر، سن و جنس لوله، نوع راه، نزدیکی به محل‌های مستعد آلودگی، نزدیکی به فضاهای سبز، نزدیکی به منابع ذخیره آب، شدت آلایندگی فاضلابروهای عبوری در محدوده هر لوله آب، فشار، سرعت، سن و کلر باقی‌مانده آب از جمله این عوامل هستند. داده‌های مربوط به چهار عامل فشار، سن، سرعت و کلر باقی‌مانده با کمک مدل‌سازی در نرم‌افزار WaterGEMS و مابقی عوامل از طریق داده‌های در اختیار قرار داده‌شده و یا محاسبه شده در نرم‌افزار GIS به‌دست آمده است.

مدل شبکه توزیع آب در اختیار قرار داده شده شامل جانمایی لوله‌ها، منبع اصلی آب، شیرهای فشارشکن، شیرهای ایزوله، مشخصات فیزیکی لوله‌ها (طول، قطر، جنس و ضریب زبری)، تراز ارتفاعی گره‌ها، تقاضای آبی هر گره و الگوی نوسانات ساعتی مصرف آب مشترکین در شبانه روز است. در ابتدا با توجه به این اطلاعات تحلیل هیدرولیکی وابسته به فشار (HDSM)[۶] در نرم‌افزار WaterGEMS انجام شده و داده‌های مربوط به سرعت و فشار برای هر گره به‌دست آمد. سپس با فرض تزریق ۰/۵ میلی گرم بر لیتر کلر به دو مخزن موجود در شبکه، تحلیل کیفی کلر و سن آب برای مدت زمان ۳۳۶ ساعت انجام شد. داده‌های هیدرولیکی به‌دست آمده برای ۲۴ ساعت، میانگین‌گیری و داده‌های کیفی مدل بعد از پایدار شدن شرایط کیفی (بعد از ۷۲ ساعت) برای تمامی گره‌ها میانگین‌گیری شده و به هر لوله مربوط اختصاص داده شد.

داده‌های به‌دست آمده از مدل GIS شبکه آب شامل طول، قطر، سن و جنس لوله است. به‌علاوه با افزودن نقشه راه‌های موجود در منطقه، می‌توان نوع راه برای هر لوله آب را مشخص کرد. هم‌چنین با مشخص بودن محل‌هایی نظیر فضاهای سبز و جایگاه‌های سوخت‌گیری خودرو می‌توان لوله‌های در محدوده نزدیک به این مناطق را شناسایی کرد. لازم‌به ذکر است که برای انجام کلیه محاسبات بر روی داده‌های GIS از نرم‌افزار ArcMap10.5 استفاده شده است.

در مورد عامل شدت آلایندگی فاضلابروهای عبوری در محدوده هر لوله آب، از یک روش امتیازدهی استفاده شده است. فاضلابروهای اطراف شبکه آب، یک منبع آلودگی بالقوه برای آلودگی میکروبیولوژیکی است. نقشه GIS این فاضلابروها، حاوی اطلاعاتی در مورد قطر، طول و موقعیت مکانی آن‌ها است. به این ترتیب با تعریف معادله (۳) براساس طول و قطر هر فاضلابرو، اساساً می‌توان شدت عددی آلایندگی هر فاضلابرو (SPI)[۷] را نشان داد (Islam et al., 2017).

$$SPI = \frac{L_i \times D_i}{\sum_{i=1}^{n} L_i \times D_i} \qquad (۳)$$

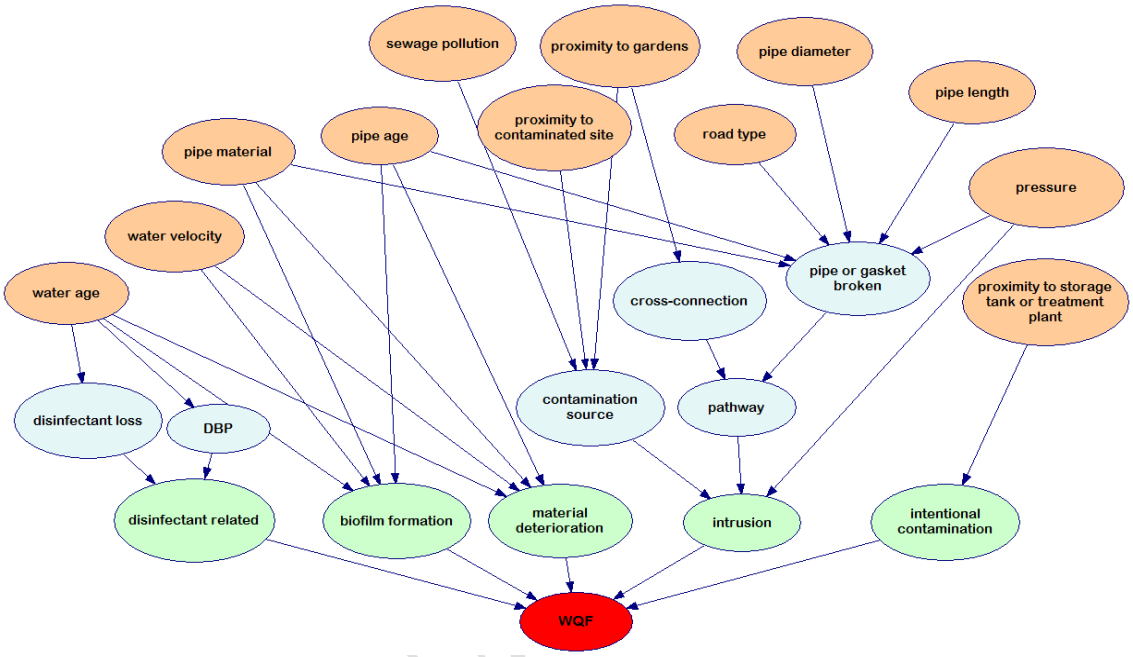
که L: طول فاضلابرو برحسب متر، D: قطر فاضلابرو برحسب میلی‌متر، i: شماره ناحیه تحت تاثیر یک گره آب (شماره پلیگون) و N: تعداد کل گره‌های آب در شبکه توزیع هستند.

تمامی این عوامل به‌طور اختصار نام‌گذاری و باتوجه به مراجع و استانداردها و حد مجاز و غیرمجاز مقادیر آن دسته‌بندی و به نرم‌افزار GeNIe به‌منظور ساخت و آموزش شبکه بیزین آن معرفی شده است. نکته قابل‌توجه آن است که برای اختصاص مقدار عددی عواملی که به‌صورت گرهی تعریف شده است (مثل فشار و یا کلر باقی‌مانده)، برای هرلوله، از میانگین‌گیری مقادیر در گره ابتدا و انتهای آن لوله استفاده شده است.

۳-۳- ساختار و آموزش شبکه بیزین

این شبکه از ۲۴ گره و ۳۳ کمان تشکیل شده است (شکل ۳). کمان‌ها در شکل ۳ نشان‌دهنده روابط علّی و معلولی بین گره‌ها است. گره‌های نارنجی رنگ، والدین اولیه (عوامل اثرگذار شناسایی شده) و گره قرمز رنگ (WQF) مولود نهایی یا همان احتمال شکست کیفیت آب (شکست کلی سیستم) است. هم‌چنین گره‌های سبز رنگ پنج جزء شکست را نمایش می‌دهد.

برای آموزش مدل موردنظر در شبکه بیزین به سابقه‌ای از شکست کیفیت آب در شبکه نیاز است، اما هیچ‌گونه اطلاعات کیفی به‌دلیل محرمانه تلقی‌شدن از طرف شرکت آب و فاضلاب در دسترس قرار نمی‌گیرد. به‌همین دلیل تعدادی از لوله‌های شبکه به‌عنوان لوله‌هایی انتخاب شدند که فرض شده در سابقه تاریخی خود دچار شکست کیفیت آب شده‌اند. از آن‌جا که عامل کلر باقی‌مانده مبنای خوبی برای تعیین وقوع و یا عدم وقوع شکست کیفیت آب است، از این عامل برای انتخاب لوله‌های مورد نظر استفاده شد. به این ترتیب لوله‌هایی که در یک بازه حدود ۶ ساعته با افت و یا افزایش کلر در مخزن‌ها، مقدار کلر باقی‌مانده در آن‌ها از حد مجاز تعریف شده (۰/۲-۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر) خارج می‌شود، به‌عنوان لوله‌های مستعد برای وقوع شکست کیفیت آب انتخاب شدند.



شکل ۳- ساختار شبکه بیزین در منطقه مورد مطالعه

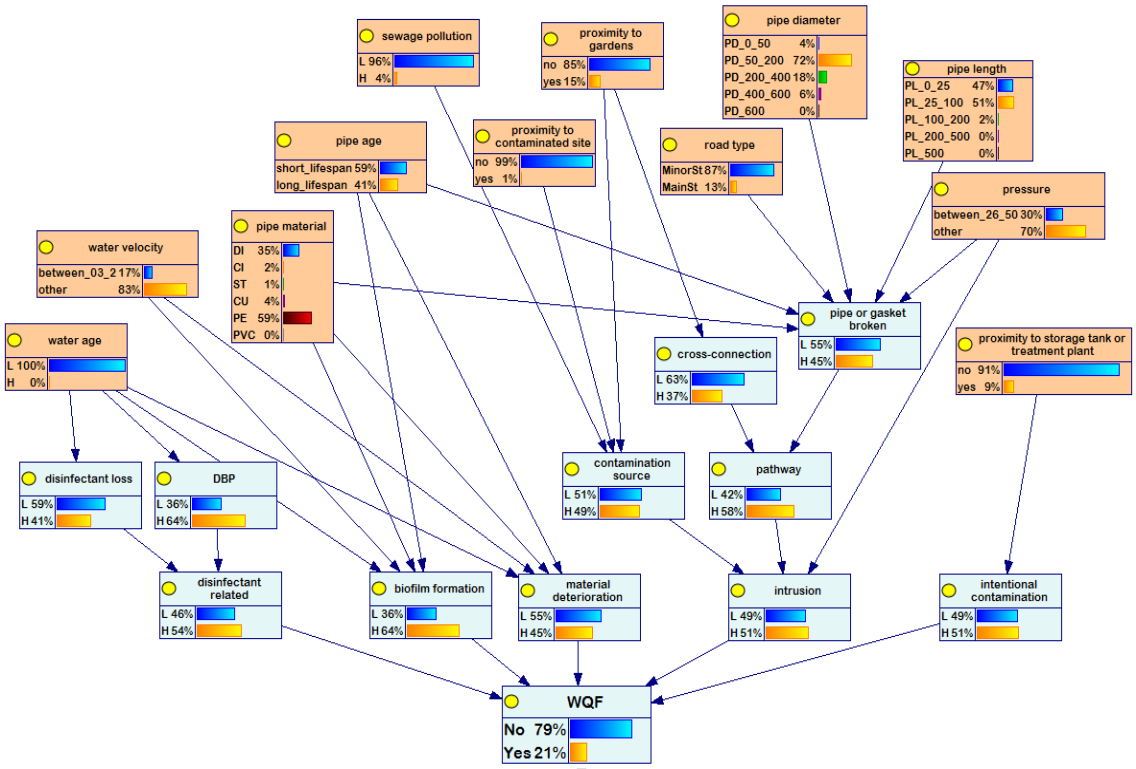
درصدهای نمایش داده شده در شکل ۴ برای عوامل اثرگذار، نشان‌دهنده تعداد داده‌های موجود هر یک از دسته‌های مربوط به آن عامل در سری داده‌های ورودی به مدل است. به‌عنوان مثال در داده‌های ورودی به مدل، ۵۹ درصد جنس لوله‌ها پلی‌اتیلن و ۳۵ درصد جنس لوله‌ها چدن نشکن است. برای گره‌های میانی و خروجی مدل نیز این درصد بیانگر احتمال شکست کم و یا زیاد عامل مربوطه است. بنابراین در این شبکه ۷۹ درصد لوله‌ها دارای شکست کیفیت آب و ۲۱ درصد لوله‌ها دارای عدم شکست کیفیت آب در سابقه خود بوده‌اند.

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، با توجه به فرضیات انجام شده در شبکه مورد مطالعه، وقوع شکست کیفیت آب از طریق زوال مواد، کم‌ترین احتمال و وقوع شکست کیفیت آب از طریق تشکیل بیوفیلم بیشترین احتمال را دارد. لازم‌به ذکر است که هرنمودار (دایره زرد رنگ نمایشی از گره است) بیانگر درصد احتمال وقوع هر حالت از گره مورد نظر است.

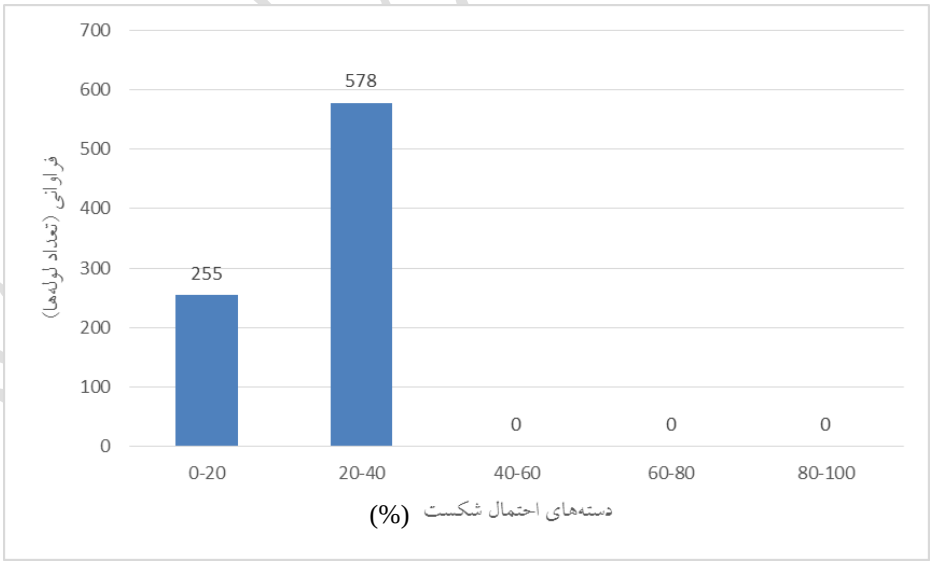
۳-۴- دریافت خروجی مدل آموزش دیده

در این مرحله با ورود اطلاعات هر لوله به شبکه آموزش دیده، می‌توان خروجی مدل که همان احتمال شکست کیفیت آب لوله است را به‌دست آورد. شکل ۵ نشان دهنده درصد فراوانی لوله‌ها در هر دسته از احتمال شکست است.

لوله‌های با میزان احتمال شکست [۰-۲۰] حدود ۳۱ درصد و لوله‌های با میزان احتمال شکست [۲۰-۴۰] حدود ۶۹ درصد از تعداد کل لوله‌های موجود در شبکه را شامل می‌شوند.



شکل۴- شبکه بیزین آموزش دیده برای منطقه مورد مطالعه



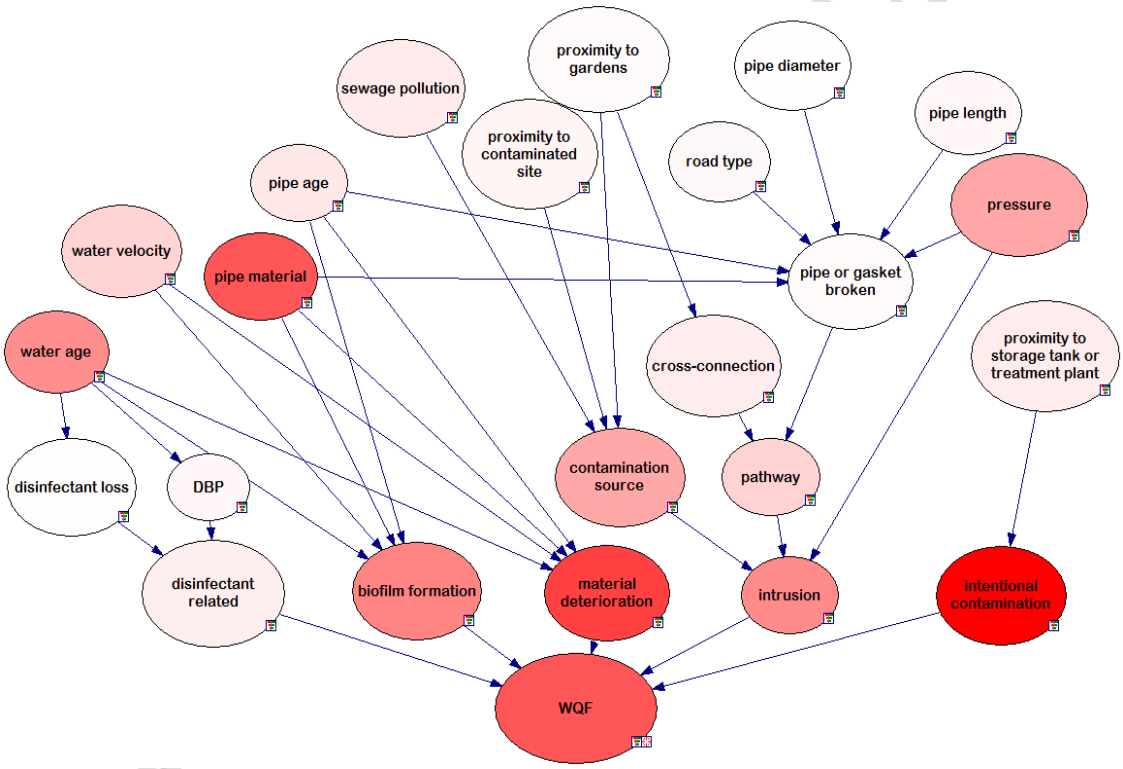
شکل ۵- نمودار فراوانی لوله‌ها در هر دسته از احتمال شکست کیفیت

۳-۵- تحلیل حساسیت عوامل اثرگذار

با کمک مدل بیزین آموزش دیده شده، می‌توان تاثیر هر یک از عوامل موثر بر احتمال شکست را بررسی و اولویت‌بندی کرد و در مراحل بعدی با تمرکز بر عوامل با اثرگذاری بیشتر به کاهش ریسک پرداخت. برای شناسایی میزان اثرگذاری

عوامل مختلف از محاسبات تحلیل حساسیت استفاده می‌شود. به این ترتیب که در هر مرحله با اعمال تغییر یکسان در احتمال وقوع هر عامل، میزان تغییر احتمال در گره و یا گره‌های هدف، نشان‌دهنده میزان حساسیت آن گره به عامل مربوطه است. هرچه با تغییرات کمتر، احتمال گره مدنظر تغییرات بیشتری کند، آن عامل اثرگذاری بیشتری بر گره مربوطه دارد. برعکس، هرچه با تغییر بیشتر، احتمال گره مولود تغییر آن‌چنانی نداشته باشد، بنابراین آن عامل، عامل اثرگذاری محسوب نمی‌شود.

همان‌طور که توضیح داده شد، در تحلیل حساسیت با اعمال تغییرات مشخص در ورودی‌های مدل (تغییر احتمال ورودی‌ها)، تاثیر تغییرات بر روی خروجی مدل (احتمال پسین) بررسی می‌شود. متغیرهای با حساسیت بالا با تغییر اندک خود می‌توانند تاثیر قابل‌توجهی بر نتایج بگذارند (GeNIe, 2017). ابزار محاسبه تحلیل حساسیت در نرم‌افزار GeNIe وجود دارد و کافی است گره موردنظر که بررسی اثر تغییرات بر روی آن مدنظر است را به‌عنوان گره هدف انتخاب کرده و محاسبات تحلیل حساسیت به صورت خودکار بر روی آن انجام شود. پس از انجام محاسبات تحلیل حساسیت، رنگ گره‌ها تغییر کرده که طیفی از رنگ قرمز را شامل می‌شود. این گره‌های قرمز رنگ حاوی پارامترهایی هستند که برای



شکل ۵- تغییرات شبکه بعد از انجام تحلیل حساسیت

محاسبه توزیع احتمال پسین در گره‌هایی که به‌عنوان هدف مشخص شده‌اند، مهم هستند. هرچه گره پررنگ‌تر باشد تاثیر آن بر گره هدف بیشتر است. در این‌جا گره WQF (شکست کیفیت آب) به‌عنوان گره هدف انتخاب شده است. از میان ۱۲ عامل ورودی به شبکه در این مطالعه چهار عامل جنس لوله، فشار، سن و سرعت آب به‌ترتیب بیشترین اثر را بر میزان احتمال شکست کیفیت آب دارند. شکل ۵ حساس‌ترین عامل‌ها را برای گره هدف (در این مورد، حالت وقوع شکست در گره شکست کیفیت آب) نشان می‌دهد، که از حساس‌ترین به کمترین حساسیت مرتب شده‌اند.

نکته قابل‌توجه آن است که نتایجی که الگوریتم تحلیل حساسیت ارائه می‌دهد، وابسته به اطلاعات زمینه شبکه است. به این‌صورت که مقدار حساسیت محاسبه شده به مجموعه مشاهده‌ها و داده‌های ورودی به شبکه بستگی دارد. با انجام مشاهده‌های بیشتر و اجرای دوباره تحلیل، این نتایج دستخوش تغییر می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آموزش پارامترهای شبکه بیزین بیانگر آن است که ۳۱ درصد از لوله‌ها دارای احتمال شکست خیلی کم و ۶۹ درصد دارای احتمال شکست کم بوده‌اند. هم‌چنین با انجام تحلیل حساسیت بر مدل آموزش دیده می‌توان دریافت که چهار عامل جنس لوله، فشار، سن و سرعت آب از جمله اثرگذارترین عوامل در شکست کیفیت آب محسوب می‌شوند. به‌علاوه، صحت‌سنجی شبکه بیزین آموزش دیده بر روی داده‌های موجود نشان می‌دهد که مدل ساخته شده تا ۷۹/۵ درصد دقت لازم برای پیش‌بینی احتمال شکست کیفیت آب را دارد. شبکه بیزین به‌دست آمده در این منطقه قابلیت آن را دارد تا با داده‌های کامل‌تر و جدیدتر به‌روزرسانی شود؛ که این امر می‌تواند منجر به افزایش کارایی آن شود.

به این ترتیب با طبقه‌بندی لوله‌ها، می‌توان به ارائه برنامه برای کاهش شکست کیفیت لوله‌های با احتمال بالا پرداخت. به این منظور لازم است تا عوامل اثرگذارتر بر شکست کیفیت هر لوله شناسایی شود. لازم‌به ذکر است که در مرحله اول، اولویت با انتخاب عواملی است که قابلیت تغییر در آن‌ها ساده‌تر است (به‌عنوان مثال عوامل هیدرولیکی شبکه)، چرا که هزینه کمتری را بر شرکت‌های آب و فاضلاب تحمیل می‌کند. به این منظور کافی است طراحی هیدرولیکی شبکه بازنگری شود و با ایجاد تغییراتی هم‌چون کلر ورودی اولیه به مخازن، کنترل تراز مخازن و یا خروجی فشارشکن‌ها، تغییر در نحوه باز و بسته بودن شیرهای شبکه، به کاهش احتمال شکست پرداخت.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- Cross- connection
2- Water Quality Index
3- Geographical Information System
4- Chemical Oxygen Demand
5- Quantitative Microbial Risk Assessment
6- Head Driven Simulation Method
7- Sewage Pollution Index

۶- مراجع

پورسعید اصفهانی، پ.، (۱۳۹۷)، "ارزیابی ریسک شکست کیفیت آب در شبکه‌های توزیع آب شهری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

تابش، م.، (۱۳۹۵). *مدل‌سازی پیشرفته شبکه‌های توزیع آب*. انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران، ۵۸۵ صفحه.

فقیهی، ن.، (۱۳۹۵)، " بررسی پارامترهای موثر بر آب بدون درآمد با استفاده از شبکه بیزین"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

وزارت نیرو، (۱۴۰۰)، *گزارش عملکرد سال ۱۳۹۹ صنعت آب و برق*، معاونت تحقیقات و منابع انسانی، دفتر فناوری اطلاعات و آمار.

BayesFusion, L.L.C., (2017), *GeNIe modeler, User manual*, Available online: https://support. Bayesfusion. Com/docs/ (accessed on 21 October 2019).

پذیرفته شده / ویرایش نشده

Chalchisa, D., Megersa, M., and Beyene, A., (2018), "Assessment of the quality of drinking water in storage tanks and its implication on the safety of urban water supply in developing countries", *Environmental Systems Research,* 6(1), 1-6. https://doi.org/10.1186/s40068-017-0089-2

Cordoba, G.C., Tuhovčák, L., and Tauš, M., (2014), "Using artificial neural network models to assess water quality in water distribution networks", *Procedia Engineering*, 70, 399-408. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.045

Islam, N., Farahat, A., Al-Zahrani, M.A.M., Rodriguez, M.J., and Sadiq, R., (2015), "Contaminant intrusion in water distribution networks: Review and proposal of an integrated model for decision making", *Environmental Reviews*, 23(3), 337-352. *https://doi.org/10.1139/er-2014-0069*

Islam, N., Rodriguez, M.J., Farahat, A., and Sadiq, R., (2017), "Minimizing the impacts of contaminant intrusion in small water distribution networks through booster chlorination optimization", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,* 31(7), 1759-1775. https://doi.org/10.1007/s00477-017-1440-x

Li, R.A., McDonald, J.A., Sathasivan, A., and Khan, S.J., (2021), "A multivariate Bayesian network analysis of water quality factors influencing trihalomethanes formation in drinking water distribution systems", *Water Research*, 190, 116712. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116712

Neapolitan, R.E., (2004). *Learning Bayesian Networks (Vol. 38)*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.

Odhiambo, M., Viñas, V., Sokolova, E., and Pettersson, T.J., (2023), "Health risks due to intrusion into the drinking water distribution network: Hydraulic modelling and quantitative microbial risk assessment", *Environmental Science: Water Research and Technology*. 9(6), 1701-1716. https://doi.org/10.1039/d2ew00720g

Pearl, J., (1988), *Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference*, United States: Morgan Kaufmann.

Sadiq, R., Kleiner, Y., and Rajani, B., (2004), "Aggregative risk analysis for water quality failure in distribution networks", *Journal of Water Supply: Research and Technology (Aqua)*, 53(4), 241-261. https://doi.org/10.2166/aqua.2004.0020

Sadiq, R., Kleiner, Y., and Rajani, B., (2007), "Water quality failures in distribution networks, Risk analysis using fuzzy logic and evidential reasoning", *Risk Analysis: An International Journal*, 27(5), 1381-1394. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2007.00972.x

Sadiq, R., Saint-Martin, E., and Kleiner, Y., (2008), "Predicting risk of water quality failures in distribution networks under uncertainties using fault-tree analysis", *Urban Water Journal*, 5(4), 287-304. https://doi.org/10.1080/15730620802213504

Şener, Ş., Şener, E., and Davraz, A., (2017). "Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey)", *Science of the Total Environment*, 584, 131-144. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.102

Tchórzewska-Cieślak, B., Pietrucha-Urbanik, K., and Papciak, D., (2019), "An approach to estimating water quality changes in water distribution systems using fault tree analysis", *EDP Sciences*, 8(4), 162. https://doi.org/10.3390/resources8040162

Torres, J.M., Brumbelow, K., and Guikema, S.D., (2009), "Risk classification and uncertainty propagation for virtual water distribution systems", *Reliability Engineering and System Safety*, 94(8), 1259-1273. https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.01.008