اولویت‌بندی تعمیر لوله‌های شبکه‌های فاضلاب با رویکرد مدیریت دارایی (مطالعه موردی: شبکه فاضلاب منطقه دو شهر اصفهان)

پگاه حسینقلی[۱]، رامتین معینی*[۲]، محمدرضا زارع[۳]

[۱] کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان
[۲] دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران- حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان
[۳] استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران- حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان

دریافت: ۱۴۰۰/۵/۶، بازنگری: ۱۴۰۰/۹/۲۸، پذیرش:۱۴۰۰/۱۰/۱۸، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸

چکیده

در حالت کلی، یافتن نقاط بحرانی با استفاده از روش‌های مختلف پیش‌بینی و استفاده از رویکردهای پیشگیرانه برای بازسازی زیرساخت‌ها، باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. در این تحقیق با محاسبه هزینه‌های مستقیم، دو سناریوی "تعمیر بهنگام" و "تعمیر پس از گسترش خرابی" برای تعمیر لوله‌های شبکه فاضلاب پیشنهاد شده است. به‌منظور ارزیابی این دو سناریو از اطلاعات شبکه فاضلاب منطقه دو اصفهان و حوادث رخداده در سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ در این منطقه، به‌عنوان مطالعه موردی، استفاده شده است. بدین منظور، با توجه به شکست‌های پیش‌بینی‌شده در این منطقه، اولویت‌بندی تعمیرات لوله‌ها با محاسبه هزینه‌های مستقیم نوسازی آن‌ها تعیین و عملکرد دو سناریوی پیشنهادی، ارزیابی شده است. در این تحقیق از نتایج پیش‌بینی شکست لوله‌ها با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده شده است. نتایج نشان داد که هزینه تعمیر بهنگام (سناریوی اول) به‌علاوه هزینه ویدئومتری ((Closed- Circuit-Television (CCTV) لوله‌های آسیب‌دیده در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ به‌ترتیب ۳،۲۶۷،۶۹۱،۷۶۵ و ۲،۵۱۱،۸۷۱،۹۵۸ و ۱،۳۹۲،۶۷۵،۶۵۰ ریال و در سناریوی دوم به‌ترتیب برابر ۶۰،۹۷۶،۱۵۳،۷۹۶ و ۴۴،۵۴۱،۴۱۵،۰۱۶ و ۲۵،۳۰۹،۴۷۲،۲۶۲ ریال بود. همچنین، هزینه بازرسی بخش‌های آسیب‌دیده شبکه به‌روش ویدئومتری، در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ نیز به‌ترتیب ۲۸۱،۵۴۷،۸۵۰ و ۲۰۲،۶۳۰،۶۰۰ و ۱۱۲،۴۱۲،۶۰۰ ریال بود. مقایسه هزینه‌ها نشان‌دهنده آن است که با پیش‌بینی شکست لوله‌ها، مقادیر هزینه‌ها در سناریوی اول برای سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ به‌ترتیب ۹۴/۶ و ۹۴/۳ و ۹۴/۴ درصد نسبت به سناریوی دوم کاهش می‌یابد. همچنین در صورت پیش‌بینی شکست و حذف هزینه بازرسی در سناریوی اول، هزینه‌ها برای سال‌های ۱۳۹۴، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ به‌ترتیب ۸/۶۱، ۸/۰۶ و ۸/۰۷ درصد کاهش می‌یابد. به‌عبارت‌دیگر، بررسی نتایج نشان می‌دهد که با انجام تعمیرات بهنگام (سناریوی اول) از وقوع حوادث ناگهانی و خسارات ناشی از آن جلوگیری می‌شود و هزینه‌ها به شکل قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: مدیریت دارایی، شبکه جمع‌آوری فاضلاب، شکست، هزینه مستقیم، اولویت‌بندی تعمیر شبکه.

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های شهری، شبکه‌های فاضلاب هستند که بی‌توجهی نسبت به وضعیت آن‌ها باعث ایجاد حوادث ناگهانی و فاجعه‌بار می‌شود که هزینه‌های زیادی به‌همراه دارد. در این راستا با شناسایی دقیق و دوره‌ای نقاط بحرانی شبکه، می‌توان با حداقل هزینه و زمان، این نقاط را بازسازی و اصلاح نمود. این مورد از مهم‌ترین بخش‌های مدیریت دارایی شبکه فاضلاب است. در حالت کلی مدیریت دارایی به مجموعه‌ای از سیستم‌ها و فرایندهای روش‌مند برای نگهداری، به‌کارگیری و توسعه دارایی‌های یک نهاد، شرکت و یا گروه، اطلاق می‌گردد (ایران‌دوست و مرادنیا، ۱۳۹۴).

در این چارچوب عموماً روش‌های مهندسی، با تجربیات و تئوری‌های اقتصادی ترکیب می‌شوند و با تکمیل این فرایند مکانیزمی تعریف می‌شود که به‌صورت منظم و با روندی منطقی، در تصمیم‌گیری‌های آتی، به‌کار برده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، مدیریت دارایی چارچوبی را برای طراحی و پیاده‌سازی برنامه‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت مجموعه مشخص می‌نماید.

*نویسنده مسئول؛ رامتین معینی شماره تماس: ۰۳۱-۳۷۹۳۵۲۹۳

آدرس ایمیل: p.hoseingholi@trn.ui.ac.ir (پ. حسینقلی)، r.moeini@eng.ui.ac.ir (ر. معینی)، mr.zare@eng.ui.ac.ir (م. ر. زارع).

در حالت کلی، مدیریت دارایی شبکه فاضلاب بخش‌های مختلفی دارد که شامل رصد و ارزیابی وضعیت شبکه، پیش‌بینی شکست، پیش‌بینی تقاضا، ارائه راهکارهای مالی و یا بهسازی شبکه و درنهایت بررسی هزینه است. بررسی سوابق تحقیقاتی نشان می‌دهد که تحقیقات مختلفی در هر یک از این بخش‌ها برای شبکه فاضلاب انجام شده است که در ادامه به برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود.

نخستین بار Baur و Herz (۲۰۰۱) برنامه‌ای طراحی نمود که در آن از اطلاعات دریافتی از سیستم ویدئومتری (CCTV)[1] استفاده شد. در این تحقیق شرایط لوله از نظر میزان بحرانی بودن به شش دسته تقسیم شد که این تقسیم‌بندی حالت‌های مختلف ازجمله حالت بدون نیاز به بازرسی و تعمیرات تا حالتی که لوله تخریب شده و نیاز به تعمیرات سریع دارد را شامل شده است. همچنین با مقایسه هزینه روش‌های مختلف تعمیر و بازسازی به‌وسیله تحلیل هزینه‌ها، زمان بازسازی نیز تعیین شد (Bauwens، ۲۰۰۷).

Ariaratnam و همکاران (۲۰۰۱) یک مدل هزینه- سود به نام پریسم (PRISM)[2]، ارائه نمودند که در آن تحلیل هزینه‌های بازسازی انجام شده است. در مدل پیشنهادی، هزینه ساخت‌وساز در هر متر برای روش‌های مختلف بازسازی تجزیه‌وتحلیل شده است.

Mailhot و همکاران (۲۰۰۳) معیاری برای جایگزینی و تعمیر بهینه لوله‌ها، براساس یک تابع هزینه به‌منظور برآورد هزینه‌های آینده پیشنهاد نمودند. در این تحقیق، ابتدا تعداد شکست در واحد زمان و واحد طول لوله محاسبه و در انتها روشی برای تخمین زمان بهینه جایگزینی و تعمیر لوله‌ها پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی زمان مربوط به حداقل هزینه تعمیر و تعویض لوله‌ها نیز تعیین شد.

Joseph و Strauch (۲۰۰۴) مدیریت دارایی شبکه فاضلاب را با استفاده از ارزیابی وضعیت آن انجام دادند. در این تحقیق با توجه به گزارش‌ها و اطلاعات دریافتی از بازرسی‌ها، رتبه‌بندی و طبقه‌بندی شرایط شبکه فاضلاب انجام شده است. از اطلاعات به‌دست‌آمده به‌منظور توسعه یک طرح اولویت‌بندی برای جایگزینی و توان‌بخشی مرحله‌به‌مرحله شبکه استفاده شد.

Saegrov (۲۰۰۶) مدلی برای مدیریت بهتر شبکه فاضلاب پیشنهاد داد. هدف اصلی این مدل تعمیر و بازسازی مناسب بخش‌های مختلف شبکه در مناسب‌ترین زمان و به‌وسیله مناسب‌ترین تکنولوژی بود. در این تحقیق، یک ساختار برای بازسازی شبکه معرفی شد که براساس شاخص عملکردی مناسب و اولویت‌بندی محل بازسازی بود. همچنین در این تحقیق عملکرد سازه‌ای، هیدرولیکی شبکه در حال حاضر و آینده بررسی و ارزیابی شد. درنهایت روش بازسازی مناسب انتخاب و اجرای برنامه بازسازی و میزان موفقیت آن بررسی شد (Bauwens، ۲۰۰۷).

رمضانیانپور و همکاران (۱۳۸۸) چارچوبی را پیشنهاد نمودند که شامل جمع‌آوری و تحلیل داده، مدل‌سازی و آنالیز تصمیم بود. در این مدل در بخش جمع‌آوری و آنالیز داده با توجه به بازرسی‌های انجام شده و نتایج بررسی‌های صورت گرفته می‌توان فاضلاب‌روها را به‌منظور انجام تعمیرات اولویت‌بندی نمود. همچنین در بخش آنالیز تصمیم، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، از بین روش‌های موجود مناسب‌ترین روش تعمیر انتخاب شد. در حالت کلی، با توجه به سطح خدمات قابل‌قبول برای مشترکین و بررسی عملکرد سیستم، شرایط نگهداری، بازرسی و تعمیرات بر مبنای محدودیت بودجه تعیین می‌شود.

در این راستا، Ugarelli و همکاران (۲۰۱۰) زمان بهینه جایگزینی لوله‌ها، براساس تعادل بین سرمایه‌گذاری و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را تعیین نمودند. در این تحقیق با انجام یک تجزیه‌وتحلیل اقتصادی، هزینه نگهداری لوله‌های تحت سرویس با هزینه جایگزینی و بازسازی آن مقایسه شد. بر این اساس، زمان مناسب برای احیا و بازسازی خطوط لوله در آینده تعیین شد. بازرسی و تعمیرات منظم شبکه فاضلاب به‌منظور جلوگیری از شکست، آلودگی محیط‌زیست و سرریز فاضلاب، کاملاً ضروری است. با این حال، تعمیر و بازسازی فاضلاب‌روها هزینه زیادی دارد درحالی‌که در بیشتر مواقع محدودیت بودجه نیز وجود دارد. در این راستا Yang و Su (۲۰۱۱) یک مدل بهینه‌ساز به‌منظور یافتن استراتژی توان‌بخشی و بازسازی و انتخاب جنس لوله جایگزین در شبکه فاضلاب با در نظر گرفتن محدودیت بودجه پیشنهاد نمودند. نتایج نشان داد که با استفاده از این مدل در شبکه فاضلاب شهر کائوسیونگ[3] تایوان، حدود ۲۰ درصد از هزینه‌های تعمیر و بازسازی کاهش می‌یابد.

Van Riel و همکاران (۲۰۱۴) امکان استفاده از اطلاعات در تصمیم‌گیری برای مدیریت دارایی سیستم فاضلاب را ارزیابی نمودند. هدف کلی این تحقیق، استفاده از اطلاعات موجود در تصمیم‌گیری برای جایگزینی سیستم فاضلاب بود. بررسی نتایج نشان داد که تصمیم‌گیری در مورد تعمیر بخش‌هایی از لوله و زمان‌های جایگزینی آن، نیازمند اطلاعاتی از قبیل کیفیت اجرای لوله، سن، فرونشست خاک، استراتژی مدیریت و بودجه در دسترس است.

Van Riel و همکاران (۲۰۱۵) در مورد تصمیم‌گیری جایگزینی لوله‌های فاضلاب به‌منظور انجام مدیریت دارایی و پیچیدگی این تصمیم‌گیری تحقیقاتی انجام دادند. در این تحقیق

1. Closed- Circuit-Television
2. Proactive Rehabilitative Sewer Infrastructure Management
3. Kaohsiung

از تکنیک سودمندی- تأثیر[4] به‌منظور تصمیم‌گیری در مورد جایگزینی ۱۵۰ لوله فاضلاب در کشور هلند استفاده شده است.

Marzouk و Osama (۲۰۱۷) یک مدل تصمیم‌گیری برای کمک به سازمان‌ها در انجام مدیریت دارایی زیرساخت‌ها پیشنهاد نمودند. روش پیشنهادی قادر به ارزیابی وضعیت دارایی‌های مربوط به سه نوع زیرساخت ازجمله، شبکه آب، شبکه فاضلاب و جاده‌ها بود. همچنین قادر به ارزیابی ریسک و تجزیه‌وتحلیل هزینه‌ها در چرخه عمر دارایی بود که به این منظور یک سیستم سلسله مراتبی خبره فازی[5] توسعه داده شد.

Greta و John (۲۰۱۹) مدلی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست-محیطی شکست لوله‌های فاضلاب ارائه نمودند. نتایج نشان داد که مهم‌ترین فاکتور ارزیابی شکست در دارایی‌ها، فاکتور هزینه است.

درنهایت، Guzmán و همکاران (۲۰۲۰) روشی مبتنی‌بر شبکه بیزین[6] برای اولویت‌بندی و انتخاب متغیرهای مؤثر در پیش‌بینی وضعیت ساختاری شبکه فاضلاب و روش‌های مدیریتی پیشگیرانه، ارائه دادند. بررسی نتایج نشان داد که تنها با در نظر گرفتن دو متغیر سن و قطر، پیش‌بینی مناسبی صورت می‌پذیرد. همچنین، با استفاده از مدل پیشنهادی، برای مدیریت دارایی شبکه فاضلاب و اولویت‌بندی آن‌ها نتایج قابل قبولی حاصل شده است.

با توجه به رشد روزافزون جمعیت و نیاز جامعه به سیستم جمع‌آوری فاضلاب، وجود این سیستم و عملکرد مناسب آن ضروری است. وقوع شکست در این سامانه باعث ایجاد پیامدهای متعددی ازجمله آلودگی اکوسیستم و محیط شهری و تحمیل هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و مسائل بهداشتی شده است. هرگونه سهل‌انگاری در زمینه اصلاح و تعمیر شبکه خسارات جبران‌ناپذیری را به‌همراه دارد (Wirahadikusumah و همکاران، ۱۹۹۸).

انتخاب روش مناسب و مصالح جایگزین تأثیر قابل‌توجهی بر روی هزینه‌ها دارد. در حالت کلی روش‌های اصلاح شبکه فاضلاب به سه گروه زیر دسته‌بندی شده است (Yang و Su، ۲۰۱۱):

۱) نوسازی[7]: جایگزینی یک لوله جدید به‌جای لوله قدیمی و یا به‌عبارت‌دیگر تعویض لوله معیوب را نوسازی می‌نامند.

۲) تعمیر[8]: عملیات تعمیر را می‌توان اقدامات لازم در رابطه با رفع آسیب‌های محدود و نقطه‌ای موجود جهت دستیابی به وضعیت موردنظر ذکر نمود.

۳) بازسازی[9]: منظور از بازسازی، مجموعه اقداماتی است که در راستای دستیابی به وضعیت مطلوب و موردنیاز فاضلاب‌روهای آسیب‌دیده انجام می‌شود.

در حالت کلی، دو روش ترانشه باز[10] و ترانشه بسته[11] به‌منظور انجام اقدامات اصلاحی شبکه وجود دارد که با توجه به شرایط و ضوابط انجام شده است. در زمان مشاهده عواملی همچون از بین رفتن پوشش حفاظتی، نمایان شدن ذرات درشت‌دانه جداره در لوله‌های بتنی، خوردگی، کاهش قطر، ترک، تغییر مقطع، صدمه به بدنه، وجود رسوبات راکد و یا هر عاملی که منجر به عدم انتقال صحیح فاضلاب شود، تعمیر، بازسازی یا جایگزینی لوله‌ها امری ضروری است (ایران‌دوست و مرادنیا، ۱۳۹۴).

در حالت کلی در روش ترانشه باز، زمین تا عمق قرارگیری لوله خاک‌برداری شده؛ لوله قدیمی بهسازی و یا تعویض و لوله جدید جایگزین آن می‌شود. ازجمله معایب آن می‌توان به ایجاد اختلال در رفت‌وآمد و ایجاد پیامدهای اجتماعی و اقتصادی اشاره نمود. همچنین، ازجمله محدودیت‌های روش ترانشه بسته نیاز آن به ماشین‌آلات و نیروی انسانی متخصص است که باعث پرهزینه بودن آن در ایران شده است. با توجه به وجود محدودیت بودجه در انجام تعمیرات، روش‌هایی با هزینه کم‌تر می‌تواند در اولویت باشند (Hashemi، ۲۰۰۸).

وقوع شکست در شبکه فاضلاب و اصلاح (تعمیر) آن همواره با پیامدهایی همراه خواهد بود که گاه باعث ایجاد مشکلاتی در سازوکار شهری می‌شود. این پیامدها شامل دو دسته هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم است. هزینه‌های مستقیم شامل کلیه هزینه‌های مربوط به ماشین‌آلات و تجهیزات، مصالح، تعمیر لوله و نیروی انسانی است (عنبری و تابش،۱۳۹۴). ولی هزینه‌های غیرمستقیم شامل هزینه‌هایی خارج از محدوده متعارف مخارج پروژه است و طرفین قرارداد هزینه‌ای بابت آن متحمل نمی‌شوند و بار آن بر دوش جامعه است. منظور از این هزینه‌ها پیامدهای نامطلوبی است که می‌تواند دارای ارزش مالی نیز باشند (باباخانی و همکاران، ۱۳۸۷).

با توجه به موارد ذکرشده، روش جایگزینی لوله بدون حفر ترانشه دارای پیامدها و هزینه‌های غیرمستقیم کم‌تری نسبت به روش ترانشه باز است. در حالت کلی، روش‌های ترانشه باز، علی‌رغم هزینه‌های سنگینی که به جامعه تحمیل می‌کنند، به‌دلیل هزینه مستقیم کم‌تر، از آن برای توسعه و نوسازی شبکه‌های فاضلاب استفاده می‌شود. ازآنجایی‌که به‌علت محدودیت بودجه، هزینه‌های مستقیم تأثیر زیادی بر انتخاب روش دارد، در این تحقیق از آن به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده استفاده می‌شود. همچنین به‌دلیل فرسوده بودن شبکه فاضلاب شهر اصفهان و قدمت آن تعویض و جایگزینی لوله، مطمئن‌ترین روش اصلاح شبکه در نظر گرفته شده است.

4. Cost-Effectiveness
5. Fuzzy Expert System
6. Bayesian network
7. Renovation
8. Repair
9. Rehabilitation
10. Open cut
11. Trenchless

با توجه به توسعه و گستردگی شبکه‌های فاضلاب، برنامه بازسازی و نوسازی این سیستم از اهمیت بالایی برخوردار بوده و فرایندی کاملاً پیچیده است. ذکر این نکته ضروری است که بخش اعظمی از تعمیرات شبکه مربوط به مواردی است که با فروریزش معابر، بالازدگی فاضلاب و توقف سرویس‌دهی خود را نشان می‌دهد. در همین راستا مدل‌های پیش‌بینی شکست به شناسایی نقاط بحرانی زودتر از زمان شکست، کمک می‌کند. دو رویکرد در زمینه اولویت‌بندی وجود دارد:

۱- اولویت‌بندی براساس نیاز به تعمیرات ضروری و میزان بحرانی بودن شرایط لوله

۲- اولویت‌بندی براساس محدودیت سرمایه‌گذاری و انتخاب کم‌هزینه‌ترین حالت

به‌طورکلی عوامل مختلفی در این زمینه تأثیرگذار است ازجمله، محل قرارگیری لوله، نوع حفاری، عمق دفن، اندازه لوله و غیره. محل قرارگیری لوله، ازجمله پارامترهایی است که بر احتمال وقوع شکست و همچنین پیامد وقوع شکست تأثیرگذار است (Mcdonald و Zhao، ۲۰۰۱).

شایان‌ذکر است که معمولاً اولویت‌بندی بخش‌های مختلف شبکه برای تعمیر و بازسازی، براساس محدودیت بودجه انجام می‌شود. در این راستا، استفاده از مدل‌های ارزیابی شکست می‌تواند باعث افزایش توانایی تصمیم‌گیران برای اولویت‌بندی تعمیر و تعویض لوله‌ها و بهبود بازده سرمایه‌گذاری شود.

با توجه به موارد مذکور، در رویکرد مدیریت دارائی و به‌منظور تعیین اولویت‌های تعمیراتی لوله‌های شبکه، لازم است که وضعیت فعلی لوله‌ها بررسی و احتمال شکست آن‌ها تعیین و پیش‌بینی شود. در این زمینه تحقیقات متعددی انجام شده است که در ادامه این بخش به برخی از آن‌ها اشاره شده است. در این راستا، عنبری و تابش (۱۳۹۵) احتمال رویداد شکست در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب را با استفاده از شبکه بیزین محاسبه نمودند.

Gedam و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از رگرسیون خطی شرایط شبکه فاضلاب را پیش‌بینی نمودند. بدین منظور از اطلاعاتی مانند جنس و سن لوله استفاده و عوامل مهم و تأثیرگذار در پیش‌بینی وضعیت شکست شبکه بررسی شد. در این راستا، رویکرد رگرسیون برای ارزیابی عوامل مهم و پیش‌بینی شرایط با استفاده از اطلاعات موجود توسعه یافته است. تجزیه‌وتحلیل نشان داد که روش می‌تواند برای پیش‌بینی وضعیت لوله استفاده شود.

Laakso و همکاران (۲۰۱۸) با ترکیب نتایج بازرسی شبکه، خصوصیات شبکه و عوامل محیطی، وضعیت شبکه فاضلاب و عوامل تأثیرگذار بر آن را بررسی نمودند. در این تحقیق با استفاده از الگوریتم بروکا[12] مدل‌سازی شرایط لوله و ارزیابی اهمیت متغیرها انجام و میزان تأثیر متغیرهای مختلف بر وخامت وضعیت شبکه بررسی شد. با توجه به نتایج، مدلی برای غربال‌گری لوله‌ها برای بازرسی‌های آینده پیشنهاد شده است که بر مبنای آن ساختاری پویا بین متغیرهای پیش‌بینی‌شده و شرایط نامناسب ارائه می‌شود.

Kabir و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک بیزین، وضعیت ساختاری شبکه فاضلاب را بررسی نمودند. همچنین تأثیر هر یک از پارامترها بر تخریب شبکه نیز بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد که سن و طول فاضلاب‌رو بر تخریب شبکه‌های بتنی و سیمانی و همچنین سن و قطر بیش‌ترین تأثیر را بر تخریب فاضلاب‌روهای فلزی و پلی‌اتیلن دارد. همچنین، عملکرد مدل پیشنهادی با استفاده از اطلاعات قبلی بهبود می‌یابد. درنهایت، حسینقلی و همکاران (۱۳۹۹) گرفتگی لوله‌ها و شکست شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب را با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک پیش‌بینی نمودند. در این تحقیق، نتایج مدل پیشنهادی با نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی مقایسه شده است. بدین منظور، پارامترهای تأثیرگذار بر شکست هیدرولیکی ازجمله سن، طول، شیب و عمق دفن لوله‌ها به‌عنوان ورودی و تعداد گرفتگی به‌عنوان خروجی مدل‌ها منظور شده است. نتایج نشان داد که دقت روش برنامه‌ریزی ژنتیک نسبت به شبکه عصبی مصنوعی بهتر بود.

درمجموع، عوامل مختلفی ازجمله نوع مصالح و یا روش‌های تعمیر و بازسازی، در نگهداری شبکه فاضلاب تأثیرگذار است. ولی محدودیت بودجه ازجمله عواملی است که مانع از اجرای بسیاری از آن‌ها می‌شود. بنابراین در این تحقیق، با توجه به این‌که امروزه هزینه تأثیرگذارترین عامل بر روش تعمیر و نوسازی لوله است، هزینه‌های مستقیم تعویض لوله‌های شبکه فاضلاب بررسی و اولویت‌های تعمیر تعیین شده است. در این راستا، دو سناریو تعمیر به‌هنگام و تعمیر پس از گسترش خرابی با توجه به پیش‌بینی شکست لوله‌ها معرفی شده است. در این تحقیق، به‌منظور پیش‌بینی شکست لوله‌ها در سناریوهای پیشنهادی از نتایج روش برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)[13] استفاده شده است که از نوآوری‌های تحقیق حاضر می‌باشد. به‌عنوان مطالعه موردی، روش پیشنهادی برای لوله‌های بخشی از شبکه فاضلاب منطقه ۲ شهر اصفهان اعمال شده است. ذکر این نکته ضروری است که بازرسی‌های دوره‌ای و منظم شبکه و اطلاع از وضعیت موجود شبکه، به‌عنوان یک روش مدیریتی است. در حالت کلی، با توجه به گستردگی کار و هزینه بالای خسارات وارده، استفاده از تکنولوژی‌هایی مثل دوربین‌های ویدئومتری در جهت مدیریت سریع و صحیح شبکه امری اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین در این تحقیق به‌منظور نشان دادن اهمیت روش پیشنهادی در کاهش هزینه، هزینه‌های بازرسی شبکه به‌وسیله دوربین‌های ویدئومتری (CCTV) نیز محاسبه‌شده

12. Boruta

13. Genetic Programming

است. بررسی نتایج نشان‌دهنده کارایی مطلوب روش پیشنهادی و اهمیت نوآوری تحقیق حاضر می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق روش‌هایی به‌منظور تعیین اولویت تعمیر لوله‌ها با رویکرد مدیریت دارائی پیشنهاد شده است. در این بخش، توضیحاتی درباره جزئیات روش ازجمله هزینه تعمیر، نوسازی و درنهایت اولویت‌بندی تعمیرات ارائه شده است. همچنین، توضیحاتی در خصوص برنامه‌ریزی ژنتیک و چگونگی استفاده از آن در پیش‌بینی شکست در لوله‌های شبکه فاضلاب ارائه شده است. در انتهای این بخش نیز مسئله مطالعه موردی معرفی شده است.

۲-۱- هزینه‌های مستقیم نوسازی شبکه

ازآنجایی‌که هزینه تعمیر اضطراری یک فاضلاب‌رو می‌تواند دو تا ده برابر بیشتر از هزینه تعمیر پیشگیرانه آن باشد، در این تحقیق دو سناریو تعمیر بهنگام (سناریوی ۱) و تعمیر پس از گسترش خرابی در طول لوله (سناریوی ۲) معرفی و نتایج آن‌ها بررسی شده است. در حالت کلی، هزینه تعویض لوله به پارامترهای مختلفی ازجمله اندازه لوله، جنس، عمق، طول نصب، سطح آب زیرزمینی، نوع خاک و ابزارهای مورداستفاده بستگی دارد. در این میان، حدود ۷۰ درصد از هزینه‌های مستقیم، ناشی از کندن و پر کردن دوباره ترانشه و ایجاد روسازی است (Hashemi، ۲۰۰۸).

در اکثر پروژه‌های شهری معیار انتخاب روش مناسب، هزینه‌های مستقیم پروژه است که به انتخاب روش‌های کم‌هزینه‌تر منتهی می‌شود. هزینه‌های مستقیم در نظر گرفته‌شده در این تحقیق شامل هزینه تعویض لوله به‌روش ترانشه باز، هزینه پمپاژ، تخریب روسازی، برداشت خاک روی لوله، تعویض لوله، پرکردن ترانشه و درنهایت اجرای مجدد روسازی است. تمامی هزینه‌های تعویض و پمپاژ با استفاده از فهرست بهای آب و فاضلاب، ابنیه و قنات محاسبه شده است. مشخصات کلی شبکه انتخابی به‌منظور تعیین هزینه‌ها شامل، عمق لوله ۳/۴ متر، قطر لوله ۲۵۰ میلی‌متر و شیب ۰/۰۱ می‌باشد. همچنین فرضیات زیر با توجه به شرایط شبکه فاضلاب شهر اصفهان در نظر گرفته شده است:

۱- دبی عبوری از لوله‌ها در شرایطی است که یک دوم حجم لوله‌ها پر باشد.

۲- براساس نشریه ۳۰۳ که حاوی مشخصات فنی خطوط لوله آب و فاضلاب است، با توجه به شرایط نصب و تحمل فشار بدنه لوله در هنگام حمل‌ونقل، طول هر شاخه لوله بتن ساده در ایران بین ۱۰۰ تا ۱۲۵ سانتی‌متر است. بنابراین این طول برابر ۱ متر در نظر گرفته شده است (مشخصات فنی و عمومی کارهای خط لوله آب و فاضلاب شهری، ۱۳۸۴).

۳- در صورت تعمیر بهنگام (سناریو اول)، فقط لازم است که طول ۲ متر از لوله تعویض شود. ولی در هنگام گسترش خرابی (سناریو دوم)، باید کل فاصله بین دو منهول (آدم‌رو) که می‌تواند به ۵۰ متر هم برسد تعویض شود.

۴- دیواره ترانشه به‌صورت قائم در نظر گرفته شده است.

در روش پیشنهادی این تحقیق، برای تعیین هزینه پمپاژ برای انتقال جریان از لوله اصلی، از فهرست بهای قنات استفاده شده است. مقادیر هزینه‌های محاسباتی در بخش "نتایج تحقیق" ارائه شده است.

۲-۲- روش اولویت‌بندی تعمیرات

بررسی سوابق تحقیقاتی نشان‌دهنده آن است که دو رویکرد، اولویت‌بندی براساس شرایط بحرانی لوله و نیاز به تعمیرات و اولویت‌بندی براساس محدودیت سرمایه‌گذاری برای تعمیر لوله‌های شبکه فاضلاب پیشنهاد شده است. در حالت کلی، معمولاً اولویت‌بندی تعمیر و بازسازی بخش‌های مختلف شبکه، براساس محدودیت بودجه انجام می‌شود. در این راستا، استفاده از مدل‌های ارزیابی شکست می‌تواند باعث افزایش توانایی تصمیم‌گیران برای اولویت‌بندی تعمیر و تعویض لوله‌ها و بهبود بازده سرمایه‌گذاری شود. در این تحقیق بدین منظور از خروجی مدل‌های ارزیابی شکست که تعداد شکست در واحد طول است، استفاده شده است. مدل ارزیابی شکست پیشنهادی، پیش‌ازاین در سایر تحقیقات نویسندگان این مقاله ارائه شده است (حسینقلی و همکاران، ۱۳۹۹).

ذکر این نکته ضروری است که براساس رویکرد اول اولویت‌بندی، درصورتی‌که جایگزینی لوله در شبکه براساس میزان بحرانی بودن آن‌ها انجام شود؛ می‌توان با توجه به تعداد شکست در واحد طول تصمیم‌گیری نمود. براین اساس لوله‌هایی با تعداد شکست در واحد طول بیشتر، در اولویت تعمیرات هستند. ولی در رویکرد دوم محدودیت بودجه و کاهش هزینه موردتوجه قرار می‌گیرد. به این صورت که تعمیر بخش‌هایی از شبکه که هزینه کم‌تری را با خود به‌همراه دارد، در اولویت تعمیر هستند و یا بخشی از شبکه که گسترش خرابی در آن باعث وارد شدن هزینه‌های بیشتر می‌شود در اولویت تعمیر هستند. در این تحقیق اولویت‌بندی تعمیر لوله‌ها با توجه به رویکردهای مذکور تعیین شده است.

۲-۳- چگونگی استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک

به‌طورکلی در مدل‌های پیش‌بینی شکست، از شبیه‌سازها برای تخمین تعداد شکست یا احتمال شکست در شبکه آب و فاضلاب استفاده شده است. در این تحقیق، از روش برنامه‌ریزی ژنتیک به‌عنوان مدل شبیه‌ساز استفاده شده است. برنامه‌ریزی ژنتیک

(GP)[14] به‌عنوان یکی از روش‌های هوش مصنوعی اولین بار توسط Koza مطرح شد که از آن به‌عنوان روشی برای یافتن رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی استفاده می‌شود. این روش ازجمله روش‌های کارآمد جستجوی تکاملی است که به‌دلیل دارا بودن دقت کافی، به‌عنوان یک روش کاربردی مطرح شده است. جمعیت در برنامه‌ریزی ژنتیک، برنامه‌های کامپیوتری با فرم درختی هستند که در این فرم افراد از ترمینال‌ها[15] و توابع[16] تشکیل شده‌اند. ترمینال‌ها شامل اعداد ثابت و پارامترهای ورودی بوده و توابع نیز می‌تواند شامل کلیه توابع ریاضی باشند (Koza، ۱۹۹۲).

مراحل حل یک مسئله با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک شامل:

الف) تولید جمعیتی از افراد با توابع و ترمینال‌های تصادفی،

ب) ارزیابی هریک از افراد که شامل ارزیابی و شناسایی مؤثرترین فرد براساس میزان شایستگی است،

ج) انتخاب افراد مؤثر به‌عنوان والد و اعمال عملگرهای ژنتیکی شامل تزویج[17] و جهش[18] بر روی افراد به‌منظور ایجاد نسل جدید،

د) تکرار این فرایند تا حصول بهترین پاسخ یا برآورده شدن شرط خاتمه و انتخاب بهترین عضو ایجادشده به‌عنوان پاسخ نهایی می‌باشد.

در این تحقیق از جعبه‌ابزار GPLAB[19] در محیط متلب به‌منظور مدل‌سازی به‌روش برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده شده است (Silva، ۲۰۰۷). بدین منظور از اطلاعات دریافتی از سامانه ۱۲۲ استفاده شده و مدل‌هایی به‌منظور پیش‌بینی شکست در شبکه‌های فاضلاب معرفی شده است. در مدل‌های پیشنهادی طول لوله، قطر، عمق کارگذاری، شیب و سن لوله‌ها به‌عنوان ورودی مدل و شکست لوله‌های شبکه فاضلاب (ازجمله شکستگی و گرفتگی) به‌عنوان خروجی مدل منظور شده است که جزئیات آن در سایر تحقیقات نویسندگان ارائه شده است (حسینقلی و همکاران، ۱۳۹۹).

۲-۴- مطالعه موردی

شبکه فاضلاب شهر اصفهان با قدمتی پنجاه‌ساله قدیمی‌ترین و اولین شبکه فاضلاب موجود در کشور است که در حال حاضر بیش از ۵۰ درصد آن نیاز به ترمیم و بازسازی دارد (صالح و خاکی وطن، ۱۳۸۷).

بنابراین، در این تحقیق، بخش عمده‌ای از شبکه فاضلاب منطقه دو به‌عنوان مطالعه موردی بررسی شده است. منطقه دو شبکه فاضلاب اصفهان، شامل محدوده جنوبی زاینده‌رود است که با مراجعه به شرکت آب و فاضلاب اصفهان، اطلاعات مربوط به شبکه و حوادث رخ داده در آن، دریافت شده است. در شکل (۱) نقشه هوایی مناطق شش‌گانه شهر اصفهان از نظر خدمات آب و فاضلاب ارائه شده است. علاوه بر این، در جدول (۱) بخشی از اطلاعات مربوط به حوادث رخداده در شبکه فاضلاب منطقه دو در سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ که توسط سامانه ۱۲۲ ثبت‌شده، ارائه شده است.

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

اطلاعات ثبت‌شده توسط سامانه ۱۲۲ شامل تاریخ وقوع حادثه، آدرس محل وقوع حادثه، نوع شکست یا حادثه، قطر لوله و جنس شبکه است. حوادث ثبت‌شده مربوط به منطقه ۲ در سال‌های مذکور شامل تخریب و ریزش شبکه، شکستگی و دوپهن‌شدگی، گرفتگی، نشست، نفوذ ریشه درختان و جابه‌جایی خطوط فاضلاب از محل بند است. بررسی اطلاعات دریافتی از شرکت آب و فاضلاب نشان‌دهنده آن است که این شبکه دارای مشکلات بسیاری است که برخی از مهم‌ترین آن‌ها شامل خوردگی و تخریب شبکه، ترک‌خوردگی، گرفتگی و پس‌زدگی فاضلاب، نشت و نفوذ است که لازم است سناریوهایی برای تعمیر و بازسازی آن و کاهش هزینه‌ها منظور شود.

۳- نتایج تحقیق

در این بخش نتایج روش پیشنهادی در تعیین اولویت‌بندی تعمیر لوله‌ها ارائه شده است. در روش پیشنهادی ابتدا هزینه تعمیر لوله‌ها محاسبه شده است که نتایج آن در ادامه ارائه شده است. در این روش، با توجه به شرایط موجود در شبکه فاضلاب شهر اصفهان، مدت‌زمان انجام تعمیرات در طول ۵۰ متر با نظر کارشناسان شرکت آب و فاضلاب به‌طور میانگین در بهترین شرایط و کار شبانه‌روزی، ۴۸ ساعت در نظر گرفته شده است. بنابراین، مدت‌زمان تعمیر ۲ متر از لوله حدود ۲ ساعت منظور شده است. همچنین میزان دبی پمپاژ برابر یک لیتر بر ثانیه فرض شده است.

14. Genetic Programming
15. Terminal
16. Function
17. Crossover
18. Mutation
19. Genetic Programming Lab

براساس معادله مانینگ[20]، دبی فاضلاب عبوری در لوله آسیب دیده برابر ۰/۰۲۵۷۵ مترمکعب برثانیه تعیین می‌باشد. مقایسه دبی فاضلاب و پمپاژ موردنظر نشان‌دهنده آن است که، جهت انتقال فاضلاب، به ۲۶ عدد پمپ ۲ اینچی نیاز است (فهرست‌بها پایه قنات، ۱۳۹۸). همچنین در مورد آسفالت کنده‌شده، فرض شده است که ضخامت آسفالت موجود به‌طور میانگین ۱۰ سانتی‌متر است و آسفالت کنده‌شده به فاصله ۳۵ کیلومتری از محل حادثه منتقل می‌شود (فهرست‌بها پایه ابنیه، ۱۳۹۷).

به‌علاوه در این تحقیق، هزینه تهیه، حمل و ریختن شن موردنیاز در کانال به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر، هزینه حمل مصالح سنگی جهت اجرای اساس به‌ضخامت ۱۵ سانتی‌متر و هزینه حمل آسفالت موردنیاز به‌ضخامت ۷ سانتی‌متر محاسبه شده است. در مورد هزینه مربوط به تهیه و حمل لوله و متعلقات از فهرست‌بها واحد آب و فاضلاب استفاده شده است. لازم به‌ذکر است، براساس اطلاعاتی که از شرکت آب و فاضلاب دریافت شد، در صورت نیاز به تعویض بخشی از لوله، لوله جایگزین از جنس پلی‌اتیلن انتخاب شده است. در جدول (۲) هزینه فعالیت‌های مختلف تعویض دو متر از لوله به‌روش ترانشه باز براساس هزینه‌ها در سال ۱۳۹۸ ارائه شده است.

همان‌طور که اشاره شد، در صورت عدم رسیدگی به‌موقع به خرابی‌های موجود در شبکه، خرابی‌ها در طول لوله گسترش یافته و منجر به آسیب رساندن به سایر قسمت‌های شبکه و مشکلات دیگری همچون ریزش معابر و به خطر افتادن جان و مال مردم می‌شود. در این راستا با توجه به اهداف این تحقیق، هزینه جایگزینی لوله به روش ترانشه باز برای طول‌های مختلف لوله محاسبه و نتایج مقایسه می‌شود. به این منظور هزینه جایگزینی ۲، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ متر از لوله‌ای با قطر ۲۵۰ میلی‌متر محاسبه شده است. در جدول (۳) هزینه‌های محاسباتی ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن است که افزایش طول لوله تعویضی باعث افزایش هزینه‌های مستقیم می‌شود. به‌عنوان نمونه افزایش طول لوله از ۱۰ متر به ۵۰ متر باعث افزایش چشم‌گیر هزینه‌های مستقیم می‌شود. این مقایسه در حالتی است که کلیه شرایط یکسان در نظر گرفته شود. همچنین، بخش قابل‌توجهی از هزینه ناشی از حفر ترانشه و عملیات‌های مربوط به آن است. بنابراین هرچه طول لوله بیشتر باشد، بدیهی است که هزینه‌های مربوطه نیز افزایش می‌یابد. همچنین، در شکل (۲) هزینه جایگزینی لوله در طول های پیشنهادی و به ازای قطر های مختلف ارائه و مقایسه شده است.

جدول ۱- بخشی از اطلاعات ثبت‌شده توسط سامانه ۱۲۲

جنس	سایز (میلی‌متر)	نوع حادثه	آدرس حادثه	تاریخ
بتن	۲۵۰	گرفتگی	خیابان توحید	۱۳۹۳/۰۷/۱۲
بتن	۳۰۰	گرفتگی	بلوار ارتش	۱۳۹۳/۰۸/۱۹
بتن	۳۰۰	گرفتگی	خیابان آبشار سوم	۱۳۹۳/۰۹/۰۵
بتن	۲۵۰	گرفتگی	خیابان قائمیه	۱۳۹۴/۰۴/۰۳
بتن	۲۵۰	گرفتگی و پس‌زدگی	خیابان سپهسالار	۱۳۹۴/۰۴/۰۳
بتن	۴۰۰	گرفتگی	خیابان صفه	۱۳۹۴/۰۶/۰۳
بتن	۲۵۰	گرفتگی و پس‌زدگی	بلوار کشاورز	۱۳۹۵/۰۱/۰۳
بتن	۴۰۰	گرفتگی و پس‌زدگی	بلوار کشاورز	۱۳۹۵/۰۲/۰۳
بتن	۱۵۰	گرفتگی	اتوبان ذوب‌آهن	۱۳۹۵/۰۴/۰۳
بتن	۱۵۰	گرفتگی	خیابان ارتش	۱۳۹۵/۰۴/۰۴
بتن	۱۵۰	گرفتگی	شهرک امیریه	۱۳۹۵/۰۴/۰۵
بتن	۴۰۰	گرفتگی	ابتدای خیابان سعادت‌آباد	۱۳۹۵/۰۴/۱۵

جدول ۲- هزینه فعالیت‌های مختلف تعویض ۲ متر از لوله به قطر ۲۵۰ میلی‌متر براساس مقادیر سال ۱۳۹۸

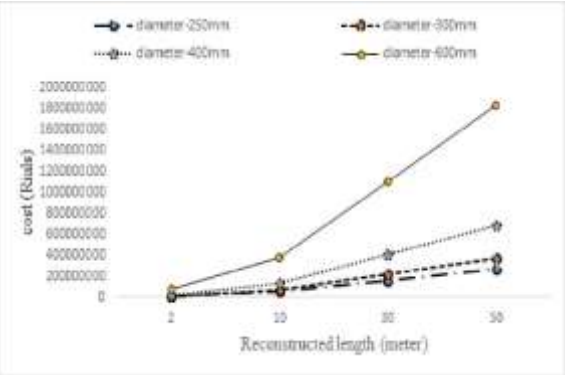
نوع فعالیت	هزینه نوسازی دو متر از طول لوله (ریال)
پمپاژ فاضلاب	۰۰۰،۸۳۸،۶
تخریب و حمل آسفالت کنده‌شده	۸۳۲،۱۹۴
حفاری و حمل خاک روی لوله	۸۹۹،۸۱۹،۲
حمل خاک، شن، اساس، قیر و آسفالت	۵۵۶،۰۴۷،۲
اجرای آسفالت	۷۰۰،۹۷۹
تهیه و حمل لوله و متعلقات	۳۴۳،۵۳۶
اجرای لوله	۹۲۶،۳۴۹

20. Manning

مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن است که هرچه قطر لوله کم‌تر باشد، هزینه‌های مستقیم نیز کاهش می‌یابد. کاهش قطر لوله باعث کاهش عرض ترانشه، کاهش دبی عبوری و طبیعتاً کاهش زمان و هزینه پمپاژ می‌شود. به‌طور مثال هزینه مربوط به جایگزینی ۵۰ متر از لوله به قطر ۶۰۰ میلی‌متر حدود ۶ برابر هزینه جایگزینی ۵۰ متر از لوله به قطر ۲۵۰ میلی‌متر است. بنابراین حساسیت تعمیر، بازسازی و جایگزینی به‌موقع لوله در مواردی که قطر لوله بیشتر باشد، افزایش می‌یابد. همچنین، هرچه قطر لوله بزرگ‌تر باشد، دبی عبوری از آن نیز بیشتر است و تعمیرات آن نیازمند پمپاژ حجم بیشتری از فاضلاب، افزایش حجم خاک‌برداری و افزایش تعداد مشترکین در مقایسه با لوله‌هایی با قطر کوچک‌تر است.

جدول ۳- مقایسه هزینه تعویض لوله به قطر ۲۵۰ میلی‌متر در متراژهای مختلف

طول لوله (متر)	هزینه نوسازی (ریال)
۲	۱۳،۷۶۶،۲۴۶
۱۰	۵۶،۷۷۸،۱۸۵
۳۰	۱۶۲،۷۷۶،۵۶۵
۵۰	۲۶۹،۹۶۲،۶۳۵

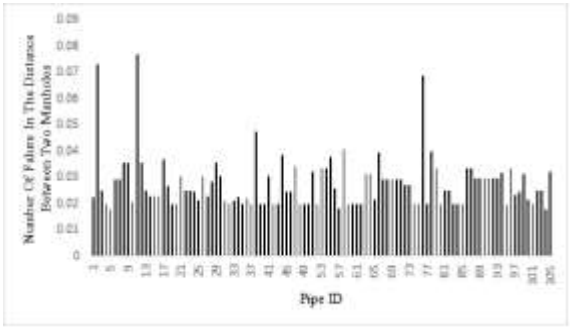


شکل ۲- مقایسه هزینه تعویض لوله در متراژ و قطرهای مختلف

با توجه به پژوهش حسینقلی و همکاران (۱۳۹۹)، به‌منظور پیش‌بینی شکست لوله‌ها، بخشی از اطلاعات ورودی (طول، شیب، عمق کارگذاری و سن) و شکست‌های رخداده در شبکه (پارامتر خروجی) به‌عنوان داده‌های آموزش برای مدل شبیه‌ساز برنامه-ریزی ژنتیک تعریف‌شده که روابطی به‌منظور پیش‌بینی شکست لوله‌های شبکه فاضلاب حاصل شد. در ادامه، روابط ارائه‌شده با استفاده از داده‌های آزمایش صحت‌سنجی شد. با توجه به نتایج، رابطه (۱) برای پیش‌بینی شکست حاصل شد که به شرح زیر است:

$$B = \frac{A^{d-(\frac{A}{D})^{0.66519}}}{L}^{0.66519^{S}} \quad (۱)$$

که در رابطه فوق، B تعداد شکست در واحد طول، A سن لوله (سال)، d عمق دفن لوله (متر)، D قطر لوله (متر)، S شیب لوله و L متوسط فاصله بین دو آدم‌رو (متر) است. با توجه به داده‌های موجود و روش پیشنهادی، تعداد شکست در سال‌های ۱۳۹۴، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ برای شبکه فاضلاب منطقه دو شهر اصفهان پیش-بینی شد. برای نمونه، بررسی حوادث رخداده در سال ۱۳۹۶ نیز حاکی از آن است که حدود ۱۰۵ لوله دچار شکست شده است. نتایج پیش‌بینی شکست بر نتایج مشاهداتی کاملاً منطبق بوده و عملکرد آن حاکی از قابل‌استفاده بودن این روش می‌باشد. شایان‌ذکر است که برای این شبکه ۹۶ لوله دارای قطر ۲۵۰، لوله ۹۷ تا ۱۰۳ به قطر ۳۰۰، دو لوله ۱۰۴ و ۱۰۵ به قطر ۶۰۰ میلی‌متر است. عمق کارگذاری آن‌ها حدود ۱ متر تا ۳ متر متغیر است. فاصله بین دو آدم‌رو نیز از ۱۳ تا ۵۷ متر متغیر است. در شکل (۳) مقادیر تعداد شکست در واحد طول برای هر لوله نشان داده شده است. در این شکل مقادیر تعداد شکست در طول از تقسیم تعداد شکست بر طول لوله بین دو آدم‌رو تعیین شد. همچنین PipeID شمارنده لوله‌ها بوده که با شماره لوله‌ها متفاوت است. بررسی نتایج نشان‌دهنده آن است که، تعداد شکست در واحد طول برای شناسه لوله‌های ۲، ۱۱ و ۷۶ بیشتر از سایر لوله‌ها است.



شکل ۳- تعداد شکست در واحد طول در سال ۱۳۹۶

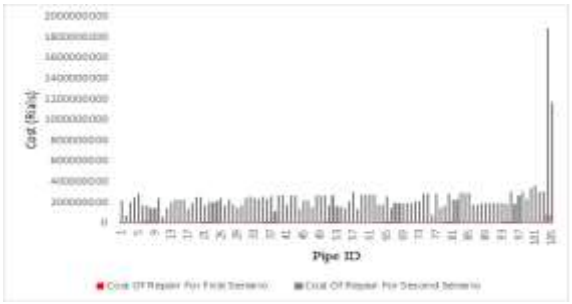
لازم به‌ذکر است که قطر این سه لوله ۲۵۰ میلی‌متر است. در صورت اولویت‌بندی لوله‌ها براساس تعداد شکست در واحد طول، این سه لوله در اولویت نوسازی هستند. همچنین لوله‌های انتهایی که دارای قطر بیشتری بوده و وقوع شکست در آن‌ها پیامدها و هزینه‌های بیشتری با خود به‌همراه دارد، دارای تعداد شکست در واحد طول کم‌تری هستند ولیکن در اولویت‌های بعدی نیز در نظر گرفته می‌شوند. به‌منظور تصمیم‌گیری صحیح، لازم است هزینه-های نوسازی هر لوله نیز بررسی شود. با مقایسه هزینه تعویض به‌موقع بخشی از لوله و هزینه تعویض کامل لوله بین دو آدم‌رو، می‌توان گزینه صحیح و اقتصادی را انتخاب نمود. به‌عبارت‌دیگر می‌توان با منظور نمودن محدودیت بودجه، اولویت‌بندی تعمیر و نوسازی لوله‌هایی با اهمیت بیشتر را تعیین نمود. در جدول (۴)

هزینه نوسازی شبکه در صورت گسترش خرابی و تعمیر زودهنگام شبکه برای حوادث رخ‌داده در سال‌های ۱۳۹۴، ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ ارائه شده است. هزینه‌های محاسبه‌شده مربوط به حوادث رخ‌داده در این سال‌ها برای مجموع طول لوله‌های شبکه می‌باشد. نتایج حاصل اختلاف چشمگیر بین هزینه تعمیر بهنگام (سناریوی ۱) و با گسترش خرابی (سناریوی ۲) را نشان می‌دهد.

در شکل (۴) هزینه نوسازی مربوط به سناریوهای اول و دوم پیشنهادی ارائه و مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن است که هزینه تعمیر بهنگام (سناریوی اول) و تعمیر در صورت گسترش خرابی (سناریوی دوم)، برای دو لوله آخر که قطر ۶۰۰ میلی‌متر دارند، بیشتر از سایر لوله‌ها است. در این حالت نوسازی لوله‌هایی با قطر بیشتر هزینه مستقیم بیشتری را به‌همراه دارند و در اولویت‌بندی باید موردتوجه قرار گیرند.

جدول ۴- مقایسه هزینه نوسازی کل لوله‌های آسیب‌دیده منطقه ۲ در سال‌های مختلف

سال	هزینه تعمیر زودهنگام (سناریو ۱، ریال)	هزینه تعمیر در صورت گسترش خرابی (سناریو ۲، ریال)
۱۳۹۴	۲،۹۸۶،۱۴۳،۹۱۵	۶۰،۶۹۴،۶۰۵،۹۴۶
۱۳۹۵	۲،۳۰۹،۲۴۷،۳۵۸	۴۴،۳۳۸،۷۸۴،۴۱۶
۱۳۹۶	۱،۲۸۰،۲۶۳،۰۵۰	۲۵،۱۹۷،۰۵۹،۶۶۲



شکل ۴- مقایسه هزینه نوسازی در دو حالت تعویض بخشی از لوله در فاصله بین دو آدم‌رو در سال ۱۳۹۶

در انتها به‌منظور نشان دادن اهمیت پیش‌بینی شکست لوله‌ها در کاهش هزینه تعمیر و بهره‌برداری، هزینه ویدئومتری به‌منظور بازرسی از شبکه نیز محاسبه شد. شایان‌ذکر است که انجام عملیات ویدئومتری در شبکه‌های فرسوده و بررسی احتمال وقوع شکست موجب شناخت بیشتر مسئولین از وضعیت موجود شبکه می‌شود (راهنمای بهره‌برداری و نگهداری از شبکه جمع‌آوری فاضلاب، ۱۳۸۸).

لازم به‌ذکر است استفاده از روش‌های پیش‌بینی شکست منجر به کاهش و یا حذف هزینه ویدئومتری می‌شود. بر اساس مذاکرات انجام‌شده با افراد خبره و کارشناسان شرکت آب و فاضلاب اصفهان، هزینه بازرسی ویدئومتری شبکه به‌ازای هر متر طول لوله براساس جدول (۵) با فرض ثابت بودن شرایط بر مبنای سال ۱۳۹۸ محاسبه شده است. با توجه به مقادیر جدول (۵)، هزینه بازرسی شبکه برای بخش‌هایی از شبکه که دچار حادثه شده‌اند در سال‌های ۱۳۹۴، ۹۵ و ۹۶ به‌ترتیب ۲۸۱،۵۴۷،۸۵۰ و ۲۰۲،۶۳۰،۶۰۰ و ۱۱۲،۴۱۲،۶۰۰ ریال است. لازم به‌ذکر است که هزینه‌های محاسبه‌شده فقط مربوط به بازرسی بخش‌های آسیب‌دیده شبکه است که مربوط به تشخیص وجود و نوع مشکل است که این هزینه‌ها به هزینه‌های تعمیر و بازسازی لوله‌ها اضافه می‌شود. بنابراین مقادیر هزینه‌های جدید در سناریوی اول ۳،۲۶۷،۶۹۱،۷۶۵ و ۲،۵۱۱،۸۷۷،۹۵۸ و ۱،۳۹۲،۶۷۵،۶۵۰ ریال و در سناریوی دوم ۶۰،۹۷۶،۱۵۳،۷۹۶ و ۴۴،۵۴۱،۴۱۵،۰۱۶ و ۲۵،۳۰۹،۴۷۲،۲۶۲ ریال به‌ترتیب برای سال‌های ۱۳۹۴، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ حاصل می‌شود. مقایسه هزینه‌های نشان‌دهنده آن است که با پیش‌بینی شکست مقادیر هزینه‌ها در سناریوی اول برای سال‌های ۱۳۹۴، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ به‌ترتیب ۹۴/۶، ۹۴/۳ و ۹۴/۴ در صد نسبت به سناریوی دوم کاهش می‌یابد. همچنین در صورت پیش‌بینی شکست و حذف هزینه بازرسی در سناریوی اول برای سال‌های ۱۳۹۴، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ به‌ترتیب ۸/۶۱، ۸/۰۶ و ۸/۰۷ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۵- مقادیر هزینه ویدئومتری با روش CCTV در شبکه‌های فاضلاب در شرایط سال ۱۳۹۸

شرح	بهای هر متر (ریال)
بازرسی شبکه‌های فاضلاب با استفاده از CCTV در فاضلاب‌روهایی با حداکثر قطر کوچک‌تر از ۴۰۰ میلی‌متر	۲۶۵۰۰
بازرسی شبکه‌های فاضلاب با استفاده از CCTV در فاضلاب‌روهایی با حداکثر قطر بزرگ‌تر و مساوی ۴۰۰ میلی‌متر و کوچک‌تر از ۶۰۰ میلی‌متر	۳۴۱۰۰
بازرسی شبکه‌های فاضلاب با استفاده از CCTV در فاضلاب‌روهایی با حداکثر قطر بزرگ‌تر و مساوی ۶۰۰ میلی‌متر و کوچک‌تر از ۸۰۰ میلی‌متر	۴۳۶۰۰

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با محاسبه هزینه‌های مستقیم نوسازی لوله‌های شبکه فاضلاب، دو سناریو تعمیر بهنگام و تعمیر پس از گسترش خرابی برای تعمیر شبکه فاضلاب بررسی شد. در این راستا، اولویت‌بندی تعمیر و نوسازی لوله‌های شبکه فاضلاب منطقه دو اصفهان (به‌عنوان مطالعه موردی) تعیین و هزینه‌های مربوط به آن محاسبه شد. با مقایسه هزینه‌ها برای سال‌های مختلف اهمیت پیش‌بینی شکست و ضرورت اقدامات پیشگیرانه در کاهش هزینه‌ها مشخص شد. در این تحقیق فقط هزینه‌های مستقیم مربوط به بخش اجرایی منظور و از هزینه‌های غیرمستقیم صرف‌نظر شد. بررسی نتایج نشان داد که با تعیین و پیش‌بینی شکست لوله‌ها و

تعمیر بهنگام آن‌ها، هزینه‌های مستقیم به‌میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد که ناشی از زمان کم‌تر تعمیرات و پیامدهای کم‌تر آن است. بررسی‌ها نشان داد که هزینه تعمیر پس از گسترش خرابی (سناریو دوم) برای سال‌های ۱۳۹۴، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ به‌ترتیب ۹۴/۶، ۹۴/۳ و ۹۴/۴ درصد نسبت به تعمیر بهنگام (سناریوی اول) افزایش یافت. همچنین بررسی‌ها نشان داد که افزایش هزینه‌ها با افزایش قطر لوله به شکل قابل‌توجهی افزایش یافت. بنابراین زمانی که قطر لوله بزرگ‌تر است اهمیت و حساسیت تعمیرات بیشتر است. در ادامه با محاسبه هزینه بازرسی شبکه به روش CCTV اهمیت پیش‌بینی شکست در شبکه و تأثیر آن در کاهش هزینه مشخص شد. همچنین بازرسی لوله‌ها به‌روش CCTV در سناریوی اول (دوم) برابر ۳،۲۶۷،۶۹۱،۷۶۵ (۶۰،۹۷۶،۱۵۳،۷۹۶) و ۲،۵۱۱،۸۷۷،۹۵۸ (۴۴،۵۴۱،۴۱۵،۰۱۶) و ۱،۳۹۲،۶۷۵،۶۵۰ (۲۵،۳۰۹،۴۷۲،۲۶۲) ریال به‌ترتیب برای سال‌های ۱۳۹۴، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ بود که از این هزینه درصورتی‌که از روش‌های پیش‌بینی شکست استفاده شود صرف‌نظر شده و درنهایت هزینه تعمیر شبکه فاضلاب کاهش می‌یابد.

۵- مراجع

باباخانی م، احمدی مطلق ا ر، میراحمدیان ب، "روش محاسبه هزینه‌های اجتماعی در اجرا و بازسازی شبکه‌های فاضلاب"، دومین همایش ملّی آب و فاضلاب با رویکرد بهره‌برداری، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۷.

حسینقلی پ، معینی ر، زارع م ر، "پیش‌بینی تعداد گرفتگی در شبکه فاضلاب شهری (مطالعه موردی: منطقه دو اصفهان)"، مجله آب و فاضلاب، ۱۳۹۹، ۳۱ (۱)، ۸۶-۹۸.

راهنمای بهره‌برداری و نگهداری از شبکه جمع‌آوری فاضلاب، دفتر فنی اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۸۸.

رمضانیان‌پور ع ا، مودی ف، نامیان م، نقاش طوسی ح، "ارائه یک چارچوب پیشنهادی برای سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری در مدیریت دارایی شبکه فاضلاب‌رو"، اولین کنفرانس ملّی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، ۱۳۸۸.

صالح س م ح، خاکی وطن ر، "مشکلات بهره‌برداری از شبکه فاضلاب و نقش ویدئومتری در بهره‌برداری بهتر از شبکه‌ها"، دومین همایش ملّی آب و فاضلاب با رویکرد بهره‌برداری، ۱۳۸۷.

عنبری م ج، تابش م، "محاسبه احتمال رویداد شکست در شبکه‌ها جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از شبکه بیزین"، مجله آب و فاضلاب، ۱۳۹۵، ۲۷ (۳)، ۴۸-۶۱.

عنبری م ج، تابش م، "محاسبه پیامد وقوع شکست در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب"، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۴.

فرد مرادنیا س، ایراندوست م، "ویدئومتری در شبکه‌های فاضلاب"، سومین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، ۱۳۹۴.

فهرست بها پایه قنات، سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۹۸.

مشخصات فنی و عمومی کارهای خط لوله آب و فاضلاب شهری، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۴.

فهرست بها پایه ابنیه، سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۹۷.

Ariaratnam ST, El-Assaly A, Members A, Yang Y, "Assessment of infrastructure inspection needs using logistic models", Journal of Infrastructure Systems, 2001, 7, 160-165Bauwens W, "Sewer network asset management decision support tools : A Review", International Symposium on New Directions in Urban Water Management, UNESCO Paris, 2007, 1-8.

Gedam A, Mangulkar S, Gandhi B, "Prediction of sewer pipe main condition using the linear regression approach", Journal of Geoscience and Environment Protection, 2016, 4, 100-105.

Greta JV,John CM, "Consequence-of-failure model for risk-based asset management of wastewater pipes using AHP", Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice,2019, 10 (2), 04019005.

Guzmán-Fierror J, Charry S, González I, Pena-Heredia F, Hernandez N, Luna-Acosta A, Torres A, "Bayesian network-based methodology for selecting a cost-effective sewer asset management model", Water Science and Technology, 2020, 81 (11), 2422-2431.

Hashemi B, "Cost of underground infrastructure renewal: a comparison of open-cut and trenchless methods behnam", In Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Arlington in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of MasterASTE of Science in Civil Engineering the University of Texas at Arlington, 2008.

Joseph PE, Strauch A, "Asset Management of Sanitary and Storm Sewer System Components Using Condition Assessmet", In Pipeline Division Specialty Congress, San Diego, California, United States, 2004, 8, 1-10.

Kabir G, Balekelay N, Balekelay C, Tesfamariam S, Asce M, "Sewer structural condition prediction integrating bayesian model averaging with logistic regression", Journal of Performance of Constructed Facilities, 2018, 32 (3), 1-10.

Koza J ,Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection, MIT, 1992. Doi: 10.1016/0303-2647(94)90062-0.

Laakso T, Kokkonen T, Mellin I, Vahala R, "Sewer Condition Prediction and Analysis of Explanatory Factors", Journal of water. 2018, 10 (9), 1-17.

Marzouk M, Osama A, "Fuzzy-Based Methodology for Integrated Infrastructure Asset Management", Internatinal Journal of Computational Intelligence Systems, 2017, 10, 745-759.

Mailhot A, Poulin A, Villeneuve J, "Optimal replacement of water pipes", Water Resources Research Journal, 2003, 39 (5), 1-14.

Mcdonald SE, Zhao JQ, "Condition assessment and rehabilitation of large sewers", International Conference on Underground Infrastructure

Research, University of Waterloo, 2001, 361-369.
Silva S, "GPLAB A Genetic Programming Toolbox for MATLAB", 2007, 72.
Ugarelli R, Di Federico V, Asce AM, "Optimal Scheduling of Replacement and Rehabilitation in Wastewater Pipeline Networks", Water Resources Planning and Management Journal, 2010, 136, no. June, 348-356.
Van Riel W, Langeveld J, Herder P, Clemens FHLR, "Intuition and information in decision-making for sewer asset management", Urban Water Journal, 2014, 11, (6), 506-518.
Van Riel W, Van Bueren E, Langeveld J, Herder P, Clemens F, "Decision-making for sewer asset management: Theory and practice", Urban Water Journal, 2015, 13 (2), 57-68.
Wirahadikusumah R, Abraham DM, Iseley T, Prasanth RK, "Assessment technologies for sewer system rehabilitation", Automation in Construction Journal, 1998, 7 (4), 259-270.
Yang DM, Su TC, "An optimization model of sewage rehabilitation", Chinese Institute of Engineers Journal, 2011, 30 (4), 651-659.

University of Tabriz

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 53 (2023), Issue 2 (Summer), 108-118

EXTENDED ABSTRACT

Prioritize Repair of Wastewater Network Using Asset Management Approach (A Case Study: Region Two of Isfahan Wastewater Network)

Pegah Hoseingholi, Ramtin Moeini*, Mohammad Reza Zare

Department of Civil Engineering, Faculty of civil engineering and transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Received: 28 July 2021**; Review:** 19 December 2021**; Accepted:** 08 January 2022

Keywords:
Asset management, wastewater network, failure, direct cost, prioritization, repair pipe

1. Introduction

Generally, using predictive methods for finding critical points and repairing the damage pipes based on these approaches is less costly than renewal them after occurring failure. In this study, by calculating direct costs, two scenarios of "on time repair" (first scenario) and "repair after failure" (second scenario) are proposed to repair the wastewater network pipe. As a case study, part of Isfahan wastewater network (region 2) and its failure data during 1393 to 1396 are considered and the obtained results are presented and compared.

2. Methodology

In this research, based on the predicted pipe failures, the prioritizations of repair pipes are determined calculating the pipe renewal direct cost of both proposed scenarios. Here, different methods are proposed to determine the priority of pipe repair with an asset management approach. In general, repairing and rebuilding different parts of the network is usually prioritized based on budget constraints. In this regard, the use of failure assessment models can increase the ability of decision makers to prioritize the repair and replacement of pipes and improve the investment returns (Hashemi, 2008). In fault prediction models, simulators are generally used to estimate the number of failures or the probability of failure in the water and sewage network. In this research, genetic programming (GP) method is used as a simulation model. Generally, GP method is used as one of the artificial intelligence method (Hoseingholi and Moeini, 2023).

For this purpose, here, GPLAB toolbox of the MATLAB software is used for modeling using GP method.Therefore, the cost of network renovation in case of widespread failure and early network repair of failure occurred in 1394, 1395 and 1396 are investigated. In addition, in order to show the importance of predicting the pipes failure in reducing the cost of repair and operation, the cost of video meters (CCTV) is calculated to inspect the network.

3. Results and discussion

The results show that the cost of on time repair (first scenario) plus to the cost of video meters (CCTV) of damaged pipes for 1394, 1395 and 1396, are 3,267,691,765 and 2,511,877,958 and 1,392,675,650 Rials, respectively. Furthermore, in the second scenario, the related costs of 60,976,153,796 and 44,541,415,016 and 25,309,472,262 Rials are obtained, respectively. In addition, the costs of inspecting the damaged parts of the network using CCTV method for 1394, 1395 and 1396 are 281,547,850, 202,630,600 and 112,412,600 Rials,

* Corresponding Author
*E-mail addresses*r: p.hoeingholi@trn.ui.ac.ir (Pegah Hoseingholi), r.moeini@eng.ui.ac.ir (Ramtin Moeini), mr.zare@eng.ui.ac.ir (Mohammad Reza Zare).

respectively. Comparison of the results shows that the obtained costs of the first scenario compared to the second scenario are reduced 94.6%, 94.3% and 94.4% for 1394, 1395 and 1396, respectively.

4. Conclusions

In this research, two scenarios of timely repair and repair after the spread of failure to repair the sewernetwork were investigatedby calculating the direct costs of renovation of sewerage network pipes.Here, only direct costs related to the executive part were included and indirect costs were excluded. In addition, the pipe failure was predicted. The results of proposed scenarios were presented and compared. The obtained results showed that by determining and predicting the failure of pipes and their timely repair, direct costs were significantly reduced, which is due to less repair time and less consequences.Furthermore, in case of failure and elimination of inspection costs of the first scenario were reduced8.61%, 8.06% and 8.07% for 1394, 1395 and 1396, respectively. In other words, the suddenly break and related damage cost were extremely reduced using the first proposed scenario.

5. References

Hashemi B, “Cost of underground infrastructure renewal: a comparison of open-cut and trenchless methods behnam”, In Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Arlington in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of MasterASTE of Science in Civil Engineering the University of Texas at Arlington, 2008.

Hoseingholi P, Moeini R, “Pipe failure prediction of wastewater network using genetic programming: Proposing three approaches”, Ain Shams Engineering Journal, 2023, 14 (5), 101958.