

## ارزیابی ریسک شکست در شبکه فاضلاب با توسعه شبکه‌های بیزین و تصمیم‌گیری چند معیاره مکانی

مقاله پژوهشی

سید مرتضی قریشی<sup>۱</sup>، محمدحسن وحیدنیا<sup>۲\*</sup>، امین رضا نشاط<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۳۱

صفحات: ۲۵-۴۵

### چکیده

شکست در شبکه فاضلاب به عنوان یکی از زیرساخت‌های مهم شهری می‌تواند عواقب نامطلوبی به همراه داشته باشد که گاهی حتی منجر به مختل شدن بخشی از عملکرد یک شهر می‌شود. در این مقاله ریسک شکست در شبکه‌های فاضلاب بر اساس ترکیب احتمال شکست و عواقب شکست در منطقه ۴ آب و فاضلاب تهران انجام گرفت. برای این منظور ابتدا از شبکه‌های بیزین جهت بدست آوردن احتمال شکست استفاده شد. شبکه بر اساس ویژگی‌هایی چون رسوبات، نشت لوله‌ها، خوردگی، سایش لوله‌ها، و تغییر شکل لوله‌ها تشکیل گردید. برای تعداد ۱۶۱۰ لوله که ۷۰٪ برای آموزش و ۳۰٪ برای تست استفاده شد، احتمال انسداد لوله‌ها ۶٫۷٪، احتمال شکست هیدرولیک ۲٫۲٪، احتمال شکست ساختاری ۰٫۳٪ و احتمال کلی شکست برای لوله‌ها مقدار ۸٫۷٪ بدست آمد. میانگین دقت کلی این مرحله ۷۶٪ برآورد شد. در برآورد عواقب شکست نیز از تحلیل‌های مکانی در GIS و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره DEA استفاده گردید. تحلیل‌های مکانی مانند حریم‌گذاری برای ۹ معیار مکانی موجب شد که با سرعت و کارایی بالا امتیاز دهی لوله‌ها در صورت وقوع شکست و تأثیر آن بر پیرامون انجام شود. روش DEA مزیت‌های استفاده از داده‌های عینی و ذهنی و همچنین کاهش تعداد مقایسه‌های زوجی را موجب گردید. نهایتاً با تأثیر مقادیر PoF و CoF بر یکدیگر ریسک شکست لوله‌ها بدست آمده و با رتبه‌بندی آن‌ها، ۹ مورد در شبکه به عنوان لوله‌های بحرانی مشخص شدند. نتایج نشان داد که چنین رویکردی قابلیت اعتماد بالایی داشته و با دقت مناسبی می‌توان ریسک شکست را برآورد نمود.

واژگان کلیدی: احتمال شکست، عواقب شکست، ریسک، سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مکانی، DEA

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

\* نویسنده مسئول مقاله: [mhvahidnia@srbiau.ac.ir](mailto:mhvahidnia@srbiau.ac.ir)

## مقدمه

یک سری عوامل مورد استفاده قرار می‌گیرد (مانند جنس، شیب، قطر لوله، و غیره) ولی برای محاسبه عواقب شکست، مطابق بیشتر تحقیقات پیشین از یک سیستم وزندار برای بررسی عواقب اقتصادی، اجتماعی و محیطی شکست لوله‌های فاضلاب استفاده می‌گردد و در این تحقیقات وزن هر کدام از عوامل محیطی، اقتصادی و اجتماعی مطابق نظر کارشناس تعیین می‌شود. زمانیکه یک لوله فاضلاب به هر دلیلی دچار شکست می‌شود، چه تشخیص شکست با و یا بدون ویدئومتری انجام شده باشد نهایتاً برای رفع مشکل لوله تنها راه ممکن در حال حاضر حفاری است. طبق نقشه‌های موجود از لوله‌های فاضلاب و خیابانهای شهری می‌توانیم بگوییم که بخش بزرگی از زیرساخت فاضلاب از زیر خیابانها عبور کرده‌اند. همین مسئله باعث می‌شود که پس از شکست لوله برای انجام حفاری در یک خیابان، عملاً آن خیابان مسدود شده و توسط شهروندان قابل استفاده نباشد. اما اینکه کدام کاربری‌ها مانند آموزشی، درمانی، فضای سبز، و غیره بیشتر تحت تأثیر هستند، در یک تصمیم‌گیری چندمعیاره قابل تعیین است (لوگناتان و همکاران، ۲۰۲۲). پس از تعیین ریسک شکست لوله‌ها، می‌توان آن‌ها را اولویت بندی نموده و به این صورت که هر لوله‌ای که شکستش باعث ریسک بیشتری شود بحرانی تر بوده و نیاز به بررسی زود هنگامتری دارد. در این تحقیق به عنوان یک مطالعه موردی، بخشی از منطقه ۴ آب و فاضلاب تهران (که شامل مناطق ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ شهرداری تهران) بررسی می‌گردد تا میزان بحران لوله‌ها و اولویت رسیدگی گردد. برای محاسبه احتمال شکست از روش شبکه بیزین و برای محاسبه عواقب حاصل از شکست لوله‌ها، مدل DEA و نهایتاً ترکیب آن با AHP تحت عنوان AHP-DEA مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## مرور تحقیقات پیشین

در این بخش به برخی پژوهش‌های مرتبط و مشابه اشاره می‌شود. سلمان و همکاران (۲۰۱۱) به ارزیابی ریسک شبکه فاضلاب پرداخت که در تحقیق ایشان فقط به بررسی شکست‌های ساختاری در لوله‌های فاضلاب

شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، به صورت دائم یا موقت تحت تاثیر اثرات شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیکی و بیوشیمیایی هستند. این اثرات ممکن است به قسمتهای مختلف شبکه در یک دوره کوتاه یا بلند مدت آسیب بزنند. شکست در شبکه فاضلاب به عنوان یکی از زیرساختهای مهم شهری می‌تواند عواقب نامطلوبی به همراه داشته باشد که گاهی حتی منجر به مختل شدن بخشی از عملکرد یک شهر می‌شود. اندازه‌گیری ریسک یک تابعی از احتمال خطر و همچنین پیامدهای آن است که معمولاً متناسب با آسیب‌پذیری‌های سیستم در برابر خطرات، محاسبه می‌گردد (روزبهبانی، ۲۰۱۲). همانطور که در تعریف ریسک آمده، برای تعیین ریسک شکست لوله‌ها، بایستی ابتدا احتمال شکست (PoF) هر لوله به‌طور جداگانه محاسبه شده و سپس پیامدهای شکست لوله (CoF) را محاسبه و با ترکیب این دو، ریسک شکست لوله‌ها را محاسبه نمود.

هر یک از مطالعات مربوط عمدتاً به جنبه‌های خاصی از ریسک شکست توجه می‌نمایند (انبری، ۲۰۱۷). هدف این تحقیق آن است که ارزیابی ریسک در محدوده‌ای مطالعاتی از شهر تهران با توجه به احتمال شکست که عمدتاً به ویژگی‌های ذاتی شبکه و لوله‌ها بستگی دارد، در کنار عوامل مکانی مانند نزدیکی به مراکز درمانی، نزدیکی به مناطق مسکونی، نزدیکی به مراکز آموزشی، نوع راه‌ها، و غیره که عمدتاً در عواقب شکست دخیل هستند، توجه شود. پس اولین هدف در این تحقیق این است که با استفاده از فاکتورهایی چون جنس، عمر، قطر، شیب لوله و عمق کار گذاشتن لوله احتمال شکست برای هر لوله به طور جداگانه محاسبه شود. سپس در قسمت محاسبه CoF که به معنای عواقب شکست می‌باشد معیارها با تحلیل‌های مکانی در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بدست آمده و بر اساس نظرات کارشناسان به روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره اولویت‌بندی شوند. بیان این نکته لازم است که محاسبه PoF و محاسبه CoF دو مرحله کاملاً جداگانه از هم می‌باشند (کبیر و همکاران، ۲۰۱۸). به این معنی که برای محاسبه احتمال شکست

این چارچوب شامل یک تکنیک مدل سازی است که به طور کارآمد داده های خرابی سیستم فاضلاب با انحراف بالا را برای پیش بینی خطر خرابی مدل سازی می کند و از رویکرد فضا-زمان دو بعدی استفاده می کند. آن ها تجزیه و تحلیل خود را برای بوگوتا، پایتخت کلمبیا اجرا نمودند. در این کار مجموعه ای از الگوریتم های یادگیری ماشین شامل رگرسیون لجستیک، درخت های تصمیم، جنگل های تصادفی و XGBoost آموزش داده شد، اعتبارسنجی گردید.

ونگاس و همکاران (۲۰۲۲) یک مدل زوال هیدرولیکی رسوبات بر اساس معیارهای خودپاکسازی برای اولویت بندی بازبینی لوله های شبکه فاضلاب توسعه دادند. این مدل با اطلاعات آزمایش های قبلی آموزش داده شد و با داده های شکایات مربوط به مشترکین خانگی در بوگوتا، کلمبیا تأیید شد. روش های حذف ویژگی بازگشتی با اعتبارسنجی متقاطع (RFECV) و بهینه سازی بیزی (BO) برای ساخت یک مدل جنگل تصادفی (RF) و پیش بینی احتمال وجود رسوبات رسوب توسط لوله در سطح لوله در این مدل استفاده شد.

لوگناتان و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه خود با هدف پر کردن شکاف دانش در انتخاب فن آوری های بازرسی و نظارت برای لوله های فولادی با قطر بزرگ (SP) و لوله های سیلندر بتنی پیش تنیده (PCCP) یک ابزار پشتیبانی تصمیم گیری با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) توسعه دادند. توسعه یک برنامه رایانه ای که می تواند یک تکنیک بازرسی مناسب را بر اساس عواملی که بر خرابی ها تأثیر می گذارد، انتخاب کند، از ویژگی های این شیوه بود.

بالستروس و همکاران (۲۰۲۲) یک روش مدل سازی مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان (SVM) را برای پیش بینی احتمال خرابی های ساختاری لوله های فاضلاب در مناطق شهری و قابلیت اطمینان این پیش بینی ها توسعه داد. نتایج نشان می دهد که طبقه بندی کننده های SVM می توانند برای برنامه ریزی بازرسی شبکه های فاضلاب، اولویت دادن به مناطق خاصی که در آن احتمال پیدا کردن شکست وجود دارد، استفاده شوند.

پرداخته شد و همچنین برای محاسبه احتمال شکست از آنالیز رگرسیون منطقی باینری استفاده شد. در این تحقیق از سیستم نمره دهی وزندار برای محاسبه CoF با توجه به اثرات محیطی و اثرات اقتصادی اجتماعی استفاده گردید. نهایتاً در این تحقیق به منظور ارزیابی ریسک شکست سه روش ضرب احتمال و -COF محاسبه ماتریس ریسک و سیستم استنتاج فازی با هم مقایسه گردیدند.

باه و همکاران (۲۰۱۵) به محاسبه ریسک شکست در لوله های فاضلاب پرداختند. در این تحقیق برای محاسبه CoF ۱۱ فاکتور استفاده گردید که یک فاکتور تأثیر جدید یعنی نزدیکی لوله ها به محل سرریز فاضلاب نیز در این تحقیق استفاده شد.

انبری و همکاران (۲۰۱۷) یک مدل ارزیابی ریسک جدید برای اولویت بندی بازرسی لوله های فاضلاب در منطقه ای از ایران، توسعه دادند که با استفاده از شبکه های بیزین ابتدا احتمال شکست لوله های فاضلاب به طور جداگانه محاسبه شده و سپس برای محاسبه عواقب شکست لوله از یک سیستم نمره دهی وزندار استفاده شد تا نتایج مقادیر شکست را با توجه به عوامل تأثیر مربوطه با نظر کارشناسی محاسبه نماید. سپس به ادغام احتمال و عواقب شکست در مدل تجزیه و تحلیل ریسک با استفاده از سیستم استنتاج فازی پرداخته و نهایتاً لوله های فاضلاب اولویت بندی شدند.

کبیر و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل پیامد زیرساخت فاضلاب مبتنی بر شبکه باور بیزی (BBN) برای ارزیابی شاخص پیامد و اولویت بندی لوله ها جهت تعمیر و نگهداری/بازسازی/جایگزینی توسعه دادند. مدل پیشنهادی می تواند با تخمین تأثیر سلامت و ایمنی، تأثیر زیست محیطی، تأثیر اجتماعی و تأثیر اقتصادی و سازمانی ناشی از شکست، اطلاعاتی را در سطح لوله ارائه دهد.

فونتکا و همکاران (۲۰۲۱) یک روش چارچوب تعمیم یافته را برای تسهیل تحلیل مکانی-زمانی قدرتمند از خطر شکست سیستم فاضلاب شهری، با غلبه بر چالش های ذاتی نقص داده ها - به عنوان مثال، داده های گمشده، اطلاعات پرت، و اطلاعات نامتعادل، پیشنهاد می دهند.

اکثر آنها در دو دسته جای می‌گیرند. روش‌های مبتنی بر تئوری احتمالات و دیگری روش‌های مبتنی بر منطق فازی. روش‌های دسته نخست دارای اساس تئوری قوی-تری می‌باشند که از جمله جدیدترین این روش‌ها، شبکه بیزین هستند (Anbari, et al. 2017). مطالعات اخیر کاربر مناسبی از BNS را در مدیریت آب و محیط زیست نشان می‌دهد (Malekmohammadi et al., 2009; Farmani et al., 2009; Madadgar and Moradkhani, 2014).

یک شبکه بیزین شبکه‌ای از گره‌ها است که با کمان‌های مستقیم به هم متصل شده‌اند و به هر گره یک تابع احتمال نسبت داده می‌شود. یک گره بیانگر یک متغیر تصادفی پیوسته یا منقطع بوده و کمانهای بین گره‌ها نشان‌دهنده روابط علت و معلولی میان گره‌ها هستند و جهت کمان‌ها همواره از علت به سمت معلول می‌باشد (به متغیر علت، گره والد و به معلول، ولد (فرزند) گفته می‌شود. به دو گره (متغیر) که توسط یک کمان به هم متصل شده‌اند، یک یال می‌گویند. نمودار یک شبکه بیزین، یک نمودار غیر حلقه‌ای جهت‌دار است یعنی هیچ مسیر مستقیمی نمی‌توان یافت که شروع و پایان آن در یک گره باشد. اگر یک گره هیچ والدی نداشته باشد (یعنی پیکان هیچ کمانی به سمت آن نباشد) گره یک جدول احتمالاتی حاشیه‌ای (MPT) خواهد داشت و اگر یک گره، یک یا چند والد داشته باشد (یعنی پیکان یک یا چند کمان به سمت آن باشد)، گره دارای یک جدول احتمالاتی شرطی (CPT) است.

در یک شبکه بیزین، هر علت (سن، جنس، قطر و عمق کارگذاشتن لوله‌های فاضلاب) تاثیرگذار بر شکست را می‌توان به چندین حالت مختلف، دسته‌بندی نمود که از ترکیب این حالت‌های مختلف، شبکه‌هایی بسیار متنوع حاصل می‌شود و نتایج حاصل نیز تحت تاثیر همین نوع دسته‌بندی قرار می‌گیرد. در این تحقیق برای دسته‌بندی عوامل تاثیرگذار در شکست‌های ساختاری و هیدرولیک شبکه فاضلاب، از شاخصی که توسط کولکارنی و همکاران

آلبرتی و کوالکانته (۲۰۲۲) یک مدل چند معیاره مبتنی بر کاربرد تئوری ارزش چند ویژگی (MAVT) در زمینه شیرهای قطع شده در سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب ارائه می‌دهند تا نشان دهند چگونه می‌توان از این مدل برای تعریف سیاست تعمیر و نگهداری استفاده کرد که بهترین مصالحه را ارائه می‌دهد.

## روش و ابزار تجزیه و تحلیل

### محاسبه احتمال شکست با شبکه بیزین

مهمترین شکست‌ها و آسیب‌های ممکن می‌تواند در دو دسته طبقه‌بندی شود: شکست‌های ساختاری و شکست‌های هیدرولیک. هر شکست در شبکه فاضلاب که وابسته به ساختار عناصر شبکه باشد، شکست ساختاری می‌باشد. از جمله این شکست‌ها می‌توان به خوردگی، فرسایش، تغییر شکل، و ترک خوردگی اشاره نمود. هر شکستی در شبکه جمع‌آوری فاضلاب که سبب مشکلاتی در جریان فاضلاب شده به عنوان شکست هیدرولیک شناخته می‌شود. دلیل آن افزایش نرخ جریان یا کاهش ظرفیت لوله است. شکست‌های هیدرولیک در شبکه‌های فاضلاب نسبت به شکست‌های ساختاری خیلی معمول‌تر هستند. این نوع از شکست‌ها شامل نشت و انسداد می‌باشند.

احتمال شکست در این تحقیق با استفاده از شبکه‌های بیزین (BNS) محاسبه می‌شود که از روش‌های بسیار مناسب جهت محاسبه احتمال شکست در لوله‌های فاضلاب می‌باشد. استفاده از مدل‌های گرافیکی، از جمله شبکه‌ها به سرعت در مدل‌سازی آب و منابع محیطی و مدیریت در شرایط عدم اطمینان رشد کرده است. برخی از ویژگی‌های شبکه بیزین عبارتند از: امکان سنجی توسعه شبکه BN در مورد پایگاه داده‌های ناقص، امکان ترکیب نظرات و اطلاعات در دسترس، آسان برای به‌روزرسانی پارامترها و احتمال شرطی بین متغیرهای مدل. نکته حایز اهمیت مبحث عدم قطعیت است. در واقع بزرگترین مشکل در عرصه مدیریت منابع آب، تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت است. روش‌های زیادی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند که

، خوردگی و فرسودگی لوله‌ها "Erosion" و تغییر شکل لوله‌ها با گره‌ای با نام "Deformation" معرفی گردیده است. گره‌های "Structural" و "Hydraulic" و "p(Failure)" نیز به ترتیب برای شکست سازه‌ای، شکست هیدرولیکی و احتمال شکست (شکست کلی سیستم) در نظر گرفته شدند.



شکل ۱: ساختار شبکه بی‌زین مطالعه موردی

برای تشریح بهتر یال‌ها که می‌توان گفت که برای آسیب‌های ناشی و انسداد و خوردگی و تغییر شکل در لوله، ۴ علت با نام‌های جنس و سن و قطر لوله و عمق کار گذاشتن لوله مورد توجه قرار گرفته است. به بیان دیگر می‌توان گفت که هر دو عامل جنس و سن بر روی نشست لوله اثر گذار هستند و یا اینکه هر ۴ عامل ذکر شده با همدیگر بر ایجاد آسیب تغییر شکل لوله اثر گذارند. و از طرفی می‌دانیم که نشست و انسداد لوله با هم جزء شکست‌های هیدرولیک محسوب شده و ۲ آسیب خوردگی و تغییر شکل نیز، شکست ساختاری را تشکیل می‌دهند. و در پایان شکست‌های هیدرولیک و ساختاری با هم، مجموعه شکست‌های کلی و نهایی شبکه را ایجاد می‌کنند.

#### محاسبه عواقب شکست با تحلیل مکانی و روش DEA

شکست‌های ساختاری و هیدرولیکی در یک شبکه جمع-آوری فاضلاب ممکن است عواقب بد داشته و یا حتی منجر به مشکلات محیطی جدی شود. این عواقب می‌تواند

(۱۹۸۶) معرفی شده است، استفاده می‌شود که این شاخص از طریق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$D(x) = \frac{p(f|c) - p(f)}{p(f)} \quad (1)$$

که  $D(x)$  شاخص معرفی شده،  $p(f|c)$  احتمال شکست لوله به شرط داشتن یک دسته ویژگی خاص  $c$  (همان دسته مربوط به علتها و  $p(f)$ )، نیز تحت عنوان احتمال گسترده شکست در کل شبکه است که  $p(f|c)$  از طریق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$p(f|c) = \frac{p(c|f)p(f)}{p(c|f)(c|f) + p(c|nf)(1-p(f))} \quad (2)$$

که  $p(c|f)$  احتمال مشاهده یک دسته ویژگی خاص  $c$  بر روی لوله‌هایی است که حداقل یک بار دچار شکست شده‌اند و از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.  $P(c|nf)$  احتمال مشاهده یک دسته ویژگی خاص  $c$  بر روی لوله‌هایی است که دچار شکست نشده‌اند و با استفاده از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$p(c|f) = \frac{\text{تعداد لوله های با ویژگی } c \text{ و دارای حداقل یک شکست}}{\text{کل تعداد لوله های دارای حداقل یک شکست در سال}} \quad (3)$$

$$p(c|nf) = \frac{\text{تعداد لوله های با ویژگی } c \text{ و بدون شکست در سال}}{\text{کل تعداد لوله های بدون شکست در سال } i} \quad (4)$$

احتمال گسترده در کل شبکه ( $p(f)$ ) نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$p(f) = \frac{\sum^N i}{\sum^N i} \quad (5)$$

پس از طبقه‌بندی مناسب هر عامل به روش کولکارتی، لازم است که کلیه داده‌ها به دو دسته تقسیم شوند. به این شکل که حدود ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش شبکه (کالیبراسیون) و حدود ۳۰٪ برای صحت‌سنجی شبکه مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در زمینه عوامل موثر بر احتمال شکست در مورد آسیب‌های مختلف و نظرات خبره، ساختار شبکه بی‌زین مطابق شکل ۱ ایجاد شد. در این شکل، گرفتگی به دلیل رسوبات با گره "Blockage" و نشست لوله‌ها "Leakage"

داده‌ها (DEA) در ترکیب با روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) با نام AHP-DEA استفاده شود. در این تحقیق، با توجه به باه (۲۰۱۵) و انبری (۲۰۱۷)، ۹ معیار برای محاسبه عواقب شکست لوله‌های فاضلاب در نظر گرفته شد. معیارها عبارت‌اند از قطر لوله‌ها، عمق کار گذاشتن لوله‌ها، نوع جاده که از روی لوله‌ها عبور میکند، نزدیکی به مراکز درمانی، نزدیکی به مدارس و مناطق مسکونی، نزدیکی به مسیله‌ها و فضای سبز و میزان نزدیکی به لوله‌های آب.

AHP از تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) حمایت می‌کند. AHP یک مشکل MCDM پیچیده را به صورت سلسله‌مراتبی تجزیه می‌کند و به ارزیابی اهمیت نسبی معیارهای تصمیم‌گیری پرداخته و متغیرهای تصمیم‌گیری را با توجه به هر معیار مقایسه کرده و یک اولویت‌بندی کلی برای هر متغیر تصمیم‌گیری تعیین می‌کند. در روش AHP پس از تشکیل سلسله مراتب، ماتریس‌های مقایسه زوجی تشکیل می‌شوند. به طور مثال اگر بخواهیم معیارهای مربوط به عواقب شکست را مقایسه نماییم، به ازای ۹ معیار یک ماتریس ۹ در ۹ خواهیم داشت. معیارها به طور دو به دو مقایسه شده و تحت یک مقیاس استاندارد (بین ۱ تا ۹ یا مقادیر معکوس آن) وزن‌دهی می‌شوند. سپس وزن‌های نهایی معیارها از روش‌های مختلف مانند میانگین حسابی قابل محاسبه می‌باشند. اما برای ارزیابی کار نیاز داریم مقدار ویژه بیشینه ماتریس یا لاندا ( $\lambda$ ) را محاسبه نماییم. زیرا هرچه مقادیر به صورت ناسازگار وزن دهی شده باشند، مقدار ویژه از بعد ماتریس ( $n$ ) فاصله می‌گیرد. بر این اساس شاخص سازگاری (CI) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (6)$$

و سپس نرخ سازگاری (CR) به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$CI = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

به دو دسته تقسیم شود: اثرات مستقیم و غیرمستقیم. اثرات مستقیم شامل هزینه تعمیر یا بازسازی فاضلاب‌ها بوده است، در حالیکه عواقب غیرمستقیم، دلالت بر اثرات شکست بر اطراف شبکه فاضلاب دارد. مطابق مطالعات قبلی هزینه تعمیر اضطراری یک فاضلاب شکسته می‌تواند دو تا ۱۰ برابر بیشتر از هزینه پیشگیری از فاضلاب آسیب دیده باشد. این هزینه‌ها شامل درخواست برنامه‌ریزی برای تجهیزات و مدیریت ساخت فاضلاب (هان و همکاران، ۲۰۰۲) می‌باشد. هر کدام از این عواقب می‌تواند شامل اثرات اجتماعی، اقتصادی و محیطی باشد. اثرات اجتماعی در شبکه‌های فاضلاب شامل خطر سلامتی انسان، وقفه در خدمات‌رسانی، تعویق ترافیکی، تصادفات و بوی منجر کننده ناشی از سرریز را در زیرزمین و یا خیابان می‌باشد. با افزایش تعداد مردم اثرات اجتماعی بیشتر می‌شود. اثرات اقتصادی شامل اثرات متفاوت تجاری به دلیل دسترسی محدود به مراکز تجاری و صنعتی، تعویق در حمل کالا و خدمات و وقفه در خدمات‌رسانی در این مراکز است. لذا تعیین عواقب شکست علیرغم اهمیت بسیار زیاد آن در برنامه تجزیه و تحلیل خطر، تا به حال به طور کامل مورد توجه نبوده است.

تمامی پژوهش‌های پیشین برای محاسبه COF یا از روش نمره دهی وزندار و یا ماتریس مقایسه‌ای زوجی AHP برای مقایسه وزندار معیارها استفاده کرده‌اند که در هر دو روش مهمترین عامل نظر کارشناسان هست. البته ایراد مهم استفاده از AHP به تنهایی این است که AHP می‌تواند تعداد محدودی (معمولاً تا ۱۵ متغیر) را با یکدیگر مقایسه نماید. پس در چنین موقعیت‌هایی که با چندین هزار لوله فاضلاب (چندین هزار متغیر یا گزینه) روبرو هستیم، استفاده از AHP به تنهایی نمی‌تواند مناسب باشد. لذا در تحقیق حاضر برای محاسبه COF تلاش شد که از روشی استفاده شود که بتواند ایرادات پژوهش‌های پیشین را پوشش دهد. لذا در این تحقیق تلاش شد تا وزن‌ها از یک روش سیستماتیک و یکپارچه تحلیل پوششی

های بزرگتر از ۱۵، تعداد زیادی از مقایسه سبب ایجاد بار سنگینی برای کارشناسان می شود و از سوی دیگر، مقایسه بیش از حد در قضاوت موجب تناقض و تضاد می-گردد. برای حل این مشکل، ترکیب روش AHP با روش تحلیل پوششی داده ها (DEA) پیشنهاد می شود. روش تحلیل پوششی داده ها یک رویکرد برنامه ریزی ریاضی بوده که ارزیابی گروهی از واحدهای تصمیم گیری با بازه نسبی است. این رویکرد توسط چانز، کوپر و رادز پیشنهاد شد (چارلز و همکاران، ۱۹۷۸).

که در آن RI شاخص تصادفی است که برای مقادیر مختلف تعداد معیار (m) از طریق جدول ۱ به دست می آید. نرخ سازگاری (CR) به صورتی طراحی می شود که اگر  $CR < 0.1$  باشد، سطح قابل قبول را در مقایسه های دوتایی نشان می دهد.

وقتی که تعداد گزینه های تصمیم بسیار زیاد باشد، ماتریس مقایسه زوجی با توجه به هر معیار برای N گزینه تصمیم گیری (مانند ۱۶۱۰ لوله) حجم زیادی از مقایسه را برای کارشناسان ایجاد می کند. ثابت شده است که در N

جدول ۱- شاخص تصادفی بودن (BOWEN, 1993)

N	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
RI	۰	۰.۵۸	۰.۹	۱.۱۲	۱.۲۴	۱.۳۲	۱.۴۱	۱.۴۵	۱.۴۹	۱.۵۱	۱.۴۸	۱.۵۶	۱.۵۷	۱.۵۹

اساس نمرات مربوط به ارزیابی خود را با توجه به معیار مورد نظر بر پایه اهمیت نسبی طبقه بندی نمایند. فرض می شود که  $j$  معیار توسط  $N_j$  کارشناس ارزیابی خواهد شد. در این صورت، نتایج را می توان با بردار ارزیابی توزیع رابطه زیر مشخص نمود: می توان با بردار ارزیابی توزیع رابطه زیر مشخص نمود:

$$R(C_j(A_j)) = \{(H_{j1}, NE_{i_{j1}}), \dots, (H_{jK}, NE_{i_{jK}})\},$$

$$i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (9)$$

که در آن  $NE_{i_{jK}}$  بیانگر تعداد کارشناسانی است که درجه  $H_{jK}$  را به گزینه ریسک  $A_j$  تحت معیار  $j$  داده اند. سپس وزن محلی از هر گزینه با هر معیار توسط رابطه زیر تعیین می شود (وانگ و همکاران، ۲۰۰۸):

$$v_{ij} = \sum_{k=1}^{k=j} S(H_{jK}) NE_{i_{jK}}$$

تلاش های متعددی برای ترکیب دو روش در برنامه های واقعی وجود داشته است. به عنوان مثال، یانگ در سال ۲۰۰۸ دو روش AHP و DEA را برای ارزیابی ریسک پل ها استفاده کردند و بیان نمودند که ترکیب دو روش مزیت های استفاده از داده های عینی و ذهنی و همچنین کاهش تعداد مقایسه های زوجی را به همراه خواهد داشت (وانگ و همکاران، ۲۰۰۸). در ادامه به طور خلاصه محاسبات روش DEA شرح داده خواهد شد. برای هر یک از معیارها، مجموعه ای از درجات ارزیابی طبق رابطه زیر معرفی می شود

$$G_j = \{H_{j1}, \dots, H_{jK}\}, j = 1, \dots, n \quad (8)$$

که در این مجموعه  $H_{j1}$  تا  $H_{jK}$  به نمایندگی از پر اهمیت ترین تا کم اهمیت ترین نمرات ارزیابی برای معیار  $j$  بوده. JK نیز اعداد نمرات ارزیابی برای هر معیار است. این تعریف اجازه می دهد تا ارزیابی برای معیارهای مختلف با استفاده از تعداد متفاوت نمرات انجام شود و همچنین انعطاف پذیری برای درجه بندی زبانی را فراهم کند. سپس از کارشناسان درخواست می شود تا ارزیابی گزینه ها بر

$$\alpha \leq v_{ij} = \sum_{k=1}^{k=j} S(H_{JK}) NE_{ijk} \leq 1,$$

$$i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (11)$$

$$S(H_{J1}) \geq S(H_{J2}) \geq \dots \geq S(H_{Jk})$$

در رابطه فوق  $S(H_{J1}), \dots, S(H_{Jk})$  متغیرهای تصمیم‌گیری هستند.

$$i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (10)$$

در این روش، ابتدا حداکثرسازی  $\alpha$  از هر متغیر تصمیم‌گیری از جدول ۲ با توجه به نتایج نظرسنجی را یافته و سپس با توجه به رابطه ۳-۲۴، متغیر تصمیم‌گیری  $S(H_{JK})$  از درجه  $H_{JK}$  به دست آورده می‌شود.

$$\max \alpha$$

جدول ۲- توزیع ماتریس تصمیم‌گیری برای گزینه‌های تصمیم‌گیری (مدل توسعه یافته DEA توسط یانگ و همکاران، ۲۰۰۸)

Alternative	Decision Criteria										
	C <sub>1</sub>			C <sub>j</sub>			C <sub>m</sub>				
	H <sub>11</sub>	...	H <sub>1k1</sub>	...	H <sub>j1</sub>	...	H <sub>jkj</sub>	...	H <sub>m1</sub>	...	H <sub>akm</sub>
A <sub>1</sub>	NE <sub>111</sub>	...	NE <sub>1k1</sub>	...	NE <sub>j1</sub>	...	NE <sub>1kj</sub>	...	NE <sub>1m1</sub>	...	NE <sub>1akm</sub>
⋮	⋮	...	⋮	...	⋮	...	⋮	...	⋮	...	⋮
A <sub>i</sub>	NE <sub>i11</sub>	...	NE <sub>ik1</sub>	...	NE <sub>ij1</sub>	...	NE <sub>ijkj</sub>	...	NE <sub>im1</sub>	...	NE <sub>iakm</sub>
⋮	⋮	...	⋮	...	⋮	...	⋮	...	⋮	...	⋮
A <sub>n</sub>	NE <sub>n11</sub>	...	NE <sub>nk1</sub>	...	NE <sub>nj1</sub>	...	NE <sub>njkj</sub>	...	NE <sub>nm1</sub>	...	NE <sub>nakm</sub>

طبق روش سلمان و همکاران (۲۰۱۲) از ضرب احتمال شکست در عواقب شکست نهایتاً می‌توان به محاسبه ریسک شکست لوله‌های فاضلاب پرداخت:

$$Risk = PoF \times CoF \quad (13)$$

### پیاده‌سازی و نتایج

#### جمع‌آوری و سازمان‌دهی داده‌ها

داده‌های مورد نیاز مربوط به این مرحله از تحقیق از آبفای منطقه ۴ تهران تهیه گردید. و از آنجا که آبفای منطقه ۴ تهران خود دربرگیرنده ۴ منطقه از مناطق شهرداری تهران (مناطق ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و بخشی از منطقه ۱۵) بوده و شامل حجم وسیعی از اطلاعات می‌باشد، لذا در این پژوهش، بخشی از شبکه فاضلاب منطقه ۴ آبفای تهران

در نهایت با داشتن متغیر  $S(H_{JKj})$  برای هر معیار، وزن محلی برای هر یک از گزینه‌ها توسط رابطه ۱۰ به دست خواهد آمد. بنابراین در AHP-DEA، پس از تعیین وزن مناسب هر معیار ( $w_j$ ) با استفاده از روش AHP، رابطه ۱۰ به صورت زیر درآمده و نتایج نهایی به دست می‌آید.

$$\max \alpha$$

$$\alpha \leq v_{ij} = \sum_{k=1}^{k=j} W_j S(H_{JK}) NE_{ijk} \leq 1,$$

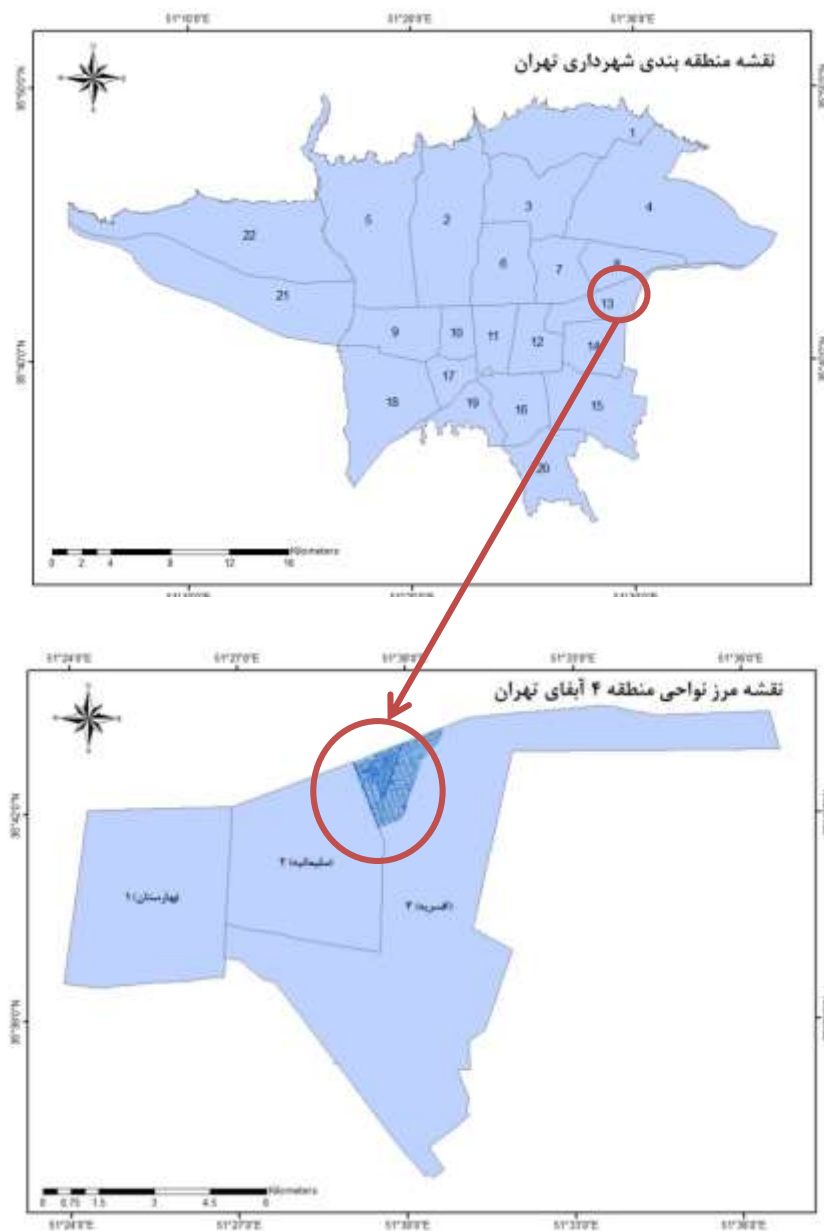
$$i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (12)$$

$$S(H_{J1}) \geq S(H_{J2}) \geq \dots \geq S(H_{Jk})$$



اطلاعات ویدئومتری فقط برای لوله‌هایی است که دچار شکست و توسط مشترکین گزارش شده است. پس از انجام ویدئومتری برای لوله‌های گزارش شده، فایل‌های xls یا xlsX ایجاد شده و همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، شماره لوله و انواع عیوبی که در هر فاصله از لوله دیده شده است، به صورت دقیق گزارش می‌گردد.

(ناحیه افسریه که بخشی از منطقه ۱۳ شهرداری تهران می‌باشد) مورد مطالعه قرار گرفت. منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ آمده است. داده‌های مورد نیاز مربوط به این بخش از تحقیق شامل داده‌های حاصل از ویدئومتری در بازه زمانی شهریور ۹۴ تا آبان ۹۵، همچنین نقشه خطوط لوله-های فاضلاب مربوط به ناحیه افسریه می‌باشد. بخشی از اطلاعات ویدئومتری در شکل ۳ آمده است.



شکل ۲- نقشه منطقه مطالعاتی

AA	Z	V	E	W	V	U	T	S	R	Q	P	O	N	M	L	K	J	I	H	G
شماره لوله	نوع لوله	نوع شبکه	فاصله	نوع شبکه	فاصله	نوع شبکه	فاصله	نوع شبکه	فاصله	نوع شبکه	فاصله	نوع شبکه	فاصله	نوع شبکه	فاصله	نوع شبکه	فاصله	نوع شبکه	فاصله	نوع شبکه
1610	1610	CO	1610	1610	1610	1610	1610	1610	1610	1610	1610	1610	1610	1610	1610	1610	1610	1610	1610	1610
1611	1611	CO	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1611	1611
1612	1612	OB	1612	1612	1612	1612	1612	1612	1612	1612	1612	1612	1612	1612	1612	1612	1612	1612	1612	1612
1613	1613	CN	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613	1613
1614	1614	OUL	1614	1614	1614	1614	1614	1614	1614	1614	1614	1614	1614	1614	1614	1614	1614	1614	1614	1614
1615	1615	CN	1615	1615	1615	1615	1615	1615	1615	1615	1615	1615	1615	1615	1615	1615	1615	1615	1615	1615
1616	1616	CN	1616	1616	1616	1616	1616	1616	1616	1616	1616	1616	1616	1616	1616	1616	1616	1616	1616	1616
1617	1617		1617	1617	1617	1617	1617	1617	1617	1617	1617	1617	1617	1617	1617	1617	1617	1617	1617	1617
1618	1618		1618	1618	1618	1618	1618	1618	1618	1618	1618	1618	1618	1618	1618	1618	1618	1618	1618	1618
1619	1619		1619	1619	1619	1619	1619	1619	1619	1619	1619	1619	1619	1619	1619	1619	1619	1619	1619	1619
1620	1620		1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620
1621	1621		1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621
1622	1622		1622	1622	1622	1622	1622	1622	1622	1622	1622	1622	1622	1622	1622	1622	1622	1622	1622	1622
1623	1623		1623	1623	1623	1623	1623	1623	1623	1623	1623	1623	1623	1623	1623	1623	1623	1623	1623	1623
1624	1624		1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624	1624
1625	1625		1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625
1626	1626		1626	1626	1626	1626	1626	1626	1626	1626	1626	1626	1626	1626	1626	1626	1626	1626	1626	1626
1627	1627		1627	1627	1627	1627	1627	1627	1627	1627	1627	1627	1627	1627	1627	1627	1627	1627	1627	1627
1628	1628		1628	1628	1628	1628	1628	1628	1628	1628	1628	1628	1628	1628	1628	1628	1628	1628	1628	1628
1629	1629		1629	1629	1629	1629	1629	1629	1629	1629	1629	1629	1629	1629	1629	1629	1629	1629	1629	1629
1630	1630		1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630

شکل ۳ - بخشی از اطلاعات ویدئومتری

JD	نشت - تغییر شکل
OJM - OJL	نشت
RF - RM	انسداد - نشت
WLC - WLT	انسداد - خوردگی - تغییر شکل
WXC	نشت
CUW - LU	انسداد
OB	تغییر شکل - انسداد
CUD - CUZ	انسداد

### تعیین مناسب‌ترین طبقه‌بندی برای عوامل با شبکه

#### بیزین

بر اساس شاخص ارائه شده توسط کولکاری و همکاران دسته‌بندی هر یک از عوامل (جنس و سن و قطر و عمق کار گذاشتن لوله‌ها) در شبکه بیزین و تشخیص بهترین دسته‌بندی ممکن انجام شد. مراحل زیر برای این موضوع انجام شد: در اولین گام با توجه به داده‌های موجود در پایگاه داده‌های توسعه داده شده در مرحله قبل و با استفاده از نظرات خبرگان، دسته‌بندی‌هایی که به نظر مناسب تر هستند، انتخاب شدند. برای هر یک از دسته‌ها (ویژگی‌ها) شاخص  $D(x)$  را به دست آورده و سپس با میانگین‌گیری بین دسته‌ها، میانگین این شاخص برای کل دسته‌بندی محاسبه شد. میانگین  $D(x)$  نهایی مثلاً برای سن لوله در حالت در نظر گرفتن دو دسته مقادیر،  $(x)$   $D_1$  و  $D_2$  و در حالت در نظر گرفتن سه دسته مقادیر،  $(x)$   $D_1$  و  $(x)$   $D_2$  و  $(x)$   $D_3$  محاسبه شده و میانگین‌گیری می‌شود. پس از به دست آوردن مقادیر میانگین  $D(x)$  برای هر حالت دسته‌بندی، بهترین دسته-

همچنین برای هر عیب در هر فاصله از لوله نیز یک امتیاز ثبت شده است که بالا بودن امتیاز عیب به معنای عمیق بودن شدت آسیب در شبکه و پایین بودن عدد امتیاز هر عیب هم نشان از بی اهمیت بودن آن عیب در شبکه دارد. بخشی از عیوب شبکه فاضلاب منطقه مورد مطالعه در جدول ۳ آمده است. لازم به ذکر است که نتیجه عیوب شبکه، مطابق دستورالعمل انجام عملیات ویدئومتری شبکه‌های فاضلاب سازمان برنامه و بودجه و نظرات کارشناسان تعیین گردیده است. کل تعداد لوله‌های منطقه مورد مطالعه شامل ۱۶۱۰ لوله بوده که هر لوله با جدول ویدئومتری مطابقت داده شده و مشخص شد که تعداد ۱۰۴ لوله دارای عیب بوده و سپس اطلاعات مربوط به شکست لوله‌ها و نتیجه هر عیب از شبکه (در محدوده مورد مطالعه)، به جدول اطلاعاتی لایه لوله‌های فاضلاب ناحیه افسریه، در پایگاه داده GIS10.4 افزوده شد. علاوه بر آن، در جدول ویدئومتری، هر لوله‌ای که دچار شکست شود یک امتیاز ساختاری و یک امتیاز هیدرولیک (در بازه ۱ تا ۵) نیز می‌گیرد.

جدول ۳- مهم‌ترین عیوب شبکه ناحیه افسریه

عیوب شبکه	نتیجه عیوب شبکه
CN - CNC	تغییر شکل - انسداد
CXI	انسداد
D	تغییر شکل
DEC - DEF - DER - DES - DEX - DEZ	انسداد - نشت

پارامترها به شرط پارامترهای بالاتر از خود در متلب انجام گرفت و خروجی های حاصل از آن جهت آموزش وارد نرم افزار Hugin Expert 8.5 شده و در آنجا آموزش پارامترها انجام گرفت. شکل ۴ نتیجه شبکه بیزین آموزش دیده را نشان می دهد.

درصد های نشان داده شده در این شکل برای پارامترهای ورودی (سن و جنس و قطر و عمق قرارگرفتن لوله) نشان دهنده درصد هر یک از دسته های مربوط به آن پارامتر از لحاظ تعداد داده های آن دسته در سری داده های کالیبراسیون است. در مورد پارامترهای میانی (شامل انسداد و نشت و خوردگی و تغییر شکل و شکست ساختاری و هیدرولیک) و پارامتر خروجی مدل (احتمال شکست کلی) اعداد نشان داده شده در این شکل، درصد وقوع شکست یا عدم آسیب مربوطه است. به این صورت که مثلاً احتمال انسداد لوله ها ۶,۷٪ بوده و احتمال شکست هیدرولیک ۲,۲٪ و احتمال شکست ساختاری ۳,۰٪ بوده و احتمال کلی شکست برای لوله ها مقدار ۸,۷٪ بوده است. مرحله نهایی در تکمیل مدل توسعه داده شده، صحت سنجی مدل می باشد. دلیل انجام صحت سنجی با استفاده از روابط جداگانه برای پیش بینی شکست و عدم شکست این است که معمولاً مدل شبکه بیزین دقت بالاتری برای پیش بینی عدم شکست دارد و علاوه بر این، دقت پیش بینی شکست های شبکه از اهمیت بالاتری برای تصمیم گیران برخوردار است. نتایج حاکی از آن بود که میزان دقت پیش بینی برای کل لوله های شبکه (داده های صحت سنجی)، برابر ۸۸,۳۳ درصد، برای لوله های دارای شکست ۴۰,۶۸ درصد و برای لوله های بدون شکست برابر ۹۹,۹۸ درصد به دست آمد که با توجه به کمبود داده ها (تنها داده های حدود یک سال و نیم در دسترس بوده است) میانگین دقت ۷۶,۳۳ در شرایط فعلی قابل قبول هستند.

بندی حالتی است که بزرگترین مقدار میانگین  $D(x)$  را نتیجه دهد. جدول ۴ نتیجه بهترین دسته بندی انجام گرفته برای پارامترهای ورودی مورد استفاده در شبکه بیزین را نشان می دهد. همچنین در این جدول در مقابل نام هر پارامتر، واحدی که در شبکه بیزین برای گره مربوط به آنها به کار می رود، ذکر شده است.

جدول ۴- بهترین دسته بندی انجام گرفته برای پارامترهای ورودی مطابق شاخص کولکارتی

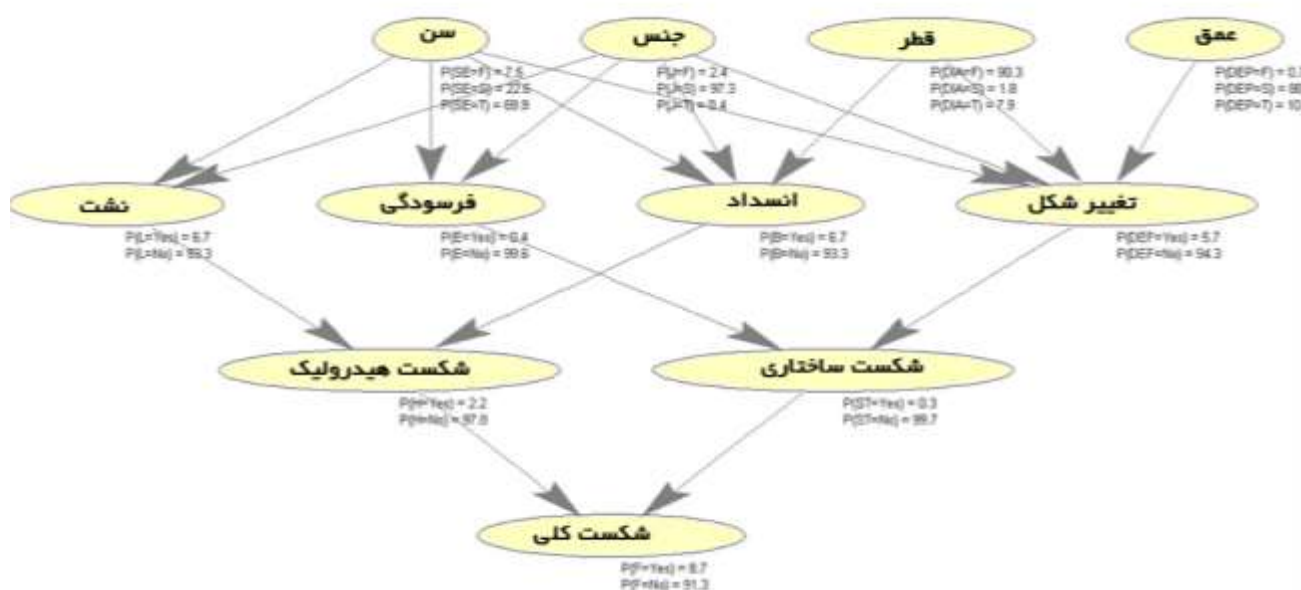
نام پارامتر(عامل)	دسته اول	دسته دوم	دسته سوم
سن لوله (سال)	۸-۵	۱۲-۸	۲۰-۱۲
جنس لوله	پلاستیکی	پلی اتیلن	بتنی
قطر لوله (mm)	۲۵۰-۲۰۰	۳۵۰-۲۵۰	۳۵۰<
عمق قرارگیری لوله (m)	۲,۵-۱,۷	۳,۵-۲,۵	۳,۵<

در پایان این گام از مدل، با توجه به تعداد کل داده های مورد استفاده برابر ۱۶۱۰ لوله، حدود ۱۱۰۵ داده (نزدیک ۷۰٪ لوله)، برای کالیبراسیون (آموزش مدل) و بقیه داده ها، یعنی ۵۰۵ لوله دیگر برای صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. به این شکل که، یک shapefile جدید با نام Train تولید شده که شامل ۱۱۰۰ لوله بوده و آموزش شبکه بیزین روی این تعداد لوله انجام گرفت و به همین ترتیب shapefile دیگری هم با نام Test ایجاد شده که مابقی ۵۱۰ لوله را در برمی گیرد و صحت سنجی را روی این ۵۱۰ لوله می توان انجام داد. جهت تخمین احتمال شکست با استفاده از شبکه بیزین، چند فاکتور تاثیر می تواند برای هر نوع آسیب مورد توجه قرار بگیرد. به عنوان مثال، تک خوردگی وابسته به سن لوله و انسداد وابسته به سن و جنس لوله است. آماده سازی جداول احتمالات شرطی در نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۲ و قسمت آموزش پارامترها در نرم افزار Hugin Expert 8.5 انجام گرفت. به این شکل که محاسبات مربوط به احتمال تک تک

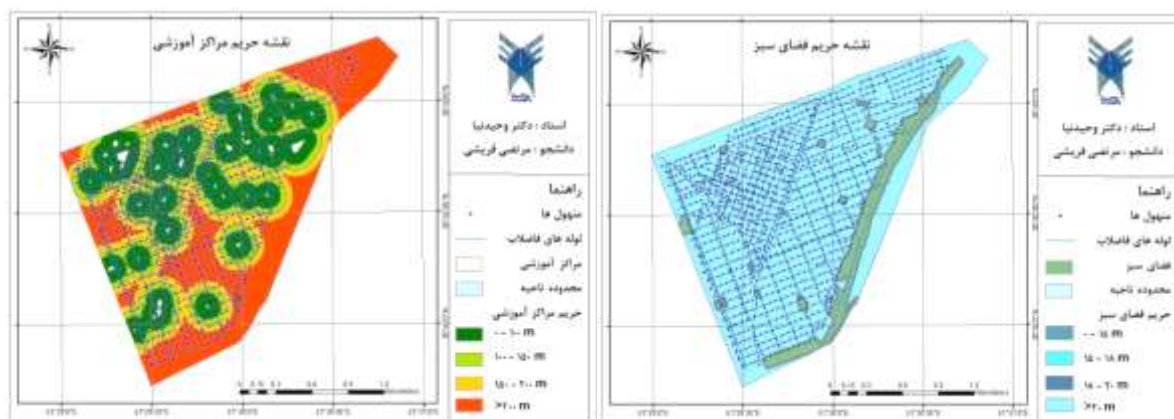
منطقه ۴ تهران به دست آمد. فاکتور قطر لوله و عمق کارگذاشتن لوله‌های فاضلاب نیز جزء توصیفات لایه لوله‌های فاضلاب بوده است. بعد از تعیین و استخراج لایه‌های مورد نظر، چهار حریم برای لایه‌های مراکز درمانی، آموزشی، مسکونی، مسیله‌ها، فضای سبز و لوله‌های آب و نوع جاده با ابزار buffer مشخص گردید. نتایج نقشه‌های موضوعی بدست آمده در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

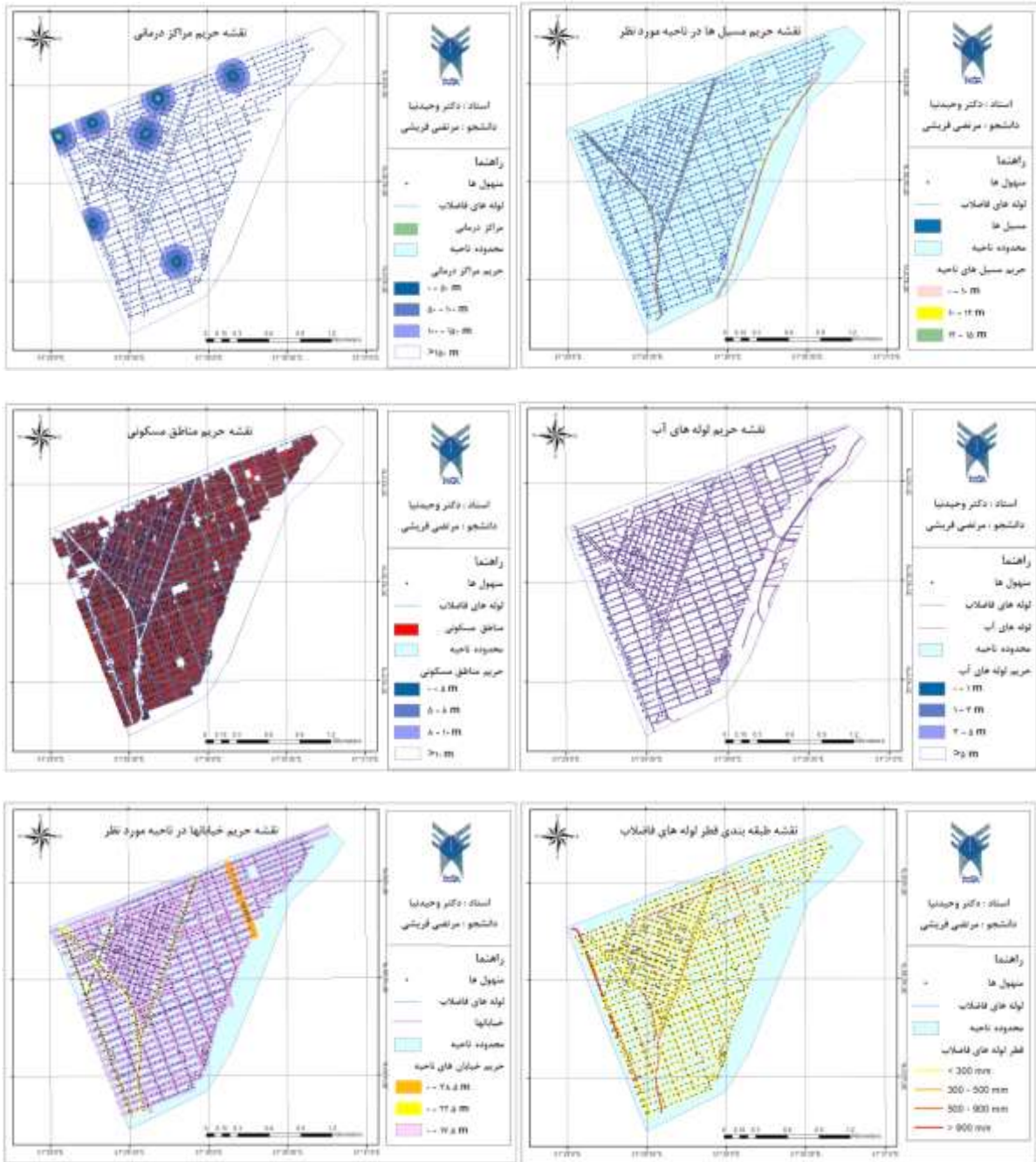
### محاسبه عواقب شکست با تحلیل مکانی و AHP-DEA

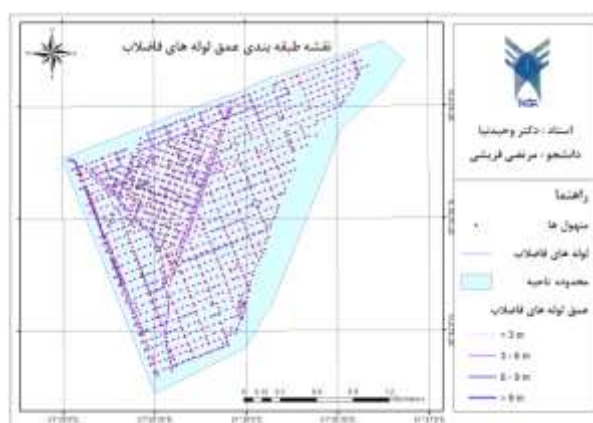
ابتدا لایه‌های اطلاعاتی مراکز درمانی، آموزشی، مناطق مسکونی، مسیله‌ها و فضای سبز از لایه اطلاعاتی کاربری اراضی منطقه ۱۳ شهرداری تهران استخراج گردید. کسب لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لوله‌های فاضلاب، لوله‌های آب و خیابانها در منطقه مورد مطالعه نیز از طریق آبفای



شکل ۴- شبکه بیزین مطالعه موردی آموزش دیده







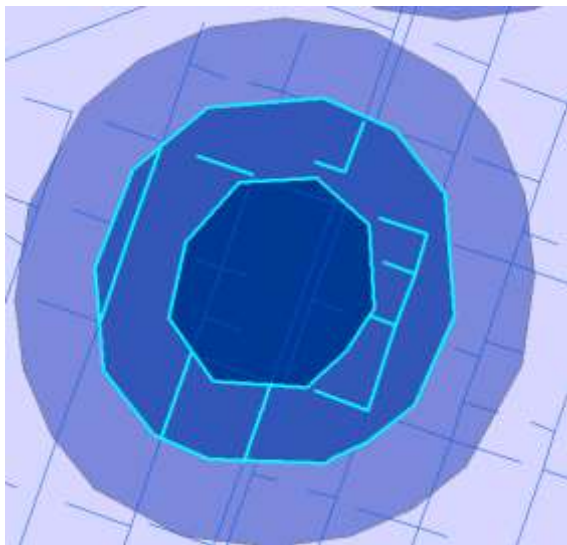
شکل ۵- نقشه های موضوعی منطقه مورد مطالعه

همگی به طور کامل در محدوده حریم کمتر از ۵۰ متری مراکز درمانی هستند، لذا عدد مورد نظر برای این لوله‌ها برای ستون Health\_H ۱۰ می‌باشد. و با توجه به شکل ۷-ب می‌بینیم که با ابزارهای selection می‌توان لوله‌هایی را که به طور کامل داخل محدوده ۱۰۰-۵۰ متری مراکز درمانی هستند را نیز یافته و به این لوله‌ها، در ستون Health\_M عدد ۱۰ داد. به همین ترتیب می‌توان لوله‌هایی را که قسمت‌های بیشتر آنها یا بیش از نصف آنها در یک محدوده خاص هست را پیدا کرده و اعداد متناظر و متناسب با آنها را با ابزار field calculator در جدول اطلاعاتی ثبت نمود. سپس جدول اطلاعاتی لایه لوله‌های فاضلاب به جدولی در اکسل با فرمت xlsx تبدیل شد و سپس پیاده‌سازی مدل DEA انجام گرفت. جهت کدنویسی مدل DEA، نرم‌افزار GAMS مورد استفاده قرار گرفت. نتایج در جدول ۵ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که برای هر معیار یک  $\alpha$  محاسبه می‌شود و به همین ترتیب برای هر معیار، ۴ وزن برای S(HJ4)، S(HJ3)، S(HJ2)، و S(HJ1) مانند جدول ۵ از طریق مدل DEA به دست آمد.

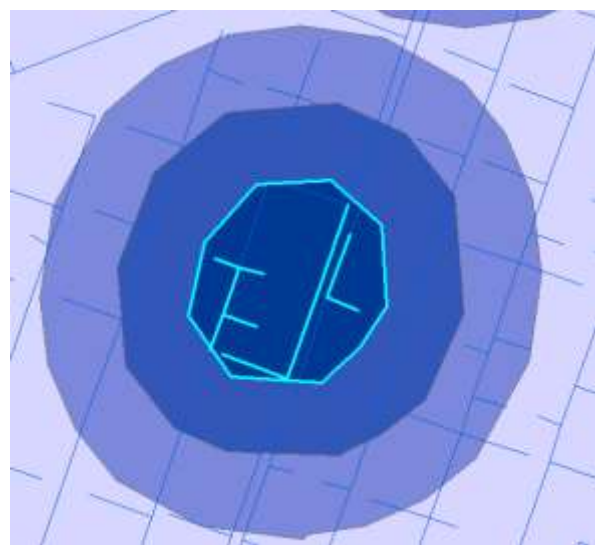
پس از تعیین حریم‌ها و طبقه‌بندی‌های مناسب از لایه‌های اطلاعاتی، برای ورود داده‌ها به مدل DEA نیاز به تکمیل اطلاعات جدول توصیفی لایه لوله‌های فاضلاب هستیم. لذا برای هر معیار، در جدول اطلاعاتی لایه لوله‌های فاضلاب، ۴ ستون مطابق شکل ۶ اضافه شد. مثلاً برای لایه مراکز درمانی، ۴ ستون با نام‌های Health\_H، Health\_M، Health\_L، و Health\_N ساخته شد. در این ستون‌ها به معنی High، M، Low و None به معنی L، N و H به معنی None است. هر کدام از این ستون‌ها اعدادی در بازه ۱ تا ۱۰ گرفته‌اند. به این شکل که برای هر لوله مجموع این ۴ ستون برابر ۱۰ می‌شود. نحوه تعیین این اعداد در شکل ۷ مشاهده می‌شود. در شکل ۷-الف حریم کمتر از ۵۰ متر، ۵۰ - ۱۰۰، ۱۰۰ - ۱۵۰ و بیشتر از ۱۵۰ متر نمایش داده شده است. با استفاده از ابزارهای select by location و select by attribute می‌توان عدد مورد نظر برای هر لوله را با توجه به محل قرارگیری در هر حریم را تعیین کرد. مثلاً با ابزارهای گفته شده می‌توان مشخص کرد که لوله‌های هایلایت شده در شکل ۷

Obj(CR)	Health_B	Health_M	Health_L	Health_H	Amoozesh_B	Amoozesh_M	Amoozesh_L	Amoozesh_H	Resident_B	Resident_M	Resident_L	Resident_H	Green_B	Green_M	Green_L	Green_H
11101	0	0	0	10	0	0	0	10	5	1	1	2	0	0	0	10
11102	0	0	0	10	0	0	0	10	0	0	1	1	0	0	0	10
11103	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	10	10	0	0	0
11104	0	0	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11105	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11106	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11107	0	0	0	10	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11108	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11109	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11120	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
11121	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	10	10	0	0	0
11122	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11124	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11125	0	0	0	0	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	10
11126	0	0	0	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	10
11127	0	0	0	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	10
11128	0	0	0	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	10
11134	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11135	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11136	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	10
11137	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11138	0	0	0	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11139	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11140	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11141	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11142	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11143	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11144	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11145	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11146	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11147	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11148	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11149	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11150	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11151	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10

شکل ۶- آماده سازی جدول توصیفی برای مدل DEA



(ب)



(الف)

شکل ۷- نحوه تعیین اعداد برای هر حریم از لایه مراکز درمانی

همانطور که پیشتر گفته شد، NE<sub>ijk</sub> مربوط به اعداد ۱ تا ۱۰ بوده که از طریق ابزارهای selection مطابق حریم لایه‌های اطلاعاتی در جدول ۵ آمده است. NE<sub>ijk</sub> مربوط به لوله Iam و معیار Zام و معیار ارزیابی Iam بوده است (مثلاً

به لوله Iam و معیار Zام و معیار ارزیابی Iam بوده است (مثلاً

به صورت  $0.9 * 0.1 * 0.04 * 0.02 * 0.1 = 0.000072$  (رابطه ۱۱)

به صورت  $0.9 * 0.1 * 0.04 * 0.02 * 0.1 = 0.000072$  (رابطه ۱۱)

ذکر است که شاخص سازگاری (CR) در این تحقیق برابر ۰/۰۸ شد که قابل قبول بودن ماتریس مقایسه زوجی اولیه را نشان می‌دهد.

بدست می‌آید. در مرحله بعد، وزن هر معیار با استفاده از نظر کارشناسی و در نرم‌افزار Expert Choice 11 محاسبه گردید. ماتریس مقایسه زوجی و نتایج نهایی حاصل از وزن هر معیار در جدول ۶ آمده است. لازم به

جدول ۵- میزان  $\alpha$  و ۴ وزن برای هر معیار که از طریق بهینه‌یابی با استفاده از نرم افزار GAMS به دست آمده است.

$\alpha$	Street_H	Street_M	Street_L	Street_N
۰/۹	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۱
$\alpha$	Health_H	Health_M	Health_L	Health_N
۰/۶۸	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲
$\alpha$	Amooze_H	Amooze_M	Amooze_L	Amooze_N
۰/۸۳	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۳
$\alpha$	Maskooni_H	Maskooni_M	Maskooni_L	Maskooni_N
۰/۷۸	۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱
$\alpha$	Masil_H	Masil_M	Masil_L	Masil_N
۰/۹۲	۰/۰۹	.	۰/۰۲	.
$\alpha$	Green_H	Green_M	Green_L	Green_N
۱	۰/۱	.	.	.
$\alpha$	Water_H	Water_M	Water_L	Water_N
۰/۶۸	۰/۰۶	۰/۰۳	.	۰/۰۳
$\alpha$	Diameter_H	Diameter_M	Diameter_L	Diameter_N
۰/۸۶	۰/۱	.	۰/۰۲	۰/۰۴
$\alpha$	Depth_H	Depth_M	Depth_L	Depth_N
۰/۹۱	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱

جدول ۶- ماتریس مقایسه زوجی برای محاسبه وزن معیارها با AHP

وزن	آب	پارک	مسیل	مسکونی	آموزشی	درمانی	عمق	قطر	جاده	معیارها
۰/۱۰۱	۴	۴	۱	۱/۳	۲	۳	۱/۳	۱/۳	۱	جاده
۰/۱۶۹	۴	۴	۲	۱/۲	۴	۴	۱/۲	۱	۳	قطر
۰/۲۵۳	۴	۴	۳	۳	۴	۴	۱	۲	۳	عمق
۰/۰۶۴	۳	۳	۱/۳	۱/۳	۲	۱	۱/۴	۱/۴	۱/۳	درمانی
۰/۰۶۳	۴	۴	۱/۳	۱/۳	۱	۱/۲	۱/۴	۱/۴	۱/۲	آموزشی
۰/۱۷۴	۴	۳	۲	۱	۳	۳	۱/۳	۲	۳	مسکونی
۰/۱۰۶	۳	۳	۱	۱/۲	۳	۳	۱/۳	۱/۲	۱	مسیل
۰/۰۴۲	۴	۱	۱/۳	۱/۳	۱/۴	۱/۳	۱/۴	۱/۴	۱/۴	پارک
۰/۰۲۹	۱	۱/۴	۱/۳	۱/۴	۱/۴	۱/۳	۱/۴	۱/۴	۱/۴	آب

محاسبه ریسک شکست لوله های فاضلاب نیز از رابطه ۱۳ استفاده می‌شود.

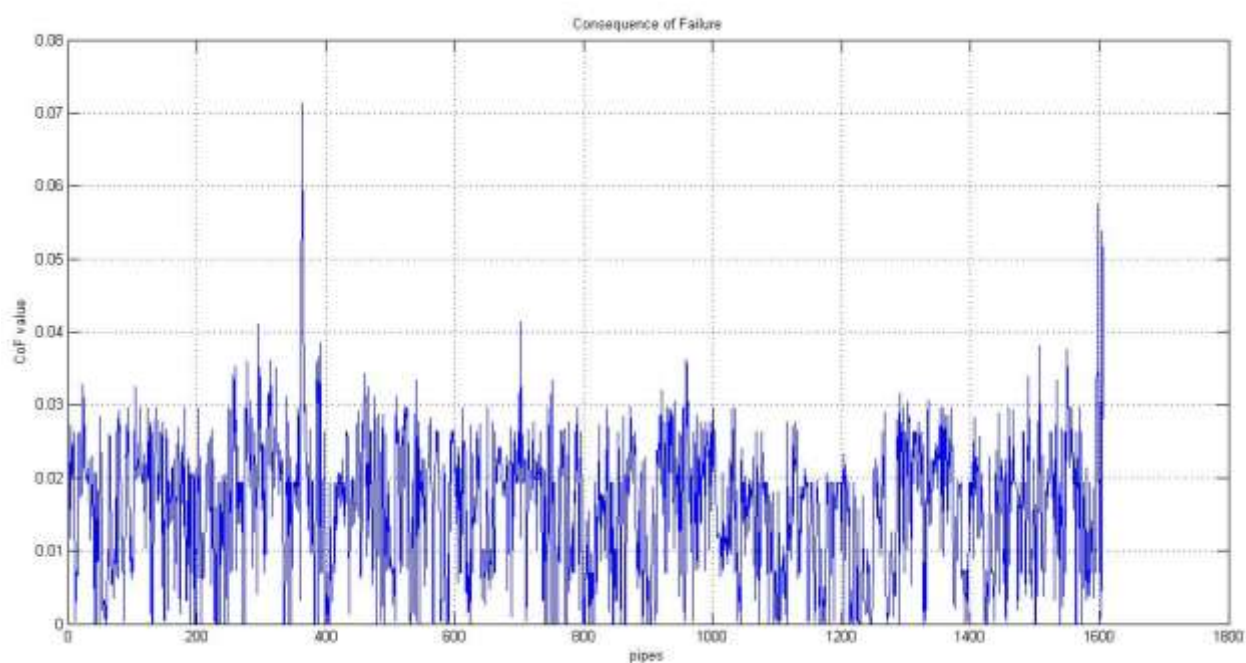
#### نتایج محاسبه ریسک لوله‌ها

سپس مطابق رابطه ۱۲ وزن‌های محلی به دست آمده برای هر لوله، بایستی در وزن معیار (حاصله از AHP) ضرب شود. سپس برای هر لوله، برای هر معیار یک عدد CoF محاسبه می‌شود که از تمامی این ۹ عددی که برای هر لوله به دست آمده، میانگین گرفته می‌شود. برای

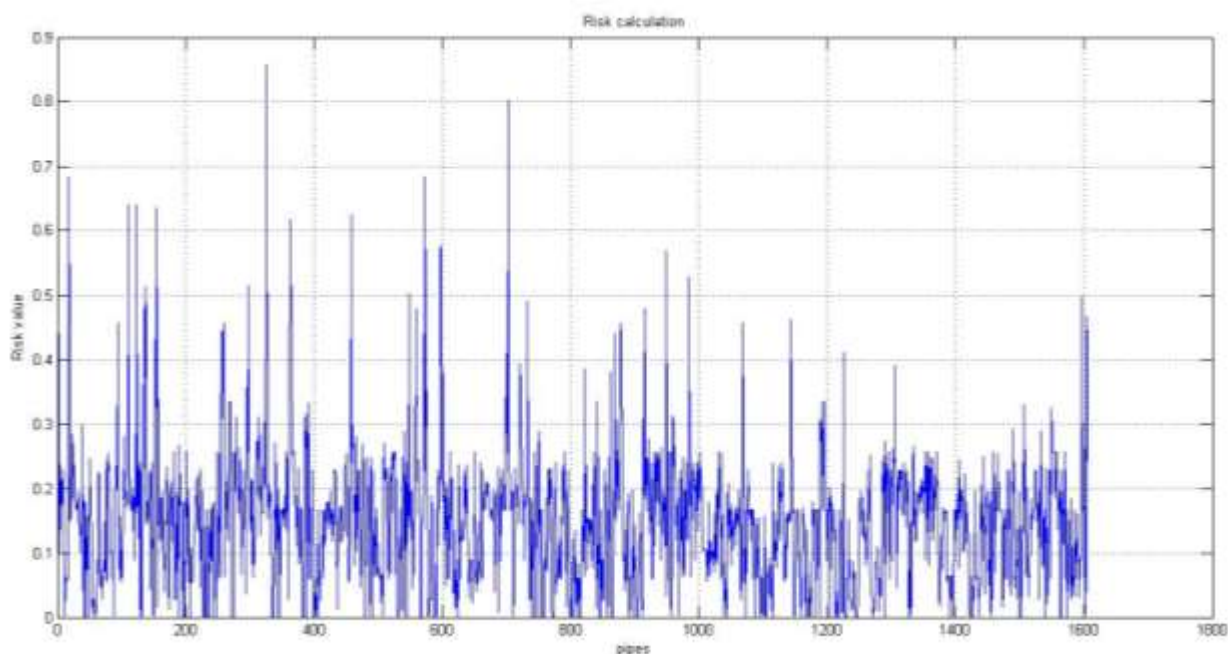


بالاتر از ۰/۰۵ بوده‌اند. همچنین در شکل ۹ نموداری نمایش داده می‌شود که محور x آن شماره هر لوله و محور y آن میزان ریسک محاسبه شده با ترکیب  $PoF * CoF$  می‌باشد. بر این اساس نمودار ستونی از ۹ لوله در شکل ۱۰ نمایش داده می‌شود که در میان کل ۱۶۱۰ لوله بحرانی تر بوده‌اند. محور x شماره هر لوله و محور y آن میزان ریسک بحرانی ترین لوله ها می‌باشد.

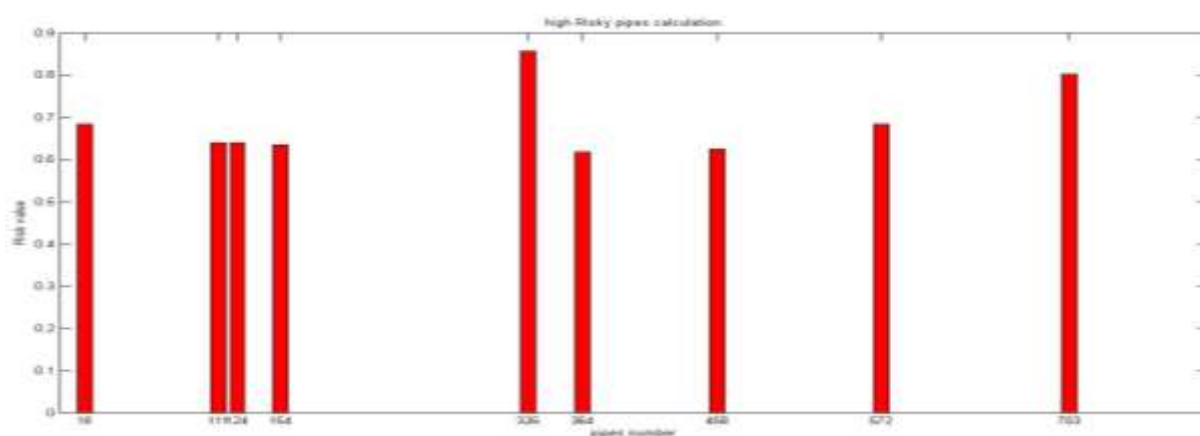
بر اساس محاسبات حاصل از ریسک شکست لوله‌های فاضلاب، لوله‌ها از درجه پایین تا بالا مرتب شده و لوله‌های با بالاترین درجات نشان از بحرانی بودن آن لوله دارد. شکل ۸ نموداری است که محور x آن شماره هر لوله و محور y آن میزان  $CoF$  محاسبه شده با روش AHP-DEA می‌باشد. همانطور که از شکل ۸ برمی‌آید ۶ لوله با بالاترین  $CoF$ ، به ترتیب عبارتند از لوله ۳۶۴، ۱۵۹۶، ۱۶۰۳، ۳۶۳، ۳۶۲ و ۱۶۰۵ که همگی دارای مقدار  $CoF$



شکل ۸- نمایش نمودار  $CoF$



شکل ۹- نمایش نمودار ریسک



شکل ۱۰- نمایش نمودار اولویت بندی بحرانی ترین لوله های فاضلاب

### بحث و نتیجه گیری

نتایج تست نشان داد که چنین رویکردی قابلیت اعتماد بالایی داشته و با دقت مناسبی می‌توان احتمال شکست را برآورد نمود. در عین حال شبکه‌های بی‌بازرسی بسیار انعطاف پذیر هستند. بنابراین مطابق با پژوهش‌های مشابه که برای سیستم‌های آب در پیش‌بینی شکست بسیار مناسب عمل کرده‌اند، در این تحقیق نشان داده شد که برای شبکه

در این پژوهش ریسک شبکه‌های فاضلاب بر اساس ترکیب احتمال شکست و عواقب شکست در منطقه ۴ آب و فاضلاب تهران انجام گرفت. برای این منظور از شبکه‌های بی‌بازرسی برای بدست آوردن احتمال شکست استفاده شد.

برآورد می‌گردد. از بین معیارهای مکانی عواقب شکست نیز می‌توان در مطالعات آتی با تأکید بر معیارهای مهم‌تر عواقب شکست را و ریسک را ارزیابی نمود. به عنوان مثال مسئله ترافیک و افزایش بار شبکه حمل و نقل می‌تواند یکی از مهمترین عواقب منفی شکست باشد، بنابراین سنجش شکست لوله‌ها بر اساس عواقب ترافیکی می‌تواند به عنوان موضوعی مجزا مورد تحقیق قرار گیرد.

## References

- Alberti, A. R., & Cavalcante, C. A. V. (2022). Multicriteria Decision Model to Support Maintenance Planning in Sewage Systems. In *Multicriteria and Optimization Models for Risk, Reliability, and Maintenance Decision Analysis: Recent Advances* (pp. 175-202). Cham: Springer International Publishing.
- Anbari, M. J., Tabesh, M., & Roozbahani, A. (2017). Risk assessment model to prioritize sewer pipes inspection in wastewater collection networks. *Journal of environmental management*, 190, 91-101.
- 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.
- Ballesteros, S. C., Mercado, L. C., Mendoza, J. E. V., Layton, S. P. E., Granados, L. C. V., Caicedo, A., & Torres, A. (2022). SVM-based predictive model for the most frequent structural failure in Bogota sewer system. *International Journal of Critical Infrastructures*, 18(4), 366-380.
- Bowen, W. M., Klosterman, R., & Brail, R. (1998). AHP: Multiple criteria evaluation.
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444.
- Farmani, R., Henriksen, H. J., & Savic, D. (2009). An evolutionary Bayesian belief network methodology for optimum management of groundwater contamination. *Environmental Modelling & Software*, 24(3), 303-310.
- Fonoteca, J. E., Agarwal, P., Torres, M. N., Mukherjee, S., Walteros, J. L., & Rodríguez, J. P. (2021). A two-stage data-driven spatiotemporal analysis to predict failure risk of urban sewer systems leveraging machine learning algorithms. *Risk Analysis*, 41(12), 2356-2391.
- فاضلاب نیز قابل استفاده می‌باشند. به علاوه، آنها اجازه ترکیب آسان از دانش کارشناسی را در مدل پیش‌بینی شکست دارند. در برآورد عواقب شکست نیز از تحلیل‌های مکانی در GIS و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP-DEA استفاده گردید. در مقایسه با پژوهش‌های دیگر، تحلیل‌های مکانی مانند حریم‌گذاری برای ۹ معیار مکانی موجب شد که با سرعت و کارایی بالا امتیاز دهی لوله‌ها در صورت وقوع شکست و تأثیر آن بر پیرامون انجام شود. ترکیب دو روش AHP و DEA مزیت‌های استفاده از داده‌های عینی و ذهنی و همچنین کاهش تعداد مقایسه‌های زوجی را موجب گردید. نهایتاً با تأثیر مقادیر PoF و CoF بر یکدیگر ریسک شکست لوله‌ها بدست آمده و با رتبه‌بندی آن‌ها، لوله‌های بحرانی بدست آمد.
- نتایج برای منطقه ۴ آب و فاضلاب تهران نشان داد که ۶ لوله بالاترین میزان عواقب شکست را، یعنی بیش از مقدار آستانه ۰/۰۵ نشان می‌دهند. همچنین بر اساس مقادیر ریسک محاسبه شده با ترکیب  $PoF * CoF$  نشان داده شد که ۹ لوله در میان کل ۱۶۱۰ لوله بحرانی‌تر بوده اند و نیاز به رسیدگی فوری دارند. برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد که روش‌های دیگری برای محاسبه PoF و CoF مورد استفاده قرار گیرد. به طور مثال در رابطه با PoF که عمدتاً داده‌مبنا است، استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی و هوش مصنوعی می‌تواند رویکرد نوینی باشد. در رابطه با CoF نیز که عمدتاً بر اساس دانش کارشناسی است، شیوه‌های نوین یا ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره پیشنهاد می‌شود. پیشنهاد دیگر توسعه یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مکانی می‌باشد. اگر پروسه‌ها به صورت سیستماتیک قابل تکرار بوده و با قابلیت تحلیل‌های مکانی متنوع در GIS ترکیب شود، انعطاف‌پذیری بالاتر و سرعت عمل بیشتری در مقایسه تصمیم‌گیری‌های مختلف ایجاد می‌شود و با اطمینان بالاتری میزان ریسک

- Madadgar, S., & Moradkhani, H. (2014). Spatio-temporal drought forecasting within Bayesian networks. *Journal of Hydrology*, 512, 134-146.
- Malekmohammadi, B., Kerachian, R., & Zahraie, B. (2009). Developing monthly operating rules for a cascade system of reservoirs: application of Bayesian networks. *Environmental Modelling & Software*, 24(12), 1420-1432.
- Roosbahani, A. (2012). *Risk based decision making model for urban water systems* (Doctoral dissertation, PhD Thesis, University of Tehran).
- Salman, B., & Salem, O. (2012). Risk assessment of wastewater collection lines using failure models and criticality ratings. *Journal of pipeline systems engineering and practice*, 3(3), 68-76.
- Vanegas, S., Montes, C., & Saldarriaga, J. (2022). Prioritizing inspection of sewer pipes based on self-cleansing criteria. *Urban Water Journal*, 1-10.
- Wang, Y. M., Liu, J., & Elhag, T. M. (2008). An integrated AHP-DEA methodology for bridge risk assessment. *Computers & industrial engineering*, 54(3), 513-525.
- Hahn, M. A., Palmer, R. N., Merrill, M. S., & Lukas, A. B. (2002). Expert system for prioritizing the inspection of sewers: Knowledge base formulation and evaluation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128(2), 121-129.
- Kabir, G., Balek, N. B. C., & Tesfamariam, S. (2018). Consequence-based framework for buried infrastructure systems: A Bayesian belief network model. *Reliability Engineering & System Safety*, 180, 290-301.
- Kulkarni, R. B., Golabi, K., & Chuang, J. (1986). Analytical techniques for selection of repair-or-replace options for cast-iron gas piping systems--Phase I. Topical report, March 1985-June 1986 (No. PB-87-114112/XAB). Woodward-Clyde Consultants, Walnut Creek, CA (USA).
- Loganathan, K., Najafi, M., Kaushal, V., & Covilakam, M. (2022). Development of a decision support tool for inspection and monitoring of large-diameter steel and prestressed concrete cylinder water pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 13(1), 04021067.

## Evaluation of failure risk in the sewerage system using Bayesian network and spatial multi-criteria decision making

Seyed Morteza Ghoreishi<sup>1</sup>, Mohammad H. Vahidnia<sup>2\*</sup>, Aminreza Neshat<sup>2</sup>

### Abstract

A failure in the sewage network as one of the important urban infrastructures can have adverse consequences, which sometimes even leads to the disruption of a part of a city's performance. In this article, the risk of failure in sewerage networks was conducted based on the combination of the probability of failure and the consequences of failure in the 4th water and sewerage area of Tehran. For this purpose, Bayesian networks were first used to obtain the probability of failure. The network was formed based on features such as deposits, pipe leakage, corrosion, pipe wear, and pipe deformation. For 1610 pipes, 70% of which were used for training and 30% for testing, the probability of pipe blockage was 6.7%, the probability of hydraulic failure was 2.2%, the probability of structural failure was 0.3%, and the total probability of failure for pipes was 8.7%. The overall average accuracy of this step was estimated at 76%. In estimating the consequences of failure, spatial analysis in GIS and the DEA multi-criteria decision-making method were used. Spatial analysis such as buffer for 9 spatial criteria made it possible to score pipes with high speed and efficiency in case of failure and its impact on the surroundings. The DEA method has the advantages of using objective and subjective data as well as reducing the number of pairwise comparisons. Finally, with the effect of PoF and CoF values on each other, the risk of pipe failure was obtained and by ranking them, 9 items in the network were identified as critical pipes. The results showed that such an approach has high reliability and the risk of failure can be estimated with proper accuracy.

**Keywords:** Data Envelopment Analysis, multi-criteria decision analysis (MCDA), spatial analysis, Sewerage System

