تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال دهم، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۳
Volume 10, No. 3, Winter 2015 (IR-WRR)
۵۳-۶۵

تدوین الگوریتمی برای تحلیل و مدیریت ریسک تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

مسعود تابش[۱*]، ابراهیم بدلی باوانی[۲]، مائده عسگریان[۲] و عباس روزبهانی[۳]

چکیده

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های شهری، وظیفه بازیافت آب و مواد مغذی را از فاضلاب جمع‌آوری شده از منازل و واحدهای صنعتی بر عهده دارند. وقوع شکست در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، اغلب پیامدهای نامطلوبی همچون خروج پساب‌های کاملاً تصفیه نشده حاوی انواع آلودگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی از تصفیه‌خانه و ورود آنها به محیط‌های شهری و زمین‌های کشاورزی را به‌دنبال خواهد داشت که می‌تواند در سطح جامعه بحران‌های جدی همچون شیوع بیماری‌های واگیردار را ایجاد نماید. از این رو شناسایی نقاط آسیب پذیر، تخمین احتمال وقوع حوادث نامطلوب و شدت اثرات ناشی از وقوع این حوادث در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌منظور تدوین و اجرای برنامه‌های مدیریت ریسک برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان این زیرساخت‌ها از اهمیّت بالایی برخوردار است. در تحقیق حاضر، الگوریتمی به‌منظور ارزیابی و مدیریت ریسک تصفیه‌خانه‌های فاضلاب معرفی شده است. پس از مرحله تشخیص خطر، محاسبه ریسک خطرات از سه جزء تشکیل می‌شود که عبارتند از: احتمال رخداد، شدت رخداد، و تشخیص رخداد. برآیند ریسک‌های اجزای یک واحد، ریسک کلّی آن واحد از تصفیه‌خانه فاضلاب را مشخص می‌نماید. بر اساس نتایج ارزیابی ریسک، راهکارهای مدیریت ریسک متناسب نیز پیشنهاد شده است. برای محاسبه اجزای مختلف ریسک (مقادیر تهدید، شدت خسارت و آسیب پذیری) از تلفیق روش‌های پرسشنامه تخصصی (اخذ نظرات کارشناسی از خبرگان) و تصمیم‌گیری چندشاخصه استفاده شده است. همچنین با انتخاب تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران به عنوان یک مطالعه موردی، الگوریتم پیشنهادی ارزیابی شده و مدیریت ریسک سامانه تصفیه‌خانه در مورد آن پیاده سازی شده است. نتایج حاصل از مطالعه موردی مبیّن آن است که الگوریتم پیشنهادی به عنوان یک ابزار مدیریتی کارآ، قابل استفاده برای مدیران تصفیه‌خانه‌های فاضلاب خواهد بود.

کلمات کلیدی: ارزیابی و مدیریت ریسک، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، تصمیم‌گیری چند معیاره، تحلیل آسیب‌پذیری.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۳ آذر ۱۳۹۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۸ تیر ۱۳۹۳

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران، قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران- محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.
۳- دانش آموخته دکترای مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی و استادیار پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.
*- نویسنده مسئول

An Algorithm for Risk Analysis and Management of Wastewater Treatment Plants

M. Tabesh[1] , E. Badali Bavani [2] , M. Asgarian[2] and A. Roozbahani[3]*

Abstract

Wastewater Treatment Plants (WWTPs) are vital infrastructures for ensuring the human and environmental health. Environmental protection, preventing contamination of underground water resources and promoting public health, are the reasons that the WWTPs systems are one of the most important elements in the civilized societies. Failures in WWTPs operation may lead to adverse outcomes such as untreated wastes exclusion from WWTPs containing various chemical and biological pollutants and their entry into the urban environments and agricultural lands. That can lead to serious crises such as outbreaks of contagious diseases in the community. Hence, assessing the potential risks in WWTPs and designing the prevention and mitigation plans are necessary. In this paper, an algorithm has been proposed for risk assessment and management of WWTPs. In the proposed algorithm, the risk of a specific element of a WWTP is calculated by multiplying three parameters comprising probability of failure, intensity of probable damages, and vulnerability of element. The aforementioned parameters is quantified by means of experts and policy-makers' viewpoints which are elicited from questionnaires. Based on the values of operational risk elements (probability, intensity, and vulnerability), different mitigation or prevention plans could be proposed to reduce risks. The proposed algorithm has been implemented on the Tehran South WWTP as a case study and earthquake risk in "biogas tanks" and the explosion risk in "disinfection units" gained first and second rank in the results, respectively. Result of this study shows that the proposed algorithm can be employed by managers and policy-makers of WWTPs as a robust and practical decision-making tool.

Keywords: Risk Assessment and Management, Wastewater Treatment Plants (WWTPs), Multiple Criteria Decision Making Methods, Vulnerability Assessment.

Received: December 14, 2013
Accepted: July 9, 2014

1- Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran. Email: mtabesh@ut.ac.ir
2- MSc Graduate, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran.
3- PhD Graduate, School of Civil Engineering, College of Engineering and Assistant Professor in College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

خسارت بسیار شدید ناشی از شکست سیستم تصفیه‌خانه‌های فاضلاب هم بر افراد جامعه و هم محیط‌زیست (گسترش آلودگی و شیوع بیماری‌های همه‌گیر و ...) و پیامدهای وخیم بعد از آن علی الخصوص در مورد بحران‌هایی که از حد متعارف قابلیت برگشت‌پذیری این سامانه‌ها فراتر هستند، لزوم برنامه‌ریزی و مدیریت بحران برای مواجهه با چنین شرایطی را اجتناب ناپذیر می‌کند. در ابتدا جهت روشن شدن بحث برخی عناوین کاربردی معرفی می‌شود. اصولا سامانه‌های آب و فاضلاب در معرض تهدیدات متنوعی قرار دارند. انجمن مهندسین عمران آمریکا[1] این تهدیدات را به سه دسته کلی زیر تقسیم می‌کند (ASCE, 2004):

(۱) تهدیدات عمدی[2]: تهدیدات عمدی در قالب حملات تروریستی یا خرابکارانه و حملات نظامی (جنگ‌ها) قابل تعریف می‌باشند که با طرح و برنامه قبلی اجرا می‌شوند. بررسی تهدیدات عمدی (انسانی) به‌عنوان عاملی که تصفیه‌خانه فاضلاب را تحت تاثیر قرار دهند، کمتر صورت پذیرفته است، اما شرایط، بعد از وقوع حادثه ۱۱ سپتامبر تغییر نموده است (Mays, 2004). تهدیدات متصور عمدی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب عبارتند از: ۱) تهدیدات رایانه‌ای، ۲) تهدیدات فیزیکی، ۳) تهدیدات آلودگی که خود بر دو دسته اصلی‌اند: الف) آلاینده‌های شیمیایی، ب) تهدیدات بیولوژیکی (Bailey, 2001).

(۲) تهدیدات طبیعی: طبیعت محمل شکل‌گیری پدیده‌هایی است که هر از چندگاهی رخ می‌دهند و می‌توانند انسان و اکوسیستم‌ها را تحت تاثیر خود قرار دهند. مهم‌ترین بلایای طبیعی در جهان عبارتند از: زلزله، سیل، زمین لغزش و طوفان. در میان بلایای طبیعی زلزله، سیلاب و خشکسالی سه پدیده‌ای هستند که بیشترین آسیب‌ها را بر سامانه‌های تصفیه‌خانه وارد ساخته‌اند (Grigg, 2003).

(۳) تهدیدات عملکردی[3]: عامل به‌وجود آورنده این قبیل تهدیدات عوامل انسانی می‌باشد که با طرح وبرنامه قبلی موجب آسیب رساندن به سامانه نمی‌شود و تهدیدات مرتبط با آن از خطای انسانی، نرم افزاری، سخت افزاری و سازمانی ناشی می‌شوند که انسان به طور مستقیم یا غیرمستقیم در آنها نقش دارد. بروز حوادث در فرآیندهای شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به بروز فجایع انسانی وزیست محیطی می‌انجامد (ASCE, 2004).

تعریف ریسک اولین بار توسط Kaplan and Garrick (1981) به صورت رابطه (۱) ارائه شد.

$$R = \{s_i, p_i, x_i\} \quad (۱)$$

که S_i: سلسله وقایع نامطلوب منجر به آسیب، P_i: احتمال وقوع متناظر با وقایع نامطلوب و X_i: پیامدهای وقایع نامطلوب است. از این‌رو خروجی تحلیل ریسک می‌تواند مجموعه‌ای از سناریوهای محتمل باشد. Zio (2007) معتقد است ریسک ترکیبی از خسارت و عدم قطعیت است. بر این اساس اگر X پیامد و p احتمال وقوع آن باشد و اگر n واقعه نامطلوب مرتبط با عملکرد سامانه متصور باشد (در یک سامانه پیچیده که منابع ایجاد ریسک زیادی وجود دارند)، ریسک کلی (R) از رابطه (۲) قابل محاسبه خواهد بود:

$$R = \sum_{i=1}^{n} x_i . p_i \quad (۲)$$

در خصوص ارزیابی و مدیریت ریسک سامانه‌های آب و فاضلاب تحقیقات بسیاری صورت گرفته است؛ Sadiq et al. (2004) با ترکیب مفهوم ریسک فازی و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) روشی برای تحلیل ریسک تجمعی آلودگی شبکه‌های توزیع آب ارائه نمودند. روش آنها با استفاده از تئوری فازی عدم قطعیت‌های موجود در فرآیند تحلیل ریسک را به خوبی بیان می‌دارد. نتایج حاصل از تحقیق آنها موید این مطلب بود که استفاده از روش نیمه کمّی تحلیل سلسله مراتبی (AHP) ابزار مناسبی برای تجمیع ریسک‌های موجود به‌شمار می‌آید. همچنین در همان سال روش ارزیابی ریسک برای سامانه‌های آبی[4] توسط گروه انرژی آزمایشگاه‌های ملّی ساندیا (Sandia, 2004)، با حمایت مالی سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا[5] ایجاد شد. این روش به مقایسه اجزای سامانه می‌پردازد تا تعیین کند کدام یک از اجزای سامانه بحرانی‌تر هستند. Tidwell et al. (2005) با استفاده از روش اثرات زنجیره مارکف و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[6] به بررسی وضعیت امنیت سامانه‌های آبی در برابر تهدیدات تروریستی پرداختند. از دید آنها محاسبه احتمال وقوع حمله دشوارترین بخش ارزیابی تهدیدات است زیرا در مورد حملات انسانی به‌دلیل نبود داده و پیچیدگی فرآیند وقوع برآورد دقیق حمله امری ناممکن است. Haimes (2009) فرآیند ارزیابی ریسک را در قالب ۵ گام به‌صورت زیر توصیف کرده است: ۱) شناسایی ریسک، ۲) مدل‌سازی، کمّی‌سازی و اندازه‌گیری ریسک، ۳) برآورد ریسک، ۴) پذیرش یا اجتناب از ریسک، ۵) مدیریت ریسک. Escer et al. (2010) ارزیابی ریسک زیست‌محیطی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری را مورد بررسی قرار داده و مقدار ریسک ناشی از حضور مواد خطرناک در فاضلاب شهری به‌دست آوردند. Roozbahani et al. (2013) به ارائه مدل با رویکردی فازی جهت تحلیل ریسک سیستم‌های آب شهری شامل بخش تأمین، تصفیه و توزیع به صورت یکپارچه پرداختند و کارایی

آن را بر روی سیستم آب شرب شهر ارومیه در ایران بررسی کردند. اکثر مطالعات انجام گرفته در مورد تحلیل ریسک زیرساخت‌های آب و فاضلاب، مربوط به سامانه‌های آب بوده و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌عنوان یک سامانه آبی مهم، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین تحقیقات صورت گرفته در رابطه با تحلیل ریسک تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، بیشتر در مورد ارزیابی ریسک زیست‌محیطی (ارزیابی ریسک شیمیایی و بیولوژیکی) و بررسی ریسک‌های ناشی از وجود آلاینده‌های خطرناک موجود در فاضلاب شهری و یا استفاده مجدد از پساب تصفیه شده و ریسک‌های ناشی از آن می‌باشد و به ارزیابی و مدیریت ریسک تکنولوژیکی (ریسک‌هایی که باعث ایجاد شکست در عملکرد فنّی سامانه می‌شوند) تصفیه‌خانه فاضلاب کمتر پرداخته شده و بهره‌گیری از رویکردهایی مانند روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و پرسشنامه‌های تخصصی کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. الگوریتم پیشنهاد شده در این تحقیق، توسعه یافته مدل ارائه شده توسط آژانس مدیریت اضطراری فدرال (FEMA, 2005)[۷] برای زیرساخت‌های مهم و حیاتی، می‌باشد. به طور خلاصه می‌توان اهداف زیر را برای این تحقیق برشمرد:

۱. تدوین یک الگوریتم جامع و کاربردی برای ارزیابی و مدیریت ریسک سامانه تصفیه‌خانه فاضلاب.

۲. تحلیل ریسک شامل شناسایی و برآورد کمّی تهدیدات، شدت خسارت و ارزیابی آسیب‌پذیری سامانه در برابر تهدیدات.

۳. مدیریت ریسک شامل دسته‌بندی ریسک‌ها و تدوین راهکارهای کاهش ریسک و نیز سیاست‌های مقابله با ریسک‌ها.

از ویژگی‌های این مقاله می‌توان به ارائه یک ساختار برای چارچوب‌های ارزیابی و مدیریت ریسک سامانه‌های تصفیه‌خانه فاضلاب؛ بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تدوین پرسشنامه‌های تخصصی برای ارزیابی ریسک تکنولوژیکی سامانه (در ادبیات فنّی موجود از این رویکرد کمتر بهره گرفته شده است،) و توسعه چارچوب ارزیابی ریسک پیشنهادی FEMA برای یک تصفیه‌خانه فاضلاب با لحاظ کردن ریسک‌های طبیعی و عملکردی، و تدوین برخی شاخص‌های جدیدِ ارزیابی، اشاره کرد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مبانی تحلیل ریسک تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

سطح توانایی یک سیستم در حفظ قابلیت سرویس‌دهی در شرایط غیر متعارف در دوره بهره‌برداری را «آمادگی سیستم» می‌نامند. آمادگی سیستم به معنای وجود قابلیت شناسایی، پیش‌بینی و مقابله با عوامل ایجاد بحران با هدف کاهش احتمال وقوع بحران، در عین حال وجود قابلیت بازسازی سیستم و رساندن شرایط سیستم به شرایط مطلوب سرویس‌دهی در حداقل زمان ممکن بعد از وقوع بحران است. شناخت طبیعت بحران‌های محتمل سیستم، برآورد شدت خسارات وارده به سیستم و میزان آسیب‌پذیری در برابر بحران‌ها، از قابلیت‌های ویژه این الگوریتم می‌باشد. ریسک واحدهای مختلف تصفیه‌خانه به صورت حاصل‌ضرب سه پارامتر احتمال وقوع تهدیدات، شدت اثر تهدیدات و آسیب پذیری اجزای تصفیه‌خانه تعریف شده‌اند و برآیند ریسک‌های اجزای یک واحد، ریسک کلّی آن واحد از تصفیه‌خانه فاضلاب را مشخص می‌نماید. بر اساس نتایج ارزیابی ریسک، راهکارهای مدیریت ریسک متناسب نیز پیشنهاد می‌شود. محاسبه اجزای مختلف ریسک (مقادیر تهدید، شدت خسارت و آسیب پذیری)، با تلفیق روش‌های پرسشنامه تخصصی (اخذ نظرات کارشناسی از خبرگان) و تصمیم‌گیری چندشاخصه میّسر می‌شود. برای ارزیابی ریسک در این تحقیق از ترکیب روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)[۸] و روش مجموع ساده وزین (SAW)[۹] استفاده شده است که در ادامه شرح داده می‌شوند.

۲-۲- روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

به طور کلی برای حل هر مسأله به کمک روش تحلیل سلسله مراتبی سه گام اصلی تعریف ساختار سلسله مراتبی، محاسبه وزن‌ها و محاسبه نرخ ناسازگاری باید انجام گیرد. در این روش تصمیم‌گیرنده می‌تواند تمامیِ معیارها و زیر معیارها را به طور همزمان با توجه به دید و قضاوتی که نسبت به مسأله دارد، وزن‌دهی کند یا اینکه جهت وزن‌دهی از روش مقایسه زوجی استفاده نماید. مقادیر عددی ارجحیت‌ها در مقایسات زوجی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مقادیر عددی ارجحیت‌ها در مقایسات زوجی (Saaty, 1980)

عبارت زبانی برای تعیین ارجحیت	مقدار عددی
ارجحیت یا اهمیت برابر	۱
ارجحیت یا اهمیت کم	۳
ارجحیت یا اهمیت قوی	۵
ارجحیت یا اهمیت خیلی قوی	۷
ارجحیت یا اهمیت کامل ومطلق	۹
ترجیحات بین عبارتهای زبانی فوق	۸ و ۶ و ۴ و ۲

۲-۳- روش تحلیل سلسله مراتبی گروهی

مقایسات زوجی به ازای هر تابلو (ماتریس تصمیم‌گیری)[۱۰] توسط تصمیم‌گیرنده (DM)[۱۱] انجام می‌پذیرد، لکن گاهی در یک

تصمیم‌گیری به جای یک‌تصمیم گیرنده چندین تصمیم گیرنده وجود داشته و نظرات همگی آنها باید در هر تابلو ملحوظ گردد. برای تصمیم‌گیری گروهی، از میانگین هندسی رابطه (۳) برای عناصر ماتریس تصمیم گیری استفاده می‌شود (اصغرپور، ۱۳۸۸):

$$a'_{ij} = (\prod_{i=1}^{n} a_{ij})^{1/n} \quad (۳)$$
$$i = 1,2,..., n,\ j = 1,2,..., k,\ i \neq j$$

که n: تعداد تصمیم‌گیرندگان و k: تعداد معیارها یا شاخص‌های تصمیم‌گیری می‌باشند.

۲-۴- تعیین اوزان نسبی و کنترل نرخ سازگاری ماتریس مقایسات زوجی

برای محاسبه اوزان نسبی (در تهدیدات و در معیارها)، نخست ماتریس‌های مقایسات زوجی در قالب پرسشنامه‌های تخصصی در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرارگرفته و پس از اخذ نظرات ایشان، برای تبدیل عبارات کیفی به معادل‌های کمّی و تکمیل ماتریس‌های مقایسات زوجی از مقیاس ۱ تا ۹ پیشنهاد شده توسط Satty (1980) مطابق جدول ۱ استفاده می‌شود. در مرحله بعد نرخ ناسازگاری ماتریس‌های مقایسات زوجی کنترل خواهد شد.

برای کنترل سازگاری، مطابق روابط ۴ الی ۷، ابتدا با استفاده از روش میانگین حسابی (نرمال‌سازی ستونی و میانگین‌گیری سطری)، بردار وزن (W) مربوط به ماتریس (A) به‌دست می‌آید. در صورتی که بزرگترین مقدار ویژه‌ی[۱۲] ماتریس مقایسه (λ_{max}) مشخص نباشد، این مقدار به‌صورت زیر تخمین زده خواهد شد (Saaty,1980):

$$A \times W = \lambda \times W \quad (۴)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i}{n},\ \lambda_{\max} \geq n \quad (۵)$$

که n: بعد ماتریس A است. با مشخص شدن مقدار λ_{max} از رابطه‌ی (۵)، مقدار شاخص ناسازگاری[۱۳] ($I.I$) از رابطه‌ی ۶ محاسبه خواهد شد:

$$I.I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (۶)$$

نرخ ناسازگاری[۱۴] ($R.I$) نیز از رابطه‌ی (۷) به دست خواهد آمد.

$$I.R = \frac{I.I}{I.I.R} \quad (۷)$$

که $I.I.R.$: نرخ ناسازگاری تصادفی است که از جدول ۲ قابل استخراج است.

حداکثر مقدار قابل قبول برای نرخ ناسازگاری ۰/۱ است. در صورتی که نرخ ناسازگاری از این میزان بیشتر باشد، بدین معناست که درایه‌های ماتریس مقایسه زوجی پر شده توسط تصمیم‌گیرنده سازگاری لازم را نداشته و بنابراین از وی درخواست می‌شود که در نظراتش تجدیدنظر کند. پس از کنترل ناسازگاری تک‌تک ماتریس‌ها و حصول اطمینان از قابل قبول بودن میزان ناسازگاری‌ها، اوزان نسبی تمامی معیارها محاسبه شده و برای ادامه روند الگوریتم ارزیابی و مدیریت ریسک تصفیه‌خانه، برای مراحل بعدی و یافتن مقادیر شدت خسارت و آسیب پذیری و در نهایت محاسبه مقدار ریسک، مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

۲-۵- روش مجموع ساده وزین (SAW)

این روش یکی از قدیمی‌ترین روش‌های به‌کار گرفته شده در روش تصمیم‌گیری چند معیاره است به‌طوری که با مفروض بودن بردار W (اوزان اهمیت شاخص‌ها) برای آن، مناسب‌ترین گزینه (A^*) به صورت رابطه ۸ محاسبه می‌شود (اصغرپور، ۱۳۸۸):

$$A^* = \{A_i \mid \max_i \frac{\sum_j (w_j . r_{ij})}{\sum_j w_j}\} \quad (۸)$$

و چنانچه $\Sigma w_j = 1$ باشد، آنگاه:

$$A^* = \{A_i \mid \max_i \sum_j (w_j . r_{ij})\} \quad (۹)$$

که A_i : معرف گزینه i ام، w_j : وزن شاخص j ام و r_{ij} : رتبه گزینه i ام در مورد شاخص j ام است.

در محاسبه «شدت خسارت» و «مقدار آسیب پذیری» برای قسمت‌های اصلی سامانه در تحقیق حاضر از روش SAW استفاده شده و فرضیات روش نیز لحاظ شده است. دلایل این انتخاب را می‌توان به این‌صورت بیان کرد: سه پارامتر اصلی برای محاسبه مقدار ریسک (مقدار تهدید، شدت خسارت و آسیب پذیری) مستقل از هم بوده و هدف مقایسه این پارامترها نیست، بلکه محاسبه مقدار امتیاز کلی حاصل از مقادیر متفاوت می‌باشد.

جدول۲- نرخ ناسازگاری تصادفی ماتریس مقایسات زوجی (I.I.R) (Satty, 1980)

N	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
I.I.R.	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۹

لذا روش امتیازدهی مستقیم و استفاده از ترکیب خطی برای محاسبه امتیاز نهایی (مقادیر شدت خسارت و آسیب‌پذیری) راهکاری مناسب تلقی می‌شود و دلیل دوم سهولت استفاده این روش می‌باشد. شایان ذکر است که روش مورد استفاده در تحقیق حاضر، یک روش تلفیقی است، به این‌صورت که برای تعیین وزن نسبی تهدیدات و وزن نسبی معیارها از روش AHP و ماتریس مقایسات زوجی استفاده می‌شود. این انتخاب براساس نتایج تحقیقاتی همچون (Rolander et al., 2004)، (Triantaphyllou, 2000) و (وفایی، ۱۳۸۶) و نیز مشاوره با کارشناسان و اساتید مرتبط با این زمینه انجام گرفته است. در تعیین امتیاز نهایی گزینه‌ها و تهدیدات، با در نظر داشتن وزن معیارهای امتیازدهی، روش SAW به‌کار گرفته می‌شود.

۲-۶- تدوین پرسشنامه‌های تخصصی[۱۵]

به‌منظور دسترسی به اهداف عینی از یک تحقیق و بررسی، سؤالاتی برای اندازه‌گیری متغیرهای تعریف شده (با توجه به تعاریف عملیاتی از آن‌ها و مقیاس اندازه‌گیری قید شده برای آن‌ها) باید به‌صورت مصاحبه یا پرسشنامه تنظیم شوند. در مراحل مختلف این تحقیق، مانند وزن‌دهی به معیارها، ارزیابی تهدیدات و غیره از تدوین پرسشنامه‌های تخصصی و استفاده از نظرات تصمیم‌گیرندگان بهره گرفته شده است.

۲-۷- مبانی الگوریتم پیشنهادی تحلیل و مدیریت ریسک تصفیه‌خانه‌ها

الگوریتم پیشنهاد شده در این تحقیق، توسعه یافته مدل ارائه شده توسط (FEMA, 2005) برای زیرساخت‌های مهم و حیاتی، می‌باشد. این دستورالعمل در اصل، یک راهنمای عمومی برای مقابله با تهدیدات انسان ساز[۱۶] و حملات خرابکارانه[۱۷] است که در اختیار مراکز حساس دولتی و عمومی آمریکا قرار دارد. نکته شاخص این دستورالعمل، سادگی کار با آن می‌باشد. در تحقیق حاضر این رویکرد به‌طور اختصاصی برای زیرساخت تصفیه‌خانه فاضلاب توسعه داده شده است. همچنین در این تحقیق انواع مختلفی از تهدیدات اعم از انسان‌ساز و حتی تهدیدات غیر انسان‌ساز (شامل بحران‌های طبیعی و عملکردی- عمومی) پیش‌بینی شده و نیز برای ارزیابی آسیب‌پذیری اجزاء در برابر تهدیدات غیر انسانی، شاخص‌ها و آستانه‌های ارزیابی، مختص آن بحران‌های غیر انسانی تدوین شده است. الگوریتم پیشنهادیِ تحلیل و مدیریت ریسک سامانه تصفیه‌خانه فاضلاب در شکل ۱ ارائه شده است. در مراحل مختلف این الگوریتم، آستانه‌هایی برای امتیازدهی به معیارهای داده شده، تعریف شده‌اند. این آستانه‌ها در تعامل و همفکری با تصمیم‌گیرندگان و کارشناسان و نیز با ایده گرفتن از ادبیات فنّی (FEMA, 2005; Sandia, 2004) انتخاب شده‌اند.

۳- مطالعه موردی تصفیه‌خانه جنوب تهران

مطالعه موردی این تحقیق تصفیه‌خانه بزرگ جنوب تهران بوده است که مراحل تحقیق درباره قسمت‌های مختلف آن اجرا شده است که همزمان با معرفی مدل، نتایج آن آورده شده است. مشخصات کلی تصفیه‌خانه جنوب تهران در جدول ۳ ارائه شده است. در هر مرحله از طریق پرسشنامه نظر کارشناسان و متخصصین را جویا شده و در مواردی که در نظرات سازگاری وجود نداشت (نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسه زوجی بیش از یک بود)، مصاحبه شوندگان به تعدیل و اصلاح نظرات خود پرداختند. تعداد ۱۰ متخصص با سمت‌های مدیران عامل، مدیر یا کارشناس قسمت‌های نظارت و بهره‌برداری، فنی، انرژی و قسمت مدیریت بحران از سازمان‌ها و شرکت‌های دولتی و خصوصی آب و فاضلاب تهران در نظرسنجی‌ها شرکت نمودند.

۳-۱- شناسایی سامانه

نخستین مرحله از مراحل هفتگانه الگوریتم ارزیابی عملکرد و مدیریت ریسک سامانه تصفیه‌خانه فاضلاب، شناسایی دقیق سامانه می‌باشد. در این گام، قسمت‌های اصلی سامانه تصفیه خانه فاضلاب مورد شناسایی قرار می‌گیرد. قسمتهای اصلی سامانه برای پیاده‌سازی الگوریتم تدوین شده به شرح زیر انتخاب شده‌اند: ۱. سایت، ۲. ساختمان‌های اداری، ۳. سیستم‌های کنترلی، ۴. ایستگاه پمپاژ ورودی، ۵. لوله‌ها، ۶. آشغالگیر ۷. دانه‌گیر و چربی‌گیر، ۸. استخرهوادهی، ۹. استخرهای ته‌نشینی اولیه و ثانویه، ۱۰. تاسیسات برقی، ۱۱. واحد پردازش و تصفیه لجن، ۱۲. واحد گندزدایی، ۱۳. مخازن نگهداری گاز (بیوگاز)، ۱۴. کارکنان بهره‌برداری، ۱۵. ایستگاه پمپاژ لجن برگشتی.

۳-۲- شناسایی تهدیدات

دومین مرحله از الگوریتم، شناسایی تهدیداتی است که به نوعی بر سامانه اثرگذار هستند و سامانه را در معرض خطر قرار می‌دهند. این تهدیدات به شرح زیر شناسایی شده‌اند:

۱) تهدیدات طبیعی شامل زلزله، طوفان، سیلاب و رانش، ۲) تهدیدات انسان‌ساز شامل بمب‌گذاری، آلاینده رادیواکتیو، بیولوژیکی، خرابکاری، شیمیایی، تحریم، حمله نظامی و سایبری، ۳) تهدیدات عملکردی- عمومی شامل آلودگی منابع آب، قطع برق، قطع

مخابرات، آتش‌سوزی، اشکالات فنی، انفجار، نشت و از بین رفتن آب‌بندی، خرابی فیزیکی تجهیزات، فرسودگی تجهیزات و نوسانات دبی فاضلاب.

۳-۳- ارزیابی تهدیدات

سپس سومین مرحله از الگوریتم ارزیابی و مدیریت ریسک تصفیه‌خانه فاضلاب، ارزیابی تهدیدات شناسایی شده است. مراحل ارزیابی تهدیدات عبارت است از: ۱- انتخاب تهدیدات مقدماتی برای هر قسمت از سامانه، ۲- محاسبه احتمال وقوع تهدیدات، ۳- محاسبه وزن نسبی تهدیدات، ۴- محاسبه مقدار تهدیدات و ۵- انتخاب تهدیدات نهایی برای هر قسمت از سامانه. خروجی این مرحله از الگوریتم، یافتن مقدار تهدید برای کلیه تهدیدات شناسایی شده و نیز شناسایی تهدیدات مؤثر بر هر قسمت از سامانه تصفیه‌خانه فاضلاب، بر اساس مقدار تهدید به‌دست آمده می‌باشد. با استفاده از روش میانگین هندسی رابطه (۳) احتمال وقوع نهایی تهدیدات محاسبه می‌شود. نحوه امتیازدهی‌ها برای احتمال وقوع تهدیدات در جدول ۴ آمده است. در ادامه و برای یافتن وزن نسبی هر تهدید از روش AHP گروهی و تلفیق نظرات کارشناسان و ماتریس مقایسات زوجی استفاده شده است.

جدول ۵ نتایج حاصل از محاسبه احتمال وقوع تهدیدات را نشان می‌دهد. این نتایج میانگین هندسی داده‌های اخذ شده از کارشناسان است.

جدول ۳- مشخصات کلی تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران (وب سایت شرکت فاضلاب تهران، ۱۳۹۰)

مشخصه	مدول ۱ تا ۴	مدول ۵ و ۶
جمعیت نهایی تحت پوشش	۲ میلیون و صد هزار نفر	۱ میلیون و پنجاه هزار نفر
تعداد فازهای اجرایی	۴ مدول	۲ مدول
دبی ورودی	۴۵۰ هزار مترمکعب در روز	۲۲۵ هزار مترمکعب در روز
مصرف پساب	۸۰ هزار هکتار آبیاری زمین‌های کشاورزی دشت ورامین	۴۰ هزار هکتار آبیاری زمین‌های کشاورزی دشت ورامین

ماتریس مقایسه زوجی انواع تهدیدات مطابق روش AHP از میانگین‌گیری نظر تک تک متخصصین و البته پس از بررسی سازگاری نتایج ماتریس مقایسه زوجی هر یک از افراد به‌دست آمده، سپس در جدول ۶ ماتریس تلفیقی مقایسه زوجی نرمال‌سازی شده و در ستون آخر آن وزن نسبی تهدیدات کلی نشان داده شده است.

با این شیوه، تهدیدات انتخاب شده نهایی مؤثر بر قسمتهای اصلی سامانه و مقدار عددی تهدید آن‌ها در هر بخش از تصفیه‌خانه بدست می‌آید که در این‌جا به عنوان نمونه نتایج تهدیدات موجود در بخش‌های سایت و ساختمان اداری در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۴- امتیازات برای احتمال وقوع تهدید (FEMA, 2005)

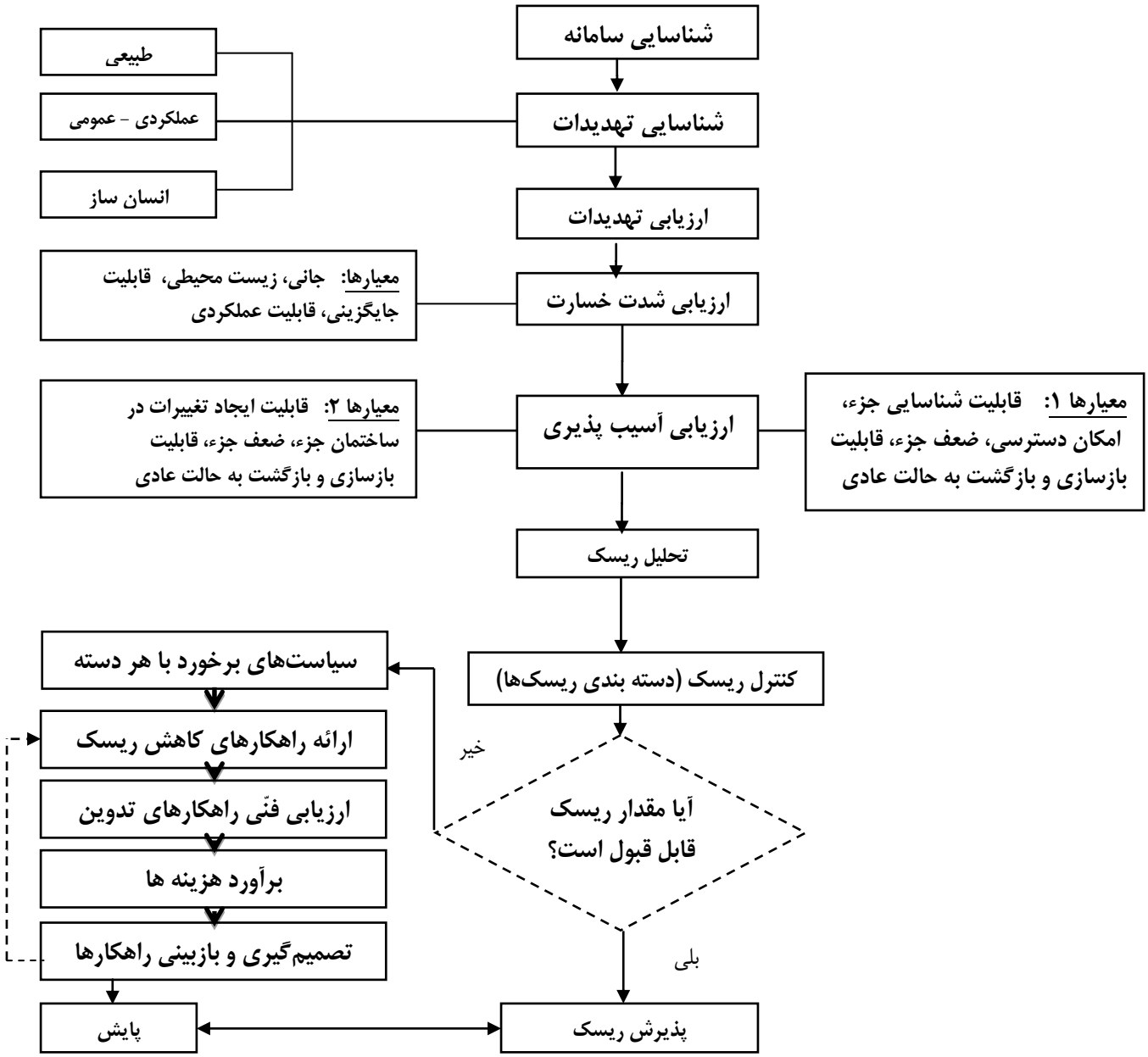
سناریو	امتیاز
تهدید مورد نظر به ندرت رخ می‌دهد	۱-۲
تهدید مورد نظر بعضاً رخ می‌دهد	۳-۵
تهدید مورد نظر اغلب رخ می‌دهد	۶-۸
تهدید مورد نظر دائماً رخ می‌دهد	۹-۱۰

جدول ۵- امتیازات احتمال وقوع تهدیدات

تهدید	احتمال وقوع	تهدید	احتمال وقوع
نوسانات دبی فاضلاب ورودی	۶/۴۶	خرابکاری	۲/۰۶
خرابی فیزیکی تجهیزات	۶/۳۲	زلزله	۱/۷۲
تحریم	۵/۹۸	انفجار	۱/۷۱
فرسودگی تجهیزات	۴/۶۲	رانش	۱/۶۶
قطع مخابرات و سیستم‌های ارتباطی	۳/۶۸	بمب‌گذاری	۱/۶۴
نقص‌های طراحی	۳/۵۷	آلودگی منابع آب	۱/۶۴
قطع برق	۳/۵۱	سایبری	۱/۵۱
نشت و از بین رفتن آب‌بندی	۳/۵	بیولوژیکی	۱/۳۳
سیلاب	۲/۷۰	شیمیایی	۱/۳۱
طوفان	۲/۶۵	آلاینده رادیواکتیو	۱/۱۹
آتش سوزی	۲/۱۱	حمله‌نظامی	۱/۱۹

جدول ۶- ماتریس تلفیقی مقایسات زوجی تهدیدات کلی (A)

تهدید	طبیعی	انسان‌ساز	عملکردی- عمومی	وزن نسبی
طبیعی	۱	۲/۳۸	۲/۵۸	۰/۵۵
انسان‌ساز	۰/۴۲	۱	۱/۷۹	۰/۲۷
عملکردی- عمومی	۰/۳۸	۱/۵۶	۱	۰/۱۸



شکل ۱- الگوریتم تحلیل و مدیریت ریسک تصفیه‌خانه فاضلاب در این تحقیق

گزینش این تهدیدات بر اساس عدد نهایی بدست آمده از مراحل قبلی صورت گرفته است. به استثنای قسمت سایت که شامل سه تهدید مؤثر بود (بر اساس موقعیت و نظرات کارشناسان)، برای بقیه قسمت‌های سامانه تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران پنج تهدید مؤثر (از دسته‌های طبیعی و انسان ساز یک تهدید و از دسته عملکردی- عمومی سه تهدید) انتخاب شدند.

۳-۴- ارزیابی شدت خسارات

تکمیل چهارمین مرحله از الگوریتم ارزیابی و مدیریت ریسک سامانه تصفیه‌خانه، منوط به پاسخ دادن به این پرسش است که «چه اتفاقی برای منابع در صورت وقوع تهدید روی می‌دهد و چه مقدار سرمایه از دست رفته و صدمات جانی چقدر است؟». روند محاسبه شدت خسارت برای هر قسمت از سامانه تصفیه‌خانه فاضلاب در اثر تهدیدات شناسایی شده شامل موارد زیر است:

الف) تعیین معیار وآستانه‌ها: معیارهای درنظر گرفته شده برای ارزیابی شدت خسارات عبارتند از: ۱) معیار جانی[۱۸] (FEMA, 2005)، ۲) زیست‌محیطی[۱۹] (Metcalf and Eddy, 2003)، ۳) مالی، ۴) قابلیت جایگزینی، ۵) قابلیت عملکردی[۲۰] (FEMA, 2005). برای

امتیازدهی به هر کدام از معیارهای داده شده، آستانه‌هایی در بازه ۱ تا ۱۰ تعریف شده که جهت نمره‌دهی در پرسشنامه‌ها به کارشناسان ارائه می‌شود. در این‌جا به عنوان نمونه آستانه‌ها برای معیار جانی در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۷- تهدیدات انتخاب شده نهایی مؤثر بر قسمتهای اصلی سامانه

بخش	دسته تهدید	تهدید	عدد تهدید
سایت	انسان ساز	بمب گذاری	۰/۱۹
	طبیعی	زلزله	۰/۵۳
	عملکردی- عمومی	آتش سوزی	۰/۰۶
ساختمان اداری	انسان ساز	بمب گذاری	۰/۱۹
	طبیعی	زلزله	۰/۵۳
	عملکردی - عمومی	قطع برق	۰/۰۲
		قطع مخابرات و سیستم‌های ارتباطی	۰/۰۱
		آتش سوزی	۰/۰۷

ب) محاسبه وزن نسبی معیارها: برای محاسبه وزن نسبی معیارهای شدت خسارات از روش تحلیل سلسله مراتبی گروهی استفاده می‌شود. در این‌جا از میانگین هندسی نظرات تصمیم‌گیرندگان استفاده شده و کنترل سازگاری ماتریس تلفیقی بررسی شده است. در جدول ۹ وزن نسبی حاصل برای هر معیار در ذیل عنوان آن آمده است.

ج) محاسبه شدت خسارت: پس از محاسبه وزن نسبی معیارها، مقدار شدت خسارت هر قسمت از سامانه در اثر تهدیدات شناسایی شده از ترکیب خطی حاصل‌ضرب وزن نسبی هر معیار در امتیاز داده شده به یک قسمت خاص از سامانه در اثر یک تهدید خاص (بر اساس آستانه‌های داده شده) به‌دست می‌آید. رابطه (۱۰) برای محاسبه مقدار شدت خسارت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رابطه با استفاده از روش SAW به‌دست آمده است.

$$C = \sum_{i=0}^{m} W_i \times S_i \qquad (۱۰)$$

که W_i: وزن نسبی معیار iام، S_i: امتیاز شدت خسارت هر تهدید با توجه به معیار iام و m: تعداد معیارها، هستند. خروجی این مرحله، مشخص شدن مقدار شدت خسارت برای تمامی تهدیدات شناسایی شده در هر قسمت از سامانه می‌باشد. در جدول ۹ به اختصار فقط امتیازات مربوط به بخش‌های سایت و ایستگاه پمپاژ به‌عنوان نمونه آورده شده است.

جدول ۸- آستانه‌ها برای معیار جانی (FEMA, 2005)

سناریو	امتیاز
فاجعه بار: منجر به مرگ	۹ – ۱۰
بحرانی: منجر به زخمی‌های وخیم و بیماری‌های شدید	۶ – ۸
نسبتاً بحرانی: منجر به زخمی‌ها و بیماری‌های کم	۳ – ۵
قابل اغماض: منجربه زخمی‌ها و بیماری‌های خیلی کم	۱ – ۲

جدول ۹- محاسبه شدت خسارت هر قسمت از سامانه

بخش	تهدید / معیار	جانی (۰/۵۸)	مالی (۰/۱۱)	امکان جایگزینی (۰/۰۳)	زیست محیطی (۰/۲۲)	عملکردی (۰/۰۶)	شدت خسارت
سایت	بمب گذاری	۵/۷۲	۴/۸۶	۸/۹۵	۴/۶۶	۳/۸۷	۵/۲۸
	زلزله	۸/۳۸	۷/۰۴	۸/۰۱	۵/۸۷	۴/۰۳	۷/۲۹
	آتش سوزی	۴/۸۵	۴/۳۲	۹/۲۵	۴/۳۲	۴/۰۶	۴/۶۷
ایستگاه پمپاژ ورودی	تحریم	۲/۸۱	۸/۹۱	۸/۷۴	۸/۹۵	۷/۸۶	۵/۱۳
	زلزله	۶/۸۱	۸/۸۱	۹/۷	۹/۰۶	۹/۸۷	۷/۶۱
	آتش سوزی	۶/۵	۷/۶۱	۸/۵	۸/۶۱	۷/۸۸	۷/۰۶
	خرابی فیزیکی تجهیزات	۱/۰۲	۵/۴۵	۵/۰۲	۷/۰۸	۳/۸۱	۲/۹۹
	نوسانات دبی فاضلاب ورودی	۲/۸۱	۸/۶۱	۶/۵۸	۸/۹۸	۸/۱	۵/۰۶

۳-۵- ارزیابی آسیب‌پذیری

گام پنجم در تحقیق حاضر ارزیابی آسیب‌پذیری اجزای تصفیه‌خانه است. برای ارزیابی آسیب‌پذیری اجزاء در برابر تهدیدات شناسایی شده یک سری معیار و آستانه‌هایی تدوین می‌شود. با توجه به ماهیت متفاوت تهدیدات شناسایی شده، برای دسته تهدیدات انسان‌ساز و دسته‌های تهدیدات عملکردی و طبیعی معیارهای جداگانه‌ای تدوین می‌شود. در ادامه، آسیب پذیری مربوط به تهدیدات انسان ساز مورد بحث قرار می‌گیرد و در مورد تهدیدات عملکردی و طبیعی به ذکر نتایج اکتفا می‌شود. روند ارزیابی آسیب پذیری اجزاء سامانه در برابر تهدیدات شناسایی شده عبارت است از: الف) تعیین معیارها و آستانه‌ها، ب) محاسبه وزن نسبی معیارها که در جدول ۱۰ نتایج آن در زیر عنوان هر معیار آورده شده است و ج) محاسبه مقدار آسیب‌پذیری برای هر جزء که برای محاسبه آن، با توجه به تعریفی که برای تعیین حدود و آستانه‌های هر معیار در پرسشنامه آورده شده است، کارشناسان هر تهدید را در مورد هر معیار نمره‌دهی می‌کنند. پس از مشخص شدن وزن نسبی معیارها، در این مرحله با استفاده از رابطه (۱۱)، عدد آسیب‌پذیری V برای تمامی قسمت‌های اصلی سامانه محاسبه می‌شود.

$$V = \sum_{i=1}^{n} W_i \times v_i \qquad (۱۱)$$

که در آن n : تعداد معیارها، Wi : وزن نسبی معیار iام و v_i : امتیاز آسیب پذیری هر تهدید با توجه به معیار iام است. به‌عنوان نمونه مقدار آسیب‌پذیری اجزای تصفیه‌خانه فاضلاب در برابر تهدیدات انسان‌ساز در جدول ۱۰ ارائه شده است.

به طریق مشابه برای تهدیدات عملکردی و طبیعی نیز میزان آسیب‌پذیری بخش‌های سیستم مطابق جدول ۱۱ محاسبه می‌شود که باز هم در این‌جا به اختصار فقط امتیازات مربوط به بخش‌های سایت و ایستگاه پمپاژ به عنوان نمونه آورده شده است. شایان ذکر است که معیارهای ارزیابی تهدیدات طبیعی و عملکردی، تا حدّی متفاوت از شاخص‌های تهدیدات انسان‌ساز می‌باشد. به‌عنوان مثال "قابلیت دسترسی به بخش" فقط در تهدیدات امنیتی مهم بوده و شاخصی برای ارزیابی تهدیدات طبیعی و عملکردی نبوده و بنابراین معیارهای ارزیابی آسیب‌پذیری تهدیدات عملکردی و طبیعی به سه دسته "قابلیت ایجاد تغییرات در ساختمان جزء"، "قابلیت بازسازی و بازگشت به حالت عادی" و "ضعف جزء" اصلاح می‌شوند.

با توجه به نتایج به‌دست آمده: ۱. ساختمان‌های اداری تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران، از نظر کارشناسان تصفیه‌خانه در برابر تهدید زلزله به‌شدت آسیب‌پذیر بوده و نیاز به بهسازی لرزه‌ای دارد. ۲. سیستم‌های کنترلی یکی از قسمت‌های حساس و مهم سامانه تصفیه‌خانه جنوب می‌باشد که بنا به گفته کارشناسان از سیستم‌های پیـــشرفـــته و اکثراً ساخت کشورهای خارجی استفاده شده است ولی

جدول ۱۰- محاسبه آسیب‌پذیری اجزای سامانه در برابر تهدیدات انسان ساز

بخش	تهدید / معیار	قابلیت شناسایی (٪۳۸)	امکان دسترسی (٪۲۳)	ضعف جزء (٪۸)	قابلیت بازسازی (٪۳۱)	آسیب پذیری
سایت	بمب‌گذاری	۸/۵۷	۷/۹۶	۳/۴۲	۲/۶۲	۶/۲
ایستگاه پمپاژ ورودی	تحریم	۴/۴۱	۳/۵۱	۵/۸۹	۷/۶۷	۵/۴۱
ساختمان اداری	بمب‌گذاری	۷/۲۲	۵/۹۷	۵/۷۵	۳/۳۸	۵/۶۶
سیستم‌های کنترلی	تحریم	۲/۶	۴/۸۵	۸/۴۳	۶/۹۱	۴/۹۹
ایستگاه پمپاژ لجن برگشتی	تحریم	۴/۴۵	۴/۵۱	۵/۷۱	۷/۸	۵/۶۸
لوله‌ها	بمب‌گذاری	۳/۲۳	۶/۶۷	۴/۳۲	۶/۲	۵/۰۹
آشغالگیر	بمب‌گذاری	۶/۳۴	۶/۳۴	۵/۷۵	۶/۱۰	۶/۲۸
دانه‌گیر	تحریم	۶/۹۸	۶/۳۴	۵/۱۱	۵/۸۹	۶/۴۰
استخرهوادهی	تحریم	۷/۳۴	۶/۳۲	۳/۸۶	۴/۴۴	۵/۹۷
استخرهای ته نشینی اولیه و ثانویه	بمب‌گذاری	۷/۳۴	۶/۳۴	۳/۸۶	۵/۴۲	۶/۲۹
کارکنان بهره برداری	بمب‌گذاری	۸/۷۴	۶/۰۵	۹/۰۱	۹/۰۲	۸/۳۲
مخازن نگهداری گاز (بیوگاز)	بمب‌گذاری	۶/۰۷	۴/۸۱	۷/۳۲	۸/۶۴	۶/۷۶
تأسیسات برقی	تحریم	۳/۰۷	۲/۹۹	۸/۷۷	۳/۸۶	۳/۷۹
واحدهای پردازش و تصفیه لجن	تحریم	۵/۴۲	۴/۱	۵/۳۴	۵/۹۶	۵/۳۴
واحد گندزدایی	تحریم	۵/۹۶	۳/۵۱	۶/۴۲	۶/۱۴	۵/۵۵

جدول ۱۱- محاسبه آسیب‌پذیری اجزای سامانه در برابر تهدیدات عملکردی و طبیعی

بخش	تهدید / معیار	ضعف جزء (٪۴۰)	قابلیت ایجاد تغییرات در ساختمان جزء (٪۲۰)	قابلیت بازسازی و بازگشت به حالت عادی (٪۴۰)	آسیب پذیری
سایت	زلزله	۲/۰۵	۳/۸۸	۶/۵۱	۴/۲۷
	آتش سوزی	۶/۰۷	۳/۸۱	۵/۸۱	۵/۵۷
ایستگاه پمپاژ ورودی	زلزله	۷/۴۸	۸	۷/۱	۷/۵
	آتش سوزی	۷/۰۴	۶/۳۶	۶/۸۱	۶/۸۸
	خرابی فیزیکی تجهیزات	۳/۴۵	۴/۵	۳/۰۲	۳/۵۲
	نوسانات دبی فاضلاب ورودی	۷/۴۹	۷/۸۱	۶/۸۶	۷/۳۷

متأسفانه به دلیل عدم پشتیبانی و عدم آشنایی کافی کارکنان، این سیستم‌ها همواره در معرض عدم سرویس و نگهداری مناسب و خرابی‌های فیزیکی قرار دارند. ۳. مخازن نگهداری گاز (بیوگاز) از جمله قسمت‌هایی است که در برابر تهدیداتی مانند انفجار و آتش‌سوزی به‌شدت آسیب پذیر بوده و به‌همین دلیل این دو تهدید امتیاز بالاتری نسبت به سایر تهدیدات به خود اختصاص داده‌اند.

۳-۶- ارزیابی ریسک

گام ششم به ارزیابی ریسک[۲۱] نهایی هر تهدید اختصاص دارد. نتایج نهایی محاسبات قبلی با روندی که توضیح داده شد، در جدول ۱۲ به صورت کامل بیان شده است و ریسک ناشی از هر تهدید در هر بخش از تصفیه‌خانه به صورت درصد بیان شده است.

جدول ۱۲- محاسبه ریسک اجزای اصلی سامانه

قسمت	پارامترهای ریسک / تهدید	عدد تهدید	شدت خسارت	آسیب‌پذیری	ریسک (٪)
سایت	بمب‌گذاری	۰/۲	۵/۲۸	۶/۲	۶/۵۵
	زلزله	۰/۵۴	۷/۲۹	۴/۲۷	۱۶/۸۱
	آتش‌سوزی	۰/۰۷	۴/۶۷	۵/۵۷	۱/۸۲
ساختمان اداری	بمب‌گذاری	۰/۲	۶	۵/۶۶	۶/۷۹
	زلزله	۰/۵۴	۷/۶۱	۸/۰۹	۳۳/۲۵
	قطع برق	۰/۰۲	۱/۶۸	۵/۱۷	۰/۱۷
	قطع مخابرات و بخش ارتباطی	۰/۰۲	۲/۴۷	۴/۷۴	۰/۲۳
	آتش‌سوزی	۶/۸۲	۶/۹۷	۰/۰۷	۳/۳۳
سیستم‌های کنترلی	تحریم	۰/۳۷	۳/۶۱	۴/۹۹	۶/۶۷
	زلزله	۰/۵۴	۷/۴۶	۷/۶۴	۳۰/۷۸
	انفجار	۰/۱	۹	۷/۸۵	۷/۰۷
	خرابی فیزیکی تجهیزات	۰/۰۶	۲/۵۳	۸/۲۲	۱/۲۵
	فرسودگی تجهیزات	۰/۰۳	۲/۴۳	۲/۳۵	۰/۱۷
ایستگاه پمپاژ ورودی	تحریم	۰/۳۷	۵/۱۳	۵/۴۱	۱۰/۲۷
	زلزله	۰/۵۴	۷/۶۱	۷/۵	۳۰/۸۲
	آتش سوزی	۰/۰۷	۷/۰۶	۶/۸۸	۳/۴
	خرابی فیزیکی تجهیزات	۰/۰۶	۲/۹۹	۳/۵۲	۰/۶۳
	نوسانات دبی فاضلاب ورودی	۰/۲	۵/۰۶	۷/۳۷	۷/۸۳
لوله‌ها	بمب گذاری	۰/۲	۷/۰۳	۵/۰۹	۷/۱۶
	زلزله	۰/۵۴	۶/۸۶	۶/۳۷	۲۳/۶
	نشت و از بین رفتن آب‌بندی	۰/۰۴	۳/۲	۵/۹۴	۰/۷۶

نتایج حاصل از تحلیل ریسک اجزای سامانه تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران نشان می‌دهد که ریسک «زلزله» در قسمت مخازن نگهداری گاز (بیوگاز) بیشترین مقدار را در بین سایر ریسک‌ها کسب کرده است. این نتیجه که بر اساس نظرات کارشناسان و تحلیل‌های انجام گرفته حاصل شده، بیانگر این واقعیت است که در صورت وقوع زلزله، این قسمت از سامانه به عنوان بحرانی‌ترین قسمت تلقی شده و باید برای کاهش این ریسک تمهیدات ویژه‌ای اندیشیده شود. ریسک‌های «قطع برق» و «فرسودگی تجهیزات» به‌ترتیب مربوط به قسمت‌های ساختمان اداری و سیستم‌های کنترلی، با کسب مقدار ریسک معادل ۰/۱۷ کمترین ریسک را به‌خود اختصاص داده‌اند.

۳-۷- کنترل ریسک

گام نهایی الگوریتم ارزیابی و مدیریت ریسک سامانه تصفیه‌خانه فاضلاب، کنترل ریسک‌های کمّی شده است. در این گام، با استفاده از نتایج حاصل شده از گام‌های قبلی و مشخص شدن «مقدار ریسک» برای تمامی تهدیدات شناسایی شده، برای هر کدام از ریسک‌ها سیاست‌های مقابله‌ای تدوین می‌شود. مراحل کنترل ریسک عبارت است از: ۱- دسته‌بندی ریسک‌ها، ۲- تدوین سیاست‌های برخورد با هر دسته و راهکارهای کاهش ریسک، ۳- ارزیابی فنّی و اقتصادی راهکارهای تدوین شده و برآورد هزینه‌ها.

۱- دسته‌بندی ریسک‌ها: برای دسته‌بندی ریسک‌ها با استفاده از نتایج تحلیل آماری، ریسک‌های شناسایی شده در این تحقیق به چهار دسته کلی، (ریسک‌های کم $۰ < R < ۱۰$) ، (ریسک‌های متوسط $۱۰ < R < ۲۰$)، (ریسک‌های شدید $۲۰< R < ۳۰$) و (ریسک‌های خیلی شدید $R > ۳۰$) تقسیم بندی می‌شوند.

۲- تدوین سیاست‌ها و مدیریت ریسک: پس از دسته‌بندی ریسک‌ها، برای هر دسته باید سیاست‌های مقابله‌ای تدوین شود. در این تحقیق برای ریسک‌های با مقدار متوسط یا بیشتر ($R_i > ۱۰$)، راهکارهای کاهش ریسک و ارزیابی‌های فنّی اقتصادی تدوین شده است. برای انجام این کار پرسشنامه تخصصی تدوین گردیده است. جدول ۱۳ راهکارهای انتخاب شده برای کاهش ریسک برای هرقسمت از سامانه را نشان می‌دهد. ستون اول این جدول قسمت‌های اصلی سامانه و ستون دوم آن تهدیدات با مقدار ریسک بالای ۱۰ را برای هر قسمت نشان می‌دهد. در ستون سوم نیز راهکارهای کاهشی ارائه شده است.

۳- ارزیابی فنی و اقتصادی راهکارها: متناسب با هر ریسک، در ستون آخر جدول ۱۳ توجیهات فنّی و اقتصادی راهکارها ارائه شده است.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ساختار نظام‌مند برای ارزیابی و مدیریت ریسک سامانه‌های تصفیه‌خانه فاضلاب ارائه شد. بدین منظور چارچوب ارزیابی ریسک پیشنهادی FEMA برای زیرساخت‌ها، برای یک تصفیه‌خانه فاضلاب با استفاده از ابزار تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی توسعه داده شد، با ذکر این نکته که ریسک‌های طبیعی و عملکردی نیز در این تحقیق لحاظ شدند و برای ارزیابی ریسک تکنولوژیکی سامانه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تدوین پرسشنامه‌های تخصصی بکارگرفته شد. نخست، احتمال وقوع تهدیدات شناسایی شده برای سامانه محاسبه شد که در بین تهدیدات، تهدید "زلزله" و "تحریم" به ترتیب بالاترین احتمالات وقوع را داشتند. یکی از دلایل اصلی بالا بودن تهدید زلزله به خاطر قرارگیری محل سامانه بر روی یکی از گسل‌های خطرناک تهران (گسل شهر ری) بوده که به گفته کارشناسان احتمال وقوع بالایی دارد. در ادامه شدت خسارت قسمت‌های اصلی سامانه مورد محاسبه قرار گرفت، تهدید "انفجار" در واحدهای پردازش و تصفیه لجن و تهدید "بمب‌گذاری" در قسمت مخازن بیوگاز، بالاترین شدت خسارات را ایجاد می‌کنند. این دو قسمت از سامانه به‌دلیل وجود مواد قابل انفجار و به‌خصوص در قسمت مخازن گاز، از ظرفیت بالقوه بالایی برای انفجار و بروز آتش‌سوزی‌های مهیب برخوردار هستند. مرحله بعدی الگوریتم پیشنهادی به تحلیل آسیب‌پذیری قسمت‌های اصلی سامانه در اثر تهدیدات شناسایی شده، پرداخته است که در نتیجه آن تهدید "انفجار" برای قسمت مخازن بیوگاز و تهدید "بمب گذاری" برای قسمت کارکنان بهره‌برداری بالاترین مقادیر آسیب پذیری را به خود اختصاص‌داده‌اند. برای قسمت مخازن بیوگاز کارشناسان عقیده دارند که این قسمت در برابر مواد منفجره و آتش‌زا حساس بوده و به شدت آسیب‌پذیر می‌باشد. با مشخص شدن مقادیر شدت خسارت و آسیب پذیری، در قسمت بعدی الگوریتم مقدار ریسک اجزای سامانه مشخص گردید. ریسک "زلزله" در قسمت مخازن بیوگاز و ریسک "انفجار" برای واحدهای گندزدائی، رتبه‌های اول و دوم را در بین نتایج حاصله به خود اختصاص دادند. می‌توان نتیجه‌گیری نمود که قسمت "مخازن بیوگاز" یکی از بحرانی‌ترین قسمت‌های سامانه تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران محسوب می‌شود. در پایان ذکر چند نکته درباره رویکرد به‌کار رفته برای ارزیابی ریسک تصفیه‌خانه حائز اهمیت است؛

جدول ۱۳- راهکارهای کاهشی برای ریسک‌های تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران

قسمت	ریسک	راهکارهای کاهشی	ارزیابی فنی و اقتصادی
سایت	زلزله	– بررسی مطالعات زمین‌شناسی محل قرارگیری سامانه – شناسایی نقاط قرار گرفته در محل‌های بحرانی	با توجه به احتمال خسارات و آسیب‌پذیری پایین این قسمت، اقدامات مقابله‌ای توجیه اقتصادی ندارد.
	بمب‌گذاری	– تجهیز سامانه به دوربین‌های مدار بسته – تامین روشنایی درشب به میزان کافی و نگهبانی ۲۴ ساعته و گشت زنی در محوطه سامانه	با توجه به بالا بودن خسارات ناشی از این تهدید، موارد یاد شده از نظر اقتصادی و همچنین فنی باید لحاظ شوند.
ساختمان اداری	زلزله	– بررسی مطالعات زمین‌شناسی محل قرارگیری سامانه – شناسایی نقاط قرار گرفته در محل‌های بحرانی – اقدامات بهسازی، نصب بادبندها و استفاده از میراگر	اقدامات مقابله‌ای از نظر فنّی و اقتصادی قابل پیاده‌سازی می‌باشند.
	بمب‌گذاری	– تجهیز محل به دوربین‌های مدار بسته و کنترل رفت و آمدها به محل و مراقبت ۲۴ ساعته	اقدامات قابل اجرا بوده و توجیه فنّی و اقتصادی نیز دارند.
سیستم‌های کنترلی	زلزله	شناسایی نقاط حساس و برقراری سیستم‌های کنترل دستی به جای کنترل‌های اتوماتیک در شرایط ایجاد خسارت برای سیستم‌های اتوماتیک	با توجه به مهم بودن نقش سیستم‌های کنترلی در سامانه، به استقرار یک سیستم پشتیبان در کنار سایر سیستم‌ها برای موقع بحرانی ضروری می‌باشد.
	انفجار	– استفاده از تجهیزات مناسب برای جلوگیری از وقوع انفجار در نقاط خطرناک. – پیش‌بینی تجهیزات اطفاء حریق	به دلیل این که تهدید انفجار می‌تواند خسارات شدیدی به این قسمت وارد آورد، لذا انجام اقدامات مقابله‌ای ضروری است.
ایستگاه پمپاژ ورودی	زلزله	– شناسایی نقاط آسیب‌پذیر و تقویت آنها – تدوین برنامه‌های آمادگی برای زلزله – طراحی و اجرای طرح‌های مقاوم‌سازی در برابر زلزله	با توجه به اهمیت این قسمت از سامانه و نیز شدت خسارات بالای این تهدید، انجام اقدامات مقابله‌ای ضروری است.
	تحریم	شناسایی کانال‌های خرید غیر مستقیم تجهیزات از طریق واسطه‌ها، تامین لوازم یدکی به‌میزان کافی و شناسایی تولیدکنندگان جایگزین	با توجه به سیاست‌های خصمانه برخی کشورها در قبال ایران، انجام اقدامات مقابله‌ای بسیار ضروری می‌باشند.
	نوسانات دبی فاضلاب ورودی	– تنظیم عملکرد پمپ‌ها – استفاده از سیستم‌های کنترلی جهت تنظیم کارکرد پمپ‌ها در مناسبترین وضعیت کارکرد	ادغام فاضلاب صنعتی و بیمارستانی با فاضلاب شهری، سامانه را با مشکل جدی مواجه کرده است، لذا انجام اقدامات مقابله‌ای از نظر فنی و اقتصادی قابل توجیه می‌باشد.
لوله‌ها	زلزله	– تدوین برنامه‌های آمادگی در برابر زلزله. – استفاده از تکنولوژی‌های جدید لوله‌های ضد زلزله – پیش‌بینی پمپ‌های سیار جهت انتقال فاضلاب در محلهایی که لوله‌ها دچار شکستگی شده‌اند	لوله‌ها مهمترین اجزای سامانه محسوب می‌شوند و انجام اقدامات مقابله‌ای از نظر فنّی و اقتصادی قابل توجیه است.
	بمب‌گذاری	– استفاده از تکنولوژی‌های جدید لوله‌های ضد زلزله – پیش‌بینی پمپهای سیار جهت انتقال فاضلاب در محل‌هایی که لوله‌ها دچار شکستگی شده‌اند و بالا بردن سیستم‌های امنیتی برای پیشگیری از انجام تهدید	لوله‌ها مهمترین اجزای سامانه محسوب می‌شوند و انجام اقدامات مقابله‌ای از نظر فنّی و اقتصادی قابل توجیه است
	نشت وازبین رفتن آب‌بندی	– شناسایی نقاط آسیب پذیر و تقویت آنها. – تدوین برنامه‌های آمادگی برای زلزله. – طراحی و اجرای طرح‌های مقاوم سازی در برابر زلزله	با توجه به اهمیت این قسمت از سامانه و نیز شدت خسارات بالای این تهدید، انجام اقدامات مقابله ای ضروری است

۱- روش ارائه شده در تحقیق حاضر برای ارزیابی تهدیدات تلفیقی از روشهای کیفی و کمی ارزیابی ریسک است که به‌دلیل سهولت اجرا در مواقعی که دسترسی به داده‌های آزمایشگاهی یا طرح‌های پـــایلوت واقعی وجود ندارد می‌تواند برای تصمیم‌گیرندگان مفید واقع شود.

۲- صحّت نتایج مدل‌های تصمیم‌گیری گروهی تا حد زیادی به مهارت و تجربه افراد مصاحبه شونده بستگی دارد، از این رو بهتر است قبل از اجرای این روش‌ها در قالب برگزاری کارگاه‌های

آموزشی، افراد در خصوص چگونگی تکمیل اجزای مدل از قبیل ماتریس مقایسات زوجی، وزن‌دهی و ... توجیه شوند.

۳- توسعه الگوریتم‌های ارزیابی و مدیریت ریسک از جمله الگوریتم ارائه شده در تحقیق حاضر در قالب سیستم‌های پشتیبانی و تصمیم‌گیری، و بسته‌های نرم‌افزاری می‌تواند تا حد زیادی به کاهش زمان اجرای مطالعات و افزایش دقت و صحّت نتایج کمک کند.

تقدیر و تشکر

در پایان از متخصصان و کارشناسان محترمِ تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران، اداره آب و فاضلاب استان تهران، شرکت فاضلاب تهران، شرکت فرآب زیست تهران، شرکت تهران میراب و تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک غرب که اطلاعات ارزشمندی در اختیار این تحقیق قرار دادند، تقدیر و تشکر می‌شود.

پی نوشت‌ها

1-American Society of Civil Engineering
2-Intentional Threats
3-Technological Threats
4-Risk Assessment Methodology – Water Supply (RAM- W)
5-USEnvironment Protection Agency
6-Multi-Criteria Decision-Making models (MCDMs)
7-Federal Emergency Management Agency
8-Analytical Hierarchy Process
9-Simple – Additive – Weighting Method (SAW)
10-Comparision Matrice
11-Decision Maker
12-Eigen Value
13-Inconsistency Index (I.I)
14-Inconsistency Ratio (R.I)
15-Expert Questionnaire
16-Man-Made Threats
17-Malevolent Threats
18-Human Toll
19-Environmental Damage
20-Functionality
21-Risk Assessment

۵- مراجع

اصغرپور م ج (۱۳۸۸) تصمیم‌گیری چندمعیاره، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران.

ASCE and AWWA (2004) Guidelines for the physical security of wastewater/storm water utilities. American Society of Civil Engineering (ASCE), Water Environment Federation (WEF) Press, New York, US.

Bailey K C (2001) The biological and toxin weapons threat to the United States. National Institute for Public Policy, Fairfax, VA.

Escer E, Perrodin Y, Keck G, Blonchard J, Vermande P (2010) Ecotoxicological risk assessment of hospital wastewater: a proposed framework for raw effluents discharging into urban sewer network. Journal of Hazardous Materials, A117(1):1011.

FEMA (2005) A how to guide to mitigate potential terrorist attacks against buildings. Risk Management Series, FEMA 452, USA, WWW.FEMA.GOV.

Grigg N S (2003) Water security: Multiple hazards and multiple barriers, Journal of Infrastructure Systems, ASCE, 9(2): 81-88.

Haimes YY (2009) Risk modeling, assessment, and management. Wiley, Third Edition, New York, US.

Kaplan S and Garrick B J (1981) On the quantitative definition of risk, Risk Analysis, 1(1): 11-27.

Mays L W (2004) Water Supply Systems Security.McGraw-Hill, New York, US.

Metcalf and Eddy Inc. (2003) Wastewater engineering. 4th ed., McGraw Hill, New York.

Roozbahani A, Zahraie B and Tabesh M (2013) Integrated risk assessment of urban water supply systems from source to tap. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 27: 923-944.

Saaty T L (1980) Decision making with the Analytic Hierarchy Process, International Journal of Services Sciences, 1(1): 83-98.

Sadiq R, Kleiner Y and Rajani B (2004) Aggregative risk analysis for water quality failure in distribution networks. Journal of Water Supply Research and Technology: AQUA, 53(4): 241-261.

SANDIA Corporation (2004) A risk assessment methodology (RAM) for physical security.Lockheed Martin Company, US.

Tidwell V C, Cooper JA and Silva C J (2005) Threat assessment of water supply systems using markov effects modeling, Journal of Water Resource Planning and Management, 131(3): 218-227.

Zio E (2007) An introduction to the basic of reliability and risk Analysis. World Scientific Publishing Co, Singapore.