

Prioritization of Wastewater Collection Network Pipes for Inspection Activities Considering Structural, Hydraulic and Environmental Indices

M. Tabesh^{1*}, A. Zandieh², A. shafie², and B. Roghani³

Abstract

Proper functioning of a sewage collection network whole depends heavily on its management plan. Prioritizing component inspection of these networks is also an important part of management plan and paying attention to it can greatly improve their performance. In the present study, after determining the factors affecting the structural deterioration process of sewers, the impact of each of these factors on their decision-making and inspection prioritization process is investigated. After defining the indices and determining how each index is scored, each of the indices is classified in the range of 1 (very good) to 5 (very bad). Subsequently, a deterioration model based on polynomial logistic regression was developed to estimate the structural status of components using defined structural indices and videometric data. In addition, hydraulic and environmental assessment indices of sewers were introduced, which classified the condition of sewers in the range of 1 (very good) to 5 (very bad). Finally structural, hydraulic and environmental indices are combined according to different scenarios proposed to prioritize for inspection activities. In the present study, a part of Tehran wastewater collection network was investigated. It was found that 0.2% of the length of the pipes was in excellent conditions and 3.3% were in very bad conditions and the rest are in the conditions between. According to the results of the sensitivity analysis on the index coefficients, the structural index was identified as the most effective index in the prioritization program and its precise determination should be considered.

Keywords: Sewage Collection Network, Inspection, Prioritization, Structural Index, Hydraulic Index, Environmental Index.

Received: January 1, 2020

Accepted: June 24, 2020

اولویت بندی بازرسی شبکه های جمع آوری فاضلاب بر اساس شاخص های سازه ای، هیدرولیکی و محیطی

مسعود تابش^{۱*}، امیر زندیه^۲، احمد شفیعی^۲ و بردیا روغنی^۳

چکیده

عملکرد مناسب یک شبکه جمع آوری فاضلاب وابستگی زیادی به برنامه مدیریت آن دارد. در همین راستا، اولویت بندی بازرسی اجزای این شبکه ها بخش مهمی از برنامه مدیریت آن است و توجه به آن می تواند در بهبود عملکرد آن زیرساخت تأثیر فراوانی داشته باشد. در تحقیق حاضر پس از تعیین عوامل تأثیرگذار در روند زوال سازه ای اجزای شبکه جمع آوری فاضلاب و تعریف شاخص های مربوطه و تعیین نحوه امتیازدهی به هر شاخص، شاخص ها دسته بندی شدند. پس از آن، برای تخمین وضعیت اجزا با استفاده از شاخص های سازه ای تعریف شده و داده های ویدئومتری، مدل زوال بر مبنای رگرسیون لجستیک چندجمله ای توسعه داده شد. به علاوه، شاخص های ارزیابی هیدرولیکی و محیطی فاضلابها نیز معرفی و دسته بندی شدند. در نهایت برای انجام فعالیت های بازرسی، شاخص های سازه ای، هیدرولیکی و محیطی در سناریوهای مختلف با یکدیگر ترکیب شدند و برنامه اولویت بندی انجام شد. با پیاده سازی مدل معرفی شده در این تحقیق بر روی بخشی از شبکه فاضلاب شهر تهران مشخص شد که ۰/۲ درصد از طول لوله ها در شرایط عالی و ۳/۳ درصد در شرایط خیلی بد بوده و مابقی در شرایطی مابین این دو حالت قرار دارند. طبق نتایج آنالیز حساسیت بر روی ضرایب شاخص ها، شاخص سازه ای اثرگذارترین شاخص در برنامه اولویت بندی منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شد و تعیین دقیق این ضریب باید مورد توجه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: شبکه جمع آوری فاضلاب، بازرسی، اولویت بندی، شاخص سازه ای، شاخص هیدرولیکی، شاخص محیطی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۴/۴

1- Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mtabesh@ut.ac.ir

2- M.Sc. Graduated Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- Ph.D. Graduated Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست گرایش آب و فاضلاب، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳- دکتری مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۹ امکان پذیر است.

TOPSIS برای اولویت‌بندی بازسازی فاضلاب‌روها استفاده کردند. در این مطالعه پس از استخراج پارامترهای موثر در بحث بازسازی شبکه‌های فاضلاب از مطالعات پیشین، وزن هر یک از معیارها از طریق تدوین پرسش‌نامه، محاسبه شد. در این تحقیق از مبحث منطق فازی برای غلبه بر بحث عدم قطعیت و همچنین ابزار GIS برای محاسبه‌ی پارامترهای محیطی استفاده شد. متأسفانه روش ارائه شده در این تحقیق بر روی هیچ مطالعه‌ی موردی پیاده‌سازی نشد تا از میزان صحت کارکرد مدل و خروجی‌های آن، اطلاعاتی به دست آید. Anbari et al. (2017) با استفاده از رویکرد تحلیل ریسک و به‌کارگیری شبکه بیزین، اجزای شبکه جمع‌آوری فاضلاب را اولویت‌بندی کردند تا با استفاده از آن بتوان برای بازسازی و نوسازی شبکه تصمیم‌گیری کرد. خرابی‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش شامل فرسایش و خوردگی، تغییر شکل، ترک و شکستگی لوله و گسیختگی از نوع سازه‌ای و نشست، گرفتگی ناشی از رسوبات و گرفتگی ناشی از ریشه از نوع هیدرولیکی هستند. در مجموع عوامل سن، جنس، پوشش خاک روی فاضلابرو، پوشش حفاظتی فاضلابرو، سرعت جریان، ابعاد، عمق دفن، سطح آب زیرزمینی، نرخ ترافیک، تعداد اتصالات، مجزا یا درهم، تعداد درختان پیرامون فاضلابرو و نوع درختان به‌عنوان عوامل مؤثر در خرابی‌ها شناسایی و در مدل لحاظ شد. مدل پیشنهادی، به‌خصوص در شرایط نقص منابع اطلاعاتی و عدم قطعیت، برای برنامه‌های تعمیرات و جایگزینی فاضلاب‌روها مناسب عنوان شد. Roghani (2020) نیز نسبت به اولویت‌بندی نظام‌مند و جامع لوله‌های شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب برای انجام اقدامات بازرسی و بازسازی، با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر ریسک چندبعدی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، اقدام کرد. در همین راستا، در ساختار روش پیشنهادی از سیستم ترکیبی مبتنی بر فرآیند سلسله‌مراتبی تحلیلی فازی (FAHP) استفاده شد تا ضمن محاسبه مقدار ریسک هر یک از فاضلاب‌روها، قادر به لحاظ کردن نظرات متخصصان و استفاده از داده‌های محدود و دارای عدم قطعیت باشد. در مطالعه‌ی ایشان به منظور تخمین هر چه دقیق‌تر مقدار ریسک، ریسک شکست سازه‌ای و هیدرولیکی فاضلاب‌روها به‌عنوان یک پارامتر چندبعدی در نظر گرفته شده و به سه ریسک جزئی جداگانه که عبارت بودند از: (۱) افت کیفیت محیط‌زیست، (۲) اختلال در ترافیک و خسارت راه‌ها، و (۳) کاهش کیفیت زندگی و افزایش هزینه‌های عمومی تفکیک شد. در نهایت، مقدار ریسک شکست سازه‌ای و هیدرولیکی کل در سطح فاضلاب‌روها از ادغام ریسک‌های جزء به‌دست آمده و توسط روش K-means، خوشه‌بندی شده و نقشه‌های ریسک منطقه (Risk Mapping) شد. لازم به ذکر است که در ساختار مدل پیشنهادی از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نیز برای

شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب در حفظ و تضمین سلامت عمومی جامعه و امنیت محیط‌زیست نقش حیاتی ایفا می‌کنند. این سامانه‌ها در بردارنده بخش بزرگی از سرمایه یک جامعه در بخش زیرساخت‌های شهری هستند (Infraguide, 2004). با توجه به مدفون بودن اجزای شبکه جمع‌آوری فاضلاب و هزینه‌بر و زمان‌بر بودن فرآیندهای بازرسی این اجزا، ارائه الگوریتم مناسب برای اولویت‌بندی فاضلاب‌روها به‌منظور انجام این فرآیندها ضروری می‌نماید.

Salman and Salem (2011) در مطالعه‌ی خود به شناسایی عوامل مهم، تعیین اهمیت نسبی عوامل انتخاب شده و خلاصه‌سازی عملکرد کلی فاضلاب‌روها از منظر این عوامل پرداختند. در این تحقیق مقدار ریسک شکست که از ترکیب مقادیر پیامدها و احتمال شکست به دست می‌آید، با استفاده از روش‌های ضرب ساده، ماتریس ریسک و سیستم استنتاج فازی محاسبه شد. نقشه‌های ریسک به‌دست آمده به تصمیم‌گیران شرکت‌های آب و فاضلاب کمک می‌کند تا بخش‌هایی از شبکه‌ی لوله‌ای که نیاز فوری به انجام تعمیرات یا نظارت دقیق را دارند، شناسایی شوند. Kessili et al. (2016) برای اولویت‌بندی فاضلاب‌روها در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، ۱۲ معیار در ۶ دسته سازه‌ای، هیدرولیکی، محیطی، اقتصادی، اجتماعی و پارامترهای فیزیکی لوله (مانند جنس و قطر) را انتخاب کردند که شامل: گسیختگی، وضعیت سازه‌ای فاضلابرو و غیره بود. سپس با تکمیل پرسش‌نامه و بکارگیری روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP، داده‌های مربوط به پرسشنامه‌ها را تحلیل کرده تا وزن هر پارامتر را محاسبه کنند. از بین معیارها، گسیختگی با وزن $0/1849$ بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است. مطابق یافته‌های این پژوهش، استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره PROMETHEE II برای رتبه‌بندی، ابزار مفیدی است. محدودیت‌های این روش تعداد معیارهاست که نباید از ۱۵ بیشتر باشد و معیارها باید برای تصمیم‌گیران قابل فهم باشد. Lashkari Zadeh and Hoseini (2016) در تحقیق خود برای ارزیابی و رتبه‌بندی آسیب‌پذیری فاضلاب‌روها از روش مجموع وزنی ساده (SAW) استفاده کردند. روش پیشنهادی در این مطالعه بر روی ۱۵ عدد از فاضلاب‌روهای منطقه ۱ شهر مشهد پیاده‌سازی و فاضلاب‌روها بر اساس آسیب‌پذیری‌شان رتبه‌بندی شدند. نتایج حاکی از آن بود که با در نظر گرفتن مجموع عوامل، روش SAW ضمن سادگی و انعطاف در فرآیند محاسباتی، فضای مقایسه معنی‌داری برای تصمیم‌گیری در این تحقیق فراهم کرد. ایشان ادعا نمودند می‌توان از روش پیشنهادی در تدوین برنامه نظارت و نگهداری فاضلاب‌روها استفاده کرد. Bashash et al. (2013) از مدل تصمیم‌گیری چند معیاره‌ی

مدیریت داده‌ها و برنامه‌ریزی برای اقدامات بازرسی و بازسازی آینده استفاده شد. نتایج به صورت کلی، حاکی از سادگی کاربرد روش پیشنهادی داشت. همچنین نتایج نشان داد که افزایش میزان عدم قطعیت در تعریف نمودارهای ارزیابی عملکرد و درجه بحران پارامترهای سازه‌ای، هیدرولیکی و محیطی فاضلاب‌روها منجر به سبک‌شماری وضعیت موجود می‌شود. بنابراین در مواردی که عدم قطعیت در فرآیند ارزیابی افزایش می‌یابد، تصمیم‌گیرندگان باید توجه خاصی به این موضوع داشته باشند.

برخی دیگر از مطالعات، مدل‌های زوال را برای پیش‌بینی تغییرات شرایط سازه‌ای فاضلاب‌روها و ارزیابی شرایط کنونی و آینده آن‌ها توسعه دادند. از این مدل‌ها می‌توان برای پیش‌بینی شرایط لوله‌های بازبینی نشده نیز استفاده کرد (Caradot et al., 2017). به عنوان نمونه، فرآیند زوال خطوط لوله مدفون با استفاده از روش مارکوف ناهمگن فازی توسط Kleiner et al. (2004) مدل‌سازی شد. در این تحقیق، ابتدا نرخ زوال در یک زمان خاص، بر اساس سن و وضعیت زیرساخت و با استفاده از الگوریتمی مبتنی بر قواعد فازی، برآورد شد. سپس برای خطوط لوله با سنین مختلف، احتمال شکست بر اساس مدل زوال تخمین زده شد. در نهایت نیز، با استفاده از مفهوم ریسک، احتمال شکست با عواقب ناشی از شکست تلفیق شدند و ریسک شکست لوله به‌عنوان تابعی از سن خط لوله به‌دست آمد. با توجه به متدولوژی، کارکرد و نوع داده‌های موردنیاز برای آن‌ها، مدل‌های زوال به‌مطابق جدول ۱ دسته‌بندی می‌شوند (Ana and Bauwens, 2010):

تحقیقات پیشین بیشتر به بررسی عوامل مؤثر در شکست‌های سازه‌ای و نقش عوامل گوناگون در این شکست‌ها پرداخته‌اند و اهمیت شاخص‌های هیدرولیکی و یا محیطی به‌طور خاص در نظر گرفته نشده است. از طرفی در بیشتر تحقیقات گذشته، اهمیت هر یک از این عوامل با روش پرسشنامه‌ای حاصل شده است (به عنوان مثال Vladeanu (2018) و (Elsawah et al. (2014) و نقش داده‌های مشاهده‌ای در برآورد اهمیت عوامل مختلف کم‌رنگ است. در تحقیق حاضر با کمک داده‌های تفسیرشده ویدئومتری بخشی از شبکه‌ی فاضلاب شهر تهران و شاخص‌های تعریف‌شده پیرامون عوامل تأثیرگذار در وضعیت سازه‌ای، مدل زوال فاضلاب‌روهای شبکه ارائه شد. در انتها شاخص‌های سازه‌ای، هیدرولیکی و محیطی تعریف‌شده، در قالب سناریوهایی با یکدیگر ترکیب و بر روی اولویت‌بندی بازرسی شبکه مورد مطالعه، پیاده‌سازی شد. لازم به ذکر است که منظور از بازرسی (Inspection) در مطالعه‌ی حاضر، پایش فاضلاب‌روها برای تعیین وضعیت آن‌ها و مشخص کردن عملکرد سیستم مطابق با شرایط طراحی شده است.

۲- روش انجام کار

شاخص‌های مورد بررسی در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. در اینجا فاضلاب‌روها از منظر شاخص‌های سازه‌ای، هیدرولیکی و محیطی امتیازدهی شده و با در نهایت با تجمیع این شاخص‌ها، فاضلاب‌روها برای انجام بازرسی، اولویت‌بندی می‌شوند. در ادامه به توضیح روند کار پرداخته می‌شود.

Table 1- Classification of structural deterioration models

جدول ۱- دسته‌بندی انواع مدل‌های زوال سازه‌ای

| Model | Characteristics | Considerations |
|--------------------------------|--|--|
| Physical models | Such models require a lot of information | Given the complexities of pipe failure mechanisms, it is difficult and often impossible to develop accurate physical models (König, 2005). |
| Artificial intelligence models | In these models, by imitating the human mind in empirical learning, attempts are made to develop a model for simulating and predicting of failure in pipes by using experimental data. | To use these models, extensive data is needed to train the model as well as the appropriate computer equipments (Tran et al., 2009). |
| Statistical models | Due to the problems of physical and artificial intelligence models, statistical models have been developed that are able to use existing data and have been used in many other infrastructures (including pavements, gas pipes, etc.) (Ariaratnam et al., 2001). | In these models, qualitative aspects are ignored. They also have limitations in dealing with dissimilar data. |

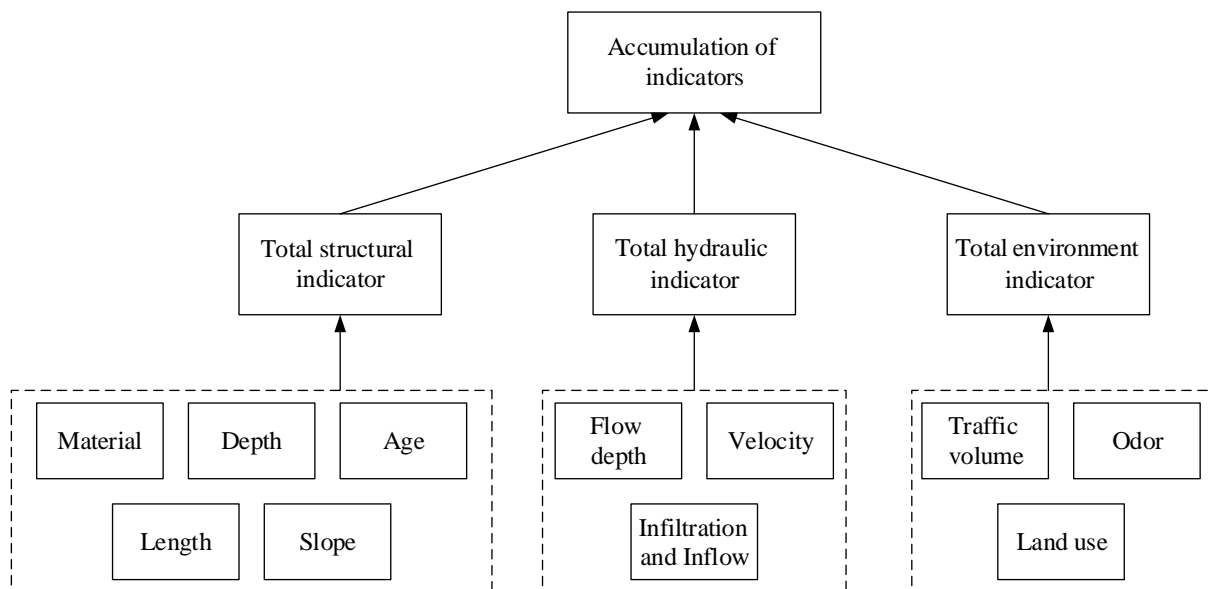


Fig. 1- Methodology schematic

شکل ۱- شماتیک کلی متدولوژی

متفاوت است، از عامل جنس لوله به صورت ترکیبی با سایر عوامل برای نمره دهی به آن‌ها استفاده می‌شود. با توجه به خصوصیات ذکر شده برای انواع لوله‌ها در EPA (2000)، می‌توان از جدول ۲ برای چگونگی عملکرد هر نوع لوله در برابر مخاطرات احتمالی استفاده کرد. امتیازدهی پیشنهادی برای این پارامتر در جدول ۳ ارائه شده است.

۲-۱-۲- عمق دفن لوله

عمق دفن لوله‌ها بنابر امور مربوط به طراحی شبکه و توپوگرافی منطقه و دلایل اجرایی می‌تواند متفاوت باشد. عوامل متعددی از جمله ترافیک و رفت‌وآمد وسایل نقلیه، رطوبت خاک، یخ‌زدگی و بار خاک روی فاضلابرو، موجب شکست سازه‌ای می‌شود. برای فاضلابروها با عمق دفن کمتر از ۲ متر، بار ترافیکی و تأثیر عوامل محیطی و برای فاضلابروها با عمق بیشتر از ۵/۵ متر، افزایش فشار خاک، بیشترین تأثیر را بر شکست سازه‌ای آن‌ها دارد.

۱-۲- شاخص‌های سازه‌ای

شاخص‌های سازه‌ای نشان دهنده عواملی هستند که به صورت مستقیم بر زوال سازه‌های فاضلابروها و در نتیجه، شکست سازه‌ای آن‌ها تأثیر می‌گذارند. سن لوله، جنس لوله، قطر لوله، طول لوله، شیب لوله و عمق دفن از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر زوال اجزا و بروز شکست در آن‌ها هستند (Ariaratnam et al., 2001; Ana et al., 2009; Davies et al., 2001; Salman, 2010). در ادامه این پارامترها و دسته‌بندی پیشنهادی در تحقیق حاضر ارائه می‌شوند.

۱-۱-۲- جنس لوله

لوله‌های مختلف در برابر عوامل خارجی مختلف همچون خوردگی، بارهای خارجی و غیره مقاومت‌های مختلفی دارند. با توجه به این‌که جنس لوله بر روی نحوه اثرگذاری برخی از عوامل تأثیرگذار است و آسیب‌پذیری لوله‌ها با جنس‌های مختلف در برابر عوامل گوناگون

Table 2- Performance of different types of pipes against different hazards

جدول ۲- عملکرد انواع لوله‌ها در برابر مخاطرات گوناگون

| Material | External factors | | | |
|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------|
| | External corrosion | Internal corrosion | Vertical forces | Dynamic forces |
| Reinforced concrete | Fair | Fair | Good | Good |
| Ductile iron | Average | Average | Good | Good |
| HDPE | Good | Good | Fair | Fair |
| PVC | Good | Good | Average | Average |
| Vitrified clay | Good | Good | Average | Average |

در لوله‌های طولانی‌تر بیشتر است، لذا این لوله‌ها بیشتر در معرض آسیب‌اند. از طرفی لوله‌های با طول بیشتر نسبت به نشست نامتقارن آسیب‌پذیرتر هستند (Ana et al., 2009). طبق نظر برخی دیگر از محققین، لوله‌های با طول بزرگ‌تر به علت تنش‌های خمشی بزرگ‌تر، بیشتر در معرض آسیب قرار دارند (Chughtai and Zayed, 2008). نمرات مربوط به طول لوله بر اساس جدول ۴ تخصیص داده می‌شود.

۲-۱-۵- شیب لوله

شیب کم در لوله‌های شبکه فاضلاب باعث کم شدن سرعت جریان فاضلاب و ته‌نشینی رسوبات شده و این امر موجب تشکیل و گسترش گاز سولفید هیدروژن درون لوله‌ها می‌شود. این گاز در حضور رطوبت و اکسیژن تبدیل به سولفوریک اسید شده و باعث بروز خوردگی در لوله‌ها به‌خصوص لوله‌هایی که در آن‌ها سیمان به کار رفته‌اند (مثل لوله‌های بتنی) می‌شود. تشکیل سولفوریک اسید در شیب‌های کم و بروز خوردگی در لوله‌ها در تحقیقات مشابه نیز ثبت شده است (Ayoub et al., 2004). با توجه به مطالب عنوان شده، می‌توان نتیجه گرفت که لوله‌های با شیب کمتر، دارای اهمیت بیشتر هستند (Salman and Salem, 2011). در تحقیق حاضر، نحوه امتیازدهی به این شاخص مطابق جدول ۴ خواهد بود.

لازم به ذکر است نظرات متفاوتی در مورد تاثیر قطر در روند فرسایش و زوال لوله وجود دارد. برخی محققان ادعا می‌کنند قطر لوله در فرسایش و خراب شدن لوله تأثیرگذار نیست. برخی تحقیقات نشان می‌دهد که لوله‌های با قطر کوچک‌تر به نسبت لوله‌های بزرگ‌تر بیشتر در معرض فرسایش و زوال هستند. در حالی که برخی دیگر عنوان می‌کنند لوله‌های بزرگ‌تر زودتر دچار فرسایش و خرابی می‌شوند زیرا سطح بزرگ‌تری در تماس با خاک و محیط بیرونی و همچنین فاضلاب دارند که احتمال بروز خوردگی و ایجاد شکاف و شکست در آن‌ها افزایش می‌یابد و همچنین وزن بیشتر آن‌ها می‌تواند باعث ایجاد شکستگی در آن‌ها شود.

به عنوان مثال، بر اساس نشریه ۱۱۸ سازمان برنامه و بودجه توصیه می‌شود پوشش خاک روی فاضلاب‌روهایی که در زیرخیابان‌های اصلی (با عرض بیش از ۲ باند عبوری وسایل نقلیه) قرار می‌گیرند حداقل ۱/۲ متر و برای فاضلاب‌روهایی که در معابر دیگر قرار می‌گیرند حداقل ۰/۹ متر باشد. و یا بر اساس توصیه‌ی نشریه ۳۰۳، حداقل عمق پوشش روی لوله به منظور جلوگیری از صدمه خوردن به لوله در اثر بارهای وارده حاصل از وسایل نقلیه و بارهای ضربه‌ای ۸۰ سانتیمتر است. از طرف دیگر، تأثیر این عامل بر لوله‌ها با جنس‌های متفاوت به یک صورت نیست و عملکرد لوله‌های بتن مسلح و یا چدنی با لوله‌های پلیمری در برابر این عامل متفاوت است (Davies et al., 2001; Ana et al., 2009; Baah et al., 2015). بر همین اساس در تحقیق حاضر، با استفاده از روش پیشنهادی توسط Le Gauffre et al. (2008)، شاخص ترکیبی عمق نصب و جنس لوله در قالب جدول ۳ ارائه می‌شود.

۲-۱-۳- سن لوله

در تحقیقات متنوعی سن لوله در مقایسه با عواملی نظیر جنس و طول لوله، به‌عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر زوال سازه‌ی فاضلاب‌روها معرفی شده است (Davies et al., 2001; Ana et al., 2009; Ariaratnam et al., 2001). بر این اساس، به‌طور کلی با افزایش سن لوله، شرایط سازه‌ی آن بدتر خواهد شد. (Ana et al., 2009) نشان دادند که گذشتن هر ۱۰ سال از عمر شبکه به میزان تقریبی ۱۴/۸٪ از مطلوبیت شرایط سازه‌ی شبکه بکاهد. در این تحقیق برای تعیین میزان مطلوبیت اجزا بر اساس سن آن‌ها، شاخصی بین ۱ (بسیار خوب) تا ۵ (بسیار بد) بر اساس جدول ۳ تخصیص داده می‌شود.

۲-۱-۴- طول لوله

فاضلاب‌روها با طول بزرگ‌تر، نقاط بیشتری در معرض آسیب دارند و چون اتصالات که یکی از علل اصلی آسیب و زوال فاضلاب‌روها است،

Table 3- Scoring method of components considering their burial depth and material

جدول ۳- نحوه نمره‌دهی به اجزا با توجه به عمق دفن و جنس آن‌ها

| Material performance | Burial depth (m) | | | | |
|----------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|
| | From 5 to 6 | From 3 to 5 and from 6 to 7 | From 2 to 3 and from 7 to 8 | From 8 to 9 | From 1 to 2 and more than 9 |
| Good | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| Fair | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| Average | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| Partly bad | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| Bad | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 |

Table 4- Scoring method of structural indices

جدول ۴- نحوه امتیازدهی به شاخص‌های سازه‌ای

| Parameter | Condition (Score) | | | | |
|---|-------------------|----------|-------------|---------|--------------|
| | Excellent (1) | Good (2) | Average (3) | Bad (4) | Very bad (5) |
| Age (year) | 0-40 | 40-80 | 80-100 | 100-120 | 120> |
| Length (percent of the length of the longest sewer) | 0-20 | 20-40 | 40-60 | 60-80 | 80-100 |
| Slope (%) | 20-25 | 15-20 | 10-15 | 5-10 | 0-5 |

مناسب تعریف شود. برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی پارامترهایی همچون سرعت جریان فاضلاب، رسوب‌گذاری، سرعت شست‌وشو، عمق جریان در لوله، شرایط فیزیکی سامانه و غیره می‌توانند مورد بررسی قرار بگیرند.

۲-۲-۱- شاخص هیدرولیکی پرشدگی

بهترین میزان پرشدگی در بازه بین ۵۰ تا ۸۰ درصد است (Tabesh and Madani, 2006). در این محدوده از پرشدگی لوله، بهترین سرعت جریان و بهترین عملکرد هیدرولیکی حاصل می‌شود. با افزایش پرشدگی از ۸۰ درصد به مرور و با نزدیک شدن به ۱ به علت احتمال تحت فشار قرار گرفتن لوله، عملکرد هیدرولیکی کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش پرشدگی از ۵۰ درصد به خاطر کم شدن سرعت و احتمال بروز رسوب‌گذاری، اندیس عملکرد کاهش می‌یابد (Tabesh and Madani, 2006). جدول ۵، نحوه نمره‌دهی به این شاخص را نمایش می‌دهد.

(Davies et al., 2001) معتقد است از آنجایی که در طراحی و اجرای لوله‌های با قطر بزرگ‌تر از افراد متخصص و ماهر استفاده و دقت خوبی به کار گرفته می‌شود احتمال خرابی در آن‌ها کمتر بوده، لذا در روند بازسازی و نوسازی لوله‌های کوچک‌تر اهمیت بیشتری دارند. دیدگاه دیگری نیز وجود دارد که عنوان می‌کند در لوله‌های بزرگ‌تر شبکه جمع‌آوری فاضلاب، حجم بیشتری فاضلاب در جریان است و بروز هرگونه ایراد و شکست در آن‌ها می‌تواند مقادیر بیشتری از فاضلاب را در محیط رها کرده و آسیب‌های جدی‌تری وارد کند. لذا با توجه به وجود نظرات متفاوت پیرامون اثرگذاری قطر لوله در روند فرسایش و زوال آن‌ها، در نظر گرفتن همزمان تعداد زیادی از پارامترها از جمله شیب و عمق لوله که خود به نوعی با قطر لوله مرتبط هستند، و همچنین تأثیر قطر در اثرات منفی بروز شکست، قطر لوله به صورت مستقل در نظر گرفته نشده و صرفاً لوله‌ها بر اساس قطرشان دسته‌بندی می‌شوند.

۲-۲-۲- شاخص‌های هیدرولیکی

۲-۲-۲- شاخص هیدرولیکی سرعت
بر اساس استانداردهای طراحی، بهترین بازه سرعت بین ۰/۷۵ تا ۴/۶ متر بر ثانیه است. کمترین سرعت قابل قبول ۰/۳ متر بر ثانیه است؛

عملکرد هیدرولیکی سامانه جمع‌آوری فاضلاب می‌تواند به صورت توانایی آن برای انتقال فاضلاب و آب‌های سطحی بدون بروز اضافه‌بار و نشست فاضلاب به آب‌ها و محیط اطراف در کنار حفظ شرایط سازه‌ای

Table 5- Scoring method of hydraulic indices

جدول ۵- نحوه نمره‌دهی به شاخص‌های هیدرولیکی

| Parameter | Condition (Score) | | | | |
|---|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------|
| | Excellent (1) | Good (2) | Average (3) | Bad (4) | Very bad (5) |
| Velocity (m/s) | 0.75<V<4.6 | 0.5<V<0.75 and 4.6<V<5.1 | 0.3<V<0.5 and 5.1<V<5.6 | 0.15<V<0.3 and 5.6<V<6.1 | V<0.15 |
| h/d (%) | 85< h/d<40 | 20< h/d<40 and 85< h/d<95 | 7.5< h/d<20 and 95< h/d<100 | 2.5< h/d<7.5 | h/d<2.5 |
| Leakage or penetration performance (in percentage of maximum value) | 0-20 | 20-40 | 40-60 | 60-80 | 80-100 |

بنابراین حداقل سرویس‌دهی قابل قبول در همین بازه مشاهده می‌شود (Tabesh and Madani, 2006). سرعت‌های بیشتر از ۶/۱ متر بر ثانیه می‌تواند موجب بروز سایش و خوردگی لوله‌ها شود و بنابراین مطلوب نیست. چگونگی تغییر اندیس عملکرد سرعت جریان با توجه به تغییرات سرعت مطابق (Tabesh and Madani, 2006) می‌باشد. جدول ۴، نحوه نمره‌دهی به این شاخص را نشان می‌دهد.

۳-۲-۲- شاخص نشت و نفوذ

وجود نشت در لوله‌های جمع‌آوری فاضلاب به صورت غیرمستقیم نشان‌دهنده وضعیت لوله است. اگر میزان نشت از یک لوله قابل توجه باشد یعنی لوله شرایط مطلوبی ندارد و می‌تواند دچار شکست و یا گرفتگی شود. نفوذ جریان به درون فاضلابرو به دلیل کاهش راندمان تصفیه‌خانه مضر است، درحالی‌که نشت فاضلاب به بیرون شبکه می‌تواند موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی شود (Cardoso et al., 2006). پس از تعیین عملکرد هیدرولیکی هر لوله بر اساس شاخص نشت با استفاده از روابط (۱) و (۲) (Cardoso et al., 2006)، برای نمره‌دهی به هر لوله از جدول ۵ استفاده می‌شود.

$$P_{\text{exf}} = \frac{Q_{\text{exf}}}{\text{sewer longitudinal area}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{day} * (\text{cm} * \text{Km})} \right) \quad (1)$$

$$P_{\text{inf}} = \frac{Q_{\text{inf}}}{\text{sewer longitudinal area}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{day} * (\text{cm} * \text{Km})} \right) \quad (2)$$

که در این روابط، Q_{exf} : حجم نشت فاضلاب، P_{exf} : شاخص نشت، Q_{inf} : حجم نفوذ فاضلاب و P_{inf} : شاخص نفوذ است. شاخص‌های هیدرولیکی مطابق جدول ۵ امتیاز می‌گیرند.

۳-۲-۳- شاخص‌های محیطی

شاخص‌های محیطی در این تحقیق به شرح زیر در نظر گرفته می‌شوند:

۳-۳-۱- بار ترافیکی معابر

با توجه به بار دینامیکی عبور هر خودرو از سطح خیابان، در ارائه برنامه‌های بازسازی و نوسازی شبکه فاضلاب و برای ارائه اولویت‌بندی بازرسی، حجم ترافیک راه‌ها برای لوله‌ها اهمیت دارد. لازم به ذکر است منظور از قرارگیری در زیر راه، قرارگیری در حریم راه است که به فاصله ۳ متر از طرفین لوله در نظر گرفته می‌شود (Rossi, 2015). جدول ۶ نحوه نمره‌دهی به این شاخص را نشان می‌دهد.

۳-۳-۲- بو

بوی نامطبوع پدیده‌ای است که عمدتاً ناشی از تشکیل گاز سولفید هیدروژن است (Iran Ministry of Energy, 2017). سولفات موجود در جریان توسط باکتری‌ها در شرایط خاصی در فاضلاب به سولفید تبدیل می‌شود و یا حتی ممکن است سولفید در برخی فاضلاب‌های صنعتی وجود داشته باشد. H_2S محلول در جریان فاضلاب به گاز تبدیل شده و در داخل لوله پراکنده می‌شود (Ayoub et al., 2004). بنابراین شاخص بو نامطبوع نشانگری از تولید گاز سولفید در فاضلابرو است که این ماده می‌تواند لوله‌ها (به ویژه لوله‌های بتنی) را به شدت دچار خوردگی کند. برای تخمین میزان سولفید تولید شده، از رابطه (۳) استفاده می‌شود. این رابطه توسط Pomeroy (1990) توسعه داده شده و به منظور کنترل بو بکار رفته است (Iran Ministry of Energy, 2017):

$$Z = \frac{3 \times (\text{BOD}_5) \times (1.07)^{T-20}}{s^{0.5} Q^{0.33}} * \frac{p}{b} \quad (3)$$

که Z : بدون واحد و اندیس سولفید به وجود آمده، BOD_5 : اکسیژن بیولوژیکی برحسب گرم اکسیژن بر مترمکعب، s : شیب لوله، Q : میزان جریان برحسب لیتر بر ثانیه، p : سطح تر برحسب متر، b : عرض سطح جریان برحسب متر و T : دمای متوسط فاضلاب در گرم‌ترین فصل سال است. عدد Z بر اساس رابطه (۴) تفسیر می‌شود. جدول ۶ نحوه نمره‌دهی به این شاخص را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} Z < 5000 & \text{سولفید به ندرت تولید می‌شود} \\ 5000 < Z < 10000 & \text{بازه مرزی تولید سولفید} \\ Z > 10000 & \text{تولید سولفید} \end{aligned} \quad (4)$$

۳-۳-۳- کاربری اراضی اطراف

خرابی لوله‌هایی که در مجاورت ساختمان‌ها و مراکز حساس قرار دارند می‌تواند کاربری این مراکز را دچار اختلال کرده و نارضایتی بیشتری به وجود بیاورد. ازجمله این مراکز مهم می‌توان به مدارس و مراکز آموزشی، بیمارستان‌ها و مراکز درمانی، سازمان‌ها، ادارات و غیره اشاره کرد. برای امتیازدهی به شاخص‌های محیطی از جدول ۶ استفاده می‌شود.

۳-۴-۲- مدل زوال

ارزیابی شرایط شبکه از طریق بازرسی‌های چشمی (مانند ویدئومتری) بسیار گران‌قیمت و زمان‌بر بوده و ایرادات متعدد دیگری از قبیل بروز مقادیر قابل توجه خطا را نیز دارند (Roghani et al., 2019; Dirksen et al., 2013).

Table 6- Scoring method of environmental indices

جدول ۶- نحوه نمره‌دهی به شاخص‌های محیطی

| Parameter | Condition (Score) | | | | |
|--------------------------|--------------------|-----------------|--|----------------------------|----------------------------|
| | Excellent (1) | Good (2) | Average (3) | Bad (4) | Very bad (5) |
| Type of road | Not under the road | Alley | Main road grade 2 | Main road grade 1 | Freeway or highway |
| Z coefficient | Z < 5000 | 5000 < Z < 7500 | 7500 < Z < 10000 | 10000 < Z < 15000 | Z > 15000 |
| Land use around the pipe | Wasteland | Residential | Commercial, administrative and service | Industrial or governmental | Educational or therapeutic |

در نظر گرفته شده، محاسبه می‌شود. اگر متغیرهای مستقل در تعداد k گروه دسته‌بندی شوند، یکی از این دسته‌ها به‌عنوان گروه مرجع انتخاب می‌شود و مابقی k-1 دسته برای تولید k-1 معادله رگرسیونی با استفاده از رابطه (۵) استفاده می‌شوند (Menard, 2002):

$$\text{logit}(p) = \ln \left(\frac{\text{Pr Pr}(y = i | x_1, x_2, \dots, x_p)}{\text{Pr Pr}(y = k | x_1, x_2, \dots, x_p)} \right) \quad (5)$$

$$= \beta_i + \beta_{i1}x_1 + \beta_{i2}x_2 + \dots + \beta_{in}x_n$$

که i: نشان‌دهنده دسته متغیر وابسته، x_1, x_2, \dots, x_p : نشان‌دهنده متغیرهای وابسته، β_i : نشان‌دهنده عرض از مبدأ دسته i و $\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{in}$: به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب رگرسیونی تعریف‌شده برای متغیرهای مستقل x_1, x_2, \dots, x_p در دسته i هستند. در رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای، احتمال عضویت سری داده در هر گروه نسبت به احتمال عضویت آن در گروه مرجع محاسبه می‌شود. از آنجایی که مقادیر ضرایب رگرسیونی برای هر یک از این مقایسه‌ها متفاوت است، لذا می‌توان مقدار احتمال عضویت هر سری داده در دسته i را برحسب احتمال عضویت آن در دسته مرجع با کمک رابطه (۶) محاسبه کرد:

$$\text{Pr}(y = i | x_1, x_2, \dots, x_p) = \text{Pr}_i(x),$$

$$\text{Pr}_i(x) = \text{Pr}_k(x) * \exp(\beta_i + \beta_{i1}x_1 + \beta_{i2}x_2 + \dots + \beta_{in}x_n) \quad (6)$$

که k: نشان دسته‌ی مرجع می‌باشد. مطابق رابطه (۷) مجموع احتمالات عضویت سری داده در دسته‌ها برابر یک است و نهایتاً احتمال مرتبط با عضویت در هر دسته با استفاده از روابط (۸) و (۹) قابل محاسبه است:

$$\text{Pr}_1(x) + \text{Pr}_2(x) + \dots + \text{Pr}_k(x) = 1 \quad (7)$$

$$\text{Pr}_i(x) = \frac{\exp(\beta_i + \beta_{i1}x_1 + \beta_{i2}x_2 + \dots + \beta_{in}x_n)}{1 + \sum_{j=1}^{k-1} \exp(\beta_j + \beta_{j1}x_1 + \beta_{j2}x_2 + \dots + \beta_{jn}x_n)}, \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, k - 1$$

$$\text{Pr}_k(x) = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^{k-1} \exp(\beta_j + \beta_{j1}x_1 + \beta_{j2}x_2 + \dots + \beta_{jn}x_n)}, \quad (9)$$

$$i = k$$

برای پیش‌بینی تغییرات وضعیت لوله‌ها در آینده و بررسی احتمال بروز شکست در آن‌ها با استفاده از نقش عوامل ذکر شده، مدل‌های زوال توسعه داده شده‌اند. در این زمینه می‌توان به تحقیقات (Chughtai and Zayed (2008) و Ana et al. (2009) اشاره کرد. به عبارت دیگر، مدل‌های زوال برای پیش‌بینی وضعیت فاضلاب‌روهای که پایش نشده‌اند، بر اساس وضعیت فاضلاب‌روهایی که پایش شده‌اند، کاربرد دارد. (Salman and Salem (2011 خلاصه‌ای از مدل‌های مورد استفاده در مدل‌سازی فرآیند زوال فاضلاب‌روها را ارائه دادند و عنوان کردند که استفاده از مدل‌های زوال رگرسیون لجستیک، از میان مدل‌های تکی مقطعی، مدلی کاملاً توجیه شده است. در ادامه به معرفی این مدل پرداخته می‌شود.

۲-۴-۱- رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای

رگرسیون لجستیک یکی از تکنیک‌های کاربردی برای تحلیل داده‌های طبقه‌بندی شده است و قابلیت کاربرد در حوزه‌های مختلفی را دارد (مانند طرح‌های مدیریت آب (Taheri et al., 2019)). این مدل یک مفهوم ساده است که یک پیش‌بینی مستقیم از احتمال شکست لوله فراهم می‌کند و می‌تواند برای تحلیل ریسک نیز مورد استفاده قرار گیرد. این نوع از مدل‌ها، مفهوم فرآیند زوال را بهتر منتقل می‌کنند؛ چرا که فاکتورهای زوال به صورت مستقیم به وضعیت فاضلاب‌رو ارتباط داده می‌شود (Ana and Bauwens, 2010). رگرسیون لجستیک یک مدل آماری رگرسیونی برای متغیرهای دوسویی (عموماً به صورت صفر و ۱ یا صحیح و غلط) است (Boslaugh, 2012). در مدل‌سازی زوال زیرساخت، متغیر دوسویه وابسته می‌تواند تحت عنوان "شکست سازه‌ای" در برابر "عدم شکست سازه‌ای" عنوان شود. متغیرهای وابسته می‌توانند از نوع متغیرهای عددی و یا متغیرهای دسته‌ای باشند که نشان‌دهنده عواملی هستند که تصور می‌شود در روند زوال اجزا تأثیرگذار هستند. در رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای در واقع چندین بار رگرسیون لجستیک حل می‌شود و هر بار احتمال حضور اجزا در یکی از دسته‌های

$$\text{Log Likelihood} = \text{Log} \left[\prod_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^k \pi_i(x_i)^{y_{ij}} \right] \right] \quad (12)$$

$$x^2 = -2\text{Loglikelihood}(\text{Model}) - 2\text{Loglikelihood}(\text{BaseModel}) \quad (13)$$

که π_i : نشان‌دهنده احتمال قرارگیری عضو در دسته i ام است. $y_j = y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jp}$, $j=1, 2, \dots, n$ که اگر پاسخ در گروه i باشد، $y_{ji} = 1$ و در غیر اینصورت، $y_{ji} = 0$ است. مقدار به‌دست‌آمده از رابطه (۸) پس از سنجش در توزیع کای-دو، مقدار p -value را به‌دست می‌دهد که نشان‌دهنده احتمال غلط بودن فرض اولیه یا به عبارتی، کارآمد بودن مدل است. حداکثر مقادیر قابل قبول برای این احتمال با توجه به ماهیت تحقیق و مدل‌های متنوع، مختلف است. برای مثال Menard (2002) به‌صورت عمومی مقادیر 0.05 یا 0.01 را برای p -value قابل قبول معرفی می‌کند. (Salman and Salem, 2011) نیز مقدار قابل قبول را وابسته به دقت مورد نظر پژوهشگر برای توسعه مدل می‌داند. با توجه به مطالب عنوان‌شده، مقدار 0.01 در این تحقیق انتخاب می‌شود.

ب- کارآمدی عوامل: برای آنکه میزان تأثیرگذاری هر یک از عوامل در نظر گرفته شده در خروجی تخمین زده شود، دو راه وجود دارد. یک راه، مشابه استفاده از روش کارآمدی مدل است که در آن برای آزمایش اثرگذاری هر عامل، یک‌بار آن عامل را حذف کرده و ضریب β متناظر با آن، صفر در نظر گرفته می‌شود و بار دیگر با در نظر گرفتن عامل، مدل اجرا می‌شود و نتایج دو حالت با هم مقایسه می‌شوند. با مقایسه اختلاف به کمک توزیع کای-دو، می‌توان اثرگذاری هر عامل را به‌دست آورد. درجه آزادی که باید در بالا در نظر گرفت برابر با درجه آزادی عامل حذف شده است. روش دوم، محاسبه والد آماری^۳ است که از طریق رابطه (۱۴) به‌دست می‌آید.

$$w_j = \left[\frac{\beta_j}{\text{std. error}(\beta_j)} \right]^2 \quad (14)$$

که $\text{std. error}(\beta_j)$: نشان‌دهنده خطای استاندارد متناظر با ضریب رگرسیونی عامل مورد نظر (β_j) است.

ج- نیکویی برازش: یک معیار مناسب برای تعیین نیکویی برازش، نسبت انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی (ضریب تعیین^۴) است. روش‌های متنوعی برای محاسبه ضریب تعیین R^2 در رگرسیون لجستیک وجود دارند. استفاده از دو روش برای محاسبه ضریب تعیین رگرسیون لجستیک کاربرد بیشتری دارد و در نرم‌افزارهای آماری قابل محاسبه است. روش اول، رابطه McFadden (1974) است که رابطه (۱۵) نحوه محاسبه آن را نشان می‌دهد:

از آنجا که معمولاً آیین‌نامه‌ها ۵ حالت مختلف را برای متغیر وابسته (شرایط داخلی لوله) در نظر می‌گیرند، چهار معادله رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای تشکیل می‌شود و ضرایب این معادلات به‌وسیله تخمین حداکثر درستی (MLE) محاسبه می‌شود. فرم کلی این معادلات به صورت رابطه (۱۰) خواهد بود:

$$\frac{\text{PR}(\text{ICG} = j)}{\text{PR}(\text{ICG} = 5)} = \beta_{0j} + \beta_{j1}I_{age} + \beta_{j2}I_{len} + \beta_{j3}I_{slp} + \beta_{j4}I_{cdemat} \quad (10)$$

که $j = 1, 2, 3, 4$ نشان‌دهنده شرایط سازه‌ای اجزاء، β_0 : نشان‌دهنده عرض از مبدأ برای دسته j و $\beta_{j1}, \beta_{j2}, \beta_{j3}, \beta_{j4}$ ضرایب رگرسیونی تعریف‌شده برای متغیرهای مستقل $I_{slp}, I_{cdemat}, I_{age}$ و I_{len} در دسته j هستند.

۲-۴-۲- صحت‌سنجی مدل زوال

پس از به‌دست آمدن ضرایب رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای می‌توان وضعیت سازه‌ای اجزای مختلف را تخمین زد. به علاوه، صحت مدل از مقایسه وضعیت سازه‌ای پیش‌بینی‌شده به وسیله مدل و وضعیت سازه‌ای مشاهداتی موجود سنجیده می‌شود. بدین منظور باید در سه مرحله، نخست کارآمدی مدل و سپس کارآمدی شاخص‌ها در نظر گرفته شوند و در نهایت باید با تعیین نیکویی برازش از تطابق خروجی‌های مدل با داده‌های واقعی مطمئن شد.

الف- کارآمدی مدل: برای سنجش کارآمدی مدل رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای، از مقایسه لگاریتم درستی مدل و لگاریتم درستی مدل پایه که فقط آیتم عرض از مبدأ را دربر دارد، استفاده می‌شود. وقتی مقادیر لگاریتم درستی در -2 ضرب شود، کارآمدی آماری تفاضل بین دو مقدار درستی با استفاده از توزیع کای-دو^۲ قابل ارزیابی است. این روش برای ارزیابی دو مدل که یکی از آن‌ها درون دیگری قرار دارد مناسب است (Salman and Salem, 2011). لگاریتم درستی مدل پایه (فقط شامل عرض از مبدأ) با استفاده از رابطه (۱۱) بدست می‌آید:

$$\text{Loglikelihood}(\text{BaseModel}) = [n_1 \times \ln(p_1) + n_2 \times \ln(p_2) + \dots + n_k \times \ln(p_k)] \quad (11)$$

که n_1, n_2, \dots, n_k : نشان‌دهنده تعداد مشاهدات در هر دسته و p_1, p_2, \dots, p_k : نشان‌دهنده نسبت تعداد مشاهدات متناظر با هر دسته به کل مشاهدات است. لگاریتم درستی مدل نیز با استفاده از رابطه (۱۲) قابل محاسبه خواهد بود. پس از به‌دست آوردن اختلاف بین -2 برابر لگاریتم درستی مدل اولیه و لگاریتم مدل کلی، مقدار آن با توزیع کای-دو رابطه (۱۳) همراه می‌شود:

که K_{min} و K_{max} : ضریب حداکثر و حداقل جریان فاضلاب است. مقدار نشتاب و آب‌های نفوذی برای شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با توجه به فاکتورهای مختلف از ۰/۴ تا ۰/۶ لیتر بر ثانیه برای هر هکتار انتخاب می‌شود (Iran Ministry of Energy, 2017). از این‌رو در این تحقیق مقدار ۰/۵ لیتر بر ثانیه برای هر هکتار انتخاب شده است. با توجه به موارد فوق مدل هیدرولیکی توسعه داده شده و با استفاده از نتایج آن و جدول ۳، نمرات شاخص‌های هیدرولیکی تخصیص داده می‌شوند.

۲-۶- اولویت‌بندی بازرسی

وضعیت سازه‌های فاضلاب‌روها در موارد موجود از داده‌های مربوطه و در صورت فقدان، با کمک مدل زوال به‌دست آمده است و مقدار آن به عنوان شاخص کل سازه‌ای در نظر گرفته خواهد شد. در بخش شاخص‌های هیدرولیکی و محیطی با استفاده از خروجی‌های مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی و شرایط پیرامونی فاضلاب‌رو، پارامترهای مربوطه محاسبه می‌شوند و با توجه به جداول نمره‌دهی، به هر شاخص نمره متناسب با آن تخصیص داده می‌شود. میانگین شاخص‌های هیدرولیکی به عنوان شاخص هیدرولیکی کل و میانگین شاخص‌های محیطی به عنوان شاخص کل محیطی در نظر گرفته شده است. بر این اساس ابتدا در چند سناریو، اولویت‌بندی بر اساس اثر هر یک از شاخص‌ها ارائه می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که در هر پروژه، شاخص‌های تعریف شده اهمیت مخصوص به خود را دارد و این اهمیت در مقایسه با هم معنا پیدا می‌کند. از آن‌جا که اهمیت شاخص‌های تعریف شده در مقابل هم متفاوت است، با تخصیص وزن‌های مختلف به شاخص‌ها، سناریوهای مختلفی تعریف شده است. ضرایب هریک از شاخص‌ها در هر سناریو مطابق جدول ۷ انتخاب شده است.

برای تصمیم‌گیری نهایی و ارائه بهترین اولویت‌بندی بازرسی، لوله‌هایی با اولویت بالاتر در نظر گرفته می‌شوند که در تعداد بیشتری از سناریوهای ارائه شده، وضعیت بحرانی داشته باشند.

$$R^2_{McF} = 1 - \frac{\ln \text{Likelihood}(M_{full})}{\ln \text{Likelihood}(M_{Intercept})} \quad (15)$$

که M_{full} : مدل کامل و $M_{Intercept}$: مدل بدون متغیرهای مستقل هستند. در این روش، نسبت لگاریتم‌های درستی نشان‌دهنده میزان بهبود مدل کامل نسبت به مدل بدون متغیرهای مستقل است (در اینجا هر قدر کوچک‌تر باشد، بهبود بیشتر بوده). مقادیر درستی بین صفر تا ۱ قرار می‌گیرند، پس مقدار لگاریتم آن کمتر یا برابر صفر است. هرچه مقدار درستی به صفر نزدیک‌تر باشد، بزرگای لگاریتم آن بیشتر می‌شود. بنابراین مدل‌های با نتایج بهتر، نسبت‌های لگاریتم درستی کوچک‌تری دارند. روش دیگر محاسبه ضریب تعیین به روش Cox and Snell (1989) است که نحوه محاسبه آن در رابطه (۱۶) آورده شده است:

$$R^2_{c\&s} = 1 - \left[\frac{\text{Likelihood}(M_{Intercept})}{\text{Likelihood}(M_{Full})} \right]^{\frac{2}{N}} \quad (16)$$

که N : نشان‌دهنده تعداد داده‌های مشاهداتی است. نسبت لگاریتم‌های درستی نشان‌دهنده میزان بهبود مدل کامل نسبت به مدل بدون متغیرهای مستقل است (در اینجا هر قدر کوچک‌تر باشد، بهبود بیشتر بوده است). قابل توجه است که حد بالایی ضریب تعیین مقداری کمتر از ۱ است که این حد بالا به وسیله رابطه (۱۷) قابل محاسبه است:

$$\text{Upper Bound} = 1 - [\text{Likelihood}(M_{Intercept})]^{\frac{2}{N}} \quad (17)$$

۲-۵- مدل هیدرولیکی

در مورد شاخص‌های هیدرولیکی در شبکه فاضلاب، با توجه به عدم وجود داده ثبت شده در این منطقه، از شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از نرم‌افزار SewerGems v8i استفاده شده است. در صورت عدم وجود آمار قابل ملاحظه از میزان نوسان‌های فاضلاب، توصیه شده است برای استخراج ضریب حداکثر جریان از رابطه (۱۸) و برای تعیین ضریب حداقل جریان از رابطه (۱۹) استفاده شود (Iran Ministry of Energy, 2017):

$$K_{max} = \frac{5}{p^{0.167}} \quad (18)$$

$$K_{min} = 0.049 \left(\frac{P}{1000} \right)^{0.2} \quad (19)$$

Table 7- Indicator coefficients in prioritization scenarios for inspection

جدول ۷- ضرایب شاخص‌ها در سناریوهای اولویت‌بندی برای بازرسی

| index | Scenario | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| Structural | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| Hydraulic | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Environmental | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 |

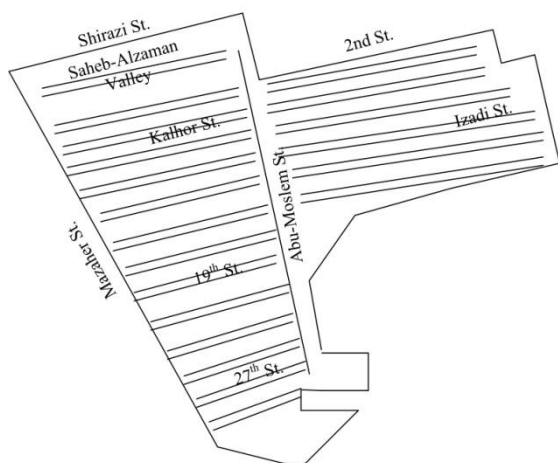


Fig. 2- The exact area of the network studied
شکل ۲- محدوده دقیق شبکه مورد مطالعه

برای این منظور و برای تشدید اثر بحرانی بودن یک لوله در هر سناریو، به جای در نظر گرفتن مقدار میانگین اولویت لوله در سناریوها، مجموع مربعات آن‌ها محاسبه می‌شود و اولویت بالاتر بازرسی با لوله‌هایی است که مجموع مربعات اولویت آن‌ها در سناریوهای مختلف، بیشتر باشد.

۳- مطالعه موردی

در این پژوهش داده‌های بخشی از شبکه جمع‌آوری فاضلاب منطقه چهار تهران، واقع در ناحیه افسریه به دلیل وجود داده‌های تفسیرشده ویدئومتری طبق ضابطه شماره ۶۷۷ و تخصیص نمره شرایط داخلی (ICG)^۵ برای برخی از لوله‌های آن، استفاده شده است. در شکل ۲، تصویر محدوده مورد مطالعه آورده شده است. در واقع شبکه مورد نظر، تنها پایلوت شبکه فاضلابی است که داده‌های ویدئومتری تفسیر شده آن به وسیله ضابطه شماره ۶۷۷ موجود است. در محدوده مورد مطالعه شبکه به صورت مجزا بوده و جنس لوله‌ها از پلی‌اتیلن است که عمر مفید این نوع لوله‌ها حدود ۵۰ سال تخمین زده می‌شود. عمر لوله‌های در حال بهره‌برداری شبکه مورد مطالعه بین ۵ تا ۲۰ سال، قطر لوله‌ها بین ۲۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر و طول لوله‌ها بین ۱۵ تا ۷۹ متر متغیر است. مساحت پایلوت مورد مطالعه قرار گرفته شده، ۸۴/۵ هکتار است. داده‌های تفسیر شده ویدئومتری و نمره ICG برای حدود یک پنجم لوله‌ها موجود است که با داشتن تنوع مناسب بین نمره‌های ۱ تا ۵ برای لوله‌ها می‌توان تاثیرگذاری پارامترهای مختلف در روند زوال اجزا و تصمیم‌گیری برای بازسازی و نوسازی آن‌ها را ارزیابی کرد. لازم به ذکر است داده‌های مربوط به رکوردهای شکست‌های قبلی و بازسازی‌ها و نوسازی‌های قبلی این شبکه موجود نیست.

۴- نتایج و تحلیل نتایج

با داشتن داده‌های فاضلاب‌روها و همچنین داده‌های تفسیرشده ویدئومتری این لوله‌ها که نشان‌دهنده وضعیت سازه‌ای آن‌ها هستند، ابتدا مقادیر نمرات مرتبط با هر شاخص برای هر لوله بدست آمده و سپس مدل زوال برای شبکه توسعه داده می‌شود. مطابق جدول ۲، عملکرد لوله‌های HDPE در برابر عوامل خوردنده داخلی و خارجی خوب و در برابر نیروهای قائم و دینامیکی، قابل قبول است. لذا برای نمره‌دهی به شاخص ترکیبی عمق کارگذاری و جنس لوله از سطر سوم جدول ۳ استفاده شده است. پس از محاسبه ضرایب رگرسیونی مربوط به هر معادله، والد آماری با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۴) محاسبه و نتایج در جدول ۸ ارائه شده‌اند.

Table 8- Logistic coefficients of the obtained equations
جدول ۸- ضرایب لجستیکی معادلات بدست آمده

| Logistic coefficients | Independent variable | | | | | |
|-----------------------|-------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|-------------------------------------|--------|
| | Intercept (β_0) | Age (β_1) | Length (β_2) | Slope (β_3) | Material-Burial depth (β_4) | |
| State 1 to state 5 | Regression coefficients | 75.539 | -12.568 | -5.628 | -5.113 | -2.205 |
| | Standard error | 591.017 | 295.372 | 1.649 | 2.447 | 1.489 |
| | Wald | 0.016 | 0.002 | 11.651 | 4.367 | 2.397 |
| State 2 to state 5 | Regression coefficients | 70.816 | -11.754 | -5.008 | -4.98 | -1.792 |
| | Standard error | 590.991 | 295.371 | 1.487 | 2.329 | 1.344 |
| | Wald | 0.014 | 0.002 | 11.341 | 4.574 | 1.778 |
| State 3 to state 5 | Regression coefficients | 16.524 | 2.176 | -2.333 | -1.929 | -1.379 |
| | Standard error | 929.981 | 646.972 | 0.913 | 1.297 | 1.008 |
| | Wald | 0 | 0 | 6.533 | 1.05 | 1.871 |
| State 4 to state 5 | Regression coefficients | 2.329 | 1.427 | -1.17 | 0.762 | -0.997 |
| | Standard error | 818.768 | 409.364 | 0.774 | 1.335 | 0.938 |
| | Wald | 0 | 0 | 2.287 | 0.325 | 1.13 |

(۱۵) و (۱۶) استفاده شده است. جدول ۱۲ نتایج این تست را نشان می‌دهد.

مقادیر قابل قبول برای ضرایب محاسبه شده با توجه به حوزه بررسی مطالعه متغیر است. در این تحقیق با در نظر گرفتن حدود عنوان شده در بخش ۲، مقادیر بالای ۰/۶۶ بعنوان خوب، بیشتر از ۰/۳۳ بعنوان متوسط و کمتر از ۰/۱۹ بعنوان ضعیف در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به مقدار ۰/۶۴ برای دسته کالیبراسیون و ۰/۵۷ برای دسته صحت‌سنجی که برای ضریب R^2_{MCF} محاسبه شده‌اند و ۰/۸۱ و ۰/۶۴ که برای ضریب $R^2_{C&S}$ محاسبه شده‌اند، عملکرد مدل راضی کننده به نظر می‌رسد. در مورد نتایج صحت‌سنجی باید اشاره شود نتایج خوب ضرایب تعیین R^2 نشان می‌دهد که پیش‌بینی مدل در مواردی که کلاس وضعیت سازه‌ای را دقیقاً پیش‌بینی نکرده است، بسیار نزدیک به واقعیت است (کلاس نزدیک به وضعیت اصلی را تشخیص داده است) و پاسخ‌ها دور از واقعیت نیستند.

۵- خلاصه و جمع‌بندی

مبنای بازرسی شبکه‌های فاضلاب در وضعیت موجود، بررسی و تحلیل شکستگی‌های فاضلابروها است و در این بازرسی‌ها سایر عوامل تأثیرگذار در زوال شبکه‌های فاضلاب لحاظ نمی‌شود. در این تحقیق برای لحاظ کردن وضعیت هیدرولیکی و محیط پیرامونی فاضلابروها، ۳ شاخص سازه‌ای، هیدرولیکی و محیطی پیشنهاد شد. به منظور بررسی نحوه‌ی استفاده از روش پیشنهادی، داده‌های بخشی از شبکه جمع‌آوری فاضلاب منطقه چهار تهران، واقع در ناحیه افسریه به عنوان مطالع موردی انتخاب شد. برای پیش‌بینی وضعیت سازه‌ای اجزای شبکه جمع‌آوری فاضلاب، مدل زوال بر مبنای رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای مورد استفاده قرار گرفت. لازم به یادآوری است که ضرایب مدل زوال برای هر مطالعه‌ی موردی باید با توجه به اطلاعات همان محل کالیبره شود. پس از آن با استفاده از ساخت مدل هیدرولیکی شبکه در محیط SewerGems، وضعیت شاخص هیدرولیکی شبکه تخمین زده شد. همچنین با استفاده از داده‌های محیط پیرامونی فاضلابروها، وضعیت شاخص‌های محیطی تخمین زده شدند. در نهایت با عنایت به این نکته که شاخص‌های سازه‌ای، هیدرولیکی و محیطی نسبت به هم دارای اهمیت متفاوتی هستند و این میزان نسبت به یکدیگر به سادگی قابل تشخیص نیست، با فرض ۱۳ سناریو، اقدام به اولویت‌بندی بازرسی فاضلابروها شد. با نگاهی بر درصد فاضلابروهایی که در کلاس‌های مختلف وضعیتی تحت هر یک از سناریوها قرار گرفته‌اند، مشخص می‌شود که در بیش از نیمی از سناریوها

اولویت بالاتر بازرسی با لوله‌ای است که مجموع مربعات اولویت آن‌ها در سناریوهای مختلف بیشتر باشد. جدول ۹ نشان‌دهنده اولویت‌بندی بازرسی لوله‌ها بر اساس مجموع مربعات مقدار اولویت سناریوهای مختلف است. خانه‌های قرمز این جدول مربوط به ۲۰ درصد بالایی لوله‌های اولویت‌دار، خانه‌های سبز مربوط به ۲۰ درصد پایینی این رتبه‌بندی و خانه‌های زرد فاضلابروهای دارای وضعیت حد واسط را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۳، درصد فاضلابروهایی که در کلاس‌های مختلف وضعیتی تحت هر یک از ۱۳ سناریو قرار گرفته‌اند، نمایش داده شده است. بر اساس این شکل در بیش از نیمی از سناریوها (سناریوهای ۱، ۲، ۴، ۷، ۸، ۹، ۱۱ و ۱۲) بیش از ۵۰ درصد از لوله‌ها در دو دسته‌ی نامطلوب آخر جای گرفته‌اند. در این سناریوها اهمیت نسبی گروه‌های سازه‌ای و هیدرولیکی بیش از گروه محیطی می‌باشد. در نتیجه می‌توان ادعا کرد که تأثیر دو گروه نام‌برده در اولویت‌بندی فاضلابروها چشمگیرتر از گروه سوم است و بهره‌برداران در تخمین پارامترهای دو گروه اول باید دقت ویژه‌ای داشته باشند.

برای بررسی حساسیت شاخص کل در مقابل تغییرات به وجودآمده در هر کدام از شاخص‌های سازه‌ای، هیدرولیکی و محیطی، بدین‌گونه عمل شده است که در حالت‌های جداگانه‌ای ضرایب هر کدام از شاخص‌ها به میزان ۲۵ و ۵۰ درصد تغییر داده می‌شود و تغییرات ایجادشده در اولویت‌بندی محاسبه می‌شود. نحوه محاسبه این تغییرات نیز بدین‌صورت است که مجموع طول لوله‌هایی که نمره شاخص مجموع آن‌ها ۴ یا ۵ شود، نسبت به مجموع طول لوله‌ها محاسبه می‌شود و با مقایسه آن‌ها، حساسیت شاخص کل نسبت به ضرایب شاخص‌ها تعیین می‌شود. جدول ۱۰، نتایج تحلیل حساسیت را نشان می‌دهد. طبق نتایج به‌دست‌آمده در مورد این مثال نمونه، شاخص سازه‌ای تأثیر زیادی بر شاخص کل و به‌طور کلی مجموع طول مورد بازدید دارد.

۴-۱- نتایج صحت‌سنجی مدل زوال

برای سنجش کارآمدی مدل رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای، از مقایسه لگاریتم درستی مدل و لگاریتم درستی مدل پایه که فقط آیتم عرض از مبدأ را در بر دارد، استفاده می‌شود. نتایج آزمون کارآمدی مدل در جدول ۱۱ ملاحظه می‌شود.

مقدار $0/0001$ محاسبه شده برای p -value نشان می‌دهد که تنها $0/01$ درصد احتمال دارد که فرض اولیه، یعنی کارآمدی مدل صادق نباشد که بسیار مناسب است. برای محاسبه نیکویی برازش، از روابط

Table 9- Prioritize inspection based on being critical in most scenarios

جدول ۹- اولویت‌بندی بازرسی بر اساس بحرانی بودن در تعداد بیشتری از سناریوها

| Priority | Pipe number | Sum of squares | Priority | Pipe number | Sum of squares | Priority | Pipe number | Sum of squares | Priority | Pipe number | Sum of squares | Priority | Pipe number | Sum of squares |
|----------|-------------|----------------|----------|-------------|----------------|----------|-------------|----------------|----------|-------------|----------------|----------|-------------|----------------|
| 1 | 283 | 282 | 60 | 266 | 201 | 119 | 55 | 175 | 178 | 81 | 140 | 237 | 119 | 117 |
| 2 | 126 | 255 | 61 | 267 | 201 | 120 | 58 | 175 | 179 | 90 | 140 | 238 | 138 | 117 |
| 3 | 288 | 255 | 62 | 268 | 201 | 121 | 67 | 175 | 180 | 91 | 140 | 239 | 140 | 117 |
| 4 | 295 | 250 | 63 | 280 | 201 | 122 | 68 | 175 | 181 | 93 | 140 | 240 | 160 | 117 |
| 5 | 26 | 244 | 64 | 287 | 201 | 123 | 89 | 175 | 182 | 94 | 140 | 241 | 195 | 117 |
| 6 | 27 | 244 | 65 | 292 | 201 | 124 | 130 | 175 | 183 | 99 | 140 | 242 | 12 | 112 |
| 7 | 282 | 244 | 66 | 238 | 200 | 125 | 131 | 175 | 184 | 100 | 140 | 243 | 14 | 112 |
| 8 | 284 | 241 | 67 | 276 | 200 | 126 | 171 | 175 | 185 | 103 | 140 | 244 | 20 | 112 |
| 9 | 293 | 241 | 68 | 2 | 196 | 127 | 173 | 175 | 186 | 104 | 140 | 245 | 72 | 112 |
| 10 | 294 | 241 | 69 | 105 | 196 | 128 | 185 | 175 | 187 | 110 | 140 | 246 | 92 | 112 |
| 11 | 191 | 237 | 70 | 116 | 196 | 129 | 186 | 175 | 188 | 111 | 140 | 247 | 96 | 112 |
| 12 | 36 | 228 | 71 | 158 | 196 | 130 | 236 | 175 | 189 | 114 | 140 | 248 | 101 | 112 |
| 13 | 40 | 226 | 72 | 34 | 194 | 131 | 242 | 175 | 190 | 115 | 140 | 249 | 102 | 112 |
| 14 | 38 | 219 | 73 | 35 | 194 | 132 | 247 | 175 | 191 | 117 | 140 | 250 | 112 | 112 |
| 15 | 43 | 219 | 74 | 39 | 194 | 133 | 263 | 175 | 192 | 118 | 140 | 251 | 113 | 112 |
| 16 | 63 | 219 | 75 | 65 | 194 | 134 | 277 | 175 | 193 | 121 | 140 | 252 | 120 | 112 |
| 17 | 168 | 219 | 76 | 66 | 194 | 135 | 33 | 173 | 194 | 122 | 140 | 253 | 123 | 112 |
| 18 | 169 | 219 | 77 | 87 | 194 | 136 | 60 | 173 | 195 | 124 | 140 | 254 | 125 | 112 |
| 19 | 189 | 219 | 78 | 106 | 194 | 137 | 73 | 173 | 196 | 132 | 140 | 255 | 135 | 112 |
| 20 | 3 | 212 | 79 | 127 | 194 | 138 | 98 | 173 | 197 | 133 | 140 | 256 | 143 | 112 |
| 21 | 41 | 212 | 80 | 128 | 194 | 139 | 139 | 173 | 198 | 136 | 140 | 257 | 145 | 112 |
| 22 | 59 | 212 | 81 | 149 | 194 | 140 | 141 | 173 | 199 | 137 | 140 | 258 | 147 | 112 |
| 23 | 108 | 212 | 82 | 150 | 194 | 141 | 183 | 173 | 200 | 144 | 140 | 259 | 163 | 112 |
| 24 | 27 | 210 | 83 | 151 | 194 | 142 | 184 | 173 | 201 | 146 | 140 | 260 | 194 | 112 |
| 25 | 29 | 208 | 84 | 203 | 194 | 143 | 190 | 173 | 202 | 154 | 140 | 261 | 196 | 112 |
| 26 | 30 | 208 | 85 | 235 | 194 | 144 | 206 | 173 | 203 | 156 | 140 | 262 | 199 | 112 |
| 27 | 214 | 208 | 86 | 269 | 194 | 145 | 207 | 173 | 204 | 157 | 140 | 263 | 209 | 112 |
| 28 | 272 | 208 | 87 | 270 | 194 | 146 | 229 | 173 | 205 | 165 | 140 | 264 | 212 | 112 |
| 29 | 47 | 207 | 88 | 289 | 194 | 147 | 51 | 168 | 206 | 175 | 140 | 265 | 220 | 112 |
| 30 | 88 | 207 | 89 | 240 | 193 | 148 | 57 | 168 | 207 | 177 | 140 | 266 | 223 | 112 |
| 31 | 152 | 207 | 90 | 286 | 193 | 149 | 174 | 168 | 208 | 178 | 140 | 267 | 224 | 112 |
| 32 | 172 | 207 | 91 | 162 | 189 | 150 | 5 | 166 | 209 | 179 | 140 | 268 | 225 | 112 |
| 33 | 217 | 207 | 92 | 1 | 187 | 151 | 181 | 166 | 210 | 187 | 140 | 269 | 226 | 112 |
| 34 | 234 | 207 | 93 | 4 | 187 | 152 | 244 | 161 | 211 | 193 | 140 | 270 | 290 | 112 |
| 35 | 248 | 207 | 94 | 24 | 187 | 153 | 245 | 161 | 212 | 197 | 140 | 271 | 46 | 109 |
| 36 | 261 | 207 | 95 | 37 | 187 | 154 | 6 | 159 | 213 | 200 | 140 | 272 | 109 | 109 |
| 37 | 275 | 207 | 96 | 52 | 187 | 155 | 23 | 159 | 214 | 208 | 140 | 273 | 231 | 109 |
| 38 | 278 | 207 | 97 | 159 | 187 | 156 | 61 | 159 | 215 | 210 | 140 | 274 | 232 | 109 |
| 39 | 279 | 207 | 98 | 180 | 187 | 157 | 161 | 159 | 216 | 211 | 140 | 275 | 249 | 109 |
| 40 | 281 | 207 | 99 | 192 | 187 | 158 | 164 | 159 | 217 | 213 | 140 | 276 | 250 | 109 |
| 41 | 285 | 207 | 100 | 205 | 187 | 159 | 237 | 154 | 218 | 239 | 140 | 277 | 251 | 109 |
| 42 | 25 | 201 | 101 | 218 | 187 | 160 | 246 | 154 | 219 | 243 | 140 | 278 | 256 | 109 |
| 43 | 31 | 201 | 102 | 271 | 187 | 161 | 254 | 154 | 220 | 255 | 140 | 279 | 257 | 109 |
| 44 | 32 | 201 | 103 | 170 | 182 | 162 | 221 | 153 | 221 | 42 | 134 | 280 | 260 | 109 |
| 45 | 64 | 201 | 104 | 74 | 177 | 163 | 7 | 145 | 222 | 148 | 134 | 281 | 262 | 109 |
| 46 | 84 | 201 | 105 | 75 | 177 | 164 | 10 | 145 | 223 | 252 | 134 | 282 | 45 | 106 |
| 47 | 85 | 201 | 106 | 76 | 177 | 165 | 56 | 145 | 224 | 8 | 133 | 283 | 18 | 102 |
| 48 | 86 | 201 | 107 | 83 | 177 | 166 | 129 | 145 | 225 | 13 | 133 | 284 | 21 | 102 |
| 49 | 182 | 201 | 108 | 97 | 177 | 167 | 215 | 145 | 226 | 219 | 133 | 285 | 70 | 102 |
| 50 | 201 | 201 | 109 | 142 | 177 | 168 | 296 | 145 | 227 | 222 | 133 | 286 | 82 | 102 |
| 51 | 202 | 201 | 110 | 155 | 177 | 169 | 22 | 140 | 228 | 291 | 133 | 287 | 134 | 102 |
| 52 | 204 | 201 | 111 | 166 | 177 | 170 | 49 | 140 | 229 | 107 | 126 | 288 | 176 | 102 |
| 53 | 227 | 201 | 112 | 167 | 177 | 171 | 62 | 140 | 230 | 153 | 126 | 289 | 15 | 92 |
| 54 | 228 | 201 | 113 | 198 | 177 | 172 | 69 | 140 | 231 | 188 | 126 | 290 | 16 | 92 |
| 55 | 230 | 201 | 114 | 9 | 175 | 173 | 71 | 140 | 232 | 253 | 126 | 291 | 258 | 91 |
| 56 | 233 | 201 | 115 | 48 | 175 | 174 | 77 | 140 | 233 | 216 | 121 | 292 | 259 | 91 |
| 57 | 241 | 201 | 116 | 50 | 175 | 175 | 78 | 140 | 234 | 44 | 119 | 293 | 17 | 59 |
| 58 | 264 | 201 | 117 | 53 | 175 | 176 | 79 | 140 | 235 | 11 | 117 | | | |
| 59 | 265 | 201 | 118 | 54 | 175 | 177 | 80 | 140 | 236 | 95 | 117 | | | |

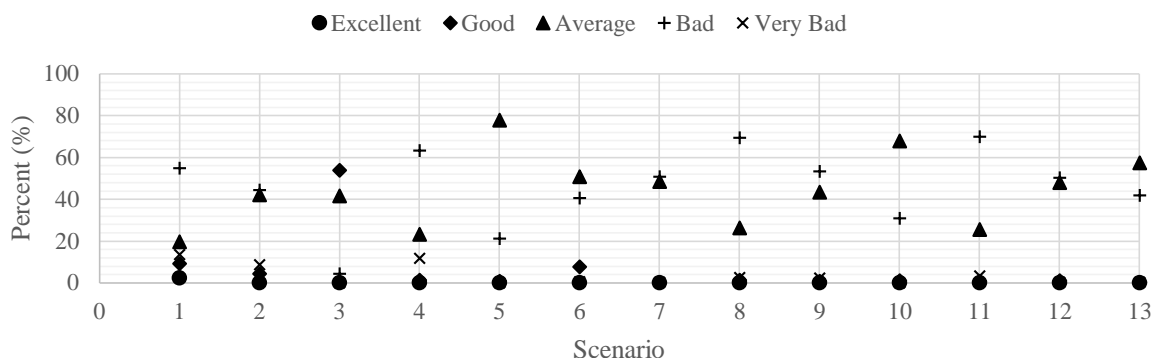


Fig. 3- Trend of sewers conditions in all scenarios
 شکل ۳- روند تغییرات وضعیت لوله‌ها در تمامی سناریوها

Table 10- Sensitivity analysis on the significant coefficients of the indices

جدول ۱۰- تحلیل حساسیت بر روی ضرایب اهمیت شاخص‌ها

| Analysis step | Structural index | Hydraulic index | Environmental index | Total inspection length (m) | Percentage of changes in inspection length relative to step zero (%) |
|---------------|------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|--|
| 0 | 1 | 1 | 1 | 8182.54 | 0 |
| 1 | 1+25% | 1 | 1 | 10738.38 | 31.2 |
| 2 | 1 | 1+25% | 1 | 8492.19 | 3.8 |
| 3 | 1 | 1 | 1+25% | 8095.11 | -1.1 |
| 4 | 1+50% | 1 | 1 | 11352.61 | 38.7 |
| 5 | 1 | 1+50% | 1 | 8543.44 | 4.4 |
| 6 | 1 | 1 | 1+50% | 7339.92 | -10.3 |

Table 11- Results of Regression Model Efficiency Test

جدول ۱۱- نتایج آزمون کارآمدی مدل رگرسیون

| Model | Validity test | | | |
|------------------------------|-------------------|----------|--------------------|---------|
| | -2 Log Likelihood | χ_2 | Degrees of freedom | p-value |
| Without independent variable | 149.65 | | | |
| Final | 73.12 | 76.53 | 16 | 0.0001 |

Table 12- Goodness of fit test results of deterioration model

جدول ۱۲- نتایج آزمون نیکویی برازش مدل زوال

| | R^2_{McF} | Upper limit | Lower limit | $R^2_{C&S}$ | Upper limit | Lower limit |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Calibration category | 0.64 | 1 | 0 | 0.81 | 0.92 | 0 |
| Verification category | 0.57 | 1 | 0 | 0.64 | 0.78 | 0 |

شاخص سازه‌ای اثرگذارترین شاخص در برنامه اولویت‌بندی شبکه معرفی شده است و در تعیین ضریب این شاخص در زمان بهره‌برداری شبکه، باید دقت فراوانی شود. در پژوهش حاضر به دلیل نبود اطلاعات دقیق از نوع آسیب‌های فاضلاب‌روها و شدت آن‌ها، از بررسی آنان صرف‌نظر شد. پیشنهاد می‌شود در تحقیق‌های آتی این موارد نیز مورد مطالعه قرار گیرند چرا که انتخاب روش مناسب بازرسی و بازسازی ارتباط تنگاتنگی با آنان دارد.

(سناریوهای ۱، ۲، ۴، ۷، ۸، ۹، ۱۱ و ۱۲) بیش از ۵۰ درصد از لوله‌ها در دو دسته‌ی نامطلوب آخر جای گرفته‌اند. در این سناریوها اهمیت نسبی گروه‌های سازه‌ای و هیدرولیکی بیش از گروه محیطی می‌باشد. در نتیجه می‌توان ادعا کرد که در منطقه مورد مطالعه تأثیر دو گروه نام‌برده در اولویت‌بندی فاضلاب‌روها چشمگیرتر از گروه سوم است و بهره‌برداران در تخمین پارامترهای دو گروه اول باید دقت ویژه‌ای داشته باشند. همچنین، آنالیز حساسیت ضرایب شاخص‌ها نشان داد که

- of the APUSS project. *Water Practice and Technology* 1(1):184-196
- Cox DR, Snell EJ (1989) *Analysis of binary data*. Vol 32 Boca Raton: CRC Press
- Chughtai F, Zayed T (2008) Infrastructure condition prediction models for sustainable sewer pipelines. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, American Society of Civil Engineers 22(5):333-341
- Davies JP, Clarke BA, Whiter JT, Cunningham RJ (2001) Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes. *Urban Water* 3(1-2):73-89
- Dirksen J, Clemens FH, Korving H, Cherqui F, Le Gauffre P, Ertl T, Plihal H, Müller K, Snaterse CT (2013) The consistency of visual sewer inspection data. *Structure and Infrastructure Engineering* 9(3):214-28
- Duchesne S, Beardsell G, Villeneuve JP, Toumbou B, Bouchard K (2013) A survival analysis model for sewer pipe structural deterioration. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 28(2):146-60
- Elsawah H, Guerrero M, and Moselhi O (2014) Decision support model for integrated intervention plans of municipal infrastructure. In *ICSI 2014: Creating Infrastructure for a Sustainable World*, pp. 1039-1050
- EPA (2000) *Wastewater technology fact sheet: Pipe construction and materials*. United States Environmental Protection Agency, Washington, USA
- Halfawy MR, Dridi L, Baker S (2008) Integrated decision support system for optimal renewal planning of sewer networks. *Journal of Computing in Civil Engineering* 22(6):360-72
- Hawari A, Alkadour F, Elmasry M, Zayed T (2016) Simulation-based condition assessment model for sewer pipelines. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 31(1):04016066
- InfraGuide (2004) *Assessment and evaluation of storm and wastewater collection systems*. DMIP Best Practice, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada
- Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization (2005) *General technical specification for urban water pipelines and sewage systems- Standard No. 303*. Deputy for Technical Affairs, Iran (In Persian)
- Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization (2015) *Manual of CCTV operations in sewer networks- Standard No. 677*. Department of

- 1- Individual Section-Level Models
- 2- Chi-Square Distribution
- 3- Wald Statistic
- 4- R^2
- 5- Internal Condition Grade

۶- مراجع

- Ana EV, Bauwens W (2010) Modeling the structural deterioration of urban drainage pipes: the state-of-the-art in statistical methods. *Urban Water Journal* 7(1):47-59
- Ana E, Bauwens W, Pessemier M, Thoeye C, Smolders S, Boonen I, De Gueldre G (2009) An investigation of the factors influencing sewer structural deterioration. *Urban Water Journal* 6(4):303-312
- Anbari MJ, Tabesh M, Roozbahani A (2017) Risk assessment model to prioritize sewer pipes inspection in wastewater collection networks. *Journal of Environmental Management* 190:91-101
- Ariaratnam ST, El-Assaly A, Yang Y (2001) Assessment of infrastructure inspection needs using logistic models. *Journal of Infrastructure Systems* 7(4):160-165
- Ayoub GM, Azar N, Fadel ME, Hamad B (2004) Assessment of hydrogen sulphide corrosion of cementitious sewer pipes: A case study. *Urban Water Journal* 1(1):39-53
- Baah K, Dubey B, Harvey R, McBean E (2015) A risk-based approach to sanitary sewer pipe asset management. *Science of the Total Environment* 505:1011-1017
- Bashash P, Jalili Ghazizadeh, M R, Salehi S, Shurian M (2017) A multi-criteria decision-making model for the rehabilitation of wastewater collection networks. 3rd International Conference on Advances in Civil Engineering, Tehran, Iran
- Boslaugh S (2012) *Statistics in a nutshell: A desktop quick reference*. 2nd Edition, O'REILLY Media, United States of America
- Caradot N, Sonnenberg H, Kropp I, Ringe A, Denhez S, Hartmann A, Rouault P (2017) The relevance of sewer deterioration modelling to support asset management strategies. *Urban Water Journal* 14(10):1007-1015
- Cardoso A, Prigiobbe V, Giulianelli M, Baer E, Bénédittis JD, Coelho ST (2006) Assessing the impact of infiltration and exfiltration in sewer systems using performance indicators: Case studies

- Roghani B (2020) Developing a risk-based multi-criteria decision making model for prioritizing sewer pipes for rehabilitation activities. PhD Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran
- Rossi II, Carmelo R (2015) Criticality and risk assessment for pipe rehabilitation in the city of Santa Barbara sewer system. Master thesis, California Polytechnic State University, USA
- Saaty TL (1980) The analytic hierarchy process. New York: McGraw Hill, Revised editions, Paperback (1996, 2000), Pittsburgh: RWS Publications
- Salman B (2010) Infrastructure management and deterioration risk assessment of wastewater collection systems. Doctoral Dissertation, University of Cincinnati
- Salman B, Salem O (2011) Risk assessment of wastewater collection lines using failure models and criticality ratings. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 3(3):68-76
- Selvakumar A, Tuccillo ME, Martel KD, Matthews JC, Feeney C (2013) Demonstration and evaluation of state-of-the-art wastewater collection systems condition assessment technologies. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 5(2):04013018
- Tabesh M, Madani S (2006) A performance indicator for wastewater collection systems. *Water Practice and Technology* 1(4)
- Taheri H, Malek Saeedi H, and Jalali M (2019) Factors affecting adoption of water management project for reclamation of lake Urmia by farmers in naghadeh township. *Iran-Water Resources Research* 15(2):265-277 (In Persian)
- Tran D H, Perera B C, and Ng A W M (2009) Comparison of structural deterioration models for stormwater drainage pipes. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 24(2):145-156
- Vittinghoff E, McCulloch CE (2007) Relaxing the rule of ten events per variable in logistic and Cox regression. *American Journal of Epidemiology* 165(6):710-718
- Vladeanu G J (2018) Wastewater pipe condition and deterioration modeling for risk-based decision making. Ph.D. Thesis, College of Engineering and Science Louisiana Tech University, USA
- Water Research Center (2004) Manual of Sewer Condition Classification (MSCC). 4th Edition, WRc, Wiltshire, England
- Technical and Execution Affairs, Ministry of Energy, Iran (In Persian)
- Islamic Republic of Iran Planning and Budget Organization Deputy of Technical and Infrastructure Development Affairs (2017) Guidelines for design of wastewater collection systems- Standard No. 118. Deputy of Technical and Infrastructure Development Affairs, Ministry of Energy, Iran (In Persian)
- Islamic Republic of Iran Vice Presidency For Strategic Planning and Supervision (2013) Design criteria of urban and rural water supply and distribution systems- Standard No. 117-3. Department of Technical Affairs, Ministry of Energy, Iran (In Persian)
- Kessili A, Benmamar S (2016) Prioritizing sewer rehabilitation projects using AHP-PROMETHEE II ranking method. *Water Science and Technology* 73(2):283-91
- Kleiner Y, Sadiq R, and Rajani B (2004) Modeling failure risk in buried pipes using fuzzy Markov deterioration process. In *Pipeline Engineering and Construction: What's on the Horizon?* (pp. 1-12)
- König A (2005) WP2 external corrosion model description, computer aided rehabilitation of sewer networks (Care-S). SINTEF Technology and Society, Trondheim, Norway
- Lashkari Zadeh J and Hoseini M (2016) Sewer pipe vulnerability ranking to develop a program for their maintaining and rehabilitation using the SAW method, 9th National Congress of Civil Engineering, Mashhad, Iran
- Le Gauffre P, Ibrahim M, Cherqui F (2008) Sewer asset management: fusion of performance indicators into decision criteria. *Performance Assessment of Urban Infrastructure Services*, Valencia, Spain
- McFadden D (1974) The measurement of urban travel demand. *Journal of Public Economics* 3(4):303-328
- Menard S (2002) *Applied logistic regression analysis*. 2nd Edition, SAGE Publications, London, UK
- Pomeroy R (1990) *The problem of hydrogen sulphide in sewers*. Clay Pipe Development Association, London, UK
- Roghani B, Cherqui F, Ahmadi M, Le Gauffre P, Tabesh M (2019) Dealing with uncertainty in sewer condition assessment: Impact on inspection programs. *Automation in Construction* 103:117-26, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.012>