

تعیین آسیب پذیری شبکه فاضلاب با روش تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: شبکه فاضلاب اجراشده در بخشی از منطقه ۵ شهرداری تهران)

محمدرضا امینی^۱ و هومن حاجی کندی^{۲*}

چکیده

به علت گستردگی شبکه فاضلاب و محدودیت زمان و هزینه، امکان رسیدگی و برطرف کردن تمام آسیب‌های فاضلاب‌روها در یک زمان وجود ندارد و این امر، نیازمند رتبه‌بندی آسیب‌پذیری، تدوین برنامه نگهداری و بازسازی فاضلاب‌روهاست. پژوهش پیش رو، به ارزیابی و رتبه‌بندی آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب اجراشده در بخشی از منطقه ۵ شهرداری تهران با استفاده از تلفیق مدل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و تکنیک اقدام کرد. بر این اساس، ابتدا با توجه به نظر کارشناسان و متخصصان شاغل در زمینه طراحی و نگهداری سیستم‌های فاضلاب و نیز مطالعات کتابخانه‌ای انجام‌شده، انواع آسیب‌های شبکه جمع‌آوری فاضلاب در سه سطح آدمرو، لوله و انشعاب بررسی و طبقه‌بندی شد. برای تعیین اهمیت نسبی ایرادها، پرسش‌نامه‌ای تهیه و در میان متخصصان شاغل در زمینه طراحی و نگهداری سیستم‌های فاضلاب توزیع شد. با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، مقایسه زوجی میان عامل‌های مربوط انجام و وزن نسبی هر یک از معیارها محاسبه شد. ماتریس‌های داوری به محیط نرم‌افزار ArcGIS منتقل و خروجی رستری از آنها تهیه شد. در پایان، لایه‌های رستری عامل‌های مختلف در محیط ArcGIS به روش عضویت‌دهی فازی هم‌جنس و سپس تلفیق و در نهایت، پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب در دو سطح آدمرو و لوله تهیه شد. براساس نتایج، احتمال شکست آدمروهای اجراشده در شبکه مورد مطالعه بسیار کم بوده و بیشتر از ۷۰ درصد آدمروهای اجراشده در رده میزان آسیب کم و خیلی کم طبقه‌بندی شد. از علت‌های احتمالی این امر به کم‌بودن سن و اجرای اصولی شبکه اجراشده می‌توان اشاره کرد. هم‌پوشانی نهایی عامل‌ها و زیرمعیارهای مؤثر بر آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب نشان داد احتمال تخریب خطوط لوله‌ی اجراشده در شبکه مورد مطالعه بسیار کم بوده و بیشتر از ۷۴ درصد خط لوله جمع‌آوری فاضلاب اجراشده در محدوده مطالعه موردی، در رده میزان آسیب کم و متوسط طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد فقط ۳۰ مسیر انتقال فاضلاب (حدود ۷ درصد شبکه) در شرایط بحرانی قرار دارد که باید توجه بیشتری به آنها نشان داد. انتظار می‌رود تعداد کم خطوط لوله بحرانی به‌علت عمر کم خطوط لوله اجراشده باشد. براساس نتایج، در میان سه عامل هدف (گرفتگی آدمرو، گرفتگی لوله و گرفتگی انشعاب)، بیشترین آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب به عامل گرفتگی لوله مربوط است. همچنین، عیوب روش‌های اجرا در هر سه سطح گرفتگی آدمرو، گرفتگی لوله و گرفتگی انشعاب، بیشترین تأثیر را داشت.

واژه‌های کلیدی: آدمرو فاضلاب‌رو، آسیب‌پذیری، تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، شبکه جمع‌آوری فاضلاب، GIS، گرفتگی لوله.

ارجاع: امینی م. ر. و حاجی کندی ه. ۱۴۰۰. تعیین آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب با روش تحلیل سلسله‌مراتبی (مطالعه موردی: شبکه فاضلاب اجراشده در بخشی از منطقه ۵ شهرداری تهران. مجله پژوهش آب ایران. ۴۱: ۴۱-۵۳.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران.
۲- استادیار دانشکده سامانه زمین، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران.

* نویسنده مسئول: h_hajikandi@iauctb.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۶

مقدمه

شبکه انتقال آب یا فاضلاب با افزایش سن، معمولاً فرسوده و تخریب می‌شود. عامل‌های مؤثر بر روند آسیب‌پذیری را می‌توان به سه دسته اصلی فیزیکی، عملیاتی و عوامل زیست‌محیطی تقسیم کرد (هاواری و همکاران، ۲۰۲۰). در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری درباره انواع تکنیک‌های مختلف ارزیابی آسیب‌پذیری فاضلاب‌روها انجام شده است. براساس مطالعات انجام‌شده، پژوهش‌های بسیاری درباره پیش‌بینی شکست و راهبردهای نگهداری شبکه جمع‌آوری فاضلاب انجام شده است. بیشتر مطالعات بر یک شبکه زیربنایی متمرکز است. چوغتای و زاید (۲۰۰۸)، تعریف چارچوبی با هدف پیش‌بینی شرایط لوله انتقال فاضلاب با توجه به نوع مواد اولیه، مواد بستر و طبقه‌بندی خیابان‌ها در سازه‌های موجود و شرایط بهره‌برداری شبکه فاضلاب را پیشنهاد کردند (چوغتای و زاید، ۲۰۰۸). البرغاوی و زاید (۲۰۰۶)، برای پیش‌بینی و با توجه به نوع لوله، اندازه، سن و درصد شکستگی به ارائه مدل رتبه‌بندی شبکه آب با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی اقدام کردند (البرغاوی و زاید، ۲۰۰۶).

لشکری‌زاده و حسینی در سال ۱۳۹۵، پژوهشی برای ارزیابی و رتبه‌بندی آسیب‌پذیری فاضلاب‌روها از عامل‌های عملکرد هیدرولیکی، شرایط درونی، عمر، جنس و قطر فاضلاب‌رو، استفاده و ارزیابی و رتبه‌بندی آسیب‌پذیری با روش مجموع وزنی (SAW) انجام دادند (لشکری‌زاده و حسینی، ۱۳۹۵). عنبری و تابش (۱۳۹۵)، مدلی برای محاسبه احتمال رویداد شکست در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از شبکه بیزین معرفی کردند که با توجه به قابلیت‌های شبکه‌های بیزین و ویژگی‌های سیستم‌های فاضلاب، مدل ارائه‌شده، کارایی زیادی دارد. روش ارائه‌شده، چهار گام اساسی آماده‌سازی ورودی‌های مدل، آموزش شبکه بیزین، صحت‌سنجی شبکه آموزش‌دیده و دریافت نتایج خروجی دارد. برای نشان‌دادن کاربرد روش معرفی‌شده، قسمتی از شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهر تهران به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد و با استفاده از احتمال رویداد شکست به‌دست آمده از مدل، فاضلاب‌روها در پنج گروه از نظر اولویت برنامه‌های بازرسی و نگهداری تقسیم شده است.

در پژوهش کاشفی و همکاران (۱۳۹۸)، مدل آماری رگرسیون لجستیک برای تحلیل متغیرهای تأثیرگذار در

شکست لوله‌های شبکه آبرسانی شهری به کار رفت و عامل‌هایی مانند قطر لوله، فشار، سن شبکه و طول لوله بررسی شد. برای ارزیابی این متغیرها از اطلاعات و داده‌های جمع‌آوری‌شده حوادث لوله‌ها در ۳ سال، در شبکه توزیع آب قسمتی از منطقه ۸ آب و فاضلاب شهر کرج در استان البرز استفاده شد.

نوروزی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب شهری در مقابل مخاطرات طبیعی اقدام و به‌عنوان مطالعه موردی، شبکه فاضلاب منطقه یک آبفای شهر تهران را بررسی کردند. روش تحقیق آنها برپایه روش توصیفی-تحلیلی و با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی بود. در مراحل پژوهش، ابتدا زیرمعیارهای مؤثر بر آسیب‌پذیری منطقه پژوهش، تعریف و به روش AHP-FUZZY وزن‌دهی شد و در نتیجه، میزان تاثیر هر کدام بر آسیب‌پذیری شاخص‌های مدنظر مشخص و با به‌کارگیری مدل TOPSIS توزیع شد.

در پژوهش داهر و همکاران (۲۰۱۸)، وزن‌های نسبی مختلف ایرادها و آسیب‌های اجزای سازنده شبکه فاضلاب، اعم از خط لوله، اتصالات مربوط و آدم‌روها با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) به‌عنوان یک روش جمع‌آوری تعیین شد. اینانلو و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی، اقدام به ایجاد چارچوبی برای ارزیابی یکپارچه آسیب‌پذیری‌های سرویس براساس احتمال وقوع خطاهای فردی سیستم، پیامدها و تعاملات بالقوه با سایر شبکه‌های زیرساخت کردند. در پژوهش قوامی و همکاران (۲۰۲۰)، روش مؤثری برای ارزیابی ریسک شکست خطوط لوله فاضلاب با ترکیبی از GIS و AHP-DEA ارائه شد. از مدل پیشنهادی در این پژوهش برای ارزیابی خطر خرابی شبکه جمع‌آوری فاضلاب بخشی از محدوده آبفای منطقه ۴ شهر تهران استفاده شد.

در پژوهش پیش‌رو، به ارزیابی و رتبه‌بندی آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب اجراشده در بخشی از منطقه ۵ شهرداری تهران با استفاده از تلفیق مدل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و تکنیک GIS اقدام شد.

مواد و روش‌ها

الف - محدوده مطالعه موردی

منطقه مورد مطالعه، شبکه فاضلاب اجراشده در بخشی از منطقه ۵ شهرداری تهران است که از سمت شمال به

ج- تشریح فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

واژه AHP مخفف عبارت Analytical Hierarchy Process به معنی «فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی» است. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، یکی از کارآمدترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که اولین بار، توماس ساعتی در سال ۱۹۹۰ ارائه کرد (ساعتی، ۱۹۹۰). کاربرد AHP در مسائل مبتنی بر تصمیم‌گیری، دربردارنده چهار گام اساسی تبدیل صورت مسئله به ساختار مدل سلسله‌مراتبی، انجام‌دادن مقایسه زوجی و به‌دست آوردن ماتریس داوری، محاسبه وزن نسبی عامل‌ها و بررسی سازگاری مقایسه‌ها و درنهایت، تجمع وزن‌ها در سطوح مختلف و محاسبه وزن نهایی گزینه‌هاست (سابرامانیان و راماناتان، ۲۰۱۲).

در AHP، عامل‌ها به‌صورت زوجی با یکدیگر مقایسه می‌شود و بیشترین وزن به لایه‌ای تعلق می‌گیرد که بیشترین تأثیر را در تعیین هدف دارد. در وزن‌دهی معیارها، قضاوت‌های شفاهی به کار می‌رود که به‌صورت مقایسه‌ای بین عامل‌ها انجام می‌شود.

این قضاوت‌ها را ساعتی (۱۹۹۰) به مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ تبدیل کرد. در این مرحله، عناصر یک سطح مشخص با توجه به عنصری خاص در سطح بالایی بی‌واسطه مقایسه می‌شود. وزن‌های حاصل عناصر را وزن‌های نسبی می‌نامند و عنصری که رتبه بالاتری دارد، ارجح محسوب می‌شود (قدسی‌پور، ۱۳۸۸).

جدول ۲- ماتریس معیارهای هدف

هدف	گرفتگی آدمرو	گرفتگی لوله	گرفتگی انشعاب	وزن نسبی
گرفتگی آدمرو	۱	۰/۲۵	۲	۰/۱۷۷۳
گرفتگی لوله	۴	۱	۹	۰/۷۳۷۵
گرفتگی انشعاب	۰/۵	۰/۱۱۱۱	۱	۰/۰۸۵۲
نرخ ناسازگاری:	۰/۰۱۳		جمع:	۱

ج- محاسبه وزن نسبی عامل‌های گرفتگی آدمرو

در پژوهش پیش رو، براساس مطالعات کتابخانه‌ای و نظر کارشناسان مربوط، گرفتگی آدمرو در چهار سطح عیوب بدنه، عیوب روش اجرا، عیوب محیطی و عیوب نیروی انسانی بررسی شد. پس از تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی، با استفاده از روش تقریبی میانگین‌گیری، وزن نسبی متغیرهای مؤثر بر گرفتگی آدمرو براساس جدول ۳ به دست آمد. براساس وزن‌های حاصل از تحلیل سلسله‌مراتبی این عامل، عیوب مرتبط با روش اجرا، بیشترین تأثیر را در آسیب‌پذیری آدمرو شبکه فاضلاب

نتایج و بحث

الف- تدوین ساختار سلسله‌مراتبی در تحلیل شبکه

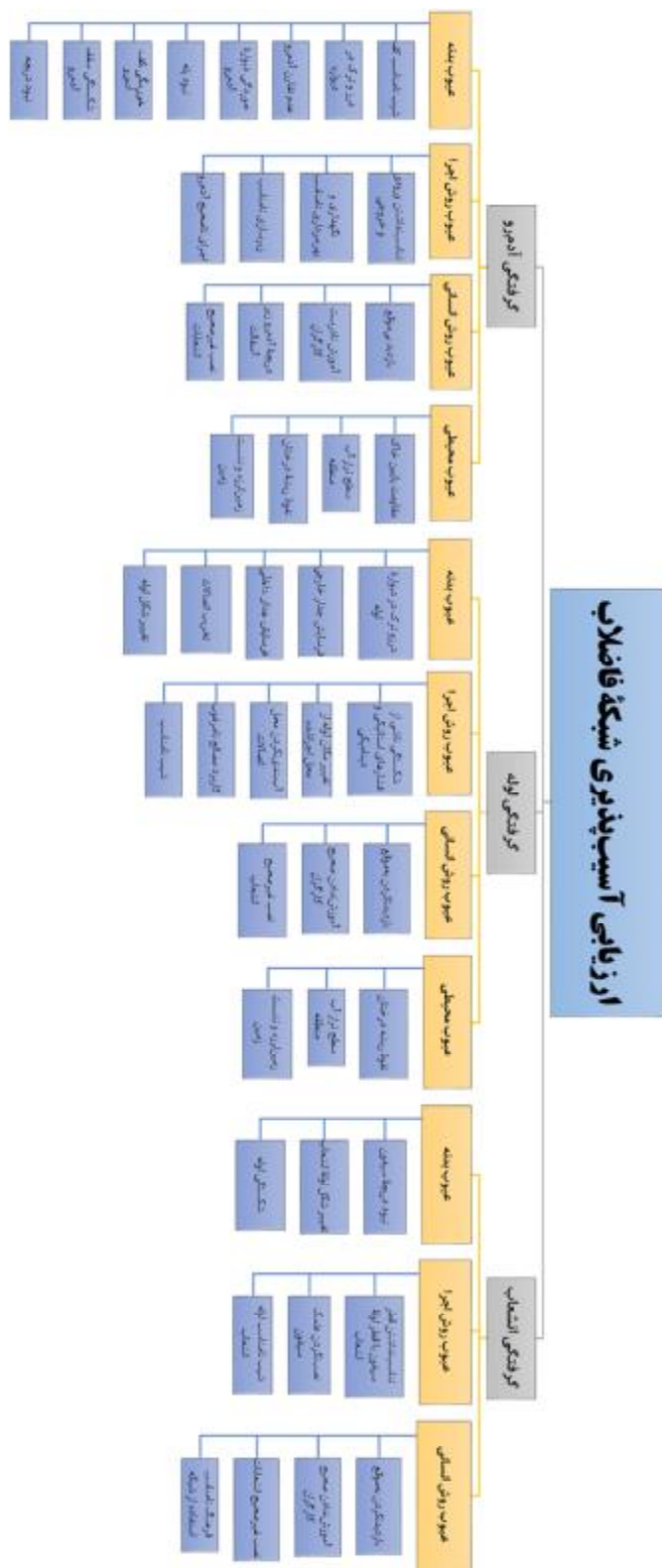
جمع‌آوری فاضلاب

در پژوهش حاضر، عامل‌ها و معیارهای مؤثر بر تخریب شبکه فاضلاب، شامل سطوح به شرح شکل ۲ است.

ب- محاسبه وزن نسبی عامل‌های هدف

پس از تشخیص عامل‌های آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب اجراشده در منطقه مطالعاتی و تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی، با استفاده از روش تقریبی میانگین‌گیری حسابی، وزن نسبی متغیرها در سه سطح کلی گرفتگی لوله، گرفتگی انشعاب و گرفتگی آدمرو محاسبه شد. نتایج حاصل از وزن‌دهی، ماتریس‌های مقایسه زوجی و محاسبه بردار وزن عامل‌های هدف در آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب در منطقه مطالعاتی به‌صورت جدول ۲ است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، بیشترین آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب مربوط به گرفتگی لوله است که این امر، مؤید نتایج پژوهش‌های بسیاری از پژوهشگران در این زمینه است (چوغتای و زاید، ۲۰۰۸؛ البرغای و زاید، ۲۰۰۶؛ لشکری‌زاده و حسینی، ۱۳۹۵).

دارد. در گام بعدی، برای هر یک از چهار معیار عیوب بدنه، عیوب روش اجرا، عیوب محیطی و عیوب نیروی انسانی، تعدادی زیرمعیار کیفی و کمی در نظر گرفته شد؛ به این ترتیب که شیب نامناسب کف آدمرو، درز و ترک در دیواره، عدم تقارن آدمرو، خوردگی دیواره آدمرو، خوردگی کف آدمرو، شکستگی سقف آدمرو، نبود پله و نبود دریچه به‌عنوان زیرمعیارهای عیوب بدنه مؤثر در گرفتگی آدمرو بررسی شد. وزن‌دهی این عامل‌ها براساس جدول ۳ انجام شد و شیب نامناسب کف آدمرو به‌عنوان مهم‌ترین زیرمعیار در عیوب بدنه آدمرو به دست آمد.



شکل ۲- ساختار سلسله‌مراتبی در تحلیل شبکه جمع‌آوری فاضلاب

بازدید نکردن به موقع، آموزش ندادن صحیح کارگران، نصب غیر صحیح انشعابات و قرار گرفتن دریچه آدمرو زیر آسفالت

برای تبیین عیوب مربوط به نیروی انسانی در ساخت و نگهداری آدمروهای فاضلاب‌رو، چهار زیرمعیار

در بررسی زیرمعیار متناسب‌نبودن ورودی و خروجی در گرفتگی آدمرو نیز داده‌ها در سه دسته براساس جدول ۳ طبقه‌بندی و به روش AHP وزن‌دهی شد. براساس نشریه ۱۶۳ سازمان برنامه و بودجه، در مواردی که فاضلاب‌رو ورودی از ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و یا بیشتر به داخل آدمرو می‌ریزد، باید از آدمروی ریزشی استفاده شود (نشریه ۱۶۳ سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۷۸). براساس وزن‌های حاصل از تحلیل سلسله‌مراتبی این متغیر، با افزایش اختلاف ارتفاع ورودی و خروجی آدمرو، آسیب واردشده به آدمرو فاضلاب، افزایش زیادی دارد.

هنگامی که ریشه درخت به یک محل اتصال یا ترک در آدمرو می‌رسد، برای دستیابی به رطوبت به درون لوله نفوذ می‌کند. ریشه درختان به‌طور کامل، آدمرو را پر می‌کند و فشار زیادی در شکاف یا محل اتصال ایجاد می‌کند. مطابق وزن‌های به‌دست آمده در جدول ۳، آسیب‌پذیری آدمرو با درصد نفوذ ریشه درختان در آدمرو، نسبت مستقیم دارد و بیشترین میزان تخریب در نفوذ بیشتر از ۷۵ درصد ریشه درختان در آدمرو رخ می‌دهد.

د- محاسبه وزن نسبی عامل‌های گرفتگی لوله

در این بخش نیز براساس نتایج سایر پژوهشگران، نشریات تخصصی سازمان برنامه و بودجه و نظر کارشناسان مربوط، گرفتگی لوله در چهار دسته عیوب بدنه، عیوب روش اجرا، عیوب محیطی و عیوب نیروی انسانی طبقه‌بندی شد. پس از تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی، با استفاده از روش تقریبی میانگین‌گیری، وزن نسبی متغیرها براساس جدول ۴ به دست آمد. مشابه آنچه در بررسی عامل‌های تخریب آدمرو به دست آمد، براساس وزن‌های حاصل از تحلیل سلسله‌مراتبی، عیوب مرتبط با روش اجرا، بیشترین تأثیر را در تخریب خط لوله فاضلاب‌رو دارد. پس از وزن‌دهی عامل‌های اصلی، برای هر یک از چهار معیار عیوب بدنه، عیوب روش اجرا، عیوب محیطی و عیوب نیروی انسانی، تعدادی زیرمعیار کیفی و کمی در نظر گرفته شد؛ به این ترتیب که درز و ترک در دیواره لوله، فرسایش جدار خارجی، فرسایش جدار داخلی، تخریب اتصالات و تغییر شکل لوله به‌عنوان زیرمعیارهای عیوب بدنه مؤثر در گرفتگی خط لوله فاضلاب‌رو بررسی شد. وزن‌دهی این زیرمعیارها به روش AHP و براساس ماتریس مندرج در جدول ۴ انجام شد و فرسایش جدار داخلی لوله به‌عنوان

بررسی شد. پس از تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی، با استفاده از روش تقریبی میانگین‌گیری، وزن نسبی زیرمعیارهای عیوب مربوط به نیروی انسانی در ساخت و نگهداری آدمروهای فاضلاب‌رو براساس جدول ۳ به دست آمد. براساس این تحلیل، بیشترین تأثیر مربوط به زیرمعیار نصب غیرصحیح انشعابات است.

براساس مطالعات کتابخانه‌ای، بررسی نشریات و نیز نظر کارشناسان مربوط، مقاومت کم خاک، نفوذ ریشه درختان، سطح تراز آب منطقه، زمین‌لرزه و نشست زمین، به‌عنوان مهم‌ترین عامل‌های محیطی در گرفتگی آدمرو بررسی شد. خاک‌ها از لحاظ فیزیکی و شیمیایی، انواع مختلفی دارد که تأثیرات آنها بر خط لوله متفاوت است. برخی از خاک‌ها خورنده است. انواع دیگری از خاک‌ها در مواجهه با تغییر رطوبت، بسیار تغییر می‌کند که این مسئله، سبب تغییراتی در بارگیری لوله می‌شود. حضور هیدروکربن‌ها و حلال‌ها در خاک ممکن است باعث تخریب لوله شود (هاواری و همکاران، ۲۰۲۰). در مطالعه مروری دیویس و همکاران در سال ۲۰۰۱، حضور آب‌های زیرزمینی، به‌طور بالقوه باعث ریزش زمین و حمایت‌نکردن آدمرو و لوله‌ها می‌شود (دیویس و همکاران، ۲۰۰۱).

در این مرحله نیز وزن نسبی زیرمعیارهای عیوب محیطی در گرفتگی آدمرو براساس جدول ۳ به دست آمد. براساس این تحلیل، بیشترین تأثیر به زیرمعیار مقاومت کم خاک پیرامون آدمرو مربوط است. در میان عامل‌ها و معیارهای آسیب‌پذیری آدمروی فاضلاب‌رو، که تاکنون بحث شد، شیب نامناسب کف آدمرو در گروه عیوب بدنه، متناسب‌نبودن ورودی و خروجی آدمرو در گروه عیوب روش اجرا و نفوذ ریشه درختان در گروه عیوب محیطی، از جمله ایرادهای کمی ساخت و نگهداری آدمرو فاضلاب‌رو به شمار می‌رود.

با مطالعه کتابخانه‌ای، بررسی بخشنامه‌ها و نشریات شماره ۱۱۸ و ۱۶۳ سازمان برنامه و بودجه و نیز نظر کارشناسان مربوط، طبقه‌بندی کمی آسیب‌های یادشده براساس جدول ۳ تعریف شد. در بررسی عامل شیب نامناسب کف آدمرو در تخریب شبکه جمع‌آوری فاضلاب، همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش مقدار شیب آدمرو، میزان آسیب‌پذیری شبکه نیز افزایش می‌یابد و بیشترین میزان آسیب در شیب‌های بیشتر از ۱۲ درصد حاصل شد.

مصالح نامرغوب و شیب نامناسب لوله بررسی شد. در ادامه، وزن نسبی زیرمعیارهای عیوب روش اجرا در گرفتگی لوله نیز براساس جدول ۴ مشخص شد. براساس وزن‌های نسبی به‌دست آمده، بیشترین تأثیر مربوط به زیرمعیار شکستگی ناشی از فشارهای استاتیک و دینامیک است.

مهم‌ترین زیرمعیار در عیوب بدنه خط لوله فاضلاب به دست آمد. به همین ترتیب، درباره عیوب روش اجرای لوله‌های فاضلاب، پنج زیرمعیار شکستگی ناشی از فشارهای استاتیک و دینامیک، تغییر مکان لوله از محل اجراشده، آب‌بندی‌نکردن محل اتصال لوله‌ها، کاربرد

جدول ۳- خلاصه وزن‌های نسبی و کلی هدف، معیارها و زیرمعیارها در گرفتگی آدمرو

هدف	معیار	زیر معیار	محدوده	وزن نسبی	وزن کلی
		درز و ترک در دیواره	-	۰/۰۹۶۸	۰/۰۲۴۸
		عدم تقارن آدمرو	-	۰/۰۷۸۵	۰/۰۲۰۱
		خوردگی دیواره	-	۰/۰۷۴۶	۰/۰۱۹۱
		خوردگی کف آدمرو	-	۰/۲۶۴۱	۰/۰۶۷۷
		شکستگی سقف آدمرو	-	۰/۰۸۸۸	۰/۰۲۲۸
عیوب بدنه		نیود پله	-	۰/۰۲۵۶	۰/۰۰۶۶
	۰/۲۵۶۴	نیود دریچه	-	۰/۰۵۷۶	۰/۰۱۴۸
			۰/۱۵٪ - ۰/۴٪	۰/۰۳۲۲	۰/۰۰۸۳
			۰/۴٪ - ۲/۵٪	۰/۰۵۹۱	۰/۰۱۵۲
		شیب کف آدمرو	۲/۵٪ - ۶/۳٪	۰/۱۲۶۶	۰/۰۳۲۵
		۰/۳۱۴۱	۶/۳٪ - ۱۲٪	۰/۲۵۷۹	۰/۰۶۶۱
			> ۱۲٪	۰/۵۲۴۲	۰/۱۳۴۴
		نگهداری و بهره‌برداری نامناسب	-	۰/۰۵۸۱	۰/۰۳۴۰
		زیرسازی نامناسب	-	۰/۲۱۴۹	۰/۱۲۵۶
گرفتگی آدمرو	عیوب روش اجرا	اجرای ناصحیح آدمرو	-	۰/۲۹۹۰	۰/۰۱۷۵
		متناسب‌نبودن ورودی و خروجی آدمرو	۶۰ سانتی‌متر < ۱۲۰ - ۶۰ سانتی‌متر ۳۲۰ - ۱۲۰ سانتی‌متر	۰/۰۸۱۰	۰/۰۴۷۳
	۰/۵۸۴۴	۰/۴۲۸۰		۰/۷۳۰۶	۰/۴۲۷۰
		مقاومت کم خاک	-	۰/۰۶۵۹	۰/۰۳۳۷
		سطح تراز آب منطقه	-	۰/۰۶۸۴	۰/۰۰۳۸
		زمین‌لرزه و نشست زمین	-	۰/۲۲۹۰	۰/۰۱۲۸
عیوب محیطی			< ۵٪	۰/۰۳۶۲	۰/۰۰۲۰
	۰/۰۵۵۷		۵٪ - ۱۹٪	۰/۰۵۲۶	۰/۰۰۲۹
		نفوذ ریشه درختان در آدمرو	۲۰٪ - ۴۹٪	۰/۱۲۶۹	۰/۰۰۷۱
		۰/۰۹۶۷	۵۰٪ - ۷۵٪	۰/۲۵۸۳	۰/۰۱۴۴
			> ۷۵٪	۰/۵۲۶۰	۰/۰۲۹۳
		بازدید نکردن به‌موقع	-	۰/۱۵۷۴	۰/۰۱۶۳
عیوب انسانی		آموزش ناصحیح کارگران	-	۰/۳۴۸۵	۰/۰۲۶۱
	۰/۱۰۳۶	نصب غیر صحیح انشعابات	-	۰/۳۷۴۵	۰/۰۳۸۸
		دریچه آدمرو زیر آسفالت	-	۰/۱۱۹۶	۰/۰۱۲۴

تخریب لوله‌های فاضلاب براساس جدول ۴ به دست آمد. مطابق این تحلیل، بیشترین تأثیر به زیرمعیار بازدید نکردن به‌موقع مربوط است. در پایان نیز براساس مطالعات کتابخانه‌ای، بررسی نشریات و نظر کارشناسان مربوط، نفوذ ریشه درختان، سطح تراز آب منطقه، زمین‌لرزه و نشست زمین به‌عنوان مهم‌ترین عامل‌های محیطی در گرفتگی

برای تبیین نقش عیوب مربوط به نیروی انسانی در تخریب خطوط لوله فاضلاب، سه زیرمعیار بازدید نکردن به‌موقع، آموزش ندادن صحیح کارگران و نصب غیر صحیح انشعابات بررسی شد. پس از تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی، با استفاده از روش تقریبی میانگین‌گیری، وزن نسبی زیرمعیارهای عیوب مربوط به نیروی انسانی در

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، بیشترین وزن تخریب شبکه فاضلاب در شیب‌های ۰/۱۵ درصد تا ۰/۴ درصد به دست آمد. مسئله مهم در طراحی شبکه جمع‌آوری و انتقال فاضلاب، سرعت انتقال آن است. انتخاب این سرعت به این علت اهمیت دارد که شبکه جمع‌آوری به صورت ثقلی طراحی و اجرا می‌شود؛ بنابراین، از شیب زمین برای انتقال استفاده می‌شود. سرعت تقریبی حرکت فاضلاب باید ۷۰ سانتی‌متر در ثانیه باشد تا شست‌وشوی لوله به صورت خودکار انجام شود. همان‌گونه که در اجرای شبکه جمع‌آوری فاضلاب، مقادیر شیب کمتری در نظر گرفته شود، فاضلاب به درستی داخل لوله‌ها حرکت نمی‌کند و این امر باعث رسوب و گرفتگی لوله‌های فاضلاب می‌شود.

در ادامه، مقادیر زیرمعیار نفوذ ریشه درختان در گرفتگی لوله در پنج گروه مطابق جدول ۴ طبقه‌بندی و به روش AHP تحلیل و وزن‌دهی شد. انسداد لوله‌های فاضلاب بر اثر نفوذ ریشه درختان بسیار متداول است. براساس گزارش‌های ارائه‌شده، لوله‌های قدیمی بتنی و سفالی نسبت به نفوذ ریشه درختان در مقایسه با لوله‌های مدرن ساخته‌شده از PVC، به مراتب حساس‌تر است؛ اگرچه، نفوذ ریشه در لوله‌های مدرن نیز ممکن است اتفاق بیفتد. محل‌های اتصال لوله‌ها اصلی‌ترین نقاط نفوذ ریشه درختان است. تعداد نقاط اتصال موجود در مسیر لوله‌گذاری به ابعاد لوله و جنس آن بستگی دارد (استبرگ و همکاران، ۲۰۱۲).

مطابق وزن‌های به‌دست آمده در جدول ۴، مانند آنچه در بررسی زیرمعیار نفوذ ریشه درختان در گرفتگی آدم‌رو به دست آمد، آسیب‌پذیری خط لوله فاضلاب‌رو با درصد نفوذ ریشه درختان در آدم‌رو نسبت مستقیم دارد و بیشترین میزان تخریب در نفوذ بیشتر از ۷۵ درصد ریشه درختان در آدم‌رو رخ خواهد داد.

و- محاسبه نرخ ناسازگاری

نرخ ناسازگاری برای ماتریس‌های عامل‌های کمی مؤثر بر آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب محاسبه شد و کمتر از ۰/۱ به دست آمد. جدول ۵، خلاصه‌ای از نرخ سازگاری ماتریس‌های مقایسه زوجی مورد استفاده در تحلیل سلسله‌مراتبی است.

لوله فاضلاب‌رو بررسی شد. بر این اساس و مطابق وزن‌های ارائه‌شده در ماتریس AHP مندرج در جدول ۴، انتظار می‌رود زمین‌لرزه و نشست زمین، بیشترین تأثیر را بر تخریب خط لوله فاضلاب‌رو داشته باشد.

در میان عامل‌ها و معیارهای آسیب‌پذیری خط لوله فاضلاب‌رو، که تاکنون بحث شد، درز و ترک در دیواره لوله و تغییر شکل لوله در گروه عیوب بدنه، شیب‌بندی نامناسب لوله در گروه عیوب روش اجرا و نفوذ ریشه درختان در گروه عیوب محیطی، از جمله ایرادهای کمی خط لوله فاضلاب به شمار می‌رود.

در جدول ۴، براساس نشریه ۶۷۷ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (شیوه‌نامه انجام عملیات ویدیومتری شبکه‌های فاضلاب) منظور از اتصال باز متوسط، درز و ترک‌های بین ۱ تا ۱/۵ برابر ضخامت لوله و اتصال باز بزرگ ۱، شکاف‌های بیشتر از ۱/۵ برابر ضخامت لوله تا حداکثر ۵ درصد قطر فاضلاب‌رو است. به همین ترتیب، اتصال باز بزرگ ۲ معادل درزهای بیشتر از ۵ درصد قطر تا ۱۰ درصد قطر فاضلاب‌رو و اتصال باز بزرگ ۳ برابر با ترک‌های بیشتر از ۱۰ درصد قطر در جداره لوله است (نشریه ۶۷۷ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۴). همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، بیشترین میزان آسیب‌پذیری خط لوله فاضلاب‌رو ناشی از اتصال باز متوسط (درز و ترک‌های بین ۱ تا ۱/۵ برابر ضخامت لوله) است.

از جمله آسیب‌های خط لوله به تغییر شکل لوله می‌توان اشاره کرد. براساس تعریف، تغییر زیاد در سطح مقطع لوله را تغییر شکل لوله می‌نامند که به‌صورت درصدی از مقدار اسمی عرض (تغییر شکل افقی) یا ارتفاع (تغییر شکل عمودی) سطح مقطع لوله تعریف می‌شود (داهر و همکاران، ۲۰۱۸). براساس وزن‌های حاصل از تحلیل سلسله‌مراتبی متغیر تغییر شکل لوله، با افزایش میزان تغییر شکل لوله، آسیب وارد به خط لوله فاضلاب، افزایش بسیاری دارد؛ به‌گونه‌ای که بیشترین تخریب در تغییر شکل‌های بیشتر از ۱۰ درصد رخ داده است.

شیب لوله از جمله متغیرهای فیزیکی است که در بسیاری از پژوهش‌ها بررسی شده است. (محمدی و همکاران، ۲۰۱۹؛ سلمان و سالم، ۲۰۱۲؛ الصغار و همکاران، ۲۰۱۷؛ نجفی و کولانداپول، ۲۰۰۵). در بررسی اثر زیرمعیار شیب نامناسب بر گرفتگی لوله، داده‌ها در پنج دسته براساس جدول ۴ طبقه‌بندی و وزن‌دهی شد.

جدول ۴- خلاصه وزن‌های نسبی و کلی هدف، معیارها و زیرمعیارها در گرفتگی لوله

هدف	معیار	زیر معیار	محدوده	وزن نسبی	وزن کلی
		فرسایش جدار خارجی	-	۰/۰۵۶۳	۰/۰۱۰۸
		فرسایش جدار داخلی	-	۰/۴۸۲۳	۰/۰۹۲۴
		تخریب اتصالات	-	۰/۲۵۰۵	۰/۰۴۸۰
		تغییر شکل لوله	۵٪ - ۰٪	۰/۰۷۶۹	۰/۰۱۴۷
	عیوب بدنه	۰/۰۵۶۳	۱۰٪ - ۶٪	۰/۲۳۰۸	۰/۰۴۴۲
	۰/۱۹۱۵		> ۱۰٪	۰/۶۹۲۳	۰/۱۳۲۶
		درز و ترک در دیواره لوله	اتصال باز متوسط	۰/۵۹۴۱	۰/۱۱۳۸
			اتصال باز بزرگ ۱	۰/۲۷۲۲	۰/۰۵۲۱
			اتصال باز بزرگ ۲	۰/۰۸۶۷	۰/۰۱۶۶
			اتصال باز بزرگ ۳	۰/۰۴۷۰	۰/۰۰۹۰
		شکستگی ناشی از فشارهای استاتیک و دینامیک	-	۰/۳۳۰۶	۰/۲۱۶۲
		تغییر مکان لوله از محل اجرا	-	۰/۱۶۱۵	۰/۰۰۵۶
		آب‌بندی نکردن محل اتصال لوله‌ها	-	۰/۱۱۵۵	۰/۰۷۵۵
	عیوب روش اجرا	کاربرد مصالح نامرغوب	-	۰/۰۸۷۵	۰/۰۵۷۲
گرفتگی لوله	۰/۶۵۴۱		۰/۱۵٪ - ۰/۴٪	۰/۵۰۴۳	۰/۳۲۹۹
۰/۷۳۷۵			۰/۴٪ - ۲/۵٪	۰/۲۵۱۹	۰/۱۶۴۸
		شیب نامناسب لوله	۲/۵٪ - ۶/۳٪	۰/۱۳۷۰	۰/۰۸۹۶
		۰/۳۰۴۹	۱۳٪ - ۶/۳٪	۰/۰۷۲۰	۰/۰۴۷۱
			> ۱۲٪	۰/۰۲۴۸	۰/۰۲۲۸
		سطح تراز آب منطقه	-	۰/۲۳۸۵	۰/۰۱۸۴
		زمین‌لرزه و نشست زمین	-	۰/۶۲۵۰	۰/۰۴۸۳
		نفوذ ریشه درختان در شبکه	< ۵٪	۰/۰۲۲۲	۰/۰۰۲۳
	عیوب محیطی	۰/۷۷۲۲	۵٪ - ۱۹٪	۰/۰۵۹۱	۰/۰۰۴۳
		۰/۱۳۶۵	۲۰٪ - ۴۹٪	۰/۱۲۶۶	۰/۰۰۹۱
			۵۰٪ - ۷۵٪	۰/۲۵۷۹	۰/۰۱۸۶
			> ۷۵٪	۰/۵۲۴۲	۰/۰۳۷۸
	عیوب انسانی	بازدید نکردن به موقع	-	۰/۴۸۰۶	۰/۰۳۷۱
	۰/۰۷۷۲	آموزش ندادن صحیح کارگران	-	۰/۴۰۵۴	۰/۰۳۱۳
		نصب غیر صحیح انشعابات	-	۰/۱۱۴۰	۰/۰۰۸۸

ز- مراحل تهیه خروجی گرافیکی با تکنیک GIS

پس از محاسبه وزن‌های نسبی و کلی در تحلیل سلسله‌مراتبی، لایه رقومی معیارهای کمی گرفتگی آدمرو، گرفتگی لوله در محیط نرم‌افزار ArcGIS بارگذاری شد. ابتدا با دستور Feature to Raster به تهیه رستر مجزا از فیلدهای جدول توصیفی هر یک از لایه‌ها اقدام و مقادیر، طبقه‌بندی شد. با استفاده از مجموعه Spatial Analyst و ابزار Reclassify، پس از تقسیم‌بندی ارزش پیکسل‌ها در طبقات مدنظر، لایه رستری تولید شد که از تلفیق رسترهای موجود در یک طبقه، طبقاتی از یک جنس و یک نوع ساخته می‌شود. پس از طبقه‌بندی داده‌ها، وزن‌های به‌دست آمده

از تحلیل سلسله‌مراتبی به رستر، اعمال و خروجی رستری وزن‌های نسبی هر یک از زیرمعیارها تهیه شد. درحقیقت، هدف نهایی تکنیک GIS به‌کاررفته در این پژوهش، هم‌پوشانی نهایی تمامی عامل‌های مؤثر در آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب در دو سطح گرفتگی آدمرو و گرفتگی لوله و ارائه نقشه پهنه‌بندی آسیب در شبکه مورد مطالعه است. توجه به این نکته مهم است که نقشه‌های رستری تبدیل‌شده برای هر یک از عامل‌های مؤثر، واحدهای مختلفی دارد که باید با روش عضویت‌دهی فازی هم‌مقیاس شود؛ درنتیجه، تمامی مقادیر بین صفر و ۱ تغییر می‌کند. در ادامه، برای فازی کردن رستر طبقه‌بندی‌شده از توبلاکس Spatial Analyst Tools و

منوی Overlay، دستور Fuzzy Membership اجرا شد؛ به این ترتیب، رستر فازی زیرمعیارهای کمی مؤثر در

آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب به دست آمد.

جدول ۵- خلاصه نرخ ناسازگاری ماتریس‌های مقایسه‌ی عامل‌ها

هدف		آسیب‌پذیری شبکه جمع‌آوری فاضلاب	
نرخ ناسازگاری		۰/۰۰۱۳	
عامل	گرفتنی آدمرو	گرفتنی لوله	
نرخ ناسازگاری	۰/۰۱۵۱	۰/۰۲۷۱	
معیار	عیوب بندنه عیوب روش اجرا عیوب محیطی عیوب انسانی	عیوب بندنه عیوب روش اجرا عیوب محیطی عیوب انسانی	
نرخ ناسازگاری	۰/۰۲۸۹ ۰/۰۲۵۳ ۰/۰۱۷۴	۰/۰۲۶۸ ۰/۰۱۶۶ ۰/۰۱۵۸ ۰/۰۲۵۱	
زیرمعیار کمی	تناسب ورودی و خروجی آدمرو شیب کف آدمرو نفوذ ریشه درختان در آدمرو	درز و ترک در دیواره لوله تغییر شکل لوله شیب لوله نفوذ ریشه درختان در لوله	
نرخ ناسازگاری	۰/۰۵۵۹ ۰/۰۵۱۷ ۰/۰۲۳	۰/۰۲۷۴ ۰/۰۳۶۵ ۰/۰۵۱۷	

ح- نتایج تحلیل سلسله‌مراتبی

پس از تأیید معنی‌داری ماتریس‌های داوری عامل‌های مؤثر در آسیب‌پذیری شبکه جمع‌آوری فاضلاب، وزن نهایی معیارها برای تهیه نقشه پهنه‌بندی منطقه به لایه‌های متناظر اعمال شد. برای اعمال صحیح وزن‌های به‌دست آمده و ارائه مدل نهایی در محیط ArcGIS از روش Weighted Overlay بهره گرفته شده است؛ به این ترتیب که رستر فازی شده در تولباکس Spatial Analyst Tools و منوی Overlay به کمک دستور Weighted Sum اضافه و از تجمیع وزن‌های به‌دست آمده، وزن کلی هر یک از عامل‌های هدف در آسیب‌پذیری شبکه جمع‌آوری فاضلاب مشخص شد. پهنه‌بندی نهایی آسیب‌پذیری شبکه جمع‌آوری فاضلاب اجرا شده در بخشی از منطقه ۵ شهرداری تهران در دو سطح آدمرو و خط لوله به صورت شکل‌های ۳ و ۴ است.

براساس طبقه‌بندی میزان آسیب‌پذیری آدمروهای فاضلاب مندرج در جدول ۶، احتمال شکست آدمروهای اجرا شده

در شبکه مورد مطالعه بسیار کم است و بیشتر از ۷۰ درصد آدمروهای اجرا شده در رده میزان آسیب کم و خیلی کم طبقه‌بندی شده است. از علل احتمالی این امر به کم‌بودن سن و اجرای اصولی شبکه اجرا شده می‌توان اشاره کرد. هم‌پوشانی نهایی عامل‌ها و زیرمعیارهای مؤثر بر آسیب‌پذیری خطوط لوله شبکه فاضلاب به صورت پهنه‌بندی گرافیکی شکل ۴ است.

براساس طبقه‌بندی انجام‌شده، میزان آسیب‌پذیری خط لوله اجرا شده فاضلاب مندرج در جدول ۷، احتمال تخریب خطوط لوله اجرا شده در شبکه مورد مطالعه بسیار کم است و بیشتر از ۷۴ درصد خطوط لوله جمع‌آوری فاضلاب اجرا شده در محدوده مطالعه موردی، در رده میزان آسیب کم و متوسط طبقه‌بندی شده است.

نتایج نشان داد فقط ۳۰ مسیر انتقال فاضلاب (حدود ۷ درصد شبکه) در شرایط بحرانی قرار دارد که باید توجه بیشتری به آنها نشان داد. تعداد کم خطوط لوله بحرانی به علت عمر کم خطوط لوله اجرا شده است.

جدول ۷- پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری خط لوله در شبکه فاضلاب

درصد طبقه‌بندی	تعداد مسیر لوله‌گذاری	مترای لوله‌گذاری (متر)	میزان آسیب‌پذیری خط لوله در شبکه فاضلاب
۱۱/۳۶	۵۱	۲۰۴۴/۶۲۴	خیلی کم
۲۳/۸۳	۱۰۷	۴۵۹۸/۰۰۳	کم
۳۸/۹۸	۱۷۵	۷۶۹۵/۴۳۴	متوسط
۱۹/۱۵	۸۶	۴۰۴۱/۸۱۰	زیاد
۶/۶۸	۳۰	۱۵۴۵/۵۴۰	خیلی زیاد
۱۰۰	۴۴۹	۲۰۱۹۵/۴۱	جمع

جدول ۶- پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری آدروهای شبکه فاضلاب

درصد طبقه‌بندی	تعداد آدرو	میزان آسیب‌پذیری آدروهای شبکه فاضلاب
۳۹/۸۷	۱۷۹	خیلی کم
۳۸/۷۵	۱۷۴	کم
۱۶/۹۳	۷۶	متوسط
۲/۴۵	۱۱	زیاد
۲/۰۰	۹	خیلی زیاد
۱۰۰	۴۴۹	جمع



شکل ۳- پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آدروهای شبکه جمع‌آوری فاضلاب



شکل ۴- پهنه‌بندی آسیب‌پذیری خطوط لوله شبکه جمع‌آوری فاضلاب

نتیجه‌گیری

خلاصه نتایج به‌دست آمده در این پژوهش شامل موارد ذیل است:

۱. در میان سه عامل هدف (گرفتگی آدم‌رو، گرفتگی لوله و گرفتگی انشعاب)، بیشترین آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب مربوط به عامل گرفتگی لوله است.

۲. عیوب روش‌های اجرا در هر دو سطح گرفتگی آدم‌رو و گرفتگی لوله، بیشترین تأثیر را دارد.

۳. احتمال شکست آدم‌روهای اجراشده در شبکه مورد مطالعه بسیار کم است و بیشتر از ۷۰ درصد آدم‌روهای اجراشده در رده میزان آسیب کم و خیلی کم طبقه‌بندی شده است.

۴. میزان آسیب‌پذیری خط لوله فاضلاب روی اجراشده در شبکه مورد مطالعه بسیار کم است و بیشتر از ۷۴ درصد خط لوله جمع‌آوری فاضلاب اجراشده در محدوده مطالعه موردی، در رده میزان آسیب کم و متوسط طبقه‌بندی شده است.

منابع

۱. سازمان برنامه و بودجه. دفتر امور فنی و تدوین معیارها. ۱۳۷۸. مکمل ضوابط طراحی شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی و فاضلاب شهری (نشریه شماره ۱۶۳. تهران: سازمان برنامه و بودجه، مرکز مدارک اقتصادی- اجتماعی و انتشارات، ۳۳ ص.
۲. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. معاونت فنی و توسعه امور زیربنایی. ۱۳۹۴. دستورالعمل انجام عملیات ویدیومتری شبکه‌های فاضلاب (ضابطه شماره ۶۷۷. تهران: سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت فنی و توسعه امور زیربنایی، وزارت نیرو، دفتر استانداردهای فنی، مهندسی، اجتماعی و زیست‌محیطی آب و آبفا. ۱۷۵ ص.
۳. عنبری م. و تابش م. ۱۳۹۵. محاسبه احتمال رویداد شکست در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از شبکه بی‌زین، فصلنامه آب و فاضلاب ۲۷(۳): ۴۸-۵۱.
۴. قدسی‌پور ح. ۱۳۸۸. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP، تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر. ۲۳۲ ص.

۵. کاشفی ح. مطیعی ه. و اطهری م. ۱۳۹۸. پیش‌بینی نرخ آسیب‌پذیری لوله‌های شبکه آبرسانی شهری با به‌کارگیری و توسعه مدل آماری رگرسیون لجستیک (مورد مطالعاتی: منطقه ۸ شهر کرج. هجدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران. دانشگاه تهران، ۳۷-۴۵، بهمن ۱۳۹۸.
۶. لشکری‌زاده ج. و حسینی س. م. ۱۳۹۵. رتبه‌بندی آسیب‌پذیری فاضلاب‌روها جهت تدوین برنامه نگهداری و بازسازی شبکه فاضلاب شهری با استفاده از روش SAW، نهمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، اردیبهشت ماه، ۱-۸.
۷. نوروزی ر. قهرودی م. و درفشی خه‌بات. خ. ۱۳۹۸. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب شهری در مقابل مخاطرات طبیعی (مطالعه موردی: منطقه یک آبفا شهر تهران. فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای. ۱۰(۳۴): ۱۴۹-۱۶۲.

8. Al-Barqawi H. and Zayed T. 2006. Condition rating model for underground infrastructure sustainable water mains. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 20(2): 126-135.
9. Alsaqqar A. S. Khudair B. H. and Jbbar R. K. 2017. Rigid Trunk Sewer Deterioration Prediction Models using Multiple Discriminant and Neural Network Models in Baghdad City, Iraq. *Journal of Engineering*. 23(8): 70-83.
10. Chughtai F. and Zayed T. 2008. Infrastructure condition prediction models for sustainable sewer pipelines. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 22(5): 333-341.
11. Daher S. Zayed T. Elmasry M. and Hawari A. 2018. Determining relative weights of sewer pipelines' components and defects. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 9(1): 04017026.
12. Davies J. P. Clarke B. A. Whiter J. T. and Cunningham R. J. 2001. Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes. *Urban water*. 3(1-2): 73-89.
13. Ghavami S. M. Borzooei Z. and Maleki J. 2020. An effective approach for assessing risk of failure in urban sewer pipelines using a combination of GIS and AHP-DEA. *Process Safety and Environmental Protection*. 133: 275-285.
14. Hawari A. Alkadour F. Elmasry M. and Zayed T. 2020. A state of the art review on

- condition assessment models developed for sewer pipelines. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 93: 103721.
15. Inanloo B. Tansel B. Shams K. Jin X. and Gan A. 2016. A decision aid GIS-based risk assessment and vulnerability analysis approach for transportation and pipeline networks. *Safety science*. 84: 57-66.
 16. Mohammadi M. M. Najafi M. Tabesh A. Riley J. and Gruber J. 2019. Condition prediction of sanitary sewer pipes. In *Pipelines 2019: Condition Assessment, Construction, and Rehabilitation*: 117-126. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
 17. Najafi M. and Kulandaivel G. 2005. Pipeline condition prediction using neural network models. in *Pipelines 2005: Optimizing Pipeline Design, Operations, and Maintenance in Today's Econom*, Pipeline Division Specialty Conference 2005 August 21-24, 2005, Houston, Texas, United States. 767-781.
 18. Östberg J. Martinsson M. Stål Ö. and Fransson A. M. 2012. Risk of root intrusion by tree and shrub species into sewer pipes in Swedish urban areas. *Urban Forestry and Urban Greening*. 11(1): 65-71.
 19. Saaty T. L. 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*. 48(1): 9-26.
 20. Salman B. and Salem O. 2012. Modeling failure of wastewater collection lines using various section-level regression models. *J. Infrastruct. Syst.* 18(2): 146-154.
 21. Subramanian N. and Ramanathan R. 2012. A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management. *International Journal of Production Economics*. 138(2): 215-241.

