

ارزیابی ریسک شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری فازی

مآنده اسگریان^۱، مسعود تابش^۲، عباس روزبهانی^۳

(دریافت ۹۲/۵/۱۵ پذیرش ۹۲/۷/۲۹)

چکیده

امروزه شبیه‌سازی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب که در شرایط عادی بهره‌برداری اجرا می‌شود، پاسخگوی مناسبی برای ارزیابی عملکرد شبکه در شرایط غیرعادی و بحرانی نیست. بنابراین در این پژوهش، به منظور برنامه‌ریزی برای مدیریت عملکرد شبکه در شرایط بحرانی، مانند بروز خطرات طبیعی و انسان‌ساز، الگویی برای ارزیابی ریسک شبکه‌های فاضلاب در مواجهه با بحران‌ها تدوین شد. در این الگو، پارامترهای ریسک که احتمال وقوع تهدیدات، شدت اثر آن‌ها و آسیب‌پذیری اجزای شبکه بودند، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه فازی از طریق پرسش‌نامه و تعریف معیارهایی برای سنجش اثر آن‌ها اندازه‌گیری شدند. با توجه به بزرگی ریسک‌های محاسبه شده، تهدیدات و مخاطرات در چند گروه یعنی تهدیدات با ریسک کم تا تهدیدات با ریسک زیاد، دسته‌بندی شدند و رویکردهای اصلی به کار رفته در برابر آن‌ها به سه دسته رویکردهای مقابله با ریسک، انتقال ریسک و پذیرش ریسک تقسیم شد. این روند برای شبکه فاضلاب منطقه تحت پوشش تصفیه‌خانه شهرک غرب تهران، به عنوان مطالعه موردی اجرا شد و بحران‌های ورود آلاینده شیمیایی و تغییرات شدید در کیفیت فاضلاب به عنوان پرمخاطره‌ترین بحران‌ها شناخته شد. رویکرد پیشنهادی در مقابل این بحران‌ها رویکرد مقابله و کاهش خطر ریسک است.

واژه‌های کلیدی: شبکه جمع‌آوری فاضلاب، ارزیابی ریسک، تصمیم‌گیری چندمعیاره، مجموع ساده وزنی فازی (FSAW)

Risk Assessment of Wastewater Collection Performance Using the Fuzzy Decision-making Approach

M. Asgarian¹, M. Tabesh², A. Rouzbahani³

(Received May 5, 2013)

Accepted Oct. 21, 2013)

Abstract

Wastewater collection network simulation in normal conditions does not provide performance assessment in unusual circumstances. In this paper, a model has been developed for risk assessment of wastewater collection systems to manage their performance under natural or man-made critical conditions. In this model, certain criteria were defined, fuzzy MADM techniques were exploited, and a questionnaire was employed to measure such risk parameters as the probability of threats, the severity of their impacts, and the vulnerability of the network components. Based on the calculated magnitude of the risks, the threats and hazards were classified into groups ranging from low-risk to high-risk threats. The approaches adopted to combat the risks were also

1. PhD Student of Water Civil Engineering, University of Tehran, Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 22510408 asgarian@ut.ac.ir
2. Prof., Center of Excellence for Engineering and Management of Civil Infrastructures, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran
3. Ass. Prof. of Water Engineering College of Aburayhan, University of Tehran, Tehran

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) ۲۲۵۱۰۴۰۸ (+۹۸ ۲۱) asgarian@ut.ac.ir
۲- استادیار و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۳- استادیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

classified into the following three categories: "to deal with the risk", "risk shifting", and "risk taking". This process was implemented for the wastewater collection system in Shahrak-Gharb District in Tehran as a case study. 'Introduction of chemical pollutants into the sewers' and 'drastic changes in wastewater quality' were identified as the most threatening crises for the district and the 'risk reduction strategy' was proposed for combating the critical conditions in this district.

Keywords: Wastewater Collection System, Risk Assessment, Multi-criteria Decision Making, Fuzzy Simple Additive Weighting (FSAW).

۱- مقدمه

در پژوهش حاضر دستورالعملی برای بازبینی بحران‌های شبکه جمع‌آوری فاضلاب با نظرسنجی از خبرگان و جمع‌آوری داده‌های میدانی طراحی شد که در آن عوامل کمی و کیفی تأثیرگذار در تحلیل ریسک شبکه جمع‌آوری فاضلاب اندازه‌گیری شدند.

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 می‌شود. تهدید، یک رخداد با احتمال وقوع پایین و پیامدهای منفی بالا است که ممکن است احتمال رخداد آن قابل محاسبه نباشد [۱]. ریسک یک تهدید، احتمال وقوع خسارت یا آسیب است. در شرایطی که وقوع پدیده‌های مطلوب و نامطلوب محتمل است، ریسک، احتمال وقوع یک پدیده نامطلوب است [۲]. توریس در پژوهشی میزان ریسک را متشکل از سه پارامتر احتمال وقوع بحران، شدت وقوع حادثه و آسیب‌پذیری سیستم تعریف کرده است [۳]. روزبھانی و همکاران به ارائه مدل IFHRA-WSS^۱ با رویکردی فازی برای تحلیل ریسک سیستم‌های آب شهری شامل بخش تأمین، تصفیه و توزیع به صورت یکپارچه پرداخته و کارایی آن را بر روی سیستم آب شرب شهر ارومیه در ایران بررسی کرده‌اند [۴]. دیموتیر و همکاران، میزان ریسک در تولید آب بهداشتی در تصفیه‌خانه‌ها را با توجه به خصوصیات آب ورودی، مشخصات سیستم و حالات مختلف شکست آن مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۵].

به‌منظور مدیریت و ارزیابی شرایط ریسک در بخش آب و فاضلاب و سامانه‌های آبی، در ایالات متحده روش‌ها و دستورالعمل‌هایی تهیه و تدوین شده‌اند که در هر یک از آن‌ها رویکردی سیستماتیک برای ارزیابی و مدیریت ریسک به‌کار گرفته شده است؛ مانند آیین‌نامه RAMCAP^۲ که روش تحلیل و مدیریت ریسک زیرساخت‌ها برای محافظت از سرمایه‌های حیاتی است و توسط مؤسسه فناوری‌های ابداعی انجمن مهندسی مکانیک

آمریکا^۳ تدوین شده است. همچنین آیین‌نامه FEMA 452 که توسط آژانس مدیریت بحران فدرال آمریکا^۴ تهیه شده است که رابطه ضربدری^۵ مشابهی برای محاسبه ریسک به‌صورت رابطه ۱ به‌کار می‌برند [۶]

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

که در این رابطه

R ریسک یا خطر، T تهدید محتمل، C پیامد، عواقب و نتایج (به تعبیری ارزش دارایی‌ها بعد از وقوع بحران) و V آسیب‌پذیری اعضای سیستم هستند. برای ارزش‌گذاری به هر یک از سه پارامتر ایجادکننده ریسک، شاخص‌هایی تعریف شده است که شاخص تصمیم‌گیرنده با توجه به آن شاخص‌ها و در اختیار داشتن آستانه‌های امتیازدهی، ارزش نهایی آن پارامتر را تعیین می‌کند.

شایان ذکر است که در این راهنماها، تنها به ارزیابی تهدیدات انسان‌ساز^۶ و حملات خرابکارانه^۷ توجه شده است، اما از آنجا که رویکرد مورد نظر در این مطالعه جامع‌تر بوده، به‌گونه‌ای که در آن به صورت همزمان هم آثار تهدیدات مغرضانه و انسان‌ساز و هم مخاطرات طبیعی و عملکردی - فنی با هم ارزیابی شده‌اند، بنابراین مدل پیشنهادی FEMA^۴ توسعه داده شد و برای ارزش‌گذاری به مخاطرات غیرانسانی و بحران‌های عملکردی - فنی، شاخص‌ها و آستانه‌هایی توسط مؤلفین تعریف شد که با استفاده از آن‌ها می‌توان ریسک تهدیدات انسان‌ساز و غیرانسانی را به‌صورت همزمان اندازه‌گیری کرد و این به شرایط واقعی نزدیک‌تر است. همچنین کاربرد مدل یاد شده برای زیرساخت شبکه جمع‌آوری فاضلاب به‌طور خاص بررسی شد و نیز به دلیل عدم قطعیت‌های فراوان در نمره‌دهی به شاخص‌ها و گزینه‌ها که در نظرسنجی از شاخص تصمیم‌گیرنده صورت می‌گیرد، در این پژوهش از رویکرد تصمیم‌گیری فازی به جای عددگذاری آستانه‌ها استفاده شد که بر قابلیت اطمینان نتایج افزوده است. برای پیاده‌سازی الگوریتم

³ ASME Innovative Technologies Institute, LLC

⁴ Federal Emergency Management Agency (FEMA)

⁵ Multiplicative

⁶ Man-Made Threats

⁷ Malevolent Threats

¹ Integrated Fuzzy Hierarchical Risk Assessment Model For Water Supply Systems (IFHRA-WSS)

² Risk Analysis and Management for Critical Asset Protection (RAMCAP)

تدوین شده، محدوده تحت پوشش تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک قدس در شهر تهران به‌عنوان مطالعه موردی بررسی شد.

۲- روش تحقیق

۱-۲- مروری بر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی^۱

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش‌هایی هستند که با بهره‌گیری از روابط ریاضی و استدلال‌های عقلی، فرایند تصمیم‌گیری را برای انسان تسهیل می‌کنند. نکته حائز اهمیت در مسائل تصمیم‌گیری و انتخاب این است که داده‌های کیفی همچون قضاوت‌های انسانی در مدل‌های تصمیم‌گیری، ایجاد عدم صراحت می‌کنند که با استفاده از روش‌های فازی می‌توانند تا حدودی عدم قطعیت‌ها را دفع کنند.

۱-۱-۲- روش فرایند سلسله‌مراتبی فازی^۲ (روش باکلی)

برای یافتن اوزان نسبی تهدیدات و همچنین معیارها، در این پژوهش از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و ماتریس مقایسات زوجی استفاده شد. این انتخاب بر اساس پژوهش‌های گذشته و نیز مشاوره با کارشناسان و اساتید مربوطه انجام گرفت [۷، ۸ و ۹].

نوع فازی روش فرایند سلسله‌مراتبی تحلیلی (FAHP) توسط اشخاص مختلفی در پژوهش‌های گذشته توسعه داده شده است [۱۰ و ۱۱].

ابتدا به‌منظور تعیین اوزان نسبی فازی معیارها، با فرض یکسان بودن وزن نظرات تصمیم‌گیرندگان، درایه‌های ماتریس‌ها با استفاده از روش میانگین هندسی با یکدیگر تلفیق شده و ماتریس فازی نهایی حاصل خواهد شد. آزل و ساعتی روش میانگین هندسی را بهترین روش برای تلفیق نظرات تصمیم‌گیرندگان در مدل فرایند سلسله‌مراتبی تحلیلی گروهی دانسته‌اند [۱۲].

وزن فازی معیارها از ماتریس فازی به‌دست آمده از تلفیق نظرات تصمیم‌گیرندگان مطابق رابطه ۲ استخراج می‌شود

$$\forall \tilde{A}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}) \Rightarrow$$

$$a_{ij}^t = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad b_{ij}^t = \left(\prod_{j=1}^n b_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad c_{ij}^t = \left(\prod_{j=1}^n c_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$a^t = \sum_{i=1}^n a_{ij}^t \quad b^t = \sum_{i=1}^n b_{ij}^t \quad c^t = \sum_{i=1}^n c_{ij}^t \quad (2)$$

$$\Rightarrow \tilde{W}_i = \left[\frac{a_{ij}^t}{c^t}, \frac{b_{ij}^t}{b^t}, \frac{c_{ij}^t}{a^t} \right]$$

$$i, j = 1, \dots, n$$

¹ Multi Criteria Decision Making (MCDM)

² Analytical Hierarchy Process (AHP)

³ Buckley- method

که در این رابطه

n بعد ماتریس مقایسه زوجی تلفیقی و $\tilde{A}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ درایه ijام در ماتریس مقایسه زوجی به‌دست آمده از تلفیق نظرات تصمیم‌گیرندگان، a_{ij}^t ، b_{ij}^t و c_{ij}^t به‌ترتیب میانگین هندسی سطری عضو اول، دوم و سوم عدد فازی مثلثی درایه‌های ماتریس تلفیقی هستند. a^t ، b^t و c^t به‌ترتیب مجموع ستونی عضو اول، دوم و سوم اعداد فازی مثلثی به‌دست آمده از میانگین‌گیری سطری ماتریس تلفیقی و \tilde{W}_i وزن فازی نهایی به‌دست آمده برای هر معیار (هر سطر) است.

در ماتریس مقایسه‌ای زوجی مقادیر ارجحیت بین معیارها، با عبارات زبانی توسط کارشناسان تعریف می‌شود و در نهایت وزن نسبی هر معیار W_j ، محاسبه می‌شود [۱۳]. با استفاده از جدول ۱ عبارات زبانی به‌کار گرفته شده شامل ارجحیت یا اهمیت مطلق، اهمیت خیلی قوی تا اهمیت برابر به‌صورت عدد فازی دوزنقه‌ای (a,b,c,d) مطابق شکل ۱ تعریف می‌شوند و در نهایت به طریق میانگین‌گیری هندسی، وزن فازی هر یک از معیارها، یعنی بردار W به‌دست می‌آید. سپس به‌منظور تعیین امتیاز فازی گزینه‌ها و مطلوبیت فازی آنها در این تحقیق از روش SAW فازی معرفی شده توسط بونیسون^۴ استفاده شد. یادآوری می‌شود که نحوه نمایش یک عدد فازی (تابع عضویت آن‌ها) در روش بونیسون و باکلی متفاوت بوده که این تفاوت در شکل‌های ۱ و ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۱- مقادیر عددی و فازی ارجحیت‌ها در مقایسات زوجی برای وزن‌دهی به معیارها

عبارت زبانی تعیین ارجحیت (معیار i نسبت به j)	مقدار عددی	ارزش ترجیحی به‌صورت فازی دوزنقه‌ای
ارجحیت یا اهمیت کامل و مطلق	۹	(۸،۹،۱۰،۱۰)
ارجحیت یا اهمیت خیلی قوی	۷	(۵،۷،۷،۹)
ارجحیت یا اهمیت قوی	۵	(۳،۵،۵،۷)
ارجحیت یا اهمیت کم	۳	(۱،۳،۳،۵)
ارجحیت یا اهمیت برابر	۱	(۱،۱،۱،۱)
برای ترجیحات بین عبارات‌های زبانی بالا	۲، ۴، ۶، ۸	-

۲-۱-۲- روش مجموع وزین ساده فازی^۵ (روش بونیسون)

سه پارامتر اصلی برای محاسبه مقدار ریسک (مقدار تهدید، شدت خسارت و آسیب‌پذیری) مستقل از هم بوده و هدف، مقایسه این پارامترها نیست، بلکه محاسبه مقدار امتیاز کلی حاصل از

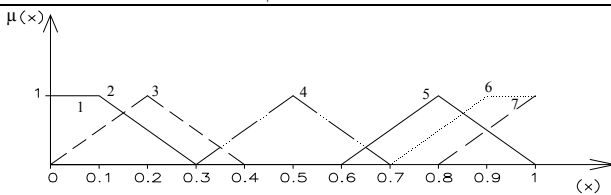
⁴ Bonissone Method

⁵ Fuzzy Simple Additive Weighting (FSAW)

می شود. به یک عدد فازی، از هفت عدد فازی ذوزنقه‌ای استفاده می شود که در جدول ۲ و شکل ۳ مشاهده می شود.

جدول ۲- اعداد فازی ذوزنقه‌ای مربوط به عبارتهای زبانی در رتبه‌دهی با روش بونیسون

ردیف	شاخص مثبت	شاخص منفی	عدد فازی ذوزنقه‌ای در روش بونیسون
۱	بسیار کم	بسیار زیاد	(0,0,0,2)
۲	کم	زیاد	(0,1,0,2)
۳	تا حدودی کم	تا حدودی زیاد	(.2,.2,.2,.2)
۴	مناسب	مناسب	(.5,.5,.2,.2)
۵	تا حدودی زیاد	تا حدودی کم	(.8,.8,.2,.2)
۶	زیاد	کم	(.9,1,.2,0)
۷	بسیار زیاد	بسیار کم	(1,1,.2,0)



شکل ۳- اعداد فازی ذوزنقه‌ای مربوط به عبارتهای زبانی در روش بونیسون [۱۳]

پس از تعیین فازی w (بردار اوزان معیارها) و r (امتیازهای گزینه‌ها در مورد هر معیار)، U_i که نشان‌دهنده مقدار تابع مطلوبیت برای هر گزینه است، با استفاده از عملگرهای جبری روش بونیسون به سادگی از رابطه ۴ محاسبه می شود. عملگرهای مزبور برای دو عدد فازی دلخواه مانند D و N به صورت روابط ۵ تا ۹ تعریف می شوند [۱۴]

$$D = (a, b, \alpha, \beta) \quad (5)$$

$$N = (a', b', \alpha', \beta') \quad (6)$$

$$D + N = (a + a', b + b', \alpha + \alpha', \beta + \beta') \quad (7)$$

$$D.N = (aa', bb', \alpha\alpha' + \alpha\alpha' - \alpha\alpha' + b\beta' + b'\beta' + \beta\beta') \quad (8)$$

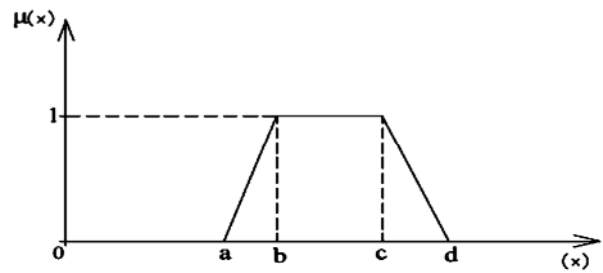
$$D/N = (a/b', b/a', \frac{a\beta' + \alpha b'}{b'(b' + \beta')}, \frac{b\alpha' + \beta a'}{a'(a' - \alpha')}) \quad (9)$$

۲-۱-۳ روش غیرفازی سازی دیگر

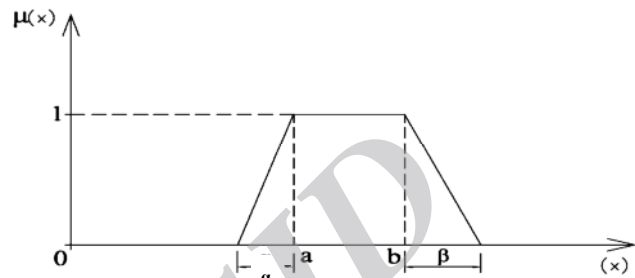
برای رتبه‌بندی اعداد فازی، ییگر در سال ۱۹۸۰ یک شاخص پیشنهاد نمود. شاخص ییگر برای گزینه i ام از رابطه ۱۰ به دست می آید [۱۵]

$$Y(\tilde{A}_i) = \frac{\int_0^1 x \mu_{\tilde{A}_i}(x) dx}{\int_0^1 \mu_{\tilde{A}_i}(x) dx} \quad (10)$$

که در این رابطه



شکل ۱- نحوه نمایش عدد فازی ذوزنقه‌ای در روش باکلی [۱۳]



شکل ۲- تابع عضویت عدد فازی ذوزنقه‌ای در روش بونیسون

مقادیر متفاوت است. لذا روش امتیازدهی مستقیم و استفاده از ترکیب خطی برای محاسبه امتیاز نهایی پارامترهای ریسک، راهکاری مناسب تلقی می شود. ضمن اینکه استفاده از SAW سهولت زیادی دارد.

در این روش، با مفروض بودن اوزان اهمیت شاخص‌ها یا بردار w ، (که در اینجا با مقایسات زوجی به صورت FAHP به دست آمده‌اند) مناسب‌ترین گزینه A^* ، به صورت رابطه ۳ محاسبه می شود

$$A^* = \{A_i | \max_i (U_i = \frac{\sum_j (w_j \cdot r_{ij})}{\sum_j w_j})\} \quad (3)$$

که در این رابطه

A_i معرف گزینه i ام، w_j وزن شاخص j ام، r_{ij} رتبه گزینه i ام در مورد شاخص j ام و U_i مطلوبیت عینی یا ضمنی گزینه i ام است [۱۴]. در حالت فازی FSAW، مانند SAW، U_i فازی یا \tilde{U}_i با تابع عضویت $\mu(u_i)$ به ازای هر گزینه i ام به صورت رابطه ۴ محاسبه می شود

$$\tilde{U}_i = \frac{\sum_{j=1}^n \tilde{w}_j \tilde{r}_{ij}}{\sum \tilde{w}_j} \quad (4)$$

در روش بونیسون w و r اعداد فازی ذوزنقه‌ای هستند که به صورت (a, b, α, β) تعریف می شوند (شکل ۲). در این روش برای تبدیل مفهوم عبارتهای زبانی r_{ij} که توسط تصمیم گیرنده بیان

$Y(\tilde{A}_i)$ برابر مختصات طولی مرکز سطح تابع عضویت $\mu_{\tilde{A}_i}(x)$ است. به این ترتیب گزینه‌ای که بزرگ‌ترین $Y(\tilde{A}_i)$ را دارد، رتبه اول را داراست [۱۵].

۲-۲- تدوین پرسشنامه‌های تخصصی

در مراحل مختلف این پژوهش، مانند وزن‌دهی به معیارها و ارزیابی تهدیدات، از تدوین پرسشنامه‌های تخصصی و استفاده از نظرات تصمیم‌گیرندگان بهره گرفته شد. تعداد و تنوع گروه‌های تصمیم‌گیرنده، امری است که به عوامل متعددی همچون منابع و امکانات موجود، مقتضیات زمانی و مکانی و هدف مطالعات بستگی دارد و باید توسط شخص تحلیل‌گر به‌دقت تعیین شود. در بسیاری از مراحل پژوهش، از تدوین پرسشنامه‌های تخصصی و مشاوره با تصمیم‌گیرندگان و کارشناسان مجرب در زمینه طراحی، بهره‌برداری و مدیریت شبکه‌های فاضلاب استفاده شد.

۳-۲- نحوه تحلیل ریسک

برای ارزیابی ریسک، چارچوبی مشابه آیین‌نامه FEMA 452 آژانس مدیریت بحران فدرال آمریکا، ارائه شد؛ اما مدل ارائه شده برای انواع مختلف ریسک‌های انسانی و ریسک‌های طبیعی و فنی - عملکردی زیرساخت شبکه فاضلاب معرفی شد. FEMA 452 در قالب پنج مرحله ۱- شناسایی و رتبه‌بندی تهدیدات، ۲- برآورد ارزش دارایی‌ها، ۳- ارزیابی آسیب‌پذیری‌ها، ۴- ارزیابی ریسک و ۵- تعیین گزینه‌های تخفیف تهدیدات بیان می‌شود [۱۶].

در هر تهدید هر یک از سه پارامتر احتمال وقوع تهدید، شدت خسارات ناشی از تهدید (یا ارزش دارایی‌ها پس از وقوع تهدید) و آسیب‌پذیری سیستم ناشی از آن تهدید، با استفاده از نظر کارشناسان، نمره‌ای از ۱ تا ۱۰ گرفته و ریسک ناشی از آن تهدید، از حاصل ضرب این سه پارامتر و تقسیم جواب نهایی بر ۱۰ به صورت درصد بیان می‌شود. همچنین برای ارزش‌گذاری به هر یک از سه پارامتر ایجادکننده ریسک، شاخص‌هایی تعریف شده است که شخص تصمیم‌گیرنده در نظر داشتن آن شاخص‌ها ارزش نهایی آن پارامتر مولد ریسک را تعیین می‌کند. به‌عنوان مثال معیارهای لحاظ شده برای ارزیابی عنصر آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در برابر تهدیدات تروریستی و انسانی عبارت‌اند از: ۱- قابلیت شناسایی جزء، ۲- امکان دسترسی به جزء^۱، ۳- ضعف جزء^۲ و ۴- قابلیت بازسازی و بازگشت به حالت عادی^۳ [۱]. در این مقاله نیز از همین معیارها به‌منظور ارزیابی ریسک‌های انسان‌ساز در شبکه فاضلاب

استفاده شد. اما از آنجایی که در بسیاری از مواقع، بحران‌های غیرعمدی مانند بحران‌های فنی - عملکردی و یا مخاطرات طبیعی، بهره‌برداری از شبکه را مختل می‌کنند، برای ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه ناشی از آن‌ها هم معیارهایی مطرح شد که شامل شاخص آسیب‌پذیری مکانیکی، شاخص آسیب‌پذیری هیدرولیکی و شاخص آسیب‌پذیری محیط زیستی می‌شود و شرح آن در جدول ۳ آورده شده است.

با به‌کارگیری رویکرد فازی تصمیم‌گیری چند شاخصه^۴، امکان تبدیل کردن نظرات زبانی و بازه‌ای افراد به نتایج قابل اعتمادتر فراهم می‌شود. در الگوریتم ارائه شده، مراحل کار در شش گام مطابق شکل ۴ تعریف شد. به‌منظور سنجش کارایی الگوریتم ارائه شده، به‌طور همزمان این روش بر روی شبکه فاضلاب محدوده غرب تهران به‌عنوان مطالعه موردی پیاده شد.

جدول ۳- توصیف شاخص‌های ارزیابی آسیب‌پذیری‌های

تهدیدات غیرانسانی

نام معیار	تعریف و توصیف معیار
شاخص تغییرات در ساختمان اجزا (آسیب‌پذیری مکانیکی)	بروز تهدید محتمل تا چه حد به اجزای شبکه بسیار آسیب می‌رساند؟ (در دیواره و شکل مقطع لوله‌ها یا قطر، طول و عمق نصب آن‌ها چقدر تغییر ایجاد کرده یا چقدر تخریب در اجزای ایستگاه پمپاژ ایجاد می‌شود و آیا موجب قطعی برق می‌شود یا تلمبه‌خانه را از کار می‌اندازد یا خیر).
شاخص نوسانات دبی و جریان فاضلاب (آسیب‌پذیری هیدرولیکی)	تهدید محتمل تا چه حد باعث افزایش جریان شده؟ آیا جریان به مقداری بیش از مقدار مجاز طراحی رسیده و وارد منهول‌ها شده و لوله‌ها به‌صورت پر و تحت فشار عمل می‌کنند، یا برعکس، آیا باعث کاهش جریان به مقدار کمتر از حدود طراحی شده به‌نحوی که ممکن است فاضلاب در مسیر لوله‌ها یا در محفظه تلمبه‌خانه ته‌نشین شود.
شاخص نوسانات کیفیت فاضلاب (آسیب‌پذیری محیط زیستی)	تهدید محتمل بر کیفیت فاضلاب تا چه حد اثر گذاشته است؟ آیا اثر این تغییرات زیاد و ماندگار است و بر مقاومت و زبری لوله‌های شبکه یا قطعات ایستگاه تلمبه‌خانه اثرگذار است؟ پارامترهای کیفی جریان (مانند BOD و کدورت) در حدود پیش‌بینی شده طراحی است یا خیر.

۳- مطالعه موردی

۳-۱- شناسایی سرمایه‌ها و اجزای شبکه

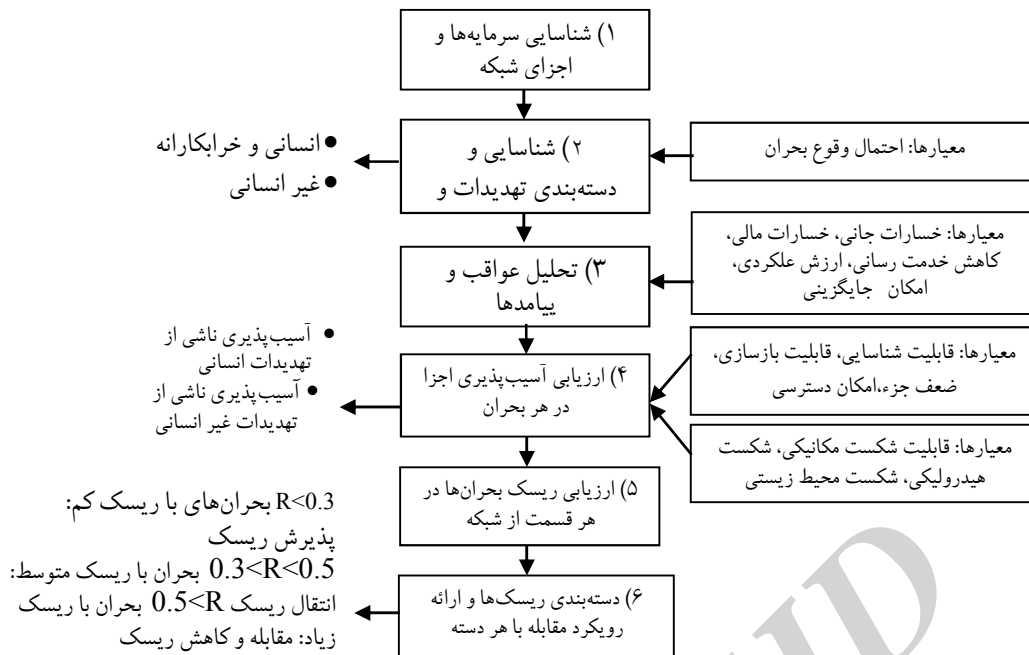
به‌عنوان یک مطالعه موردی برای پیاده‌سازی و ارزیابی الگوریتم تدوین شده، محدوده تحت پوشش تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک قدس در شهر تهران بررسی شد. این محدوده شامل مناطق سعادت‌آباد، شهرک قدس و بخشی از پونک بود که وسعت شبکه فاضلاب تحت پوشش آن در ابتدای طرح در حدود ۲۹۰ هکتار و

⁴ Multi Attribute Decision Making (MADM)

¹ Asset Accessibility

² Asset Weakness

³ Be Functional Again After The Attack



شکل ۴- نمودار مراحل تحلیل ریسک شبکه فاضلاب

$$W.w = \lambda.w$$

(۱۱)

که در این رابطه

W ماتریس مقایسه زوجی کل غیرنرمال مطابق جدول ۵، w بردار وزن هر گروه از بحرانها مطابق ستون آخر این جدول و λ بردار ویژه ماتریس w است:

$$\begin{bmatrix} 1 & \dots & 6.88 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.14 & \dots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.62 \\ 0.23 \\ 0.07 \\ 0.07 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 24.9 \\ 8.09 \\ 2.38 \\ 2.69 \end{bmatrix} = \lambda.w \Rightarrow$$

(۱۲)

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.99 \\ 3.52 \\ 4.06 \\ 4.34 \end{bmatrix} \Rightarrow \lambda_{\max} = 4.226$$

ساعتی از اختلاف λ_{\max} و n، بعد ماتریس مقایسه زوجی،^۲ برای تعریف ضریب ناسازگاری^۱ و به دنبال آن نسبت ناسازگاری^۲ استفاده کرد [۱۳ و ۱۴]

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \Rightarrow CI = \frac{4.226 - 4}{4 - 1} = 0.075$$

(۱۳)

^۱ Inconsistency Coefficient (CI)
^۲ Inconsistency Ratio (IR)

طول ۶۰ کیلومتر بوده و در انتهای دوره طرح خود (سال ۱۴۱۰) به ۳۸۰۰ هکتار خواهد رسید [۱۷].

۲-۳- شناسایی و دسته‌بندی تهدیدات و بحرانها

ابتدا فهرست کلی از انواع بحران‌هایی که ممکن است در یک شبکه فاضلاب رخ دهد، مطابق جدول ۴ آماده شد که گروه‌های مختلف بحران‌ها را مقایسه زوجی نمایند تا وزن نسبی و اهمیت هر گروه نسبت به سایر گروه‌ها به دست آید. مقایسات زوجی متخصصان به صورت گفتاری و با عبارات زبانی موجود در جدول ۱ (مانند ارجحیت یا اهمیت قوی و غیره) انجام شد. سپس هر عبارت گفتاری به فرم عددی خود مطابق همین جدول تبدیل شد تا بتوان نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسه زوجی پر شده توسط هر یک از متخصصان را به صورت عددی محاسبه کرد. درایه‌های ماتریس مقایسه زوجی در جدول ۵ از میانگین هندسی نظر افرادی که ماتریس مقایسه زوجی آن‌ها سازگار بوده، به دست آمده است. ماتریس میانگین کل هم باید سازگار باشد که محاسبات آن در ادامه و به عنوان نمونه آمده و با نسبت ناسازگاری $IR = 0.083 < 0.1$ ماتریس قابل قبولی است و می‌توان برای ادامه مراحل از فرم فازی آن استفاده کرد.

برای محاسبه IR ابتدا با روش میانگین حسابی از تقسیم درایه‌های موجود در هر ستون، بر حاصل جمع درایه‌های آن ستون، ماتریس نرمال شده به دست می‌آید و سپس با میانگین‌گیری درایه‌های هر سطر، وزن نسبی آن سطر، به دست می‌آید. حال مقدار ویژه بیشینه (λ_{\max}) از روابط زیر اندازه‌گیری می‌شود [۱۸]

جدول ۴- شرح تهدیدات انسانی و خطرات غیرانسانی موجود در یک شبکه جمع آوری فاضلاب

نوع تهدید	شماره تهدید	نام تهدید	توضیحات
انسانی و مغرضانه	۱	سایبری	تهدید انسانی و مغرضانه نرم محسوب می شود. ابزار تهدید، هک کردن است.
	۲	بمب گذاری	تهدید انسانی و مغرضانه سخت محسوب می شود. ابزار تهدید، بمب است.
	۳	آلاینده بیولوژیکی	تهدید انسانی و مغرضانه ویژه محسوب می شود. ابزار تهدید، آلاینده است.
	۴	آلاینده شیمیایی	تهدید انسانی و مغرضانه ویژه محسوب می شود. ابزار تهدید، آلاینده است.
محیط زیستی، اجتماعی	۵	تغییرات در کیفیت فاضلاب صنایع و اماکن	این بحران ممکن است بر اثر نوسانات در میزان BOD و COD فاضلاب صنایع و اماکن رخ دهد.
	۶	افزایش بیش از حد ورودی فاضلاب	ممکن است به دلیل رشد ناگهانی جمعیت و توسعه شهری یا طولانی شدن زمان ساخت شبکه ها بیش از زمان برآورد، حجم جریان بیش از حد باشد.
	۷	کاهش بیش از حد فاضلاب ورودی	این بحران غالباً به دلیل خشکسالی یا نقص در بالادست عضو رخ می دهد.
	۸	آتش سوزی و انفجار صنعتی	عدم هوادهی به جریان فاضلاب و سرعت کم جریان، باعث می شود گازهای خروجی از فاضلاب با رطوبت هوای موجود ترکیب شده و ایجاد انفجار کند.
	۹	نشست و از بین رفتن آب بندی	---
	۱۰	ورود نخاله	مواردی مثل رشد و ورود گیاهان به فاضلابرها، ریختن زباله به شبکه از ورودی منهولها توسط افراد، ریختن شن و ماسه توسط ماموران شهرداری به دریچه ها
	۱۱	فرسودگی و خوردگی	---
ذاتی (فرایندی) و عملکردی	۱۲	اشکالات طراحی	مشکلاتی مثل طراحی شبکه برای شرایط ایده آل، وجود مشکلات فراوان در پیاده سازی شبکه طراحی شده
	۱۳	زلزله	---
	۱۴	طوفان	---
	۱۵	سیل	افزایش غیرقابل کنترل حجم فاضلاب از طریق نفوذ غیراصولی سیلاب به شبکه مانند ورود نادرست آب بامها یا روانابها به درون شبکه
	۱۶	رانش	---
طبیعی	۱۷	روانگرایی	---

شاخص های مورد بررسی باشد، در این صورت طبق روش باکلی در هر سطر از ماتریس، w_i یا همان وزن شاخص i ام در قیاس با سایر شاخص ها به شکل زیر تعریف می شود

$$w_i = \left(\frac{a_i}{d}, \frac{b_i}{c}, \frac{c_i}{b}, \frac{d_i}{a} \right) \quad (15)$$

که در این رابطه

$$a_1 = [\prod_{j=1}^4 a_{1j}]^{1/4} = (1 \times 3 \times 5 \times 5)^{1/4} = 2.94 \quad (16)$$

$$a_2 = [\prod_{j=1}^4 a_{2j}]^{1/4} = \left(\frac{1}{7} \times 1 \times 3 \times 1 \right)^{1/4} = 0.81 \quad (17)$$

$$a_3 = [\prod_{j=1}^4 a_{3j}]^{1/4} = \left(\frac{1}{9} \times \frac{1}{7} \times 1 \times 1 \right)^{1/4} = 0.35 \quad (18)$$

$$a_4 = [\prod_{j=1}^4 a_{4j}]^{1/4} = \left(\frac{1}{9} \times \frac{1}{5} \times 1 \times 1 \right)^{1/4} = 0.39 \quad (19)$$

$$a = \sum_{i=1}^4 a_i = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 4.493 \quad (20)$$

$$IR = \frac{CI}{CRI} = \frac{0.075}{0.9} = 0.083 \leq 0.1 \Rightarrow OK. \quad (14)$$

که در این روابط

CI ضریب ناسازگاری، IR نسبت ناسازگاری و CRI ضریب ناسازگاری ماتریس تصادفی $n \times n$ است.

با توجه به این که ماتریس مقایسه زوجی ترکیبی مشکل سازگاری ندارد و قابل استناد است، این ماتریس به فرم فازی موجود در جدول ۶ نمایش داده می شود. در تبدیل مقادیر درایه ها، از فرم عددی به فرم فازی از جدول ۱ استفاده شد. طریقه نشان دادن اعداد فازی در روش باکلی به صورت (a, b, c, d) است.

۳-۳- محاسبه پارامترهای مورد نیاز روش باکلی برای به دست آوردن \tilde{w}_i ها (وزن های فازی گروه بحرانها)

اگر درایه های فازی ماتریس مقایسه زوجی به صورت کلی $A = [(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})] i, j = 1, \dots, N$ نمایش داده شود که $(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$ نمایش فازی درایه i از ماتریس A و N تعداد

جدول ۵- ماتریس مقایسه زوجی کل به منظور سنجش نرخ ناسازگاری آن

نام گروه	بحران انسان ساز	بحران محیط زیستی، اجتماعی	بحران فرایندی و صنعتی	بحران طبیعی
بحران انسان ساز	1	$(7 \times 4 \times 6 \times 4 \times 8)^{1/5} = 5.5$	$(9 \times 5 \times 7 \times 4 \times 8)^{1/5} = 6.4$	$(9 \times 6 \times 6 \times 5 \times 7)^{1/5} = 6.5$
بحران محیط زیستی، اجتماعی	$\frac{1}{5.5}$	1	$(5 \times 5 \times 4 \times 6 \times 7)^{1/5} = 5.4$	$(4 \times 2 \times 2 \times 3 \times 6)^{1/5} = 3.1$
بحران ذاتی (فرایندی) و صنعتی	$\frac{1}{6.43}$	$\frac{1}{5.4}$	1	$(1 \times 2 \times 1 \times 3 \times 4)^{1/5} = 1.5$
بحران طبیعی	$\frac{1}{6.5}$	$\frac{1}{3.15}$	$\frac{1}{1.5}$	1

جدول ۶- ماتریس مقایسه زوجی ترکیبی گروه‌های بحران‌ها به صورت اعداد فازی $(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$

نام گروه	بحران انسان ساز	بحران محیط زیستی، اجتماعی	بحران ذاتی (فرایندی) و صنعتی	بحران طبیعی
بحران انسان ساز	(1,1,1,1)	(3,5,5,7)	(5,7,7,9)	(5,7,7,9)
بحران محیط زیستی، اجتماعی	$(\frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3})$	(1,1,1,1)	(3,5,5,7)	(1,3,3,5)
بحران ذاتی (فرایندی) و صنعتی	$(\frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5})$	$(\frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3})$	(1,1,1,1)	(1,1,1,1)
بحران طبیعی	$(\frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5})$	$(\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 1)$	(1,1,1,1)	(1,1,1,1)

جدول ۷- مقادیر پارامترهای مورد نیاز روش باکلی

d_i	c_i	b_i	a_i	i
۴/۸۸	۳/۹۶	۳/۹۶	۲/۹۴	۱
۱/۸۵	۱/۳۲	۱/۳۲	۰/۸۱	۲
۰/۵۱	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۳۵	۳
۰/۶۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۳۹	۴

جدول ۸- وزن فازی گروه‌های بحران‌ها \tilde{w}_1 (نمایش به فرم شیوه‌های باکلی و بونیسون)

وزن گروه بحران	مقدار فازی به صورت (a, b, c, d)	مقدار فازی به صورت $(\alpha, \beta, \alpha, \beta)$
وزن بحران‌های انسان ساز	(0.372, 0.643, 0.643, 1.086)	(0.643, 0.643, 0.271, 0.443)
وزن بحران‌های محیط زیستی، اجتماعی	(0.102, 0.214, 0.214, 0.411)	(0.214, 0.214, 0.112, 0.197)
وزن بحران‌های ذاتی (فرایندی) و صنعتی	(0.045, 0.067, 0.067, 0.113)	(0.067, 0.067, 0.022, 0.046)
وزن بحران‌های طبیعی	(0.049, 0.076, 0.076, 0.149)	(0.076, 0.076, 0.027, 0.073)

وزن بحران‌های محیط زیستی، اجتماعی

$$\tilde{w}_2 = \left(\frac{a_2}{d}, \frac{b_2}{c}, \frac{c_2}{b}, \frac{d_2}{a} \right) = (0.102, 0.214, 0.214, 0.411)$$

وزن بحران‌های ذاتی (فرایندی) و صنعتی

$$\tilde{w}_3 = \left(\frac{a_3}{d}, \frac{b_3}{c}, \frac{c_3}{b}, \frac{d_3}{a} \right) = (0.045, 0.067, 0.067, 0.113)$$

وزن بحران‌های طبیعی

به طریق مشابه مقادیر b_1, c_1, d_1 نیز به دست می‌آیند که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است. بنابراین مقدار فازی ارجحیت گروه‌های بحران، طبق روش باکلی به صورت اعداد فازی زیر نمایش داده می‌شود که نتایج آن در جدول ۸ به فرم باکلی و نیز تبدیل شده به فرم بونیسون دیده می‌شود.

وزن بحران‌های انسان ساز:

$$\tilde{w}_1 = \left(\frac{a_1}{d}, \frac{b_1}{c}, \frac{c_1}{b}, \frac{d_1}{a} \right) = (0.372, 0.643, 0.643, 1.086)$$

بزرگی هر تهدید مطابق جدول ۹ به دست می آید. در این مرحله با استفاده از رابطه غیرفازی سازی بیگر، عدد فازی امتیاز نهایی تهدید \tilde{U}_i یعنی \tilde{U}_i ، به صورت غیرفازی و عددی در آمده و به این ترتیب می توان تهدیدات را بر حسب امتیاز عددی نهایی به صورت نزولی لیست کرد. بنابراین مهم ترین تهدیدات مطابق جدول ۱۰ و شکل ۵ به دست می آیند.

$$\tilde{w}_4 = \left(\frac{a_4}{d}, \frac{b_4}{c}, \frac{c_4}{b}, \frac{d_4}{a} \right) = (0.049, 0.076, 0.076, 0.149)$$

پس از به دست آوردن وزن نسبی گروه ها با مقایسات زوجی به روش باکلی، برای ارزش گذاری و امتیازدهی به گزینه ها (تهدیدات)، از روش بونیسون استفاده می شود. برای محاسبه رتبه هر یک از گزینه ها \tilde{r}_j ، ماتریس تصمیم گیری زیر تشکیل شده و امتیاز فازی

جدول ۹- ماتریس تصمیم برای ارزیابی بحران های تشکیل دهنده ریسک، در شبکه فاضلاب غرب شهر تهران

نوع تهدید	وزن نسبی گروه بحران	شماره تهدید (i)	معیار احتمال وقوع (\tilde{w}_1) $\tilde{w}_1 = w_1 = (1,1,0,0)$					
			بسیار زیاد (1,1,2,0)	زیاد (9,1,2,0)	ناحدودی زیاد (8,8,2,2)	مناسب (5,5,2,2)	ناحدودی کم (2,2,2,2)	کم (0,1,0,2)
تهدیدات انسانی و مغرضانه	(0.643,0.643,0.271,0.443)	۱						
		۲						
		۳						
		۴						
محیط زیستی، اجتماعی	(0.214,0.214,0.112,0.197)	۵						
		۶						
		۷						
ذاتی (فرایند) و عملکردی	(0.067,0.067,0.022,0.046)	۸						
		۹						
		۱۰						
		۱۱						
		۱۲						
طبیعی	(0.076,0.076,0.027,0.073)	۱۳						
		۱۴						
		۱۵						
		۱۶						
		۱۷						

جدول ۱۰- امتیاز نهایی پنج بحران مهم به صورت فازی و غیرفازی در ارزیابی بحران های تشکیل دهنده ریسک

ردیف تهدید	نام تهدید	جنس و نوع تهدید	عدد فازی امتیاز نهایی بحران \tilde{U}_i	مقدار غیرفازی شده توسط روش بیگر $Y(\tilde{U}_i)$
۱	الاینده شیمیایی (مغرضانه)	انسانی و مغرضانه	(.32,.32,.21,.44)	0.398
۲	تغییر در کیفیت فاضلاب صنایع و اماکن (غیرمغرضانه)	محیط زیستی، اجتماعی	(.19,.21,.12,.20)	0.228
۳	افزایش بیش از حد ورودی فاضلاب	محیط زیستی، اجتماعی	(.17,.17,.11,.24)	0.215
۴	کاهش بیش از حد فاضلاب ورودی	محیط زیستی، اجتماعی	(.04,.04,.04,.12)	0.069
۵	نشست و از بین رفتن آب بندی	ذاتی (فرایندی)، عملکردی - فنی	(.05,.05,.03,.06)	0.065

۳-۳- تحلیل عواقب و ارزیابی شدت خسارات

به منظور ارزیابی شدت عواقب بحران‌ها، ابتدا پنج معیار اندازه‌گیری شدت عواقب و اثرات (شکل ۴)، مشابه گام‌های بخش ارزیابی تهدیدات، توسط متخصصان مقایسه زوجی می‌شود که یک نمونه از آن در ماتریس جدول ۱۱ قابل مشاهده است و با به‌کارگیری روش FAHP باکلی وزن فازی هر شاخص از ماتریس مقایسه کارشناسان به دست می‌آید. تعریف هر شاخص در جدول ۱۲ و نحوه نمره‌دهی به گزینه‌ها یا بحران‌ها در مورد هر شاخص در جدول ۱۳ به عنوان نمونه برای یک معیار آورده شده است. جدول ۱۴ نیز ماتریس تصمیم‌گیری برای هدف تعیین شدت عواقب تهدیدات را نشان می‌دهد که در آن امتیاز نهایی شدت عواقب هر تهدید، به صورت فازی به دست آمده است. وزن هر یک از پنج شاخص در جدول ۱۴ با استفاده از محاسبات رویکرد باکلی و محاسبات این روش روی ماتریس مقایسه زوجی آن‌ها به دست آمده است. نحوه عملیات دقیقاً مشابه روابط ۱۶ تا ۲۰ و جدول‌های ۷ و ۸ برای یافتن وزن فازی گروه‌های بحران است. نحوه محاسبه امتیاز نهایی شدت عواقب بحران اول یعنی ورود آلاینده شیمیایی، به عنوان نمونه در جدول ۱۴ مشخص شده است. عملیات ضرب و جمع به صورت فازی و مطابق روابط ۷ و ۸ انجام می‌شود. در مورد جدول‌های ۱۵ و ۱۶ نیز به همین شکل عمل شده است.



شکل ۵- تابع عضویت امتیاز نهایی سه بحران مهم در تشکیل ریسک

برخی صنایع و اماکن مانند بیمارستان‌ها باید فاضلاب خروجی خود را قبل از تخلیه به شبکه جمع‌آوری، پیش تصفیه نمایند. اگر به صورت عمدی و با نیت مغرضانه و خرابکارانه، پیش تصفیه صورت نگیرد، یک تهدید انسانی رخ می‌دهد که ممکن است آلودگی شیمیایی بسیار زیادی را در شبکه پخش نموده و سلامت شهر را تهدید کند. احتمال وقوع مشکل تغییر در کیفیت فاضلاب صنایع و اماکن زیاد است و آثار آن می‌تواند عمیق و پایدار باشد. مشکل افزایش بیش از حد فاضلاب ورودی به شبکه نیز اغلب به واسطه دیرکرد در زمان اتمام پروژه‌ها صورت می‌گیرد و بعضاً باعث می‌شود تقاضای شهری بیش از مقدار در نظر گرفته شده در زمان طراحی باشد. نتایج به دست آمده از نظرسنجی‌ها، بیان‌کننده تهدیدات جدی در شبکه فاضلاب است.

جدول ۱۱- نمونه‌ای از ماتریس مقایسه زوجی معیارها

شاخص	پیامدهای مالی	پیامدهای جانی	ارزش عملکردی	امکان جایگزینی	کاهش خدمات رسانی
نتایج مالی	اهمیت برابر	(اهمیت مطلق) ^{-۱}	(اهمیت خیلی قوی) ^{-۱}	(اهمیت قوی) ^{-۱}	(اهمیت خیلی قوی) ^{-۱}
نتایج جانی		اهمیت برابر	اهمیت خیلی قوی	اهمیت مطلق	اهمیت قوی
ارزش عملکردی			اهمیت برابر	اهمیت برابر	اهمیت برابر
امکان جایگزینی				اهمیت برابر	(اهمیت کم) ^{-۱}
کاهش خدمات رسانی					اهمیت برابر

جدول ۱۲- شرح و توصیف شاخص‌های مربوط به تحلیل عواقب و پیامدها [۱]

نام معیار	تعریف و توصیف معیار
معیار امکان جایگزینی	در صورت بروز تهدید و آسیب دیدن جزء، امکان جایگزینی تا چه حد وجود دارد. (کاملاً وجود دارد، یا در کوتاه مدت فراهم می‌شود، یا در میان مدت یا در بلند مدت).
کاهش خدمات رسانی	در صورت بروز تهدید و آسیب دیدن جزء، میزان کاهش خدمات رسانی آن چند درصد خواهد بود. (بالای ۹۰ درصد، برابر قطع کامل سرویس‌دهی خواهد بود).
معیار عواقب اقتصادی	در صورت بروز تهدید و آسیب دیدن جزء، هزینه‌های سرمایه‌گذاری برآورد شده در چه حدی است. (کم است و به‌سادگی قابل پرداخت، یا در حد معقول و با اجرای برنامه‌ریزی‌ها قابل پرداخت است، یا زیاد است).
معیار عواقب جانی و انسانی	در صورت بروز تهدید و آسیب دیدن عضو، عواقب و تبعات جانی تا چه حد است. (قابل اغماض و منجر به بیماری‌ها و زخمی‌های بسیار کم، یا ایجاد بیماری‌های شدید، و یا فاجعه‌بار و منجر به مرگ افراد).
معیار ارزش عملکردی	در صورت بروز تهدید و آسیب دیدن جزء، کارکرد اصلی سیستم تا چه حد دچار اختلال می‌شود.

جدول ۱۳- نحوه امتیازدهی به معیار ارزش عملکردی (آستانه‌های معیار ارزش عملکردی)

تعریف و توصیف معیار	حدود زبانی و کلامی برابر (مورد استفاده در رتبه‌دهی با روش SAW فازی - بونیسون)	عدد فازی دوزنقه‌ای در روش بونیسون
در صورت بروز تهدید و آسیب دیدن جزء، کارکرد اصلی سیستم تا چه حد دچار اختلال می‌شود. (دچار اختلال نمی‌شود، یا در بلند مدت دچار اختلال می‌شود، یا در کوتاه مدت و یا اینکه کارکرد سیستم به‌کلی و بلافاصله قطع می‌شود).	بسیار کم	(0,0,0,2)
	کم	(0,1,0,2)
	تا حدودی کم	(2,2,2,2)
	مناسب	(.5,.5,2,2)
	تا حدودی زیاد	(.8,.8,2,2)
	زیاد	(.9,1,2,0)
بسیار زیاد	(1,1,2,0)	

جدول ۱۴- ماتریس تصمیم‌گیری برای تحلیل عواقب و اثرات بحران‌ها در اجزای شبکه فاضلاب محدوده طرح

نام بخش	ردیف تهدید	معیار نتایج مالی	معیار نتایج جانی	ارزش عملکردی	امکان جایگزینی	کاهش خدمات رسانی	امتیاز نهایی $\tilde{U}_i = \sum_{j=1}^N w_j \times \tilde{r}_{ij}$ N تعداد معیارهاست.
		(.035, .035, .015, .044)	(.550, .550, .255, .444)	(.177, .177, .084, .149)	(.072, .072, .038, .117)	(.165, .165, .081, .145)	
لوله‌ها و فاضلاب‌بروها	۱	(1,1,2,0)	(1,1,2,0)	(.8, .8, .2, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(.2, .2, .2, .2)	(.80, .80, .48, .86)*
	۲	(.9,1,2,0)	(.5, .5, .2, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(0, .1, 0, .2)	(.43, .45, .29, .54)
	۳	(0, .1, 0, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(.9, 1, .2, 0)	(.8, .8, .2, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(.57, .60, .38, .62)
	۴	(.2, .2, .2, .2)	(0, 0, 0, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(0, .1, 0, .2)	(0, 0, 0, .2)	(.10, .10, .68, .34)
	۵	(0, 0, 0, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(0, 0, 0, .2)	(.2, .2, .2, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(.37, .37, .26, .46)
بخش پمپاژ و سازه آن	۱	(1,1,2,0)	(.5, .5, .2, .2)	(.9, 1, .2, 0)	(.5, .5, .2, .2)	(.2, .2, .2, .2)	(.54, .56, .36, .80)
	۲	(.9, 1, .2, 0)	(.5, .5, .2, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(.2, .2, .2, .2)	(0, .1, 0, .2)	(.41, .43, .28, .74)
	۳	(0, .1, 0, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(.8, .8, .2, .2)	(.2, .2, .2, .2)	(.45, .46, .32, .80)
	۴	(.2, .2, .2, .2)	(0, 0, 0, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(0, .1, 0, .2)	(0, 0, 0, .2)	(.10, .10, .07, .47)
	۵	(0, 0, 0, .2)	(.2, .2, .2, .2)	(0, 0, 0, .2)	(0, 0, 0, .2)	(.2, .2, .2, .2)	(.14, .14, .14, .50)

$$*(.80, .80, .48, .86) = (.035, .035, .015, .044) \times (1, 1, 2, 0) \dot{+} (.55, .55, .255, .444) \times (1, 1, 2, 0) \dot{+} (.177, .177, .084, .149) \times (.8, .8, .2, .2) \dot{+} (.072, .072, .038, .117) \times (.5, .5, .2, .2) \dot{+} (.165, .165, .081, .145) \times (.2, .2, .2, .2)$$

جدول ۱۵- ماتریس تصمیم برای تحلیل آسیب‌پذیری بخش‌های مختلف شبکه فاضلاب غرب تهران ناشی از تهدیدات انسانی

نام بخش	نام تهدید	قابلیت شناسایی	امکان دسترسی	ضعف جزء	قابلیت بازسازی	امتیاز نهایی $\tilde{U}_i = \sum_{j=1}^N w_j \times \tilde{r}_{ij}$ N تعداد معیارهاست.
		(.070, .070, .026, .062)	(.080, .080, .032, .094)	(.595, .595, .318, .568)	(.255, .255, .147, .375)	
لوله‌ها و فاضلاب‌بروها	ویژه (شیمیایی)	(.8, .8, .2, .2)	(.9, 1, .2, 0)	(.5, .5, .2, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(.55, .56, .38, 1.0)
	ویژه (بیولوژیکی)	(.8, .8, .2, .2)	(.9, 1, .2, 0)	(.2, .2, .2, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(.37, 1.66, .28, 2.71)
	سخت (بمب‌گذاری)	(.5, .5, .2, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(.8, .8, .2, .2)	(.2, .2, .2, .2)	(.60, .60, .41, 1.03)
بخش پمپاژ و سازه آن	نرم (سایبری)	(.2, .2, .2, .2)	(0, .1, 0, .2)	(0, 0, 0, .2)	(0, 0, 0, .2)	(.01, .02, .01, .44)
	ویژه (شیمیایی)	(.5, .5, .2, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(.2, .2, .2, .2)	(0, .1, 0, .2)	(.19, .22, .17, .65)
	ویژه (بیولوژیکی)	(.5, .5, .2, .2)	(.5, .5, .2, .2)	(.2, .2, .2, .2)	(0, .1, 0, .2)	(.19, .22, .17, .65)
	سخت (بمب‌گذاری)	(.2, .2, .2, .2)	(.2, .2, .2, .2)	(1, 1, .2, 0)	(.2, .2, .2, .2)	(.68, .68, .45, .86)
	نرم (سایبری)	(.2, .2, .2, .2)	(.2, .2, .2, .2)	(0, .1, 0, .2)	(0, 0, 0, .2)	(.03, .09, .03, .51)

جدول ۱۶- ماتریس تصمیم برای تحلیل آسیب پذیری بخش های مختلف شبکه فاضلاب غرب تهران ناشی از مخاطرات غیرانسانی

نام بخش	نام بحران	شکست مکانیکی	شکست هیدرولیکی	شکست محیط زیستی	امتیاز نهایی
		(.158,.158, .077,.113)	(.076,.076, .028,.083)	(.766,.766, .272,.408)	$\tilde{U}_i = \sum_{j=1}^N w_j \times \tilde{F}_{ij}$
لوله ها و فاضلابروها	تغییرات در کیفیت فاضلاب صنایع و اماکن (تغییر در BOD ₅)	(.2,.2,.2,2)	(0,1,0,.2)	(1,1,2,0)	(.80,.81,.40,.52)
	افزایش بیش از حد ورودی فاضلاب	(0,1,0,2)	(1,1,2,0)	(2,2,2,2)	(.23,.24,.19,.46)
	کاهش بیش از حد فاضلاب ورودی	(0,0,0,2)	(.2,.2,.2,2)	(.2,.2,.2,2)	(.17,.17,.17,.42)
	نشست و از بین رفتن آب بندی	(.2,.2,.2,2)	(.5,.5,.2,2)	(.5,.5,.2,2)	(.45,.45,.29,.59)
	فوسودگی و خوردگی	(.8,.8,2,2)	(.2,.2,.2,2)	(.5,.5,2,2)	(.52,.52,.33,.63)
بخش پمپاژ و سازه آن	زلزله و انفجار صنعتی	(.9,1,2,0)	(.5,.5,2,2)	(.8,.8,2,2)	(.79,.81,.43,.75)
	تغییرات در کیفیت فاضلاب صنایع و اماکن (تغییر در BOD ₅)	(.2,.2,.2,2)	(0,1,0,2)	(.9,1,2,0)	(.72,.81,.37,.52)
	افزایش بیش از حد ورودی فاضلاب	(0,1,0,2)	(.8,.8,2,2)	(.2,2,2,2)	(.21,.23,.19,.48)
	کاهش بیش از حد فاضلاب ورودی	(0,1,0,2)	(.2,.2,.2,2)	(0,1,0,2)	(.02,.11,.02,.39)
	نشست و از بین رفتن آب بندی	(0,1,0,2)	(.2,.2,.2,2)	(.5,.5,2,2)	(.40,.41,.25,.55)
	فوسودگی و خوردگی	(.8,.8,2,2)	(.2,.2,.2,2)	(.5,5,2,2)	(.52,.52,.33,.63)
	زلزله و انفجار صنعتی	(.9,1,2,0)	(.2,.2,.2,2)	(.8,.8,2,2)	(.77,.79,.42,.72)

جدول ۱۷- تعیین ریسک بخش های مختلف شبکه جمع آوری فاضلاب و تعیین میزان ضرورت اعمال مدیریت ریسک در شرایط بحرانی

نام بخش	نام تهدید	ارزیابی تهدید T	شدت عواقب C	مقدار آسیب پذیری V	عدد فازی ریسک R	مقدار عددی ریسک	رویکرد به کار گرفته شده در برابر ریسک
لوله ها و فاضلابروها	آلاینده شیمیایی (مغرضانه)	(.32,.32,.21,.44)	(.80,.80,.48,.86)	(.55,.56,.38,1.0)	(.14,.14,.13,.18)	0.7040	مقابله و کاهش ریسک
	تغییر در کیفیت فاضلاب صنایع (غیرمغرضانه)	(.19,.21,.12,.20)	(.43,.45,.29,.54)	(.80,.81,.40,.52)	(.07,.08,.06,.47)	0.2045	انتقال ریسک
	افزایش بیش از حد ورودی فاضلاب	(.17,.17,.11,.24)	(.57,.60,.38,.62)	(.23,.24,.19,.46)	(.02,.02,.02,.33)	0.1258	پذیرش ریسک
	کاهش بیش از حد فاضلاب ورودی	(.04,.04,.04,.12)	(.10,.10,.68,.34)	(.17,.17,.17,.42)	(.0,0,0,04)	0.0139	پذیرش ریسک
	نشست و از بین رفتن آب بندی	(.05,.05,.03,.06)	(.37,.37,.26,.46)	(.45,.45,.29,.59)	(.01,.01,.01,.09)	0.0348	پذیرش ریسک
بخش پمپاژ و سازه آن	آلاینده شیمیایی (مغرضانه)	(.32,.32,.21,.44)	(.54,.56,.36,.80)	(.19,.22,.17,.65)	(.03,.04,.03,.86)	0.3101	انتقال ریسک
	تغییر در کیفیت فاضلاب صنایع (غیرمغرضانه)	(.19,.21,.12,.20)	(.41,.43,.28,.74)	(.72,.81,.37,.52)	(.06,.07,.05,.57)	0.2335	انتقال ریسک
	افزایش بیش از حد ورودی فاضلاب	(.17,.17,.11,.24)	(.45,.46,.32,.80)	(.21,.23,.19,.48)	(.02,.02,.02,.35)	0.1279	پذیرش ریسک
	کاهش بیش از حد فاضلاب ورودی	(.04,.04,.04,.12)	(.10,.10,.07,.47)	(.02,.11,.02,.39)	$(.06,4.4,06,45.5) \times 10^{-3}$	0.0153	پذیرش ریسک
	نشست و از بین رفتن آب بندی	(.05,.05,.03,.06)	(.14,.14,.14,.50)	(.40,.41,.25,.55)	(.0,0,0,07)	0.0237	پذیرش ریسک

۳-۴- ارزیابی آسیب پذیری اجزا در هر بحران

شاخص‌های ارزیابی آسیب‌پذیری بحران‌های طبیعی و فنی در جدول ۳ در سه گروه مکانیکی، هیدرولیکی و محیط زیستی تعریف شده‌اند. شاخص‌های لحاظ شده برای ارزیابی آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در برابر تهدیدات تروریستی و انسانی نیز مطابق روش FEMA عبارت بودند از: ۱- قابلیت شناسایی جزء، ۲- امکان دسترسی به جزء، ۳- ضعف جزء و ۴- قابلیت بازسازی و بازگشت به حالت عادی [۱]. بنابراین بدون تفسیر و مشابه بخش ارزیابی شدت عواقب، به ذکر ماتریس تصمیم‌گیری نهایی (شدت آسیب در هر بحران)، در قالب دو ماتریس در جدول‌های ۱۵ و ۱۶ بسنده شد.

۳-۵- ارزیابی و دسته‌بندی ریسک بحران‌ها، دسته‌بندی آن‌ها و ارائه رویکرد مقابله با هر دسته

پس از محاسبه امتیاز نهایی هر یک از پارامترهای ریسک مطابق رابطه ۱، از حاصل ضرب فازی این پارامترها مقدار فازی ریسک هر یک از بحران‌ها، بر روی هر یک از اعضای شبکه با کمک عملگر ضرب بونیسون محاسبه شد (جدول ۱۷). با استفاده از روش غیر فازی‌سازی ییگر، مقدار غیرفازی شده ریسک هر بحران در قسمت‌های مهم شبکه جمع‌آوری فاضلاب به صورت ستون هفتم جدول به دست می‌آید.

هرگونه تغییر در کیفیت فاضلاب، می‌تواند یک تهدید برای شبکه محسوب شود. به‌ویژه زمانی که این تغییرات به‌طور ناگهانی و با مقدار زیاد باشد، مانند هنگامی که تهدید خرابکارانه ورود آلاینده شیمیایی به شبکه رخ دهد که در این صورت باید رویکرد مدیریتی مناسب و به‌موقع در مقابل آن اعمال شود. رویکردهای به‌کارگرفته شده در برابر ریسک، غالباً به سه قسم اصلی کاهش و مقابله، انتقال ریسک و پذیرش ریسک تقسیم می‌شوند. اگر ریسک تهدید یا مخاطره از آستانه‌ای (تعریف شده با توجه به نیاز کارفرما)، فراتر باشد، رویکرد اتخاذ شده، تدوین سناریوهایی برای کاهش^۱ و مقابله با ریسک است. در این حالت باید بر مبنای نوع مخاطره، برنامه جامع مدیریت بحران ارائه شود؛ اما در صورتی که ریسک به‌دست آمده از حد آستانه خطر کمتر باشد، بسته به شدت آن و محدودیت‌های مالی می‌توان رویکردهای انتقال ریسک یا پذیرش ریسک را اعمال کرد. ریسک‌های کوچک به دلیل افزونگی موجود در شبکه قابل قبول و در حد معقول هستند. در مورد ریسک‌های کمی بزرگ‌تر، بسته به بودجه و امکانات موجود، با صلاحدید مدیران امر می‌توان این قبیل تهدیدات را به دسته اول منتقل کرده و

^۱ Mitigation

رویکردهای کاهش در برابر آن‌ها اتخاذ نمود و یا اینکه ریسک آن‌ها را پذیرفت.

مقدار آستانه خطر برای مقابله با ریسک یا پذیرش یا انتقال آن، می‌تواند بسته به شرایط برنامه‌ریزی و بودجه‌بندی و نیز سطح ریسک مورد قبول کارفرما تغییر کند. می‌توان حد آستانه را مقدار عددی خاصی مثل ۵۰ درصد، برابر عدد ریسک غیرفازی شده ۰/۵ در نظر گرفت، یا می‌توان مبنای کار را روی تعداد ریسک‌های مهم قرار داد، مثلاً ۵۰ درصد از ریسک را برای به‌کارگیری سناریوهای کاهش ریسک انتخاب کرد. در این مطالعه با استفاده از نظر کارشناسان درباره شدت اثرات، ریسک‌ها به سه گروه بحران‌های با ریسک کم ($R < 0.2$): رویکرد پذیرش ریسک؛ بحران‌های با ریسک متوسط ($0.2 < R < 0.5$): رویکرد انتقال ریسک و بحران‌های با ریسک زیاد ($R > 0.5$): مقابله و کاهش، تقسیم‌بندی و معرفی شدند. به این ترتیب از میان بحران‌های جدول ۱۷، با بهره‌گیری از نظرات کارشناسان شبکه فاضلاب شهر تهران مشاهده شد، بحران ورود آلاینده‌های شیمیایی (مغرضانه) در هر دو قسمت لوله‌ها و فاضلاب‌بروها و قسمت ایستگاه پمپاژ و بحران تغییر در کیفیت فاضلاب صنایع و اماکن (غیر مغرضانه) در قسمت ساختمان پمپاژ به‌عنوان خطرناک‌ترین بحران‌های محتمل در تهران به‌دست آمدند که در ستون آخر جدول هم مشاهده می‌شوند و می‌توان رویکرد کاهش ریسک را برای مقابله با آن‌ها اتخاذ کرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل برای تحلیل ریسک شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب در شرایط بحرانی ارائه شد. ریسک ناشی از تهدیدات و مخاطرات محتمل در شبکه با نظر کارشناسان زیربط از طریق روش تصمیم‌گیری چند معیاره فازی FSAW شناخته شد. تا نتایج گفتاری و مبهم نظرات موجود در پرسشنامه‌ها به مقادیر عددی قابل اعتماد تبدیل شود. یکی از نکات منحصر به فرد این پژوهش، تحلیل ریسک همزمان مخاطرات طبیعی، عملکردی زیرساخت مورد نظر در کنار تهدیدات انسانی و خرابکارانه است و دیگر آنکه برای ارزیابی شدت خسارات ناشی از خطرات و آسیب‌پذیری اجزای سیستم فاضلاب، معیارها و آستانه‌هایی توسط پژوهشگران تعریف شد. بسته به بزرگی ریسک به‌دست آمده در مورد هر تهدید، سناریوی مقابله با ریسک، انتقال ریسک یا پذیرش ریسک اتخاذ شد. شبکه فاضلاب منطقه تحت پوشش تصفیه‌خانه شهرک غرب به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد که در آن پس از اجرای مدل، بحران ورود آلاینده‌های شیمیایی به‌صورت مغرضانه و تغییرات شدید در کیفیت فاضلاب به‌عنوان پرمخاطره‌ترین بحران‌ها شناخته شدند. بنابراین رویکرد پیشنهادی در مقابل این

عموماً با داده‌های نشریات حاصل از تجربه این آژانس‌ها همخوانی دارد.

۵- قدردانی

به این وسیله از آقایان مهندس محسنی، مهندس آرش کریم‌زاده و خانم مهندس پرنیان روحانی از شرکت مه‌اب قدس، آقایان مهندس غرّا و مهندس شاکری از شرکت فاضلاب تهران، آقای مهندس نورمحمدی و خانم زهره قاسمیان از تصفیه‌خانه جنوب تهران و آقای مهندس جعفر محمودی از شرکت آب و فاضلاب تهران صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

بحران‌ها رویکرد مقابله و کاهش خطر ریسک بوده است. لازم به ذکر است که پس از مقایسه نتایج با پژوهش‌های مشابه که در آژانس‌های معتبری مثل وزارت امنیت داخلی آمریکا^۱ انجام شده است، مشخص شد که تعیین قسمت‌های آسیب‌پذیر شبکه و یافتن تهدیدات اساسی فراروی شبکه و نحوه برخورد با آن تهدیدات که با رویکرد تصمیم‌گیری چند شاخصه فازی و بهره‌برداری از نظر کارشناسان انجام پذیرفت، نتایجی قابل استناد و صحیح است که

^۱ Department of Homeland Security (DHS)

۶- مراجع

1. FEMA 452. (2005). *A how to guide to mitigate potential terrorist attacks against buildings*, Risk Management Series, Published by Federal Emergency Management Agency, USA.
2. Garvey, P.R. (2009). *Analytical methods for risk management: A system engineering perspective*, ISBN. 1-5848-8637-4, Taylor and Francis Group, Boca Rotan, FL.
3. Torres, J.M., Brumbelow, K., and Guikema, S.D. (2009). "Risk classification and uncertainty propagation for virtual water distribution systems." *J. of Reliability Engineering and System Safety*, 94(8), 1259-1273.
4. 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.
5. Demotier, S., Schon, W., Denoeux, T., and Odeh, K. (2003). "A new approach to assess risk in water treatment using the belief function framework." *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2, 1792-1797.
6. RAMCAP. (2006). *Risk analysis and management for critical asset protection*, ASME Innovative Technologies Institute, LLC, Version 2.0.
7. Teele, A. (1988). "Choice of multi-criteria decision making techniques for watershed management." PhD Dissertation, University of Arizona, USA.
8. Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-criteria decision making: A comparative study*, Kluwer Academic Publisher, Netherlands.
9. Zanakis, S.H., Solomon, A., Wishart, N., and Dublisch, S. (1998). "Multi-attribute decision making: A simulation comparison of selected methods." *European J. of Operational Research*, 107(3), 507-529.
10. Chang, D.Y. (1996). "Application of the extent analysis method on fuzzy AHP." *European J. of Operation Research*, 95(3), 649-665.
11. Deng, H. (1999). "Multi-criteria analysis with fuzzy pair wise comparison." *Proceedings of IEEE International Fuzzy Systems Conference*, Seoul, Korea, 726-731.
12. Aczel, J., and Saaty, T.L. (1983), "Procedure for synthesizing ratio judgements." *J. of Mathematical Psychology*, 27(1), 93-102.
13. Chi, H.K., Huery, R.Y., and Liao, L.H. (2008). "Applying fuzzy analytic hierarchy process to explore the university organizational performance in Taiwan." *J. of Human Resource and Adult Learning*, 4(1), 39-46.
14. Asgharpour, M.J. (2008). *Multi-criteria decision making*, 15th Ed., Tehran University Press, Tehran. (In Persian)
15. Yager, R.R. (1980). "On a general class of fuzzy connectives." *J. of Fuzzy Sets and Systems*, 4(3), 235-242.
16. Sylves, R., and Cumming, W.R. (2000). "FEMA's path to homeland security: 1979-2003." *J. of Homeland Security and Emergency Management*, 1(2), doi: 10.2202/1547-7355.1029.
17. Azimi, A.S., Taklifi, A., Riazati, E., and Mesr Zadeh, A. (1390). "Increasing the capacity of existing municipal wastewater treatment plant using a MBBR (case study: Shahrak-Gharb wastewater treatment network)." *15th National Conference and Exhibition of Environmental Engineering*, Tehran. (In Persian)
18. Saaty, T.L. (2008). "Decision making with the analytic hierarchy process." *Int. J. of Services Sciences*, 1(1), 83-98.