

**Research Paper**

**مقاله پژوهشی**

**Vulnerability Assessment of Urban Sewer Networks Against Industrial Discharges Using RAMCAP Method, Case Study: Tehran City**

**ارزیابی آسیب پذیری شبکه های فاضلاب شهری در برابر تخلیه های صنعتی با استفاده از روش RAMCAP مطالعه موردی: شهر تهران**

Aghil Ghorbani Shahnajafi<sup>1\*</sup>, Seyed Hossein Hashemi<sup>2</sup> and Seyed Naser Bashi Azghadi<sup>3</sup>

عقیل قربانی شاهنجفی<sup>۱\*</sup>، سیدحسین هاشمی<sup>۲</sup> و سیدناصر باشی ازغدی<sup>۳</sup>

1- M.Sc., Environmental Science and Engineering, Faculty of Environment Science, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran.

۱- کارشناس ارشد علوم و مهندسی محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

2- Associate Professor of Environmental Technologies, Faculty of Environment Science, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran.

۲- دانشیار فناوری های محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

3- Assistant Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad, Iran.

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران.

\*Corresponding Author, Email: [aghilghorbani71@gmail.com](mailto:aghilghorbani71@gmail.com)

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [aghilghorbani71@gmail.com](mailto:aghilghorbani71@gmail.com)

Received: 18/07/2024

Revised: 14/10/2024

Accepted: 10/11/2024

© IWWA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۸

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

© انجمن آب و فاضلاب ایران

**Abstract**

**چکیده**

Since in many regions and due to different reasons, there are industrial plants inside urban or suburban areas, and their produced wastewater may discharge to urban sewer network. In this study, vulnerability of urban sewer networks against industrial discharges which can enter high flow and pollution loads to sewers and cause damage to wastewater facilities (pipes) was identified and determined. For this purpose, the sewage network of District 21 of Tehran, which includes many industrial units, was selected as a case study, and related information was collected. Then the assets and specific threats related to the network were identified. After that, the severity of assets damages which were caused by any probable threat was determined. Finally, the vulnerability index of pipes as the assets of the sewage network was ranked and calculated using the RAMCAP method based on their diameter in the range of low, medium, and high risk. The results show that the most important threats caused by industrial discharges to the urban sewer network are release of chemical pollutants and dramatically changes of industrial discharges quality which can create physical damage of urban wastewater facilities and their dysfunction. Out of a total of 75 pipes in the network, 6 pipes have high risk, 10 pipes have medium risk, and the remaining 59 pipes have low risk.

از آن جا که در بسیاری از مناطق به دلایل مختلف واحدهای صنعتی در داخل و حومه شهرها قرار دارند، فاضلاب تولیدی آنها ممکن است به سیستم فاضلاب شهری تخلیه شود. در این پژوهش آسیب پذیری شبکه های فاضلاب شهری در مقابل تخلیه فاضلاب های صنعتی که می توانند دبی و بار آلودگی زیادی به شبکه فاضلاب وارد کنند و موجب خسارت به تأسیسات فاضلاب (شبکه های جمع آوری) شوند، شناسایی و تعیین شده است. بدین منظور شبکه فاضلاب منطقه ۲۱ تهران که دربرگیرنده تعداد زیادی واحدهای صنعتی است، به عنوان مطالعه موردی انتخاب و اطلاعات مربوطه گردآوری شد. سپس دارایی ها و تهدیدات ویژه مربوط به شبکه فاضلاب شناسایی و پس از آن شدت آسیب ناشی از هر تهدید احتمالی بر دارایی های مشخص شد. در آخر عدد آسیب پذیری لوله ها به عنوان دارایی های شبکه فاضلاب با استفاده از روش RAMCAP، محاسبه شد. نتایج نشان داد که مهم ترین مخاطرات ناشی از تخلیه فاضلاب های صنعتی به شبکه فاضلاب شهری، ورود آلاینده های شیمیایی و تغییر شدید کیفیت فاضلاب ناشی از تخلیه های صنعتی است که می توانند موجب خسارت به تأسیسات فاضلاب شهری و اختلال در عملکرد آنها شوند. در کل، از مجموع ۷۵ لوله به عنوان دارایی مهم در شبکه، ۶ لوله دارای ریسک بالا، ۱۰ لوله دارای ریسک متوسط و بقیه ۵۹ لوله دارای ریسک کم هستند.

**Keywords:** Sewer network, Industrial wastewater, Pollution load, Risk, Network assets, RAMCAP.

**کلمات کلیدی:** شبکه فاضلاب، فاضلاب صنعتی، بار آلودگی، ریسک، دارایی های شبکه، RAMCAP

می‌شود. تهدید، یک رخداد با احتمال وقوع پایین و پیامدهای منفی بالا است که ممکن است احتمال رخداد آن قابل محاسبه نباشد. ریسک، احتمال وقوع یک پدیده نامطلوب است. ریسک متشکل از سه پارامتر احتمال وقوع بحران، شدت وقوع حادثه و آسیب‌پذیری سیستم است (Torres et al., 2009). امروزه تکنیک‌های مختلفی مانند مدل IFHRA-WSS، مدل RAMCAP، رویکرد FEMA، تحلیل ریسک فازی، تحلیل سلسله مراتبی با دو رویکرد فازی و درخت خطا همراه با مدل سازی شیء‌گرا، تلفیق رویکردهای عملکردی و آمیشتی، تجمع درخت خطا و شبیه‌سازی مونت کارلو برای ارزیابی و تحلیل ریسک در زیرساخت‌های تأمین و توزیع آب شهری شبکه‌های فاضلاب به صورت مجزا یا یکپارچه به کار گرفته شده است (Sadiq., 2020; Xudong., 2022; Li., 2009; Saskia., 2022; Nurollahi et al., 2015; Roorbahani., 2015; Tchorzewska., 2019).

دستورالعمل موسوم به مدل RAMCAP که به اختصار از مدیریت و ارزیابی ریسک برای محافظت از سرمایه‌های حیاتی اخذ شده است، متدولوژی توصیه شده برای بخش آب و فاضلاب در ایالات متحده است. RAMCAP فرآیندی برای ارزیابی پیامدهای، آسیب‌پذیری‌ها و خطرپذیری‌های ناشی از حوادث و حملات تروریستی برای اولین بار در آمریکا استفاده شده است. به علاوه، این روش، راه کارهای را برای ارزیابی اثرات و پیامدهای حوادث طبیعی در بخش آب و فاضلاب ارائه می‌کند. این دستورالعمل دو هدف عمده را دنبال می‌نماید: یکی تعیین یک چارچوب و قالب عمومی و فراگیر برای آگاهی از خطرات و تهدیدهایی که سامانه‌های آب و فاضلاب با آن‌ها مواجه هستند و دیگری این که راهنمایی به منظور تدوین چگونگی دستیابی به روش‌های ارزیابی خطرات متوجه سامانه‌های آب و فاضلاب با به کارگیری این قالب ارائه شده است (Brashear et al., 2010). در روش RAMCAP ریسک مساوی است با تهدید در پیامد و آسیب‌پذیری که از اعضای اصلی مدل هستند. برای ارزش‌گذاری به هر یک از سه پارامتر ایجادکننده ریسک، شاخص‌های تعریف شده است که شخص تصمیم‌گیرنده با توجه به آن شاخص‌ها، ارزش نهایی آن پارامتر را تعیین می‌کند. تاکنون پژوهش‌ها و مطالعات متعددی برای بررسی آسیب‌پذیری، ارزیابی و تحلیل ریسک بخش‌های مختلف شبکه فاضلاب و شبکه‌های آب‌رسانی صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره شده است.

روزبهانی و همکاران (۱۳۹۴) مدل IFHRA-WSS با رویکرد فازی را برای تحلیل ریسک سامانه‌های آب شهری شامل بخش

امروزه یکی از مسائل عمده محیط‌زیست کشور که از فعالیت‌های انسان ناشی می‌شود، فاضلاب صنایع مختلف است. تخلیه فاضلاب‌های صنعتی خام و تصفیه نشده به محیط‌زیست یکی از مشکلات جدی است که در حال حاضر منابع آب و خاک کشور را تهدید می‌کند. تفاوت در کمیت و کیفیت فاضلاب صنایع، نوع عملیات صنعتی و تنوع زیاد مواد شیمیایی مصرفی در واحدهای صنعتی، از جمله مسائلی هستند که مدیریت فاضلاب‌های صنعتی را به مراتب تخصصی‌تر و پیچیده‌تر از فاضلاب‌های شهری می‌سازد (Wang et al., 2004).

شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری از جمله زیرساخت‌های اصلی شهرها هستند. این شبکه‌ها از محل ورود تا خروج فاضلاب، در معرض تهدیدهای طبیعی و انسانی قرار دارند که در این میان، تهدیدهای انسانی می‌تواند به صورت حملات انفجاری مستقیم یا ورود آلودگی به شبکه فاضلاب باشد (ASME, 2006). بیشتر کشورهای پیشرفته فاضلاب‌های صنعتی خود را به روش‌های مختلف مدیریت می‌کنند. یکی از این روش‌ها، اتصال فاضلاب صنایع به شبکه فاضلاب شهری است. در این روش، مقدار بالای بار آلودگی فاضلاب صنایع، ممکن است موجب خسارت به سیستم تصفیه‌خانه و نیز تأسیسات شبکه انتقال فاضلاب شهری شود. تخلیه غیرمجاز فاضلاب صنعتی به تأسیسات فاضلاب شهری می‌تواند موجب تخریب تأسیسات شبکه جمع‌آوری و تصفیه‌خانه فاضلاب و هم‌چنین انتشار آلاینده‌های شیمیایی و بیولوژیکی شود که ممکن است پیامدهایی از قبیل آلودگی، تخریب محیط‌زیست، بیماری و مرگ انسان‌ها را به دلیل نزدیکی به محیط زندگی و هم‌چنین توقف خدمات فاضلاب به دنبال داشته باشد. بنابراین تحلیل جامع ریسک و آسیب‌پذیری ناشی از این نوع تخلیه‌ها با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های این سامانه‌ها و اجزای آن‌ها ضروری است (عسکریان و همکاران، ۱۳۹۴).

ارزیابی ریسک عبارت از روش منطقی برای تعیین اندازه کمی و کیفی خطرات و بررسی پیامدهای بالقوه ناشی از حوادث احتمالی بر روی افراد، مواد، تجهیزات و محیط است. در حقیقت از این طریق میزان کارآمدی روش‌های کنترلی موجود مشخص شده و داده‌های باارزشی برای تصمیم‌گیری در زمینه کاهش ریسک، خطرات، بهسازی سیستم‌های کنترلی و برنامه‌ریزی برای واکنش به آن‌ها فراهم می‌شود. هر نوع حادثه‌ای که بروز آن محتمل بوده و منجر به خسارات جانی یا مالی و آسیب به زیرساخت‌های حیاتی یک کشور شود، تهدید یا بحران نامیده

انشعاب‌ها) و با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی، مقایسه زوجی میان عامل‌های مربوطه انجام و وزن نسبی هر یک از معیارها محاسبه شد. سپس بیشترین آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب برای هر کدام از اهداف مشخص شد. (Ghoreishi et al. (2023) ارزیابی ریسک شکست در شبکه فاضلاب را با توسعه شبکه‌های بیزین و تصمیم‌گیری چند معیاره مکانی براساس ترکیب احتمال شکست و عواقب شکست در منطقه ۴ آب و فاضلاب تهران انجام دادند. شبکه بیزین براساس ویژگی‌هایی چون رسوبات، نشت لوله‌ها، خوردگی، سایش لوله‌ها و تغییر شکل لوله‌ها تشکیل شد. در این مطالعه، از تحلیل‌های مکانی در GIS و روش تصمیم‌گیری چند معیاره DEA<sup>۲</sup> استفاده شد. نتایج نشان داد که چنین رویکردی قابلیت اعتماد بالایی داشته و با دقت مناسبی می‌توان ریسک شکست را برآورد نمود.

با آن‌چه بیان شد حفظ و نگهداری شبکه‌های آب و فاضلاب و تصفیه‌خانه ضروری است و به‌عنوان مسئله عمده‌ای در حفظ جان انسان‌ها به‌شمار می‌آید. لذا مطابق مطالعات صورت‌گرفته تا هنوز از مدل RAMCAP برای ارزیابی شبکه‌های آب‌رسانی استفاده شده است. در این پژوهش از این مدل برای ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب استفاده شده است. شایان ذکر است از آن‌جا که رویکرد مورد مطالعه جامع‌تر نبوده است از سایر روش‌ها مانند FMEA<sup>۳</sup>، AHP<sup>۴</sup>، درخت خطا و تحلیل ریسک فازی استفاده نشده است، به‌گونه‌ای که در روش‌های دیگر به‌صورت هم‌زمان آثار تهدیدات مغرضانه، انسان‌ساز، هم مخاطرات طبیعی و عملکردی - فنی با هم ارزیابی شده باشد. در صورتی که مزیت روش RAMCAP نسبت به سایر روش‌های ارزیابی ریسک این بوده که این روش مختص برای ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک بخش آب و فاضلاب بوده است. هم‌چنین معیارها و الگوهای استفاده شده در دیگر روش‌ها یا به‌صورت عمومی بوده و یا مختص یک بخش خاصی غیر از سامانه‌های آب و فاضلاب بوده است. از جمله نوآوری صورت‌گرفته در این تحقیق، علاوه بر در نظر گرفتن کلیه اجزای شبکه فاضلاب به‌صورت یکپارچه، به‌کارگیری شاخص‌های موثر و تأثیرگذار در ارزیابی تهدیدات و ارزیابی آسیب‌پذیری بوده است.

از آن‌جا که تهران پایتخت و بزرگ‌ترین شهر ایران است و صنایع زیادی در آن مشغول فعالیت هستند، مشکلات محیط‌زیستی زیادی از جمله فاضلاب صنایع در این شهر وجود دارد. فاضلاب صنایع در منطقه غرب تهران، از پرمخاطره‌ترین مشکلات محیط‌زیستی این شهر است. یکی از راه‌های مدیریت فاضلاب صنایع این محدوده، اتصال فاضلاب صنایع مختلف به

تأمین، تصفیه و توزیع به‌صورت یکپارچه ارائه و کارایی آن بر روی سیستم آب شرب شهر ارومیه در ایران را بررسی کردند. (Asgarian et al. (2023) مدل FSAW<sup>۵</sup> را برای تحلیل ریسک شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، برای مدیریت عملکرد شبکه در شرایط بحران مانند بروز خطرات طبیعی و انسان‌ساز ارائه کردند. در این مطالعه که در منطقه تحت پوشش تصفیه‌خانه شهرک غرب تهران اجرا شد، بحران‌های ورود آلاینده شیمیایی و تغییرات شدید در کیفیت فاضلاب به‌عنوان پرمخاطره‌ترین بحران شناخته شد. سرانجام رویکرد مقابله و کاهش خطر ریسک به‌عنوان رویکرد پیشنهادی ارائه شد.

(Salman et al. (2012) خطرپذیری (ریسک) لوله‌ها در شبکه‌های فاضلاب را ارزیابی کردند. آن‌ها براساس اولویت‌بندی شبکه‌های فاضلاب با توجه به نظرات کارشناسان، مقادیر شکست یا خرابی برای هر لوله را به‌صورت نسبی تعیین کردند. سپس برای تعیین پیامد شکست از سیستم امتیازدهی وزنی استفاده شد که در آن عملکرد هر لوله با توجه به مجموعه‌ای از فاکتورها ارزیابی و مجموع وزنی محاسبه شد. (Anbari et al. (2018) یک مدل ارزیابی ریسک جدید برای اولویت‌بندی بازرسی لوله‌های فاضلاب با استفاده از شبکه‌های (BNs) Bayesian به‌عنوان یک روش احتمالی برای محاسبه احتمال شکست و روش میانگین وزنی برای محاسبه پیامدهای مقادیر شکست ارائه کردند. در این مطالعه با در نظر گرفتن عدم قطعیت، ادغام احتمال و پیامدهای مقادیر شکست با استفاده از یک سیستم استنتاج فازی (FIS) مقدار ریسک لوله‌ها فاضلاب محاسبه شد.

(Asghari et al. (2023) با ارائه روش تلفیقی تجزیه و تحلیل و مدیریت ریسک برای حفاظت از دارایی‌های حیاتی (RAMCAP) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) کل زیرساخت آبی شهر تهران شامل سدها، تصفیه‌خانه‌ها، مخازن ذخیره، چاه‌ها، تلمبه‌خانه‌ها و شبکه توزیع را از لحاظ آسیب‌پذیری بررسی کردند. نتایج نشان داد ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌ها بر مبنای معیارها و اهداف مشخص شده قابلیت کشف و شناسایی دارند که در نتیجه سدهای امیرکبیر و طالقان و دیگر اجزای سامانه آب‌رسانی بیشترین آسیب‌پذیری و مخازن ذخیره آسیب‌پذیری کمتری را دارا بوده است.

امینی و حاجی‌کندی (۱۴۰۰) به ارزیابی و رتبه‌بندی آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب اجرا شده در بخشی از منطقه ۵ شهرداری تهران با استفاده از تلفیق مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و تکنیک GIS<sup>۶</sup> پرداخته است. در این مطالعه براساس سه عامل هدف (گرفتگی آدم‌رو، گرفتگی لوله و گرفتگی

از کاربری‌های مسکونی، اداری و تجاری و صنعتی را در برگرفته است، به طوری که ۴۳۴۰ کارگاه و حدود ۲۰ درصد اشتغال صنعت شهر تهران در این منطقه قرار دارد (شکل ۱).

## ۲-۲- شناسایی صنایع

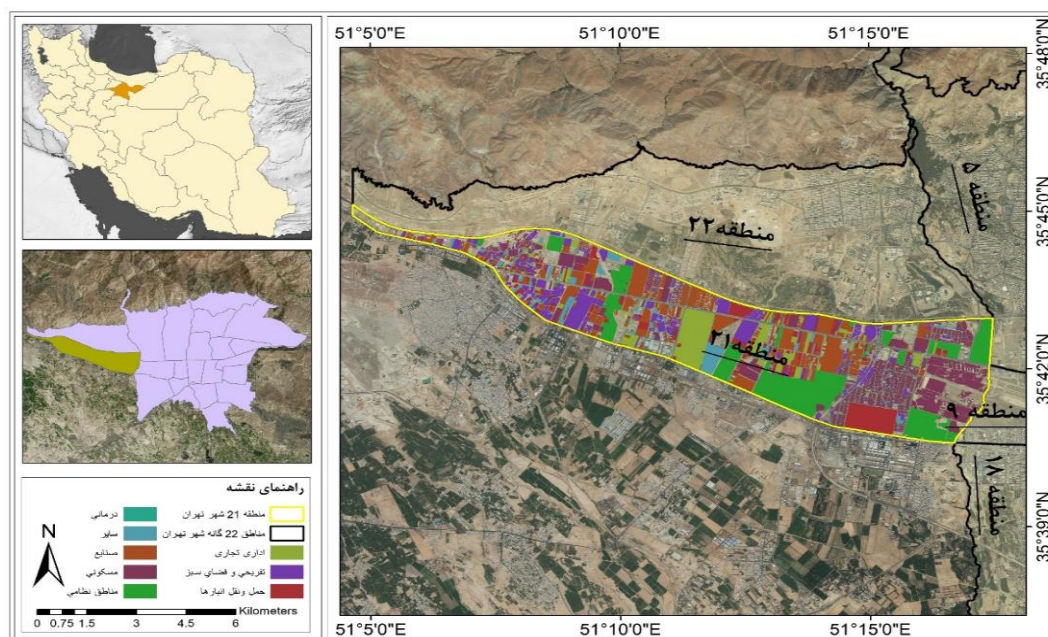
در اولین گام پژوهش، صنایع مستقر در منطقه ۲۱ تهران شناسایی و صنایع با تعداد کارکنان بیش از ۱۰ نفر که جزو صنایع متوسط و بزرگ طبقه‌بندی می‌شوند، انتخاب شدند (وزارت صنعت، معدن و تجارت، ۱۳۹۲). در گام بعدی با طراحی پرسشنامه و بازدید میدانی از تک‌تک صنایع اطلاعات موردنیاز در زمینه موقعیت جغرافیایی، مقدار آب مصرفی، ویژگی‌ها و مشخصات فاضلاب تولیدی ۸۰ واحد صنعتی منتخب جمع‌آوری شد (جدول ۱).

شبکه فاضلاب شهری پایتخت است. در این شرایط، مقدار بالای دبی و بار آلودگی فاضلاب صنایع، ممکن است موجب خسارت به شبکه جمع‌آوری و انتقال و تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شود. بنابراین، با توجه به اثرات تخلیه‌های صنعتی بر تأسیسات فاضلاب شهری، در این پژوهش فقط شناسایی و بررسی آسیب‌پذیری تأسیسات شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری به هنگام وقوع تخلیه‌های صنعتی با استفاده از مدل RAMCAP انجام شده است.

## ۲- مواد و روش

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه، منطقه ۲۱ تهران با مساحتی بالغ بر ۵۵۵۰ هکتار، ۷/۸ درصد کل مساحت شهر تهران و مجموعه‌ای



شکل ۱- کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- خلاصه ساختار و اطلاعات پرسشنامه

ویژگی	مشخصات	شرح
شناسه واحد صنعتی	نام صنعت نشانی نوع مواد اولیه مصرفی نوع تولیدات مختصات جغرافیایی صنعت	نوع تولیدات: - ظرفیت سالانه تولید - مقدار سالانه مصرف مواد اولیه
ویژگی‌های آب مصرفی واحد صنعتی	کمیت و کیفیت آب مصرفی	میانگین سالانه آب مصرفی واحد صنعتی منبع تأمین آب حجم مخازن ذخیره آب مصرفی

میزان آب مصرفی در فرایند تولید ساعات مصرف آب در فرایند تولید میزان مصرف آب بهداشتی کیفیت آب مصرفی		
میانگین سالانه فاضلاب تولیدی حداکثر دبی فاضلاب تولیدی حداقل دبی فاضلاب تولیدی ساعات حداقل و حداکثر دبی فاضلاب مقدار فاضلاب تولیدی به ازای واحد مواد اولیه مصرفی مقدار فاضلاب تولیدی به ازای واحد تولید محصول	کمیت و کیفیت فاضلاب تولیدی	ویژگی‌های فاضلاب تولیدی واحد صنعتی
ویژگی‌های جریان فاضلاب: - دبی فاضلاب - ساعات تولید فاضلاب در شبانه‌روز - ساعات اوج تولید فاضلاب - ویژگی ظاهری فاضلاب (رنگ، بو و غیره)	انواع جریان فاضلاب: - فاضلاب حاصل از شستشوی سالن - فاضلاب حاصل از تولید محصول - فاضلاب حاصل از شستشوی ظروف و تجهیزات - فاضلاب بهداشتی - فاضلاب حاصل از شکل دادن و سرد کردن قطعات تولید	ویژگی‌های جریان‌های فاضلاب تولیدی واحد صنعتی
تأسیسات تصفیه یا پیش تصفیه نحوه دفع فاضلاب فاصله کارخانه تا نزدیک‌ترین خط شبکه فاضلاب‌روی شهری	وجود یا عدم وجود تأسیسات پیش تصفیه یا تصفیه فاضلاب	تأسیسات فاضلاب صنعتی

متصل شده‌اند. در این پژوهش از میان حدود ۲۶۳۶ لوله شبکه فاضلاب در منطقه، فاضلاب صنایع به ۷۵ لوله تخلیه می‌شود که در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. سپس سطح اهمیت ریسک لوله‌ها براساس قطر در بازه ۲۵۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر به سه دسته کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شده است. هم‌چنین فاصله صنایع تا نقطه تخلیه به شبکه، برای همه صنایع بین ۱۰ تا ۸۰۰ متر در نظر گرفته شده است.

### ۲-۳- ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه با روش RAMCAP

یکی از روش‌های ارزیابی ریسک شبکه‌های آب و فاضلاب مدل RAMCAP است (ASEM., 2006). همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، این روش هفت گام اساسی به شرح زیر دارد.

**گام اول:** ارزیابی و شناسایی ارزش دارایی‌ها: لوله‌ها به‌عنوان دارایی شبکه انتخاب شدند. لوله‌های انتخاب‌شده، مواردی هستند که به نقاط یا آدم‌روهایی که تخلیه صنعتی وارد شبکه می‌شود،

جدول ۲- دارایی‌های شبکه جمع‌آوری فاضلاب

ردیف	آدم‌رویی که فاضلاب صنعتی وارد می‌شود	لوله‌ی دارای آلودگی	قطر لوله (mm)	ردیف	آدم‌رویی که فاضلاب صنعتی وارد می‌شود	لوله‌ی دارای آلودگی	قطر لوله (mm)
۱	C101	P4C101	۲۵۰	۳۸	C305	P4C305	۲۵۰
۲	C108	P4C108	۳۰۰	۳۹	C317	P4C317	۲۵۰
۳	C111	P4C111	۳۰۰	۴۰	C318	P4C318	۲۵۰
۴	C116	P4C116	۲۵۰	۴۱	C331	P4C331	۳۰۰
۵	C120	P4C120	۳۰۰	۴۲	C359	P4C359	۴۰۰
۶	C222	P4C122	۴۰۰	۴۳	C360	P4C360	۴۰۰
۷	C132	P4C132	۲۵۰	۴۴	C364	P4C364	۴۰۰
۸	C143	P4C143	۲۵۰	۴۵	C366	P4C366	۴۰۰
۹	C147	P4C147	۲۵۰	۴۶	C414	P4C414	۴۰۰

ردیف	آدم‌رویی که فاضلاب صنعتی وارد می‌شود	لوله‌ی دارای آلودگی	قطر لوله (mm)	ردیف	آدم‌رویی که فاضلاب صنعتی وارد می‌شود	لوله‌ی دارای آلودگی	قطر لوله (mm)
۱۰	C149	P4C149	۲۵۰	۴۷	C419	P4C419	۲۵۰
۱۱	C151	P4C151	۲۵۰	۴۸	C437	P4C437	۵۰۰
۱۲	C152	P4C152	۲۵۰	۴۹	C438	P4C438	۵۰۰
۱۳	C158	P4C158	۲۵۰	۵۰	C458	P4C458	۲۵۰
۱۴	C161	P4C161	۲۵۰	۵۱	C461	P4C461	۲۵۰
۱۵	C174	P4C174	۳۰۰	۵۲	C466	P4C466	۲۵۰
۱۶	C180	P4C180	۴۰۰	۵۳	C474	P4C474	۲۵۰
۱۷	C182	P4C182	۴۰۰	۵۴	C479	P4C479	۲۵۰
۱۸	C189	P4C189	۲۵۰	۵۵	C485	P4C485	۲۵۰
۱۹	C192	P4C192	۲۵۰	۵۶	C486	P4C486	۲۵۰
۲۰	C198	P4C198	۳۰۰	۵۷	C487	P4C487	۲۵۰
۲۱	C204	P4C204	۳۰۰	۵۸	C648	P4C648	۶۰۰
۲۲	C216	P4C216	۲۵۰	۵۹	A1414	P4A1414	۶۰۰
۲۳	C219	P4C219	۲۵۰	۶۰	A1415	P4A1415	۶۰۰
۲۴	C237	P4C237	۲۵۰	۶۱	AM504	AM504	۷۰۰
۲۵	C232	P4C232	۴۰۰	۶۲	B242	P4B242	۴۰۰
۲۶	C241	P4C241	۴۰۰	۶۳	B429	P4B429	۲۵۰
۲۷	C243	P4C243	۴۰۰	۶۴	B564	P4B564	۵۰۰
۲۸	C250	P4C250	۲۵۰	۶۵	B589	P4B586	۳۰۰
۲۹	C253	P4C253	۲۵۰	۶۶	B595	P4B595	۳۰۰
۳۰	C253	P4C253	۲۵۰	۶۷	B598	P4B598	۳۰۰
۳۱	C256	P4C256	۲۵۰	۶۸	H101	P4H101	۲۵۰
۳۲	C270	P4C270	۲۵۰	۶۹	H130	P4H130	۱۲۰۰
۳۳	C286	P4C286	۴۰۰	۷۱	H131	P4H131	۱۲۰۰
۳۴	C290	P4C290	۲۵۰	۷۲	H133	P4H133	۱۲۰۰
۳۵	C301	P4C301	۵۰۰	۷۳	H134	P4H134	۱۲۰۰
۳۶	C302	P4C302	۷۰۰	۷۴	H137	P4H137	۱۲۰۰
۳۷	C303	P4C303	۷۰۰	۷۵	H274	P4H274	۱۲۰۰

می‌شود.

**گام پنجم:** ارزیابی تهدید: ارزیابی تهدید، احتمال یک حمله را محاسبه می‌کند.

**گام ششم:** ارزیابی ریسک: میزان ریسک ناشی از هر تهدید برای هر دارایی با معادله (۱) محاسبه و سپس مقادیر سطح ریسک برای هر دارایی مشخص می‌شود.

$$R = C \times V \times T \quad (1)$$

که  $R$ : ریسک<sup>۱</sup> یا خطرپذیری،  $C$ : پیامد<sup>۲</sup> یا نتیجه،  $V$ : آسیب‌پذیری<sup>۱</sup> و  $T$ : تهدید محتمل<sup>۱۱</sup> هستند.

**گام هفتم:** مدیریت ریسک: پس از آن که مقادیر دارای ریسک با پتانسیل بالا برای هر یک از لوله‌ها یا دارایی‌ها مشخص شد، لازم

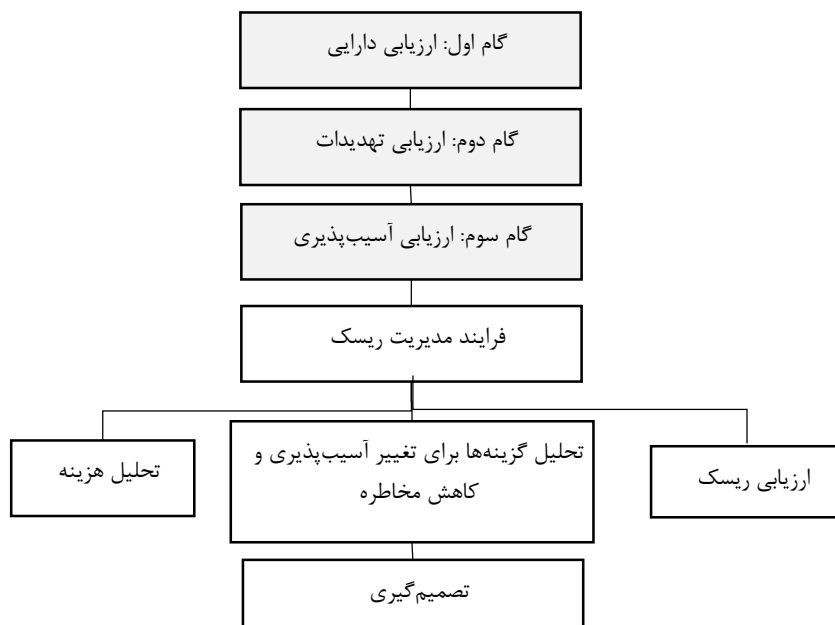
**گام دوم:** شناسایی تهدیدها: نوع تهدیدها و ریسک‌های شبکه یا دارایی تعیین می‌شوند. در این پژوهش آلودگی شیمیایی ناشی از تخلیه فاضلاب صنعتی به‌عنوان یک تهدید انسان‌ساز برای تک‌تک دارایی‌ها مدنظر است.

**گام سوم:** تحلیل نتیجه: مقدار آسیب‌پذیری مالی و جانی ناشی از آلودگی شیمیایی به‌عنوان یک تهدید، تعیین می‌شود. در شبکه‌های فاضلاب بیش‌تر آسیب‌ها از نوع مالی و اغلب شامل خسارت ناشی از آلودگی‌های شیمیایی بر تأسیسات و خوردگی لوله‌های فاضلاب هستند. در این پژوهش مقدار هزینه آسیب ثابتی برای هر لوله در نظر گرفته شده است.

**گام چهارم:** ارزیابی آسیب‌پذیری: پتانسیل آسیب‌پذیری دارایی‌های بحرانی در برابر تهدیدهای شناسایی شده محاسبه

از آن‌جا که در این مقاله هدف ارزیابی دارایی‌ها، شناسایی تهدیدها و تعیین مقدار آسیب‌پذیری است، بنابراین گام‌های اول تا سوم انجام شده‌اند.

است گزینه‌هایی برای کاهش ریسک به اجرا گذاشته شود. یکی از روش‌های بسیار کاربردی برای کاهش ریسک، ایجاد شبکه‌های پایش در شبکه است.



شکل ۲- فرایند ارزیابی ریسک با روش RAMCAP (ASEM, 2006)

### ۳- بحث و نتایج

B, C و H شامل ۲۶۳۶ لوله و ۲۶۳۰ منهول تقسیم شد. پس از شبیه‌سازی شبکه، موقعیت جغرافیایی صنایع بر روی شبکه پیاده‌سازی شد (شکل ۳). بیش‌ترین تراکم صنایع به‌ترتیب در زیرحوضه‌های A, H, C و B است. سپس فاضلاب هر واحد صنعتی به نزدیکترین انشعاب شبکه فاضلاب متصل شد.

### ۳-۱- صنایع موجود در منطقه

صنایع شناسایی شده از طریق کار میدانی و پرسشنامه، براساس طرح آمارگیری از کارگاه‌های صنعتی کشور، در ۱۰ دسته طبقه‌بندی شدند (جدول ۳).

### ۳-۲- بار آلودگی و دبی فاضلاب صنایع

در این پژوهش دو ویژگی بار آلودگی و دبی برای فاضلاب هر صنعت در نظر گرفته شد. برآورد دبی فاضلاب صنایع با استفاده از داده‌های پرسشنامه و سرانه COD به‌عنوان یک شاخص کلیدی کیفیت فاضلاب از طریق پروفایل‌های صنعتی یا مقالات مشابه برای هر صنعت به‌دست آمد. جدول ۴ خلاصه این مقادیر را نشان می‌دهد.

### ۳-۳- ارزیابی آسیب‌پذیری

پس از تعیین موقعیت صنایع روی شبکه فاضلاب شهری و اتصال فاضلاب صنایع به آن، ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه فاضلاب براساس دارایی‌های شبکه و با هدف شناسایی نقاط با پتانسیل ریسک با استفاده از روش RAMCAP انجام شد. در این فرآیند لوله‌هایی انتخاب شدند که نقاط یا منهول‌های پذیرنده فاضلاب صنعتی به آن‌ها متصل هستند. لوله‌ها براساس قطر در محدوده

جدول ۳- صنایع واقع در محدوده مطالعات

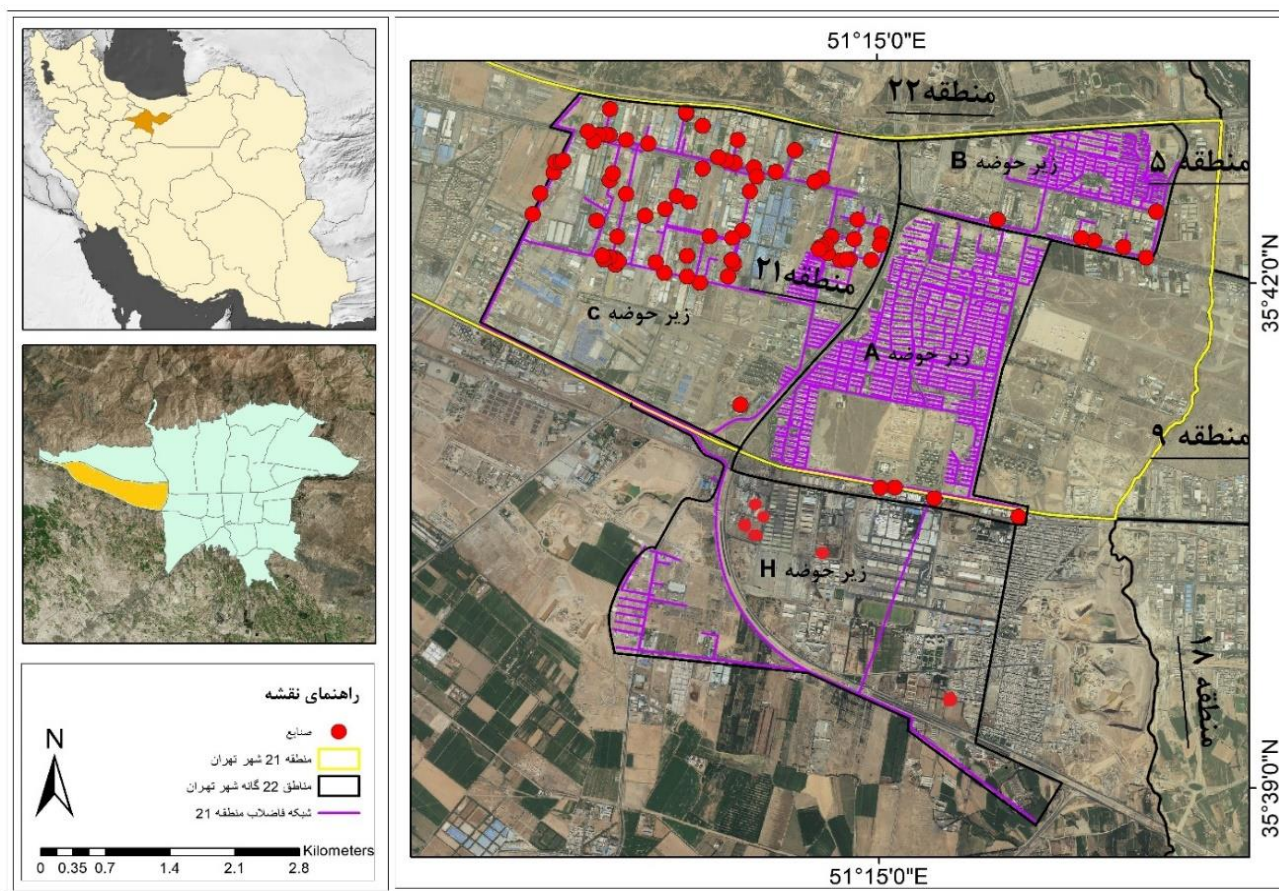
نوع صنعت	تعداد	درصد
غذایی و دارویی	۲۶	۳۲/۵
الکترونیک	۱۲	۱۵
ماشین‌سازی تجهیزات	۱۲	۱۵
پلاستیک و شیمیایی	۱۰	۱۲/۵
نساجی	۵	۶/۲۵
کاغذسازی	۴	۵
کانی فلزی	۴	۵
آرایشی و بهداشتی	۴	۵
کانی غیرفلزی	۲	۲/۵
چوب و سلولز	۱	۱/۲۵

### ۳-۲- شبیه‌سازی شبکه‌ی فاضلاب و موقعیت صنایع

محدوده مطالعات مطابق اطلاعات دریافتی از شبکه فاضلاب و استقرار و پراکنش صنایع موجود، منطقه به چهار زیرحوضه (A)،

آسیب‌پذیری، ۶ لوله شامل P4H13, P4H131, P4H133, P4CH134, P4H137 و P4H274 در زیرحوضه H اهمیت ریسک بالا دارند. از آن‌جا که فاضلاب سایر زیرحوضه‌ها به زیرحوضه H وارد و از آن‌جا به تصفیه‌خانه غرب منتقل می‌شود، مقادیر ریسک این لوله‌ها بالا است. هم‌چنین ۱۰ لوله P4C301, P4C302, P4A1415, P4A1414, P4C648, P4C438, P4C437, P4C303, AM504 و P4B564 که شش تا در زیرحوضه C, سه تا در زیرحوضه A و یکی در زیرحوضه B هستند، ریسک متوسط و سایر لوله‌ها ریسک کم دارند (جدول ۶).

ریسک کم، متوسط، زیاد مطابق جدول ۵ رتبه‌بندی شدند. چرا که مطابق شکل ۳، با افزایش قطر لوله، میزان فاضلاب صنعتی دریافتی و در نتیجه احتمال آلودگی افزایش می‌یابد. مرتبط کردن ریسک آلودگی صنایع که در این مطالعه خوردگی لوله‌ها است، تنها با در نظر گرفتن قطر لوله‌ها و با فرض ثابت بودن جنس لوله، سن آن، بازه‌های پایش و بهسازی آن بررسی شده است. از مجموع ۸۰ منهول یا آدم‌رو که تخلیه صنعتی به آن‌ها انجام می‌شود، ۷۵ لوله به‌عنوان دارایی مهم و دربرگیرنده نقاط تخلیه در شبکه انتخاب شدند (جدول ۴). براساس نتایج ارزیابی



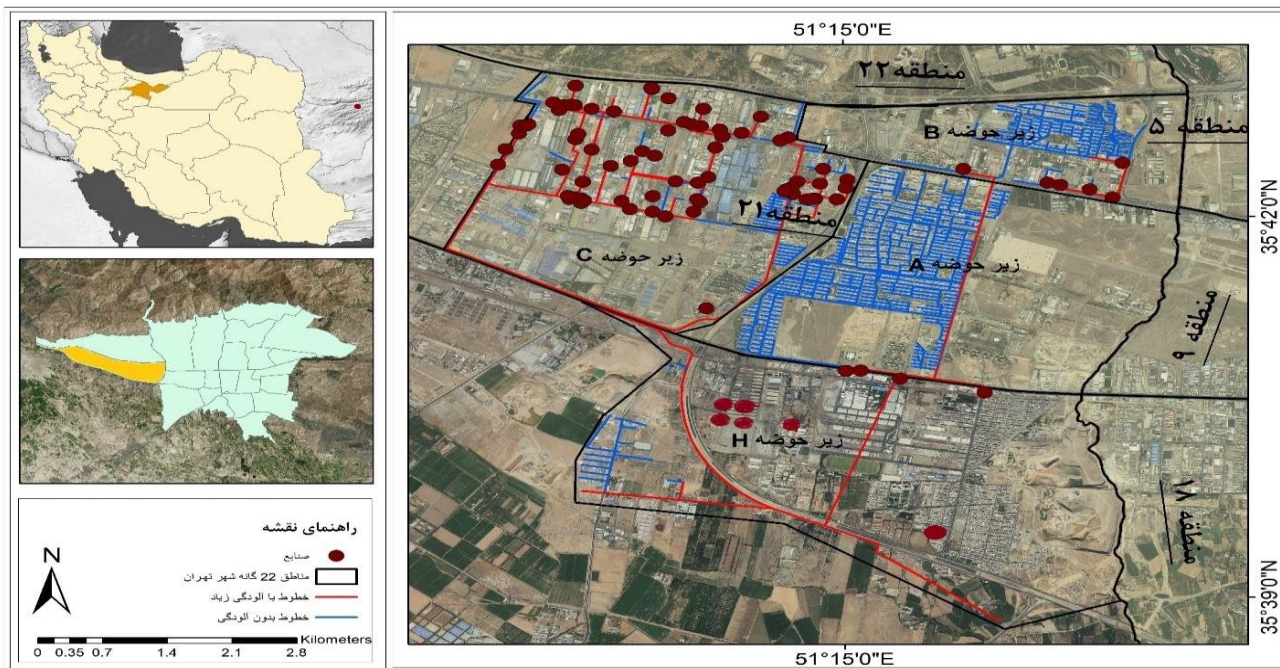
شکل ۳- مدل شبکه و موقعیت صنایع مورد مطالعه در شبکه فاضلاب

جدول ۴- سرانه COD صنایع مورد مطالعه

COD (mg/l)	گروه صنعتی	COD (mg/l)	گروه صنعتی
۸۸۰۰	کاغذسازی	۲۲۰۰	غذایی و دارویی
۸۵۷۸	پلاستیک و شیمیایی	۳۵۰۰	نساجی
۹۶۰	کافی فلزی	۱۲۰۰	چوب و سلولز
۶۵۰	الکترونیک	۵۲۰۰	ماشین‌سازی و تجهیزات
۲۵۰	کافی غیرفلزی	۲۲۰۰	آرایشی و بهداشتی

جدول ۵- محدوده ریسک و قطر لوله‌ها

ریسک کم	ریسک متوسط	ریسک بالا	محدوده ریسک
۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰-۵۰۰	۱۵۰۰-۱۰۰۰	قطر لوله (mm)



شکل ۴- نقاط دارای ریسک شبکه

جدول ۶- ریسک دارایی‌های شبکه فاضلاب در محدوده مطالعات

نوع دارایی	سطح ریسک	نوع دارایی	سطح ریسک	نوع دارایی	سطح ریسک
P4C182	ریسک کم	P4C101	ریسک کم	P4H130	ریسک بالا
P4C189	ریسک کم	P4C108	ریسک کم	P4H131	ریسک بالا
P4C192	ریسک کم	P4C111	ریسک کم	P4H133	ریسک بالا
P4C198	ریسک کم	P4C116	ریسک کم	P4H134	ریسک بالا
P4C204	ریسک کم	P4C120	ریسک کم	P4H137	ریسک بالا
P4C216	ریسک کم	P4C122	ریسک کم	P4H274	ریسک بالا
P4C219	ریسک کم	P4C132	ریسک کم	P4C301	ریسک متوسط
P4C237	ریسک کم	P4C143	ریسک کم	P4C302	ریسک متوسط
P4C232	ریسک کم	P4C147	ریسک کم	P4C303	ریسک متوسط
P4C241	ریسک کم	P4C149	ریسک کم	P4C437	ریسک متوسط
P4C243	ریسک کم	P4C151	ریسک کم	P4C438	ریسک متوسط
P4C250	ریسک کم	P4C152	ریسک کم	P4C648	ریسک متوسط
P4C253	ریسک کم	P4C158	ریسک کم	P4A1414	ریسک متوسط
P4C256	ریسک کم	P4C161	ریسک کم	P4A1415	ریسک متوسط
P4C270	ریسک کم	P4C174	ریسک کم	AM504	ریسک متوسط
P4C286	ریسک کم	P4C180	ریسک کم	P4B564	ریسک متوسط
P4C290	ریسک کم	P4C331	ریسک کم	P4B429	ریسک کم
P4C458	ریسک کم	P4C359	ریسک کم	P4B242	ریسک کم
P4C461	ریسک کم	P4C360	ریسک کم	P4H101	ریسک کم
P4C466	ریسک کم	P4C364	ریسک کم	P4B598	ریسک کم
P4C474	ریسک کم	P4C366	ریسک کم	P4C318	ریسک کم
P4C479	ریسک کم	P4C414	ریسک کم	P4C317	ریسک کم
P4C485	ریسک کم	P4C419	ریسک کم	P4C305	ریسک کم
P4C486	ریسک کم	P4B586	ریسک کم	P4B595	ریسک کم
P4C487	ریسک کم				

- 3- Simple Additive Weighting
- 4- Fuzzy Inference System
- 5- Analytical Hierarchy Process
- 6- Geographic Information System
- 7- Data Envelopment Analysis
- 8- Risk
- 9- Consequence
- 10- Vulnerability
- 11- Threat Likelihood
- 12- Chemical Oxygen Demand

## ۶- مراجع

امینی، م.ر.، و حاجی کندی، ه.، (۱۴۰۰)، "ارزیابی آسیب پذیری شبکه های فاضلاب با روش تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: شبکه فاضلاب اجرا شده در بخشی از منطقه ۵ شهرداری تهران"، *مجله پژوهش های آب/ایران*، ۱۵(۲)، ۴۱-۵۳

<http://doi.org/10.22112/jwwse.2021.286010.1275>

عسکریان، م.، تابش، م.، و روزبهانی، ا.، (۱۳۹۴)، "ارزیابی ریسک عملکرد شبکه جمع آوری فاضلاب با استفاده از روش تصمیم گیری فازی"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۶، ۷۴-۸۷.

<http://doi.org/10.22112/wwj-volume-74-87>.

روزبهانی، ع.، زهرایی، ب.، و تابش، م.، (۱۳۹۴)، "تحلیل ریسک کمیت و کیفیت آب در سیستم های تامین آب شهری با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۴(۴)، ۱۴-۲.

Anbari, M.J., Tabesh, M., and Roozbahani, A., (2018), "Risk assessment model to prioritize sewer pipes inspection in wastewater collection", *Journal of Environmental Management*, 190, 91-101, <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.052>

Asghari, F., Piadehm, F., Behzadian, K., (2023), "Resilience assessment in urban water infrastructure: A critical review of approaches, strategies and applications", *Sustainability*, 15(14), 11151, <https://doi.org/10.3390/su151411151>.

ASME, (2006), *RAMCAP: Risk analysis and management for critical asset protection-version 2.0*, Innovative Technologies Institute, LLC, Washington DC.

Aven, T., (2011), "On some recent definitions and analysis frameworks for risk, vulnerability and resilience", *Journal of Risk Analysis*, 31, 515-522. <http://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01528.x>.

Brashear, J., Olstein, M., Binning, D., and Stenzler, J., (2010), *Risk analysis and management for critical asset protection for the water and wastewater sector*, 2nd Edition, WEF, USA, <http://doi.org/10.1111/risa.12844>.

Fan, X., and Yu, X., (2022), "An innovative machine learning based framework for water distribution network leakage detection and localization", *Journal*

در طی دهه های اخیر با توسعه صنعت و فناوری، موضوع فاضلاب های صنعتی به یکی از چالش ها و مشکلات عمده محیط زیستی تبدیل شده است. در حال حاضر یکی از راه های مدیریت فاضلاب صنایع، اتصال آن ها به شبکه فاضلاب شهری است. از آن جا که فاضلاب های صنعتی از نظر تنوع، کیفیت و کمیت با فاضلاب های خانگی متفاوت هستند، تخلیه آن ها به شبکه های جمع آوری و تصفیه خانه های فاضلاب شهری ممکن است به دلیل تخریب تاسیسات، مشکلات بسیاری به وجود آورد که موجب اختلال در عملکرد آن ها شود. بنابراین ارزیابی آسیب پذیری و ریسک فاضلاب روهای شهری در برابر تخلیه فاضلاب های صنعتی ضروری است. در این پژوهش با استفاده از مدل RAMCAP آسیب پذیری شبکه جمع آوری فاضلاب در منطقه ۲۱ شهر تهران به عنوان یکی از مناطق مهم صنعتی کشور در شرایط مختلف تخلیه فاضلاب های صنعتی تحلیل شده است. بدین منظور در ابتدا با طراحی پرسشنامه و بازدید میدانی اطلاعات مورد نیاز در زمینه موقعیت جغرافیایی، ویژگی ها و مشخصات فاضلاب تولیدی ۸۰ واحد صنعتی منتخب در ۱۰ گروه عمده گردآوری و طبقه بندی شد. از بین حدود ۲۶۳۶ لوله شبکه فاضلاب در منطقه مشخص شد که فاضلاب صنایع به ۷۵ لوله تخلیه می شود. سپس سطح اهمیت ریسک لوله ها براساس قطر در بازه ۲۵۰ تا ۱۵۰۰ میلی متر به سه دسته کم، متوسط و زیاد طبقه بندی شد. هم چنین فاصله صنایع تا نقطه تخلیه به شبکه، برای همه صنایع بین ۱۰ تا ۸۰۰ متر در نظر گرفته شده است. در این پژوهش دو ویژگی بار آلودگی و دبی برای فاضلاب هر صنعت با استفاده از داده های پرسشنامه و سرانه COD<sup>۲</sup> به عنوان یک شاخص کلیدی کیفیت فاضلاب از طریق پرسشنامه برای هر صنعت به دست آمد. در نهایت و پس از ارزیابی آسیب پذیری شبکه فاضلاب مشخص شد که ۶ لوله دارای اهمیت ریسک بالا، ۱۰ لوله ریسک متوسط و بقیه لوله ها از ریسک کمی در برابر تخلیه های صنعتی برخوردار هستند. علاوه بر این، نتایج نشان داد که مهم ترین مخاطرات ناشی از تخلیه فاضلاب های صنعتی به شبکه فاضلاب شهری، تغییر شدید کیفیت فاضلاب ناشی از تخلیه های صنعتی است.

## ۵- پی نوشت ها

- 1- Risk Analysis and Management for Critical Asset Protection
- 2- Failure Modes and Effects Analysis

Creative Commons Attribution  
(CC-BY) license.

- Structural Health Monitoring*, 21, 1626-1644, <http://doi.org/10.1177/14759217211040269>.
- Federal Emergency Management America (FEMA), (2003), "Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks", *Journal Risk Management Series*, 54, 145-254, <http://doi.org/10.1111/h.1258-65421>.
- Ghoreishi, M., Vahidnia, M.H., and Neshat, A., (2023). "Evaluation of failure risk in the sewerage system using Bayesian network and spatial multi-criteria decision making", *Journal of Application of Geographical Information System and Remote Sensing in Planning*, 14(Spring), 107234, <http://doi.org/10.1016/J.PSEP.2023.10.036>.
- Lee, M., McBean, E., Ghazali, M., Schuster, C., and Huang, J., (2018), "Fuzzy-logic modeling of risk assessment for a small drinking-water supply system", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(6), 547-552, <http://doi.org/10.1177/0037549717738351>.
- Nurollahi, H., Barzegar, A., Abadian, F.E., Soleimani, A., and Alikhani, A., (2015), "Developing a new model for risk assessment, combining critical infrastructure studies and spatial planning criteria", *Journal of Emergency Management*, 48, (7), 47-56, <http://doi.org/10.1180/1040844.20>.
- Sadiq, R., Rodríguez, M., and Tesfamariam, S., (2020), "Integrating indicators for performance assessment of small water utilities using ordered weighted averaging (OWA) operators", *Journal of Expert Systems with Application*, 37, 4881-4891, <http://doi.org/10.3390/math8101729>.
- Salman, B., and 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, [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000100](http://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000100).
- Saskia, F., Liza, B., Wibke, B., and Eric, C., (2022), "A risk-based assessment approach for chemical mixtures from wastewater treatment plant effluents", *Environment International*, 164, 107234, <http://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107234>.
- Tchorzewska, B., (2019), "Fuzzy failure risk analysis in drinking water technical system", *Reliability: Theory & Applications*, 1(20), 138-148, <http://doi.org/10.1515/jok-2019-0032>.
- Torres, J., Brumbelow, K., and Guikema, S., (2009), "Risk classification and uncertainty propagation for virtual water distribution systems", *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, 94, 1259-1273, <http://doi.org/10.1016/j.res.2009.01008>.
- Wang, L.K., and Hung, Y.T., (2004), *Handbook of industrial and hazardous wastes treatment*, 2nd Revision, CRC Press, USA.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the