Risk Assessment of Water Treatment Plants Using Fuzzy Fault Tree Analysis (Case Study: Jalaliyeh Water Treatment Plant)

M. Tabesh[1], A. Roozbahani[2],F. Hadigol[3]

1. Prof., Center of Excellence on Engineeing and Management of Civil Infrastructure, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Assist. Prof., Department of Irrigation and Drianage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran (Corresponding Author) roozbahany@ut.ac.ir
3. MSc of Civil-Environmental Enginering, School of Civil Engineering of Engineering, University of Tehran, Tehran

(Received Nov. 10, 2016 Accepted March 15, 2017)

To cite this article :
Tabesh, M., Roozbahani, A., Hadigol, F., 2018, "Risk Assessment of Water Treatment Plants Using Fuzzy Fault Tree Analysis (Case Study: Jalaliyeh Water Treatment Plant)." Journal of Water and Wastewater, 29 (4), 132-144. Doi: 10.22093/wwj. 2017.67314.2273 (In Persian)

Abstract

In this research, Fault Tree Analysis (FTA) with fuzzy and crisp approaches were used to assess the risk associated with the performance of water treatment plants. The fuzzy logic was used to consider the uncertainties in expert opinions and the nature of threats. This modelling approach was implemented as a case study in Jalaliyeh water treatment plant in Tehran. One undesirable event in such structure was improper water quantity and quality. The results of this case study showed that probability of treatment plant failure under fuzzy and non-fuzzy methods are 19% and 10%, respectively. The risk treatment plant failure was found to be within the low to medium range. For risk assessment, multiple components were found to influence the failure of treatment plants. Our evalutation showed that the following items were ranked as highest to lowest to influence the treatment plant failure: inappropriate tank design, power equipment failure, failure of transmission line, and inadequate repair and maintenance of the pumps.

Keywords: Fuzzy Fault Tree, Risk Analysis, Vulnerability, Water Treatment Plant.

ارزیابی خطرپذیری تصفیه‌خانه‌های آب با استفاده از تحلیل درخت خطای فازی (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه جلالیه تهران)

مسعود تابش[۱]، عباس روزبهانی[۲]، فرهاد هادیگل[۳]

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیر ساخت‌های عمرانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۲- استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
(نویسنده مسئول) roozbahany@ut.ac.ir
۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران، محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(دریافت ۹۵/۸/۲۰ پذیرش ۹۵/۱۲/۲۵)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
تابش، م.، روزبهانی، ع، هادیگل، ف.، ۱۳۹۷، "ارزیابی خطرپذیری تصفیه‌خانه‌های آب با استفاده از تحلیل درخت خطای فازی (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه جلالیه تهران)" مجله آب و فاضلاب، ۲۹ (۴)، ۱۴۴-۱۳۲. Doi: 10.22093/wwj.2017.67314.2273

چکیده

وجود یک رویکرد جامع در ارزیابی عملکرد تصفیه‌خانه‌های آب و کاهش آسیب‌پذیری آنها، می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های ناشی از عملکرد نامناسب در شرایط بحرانی و تمرکز بر روی مهم‌ترین نقاط آسیب‌پذیر و کاهش آسیب‌پذیری آنها شود و از این طریق هزینه مؤثر بودجه‌ها در برنامه‌های بهسازی صرف می‌شود. در این پژوهش روش تحلیل ریسک مشهور درخت خطا با دو رویکرد ساده و فازی برای ارزیابی ریسک تصفیه‌خانه آب استفاده شد و منطق فازی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در نظرات کارشناسی و ماهیت خطرات تهدید کننده به‌کار گرفته شد. این مدل در قالب یک مطالعه موردی در تصفیه‌خانه جلالیه تهران ارائه می‌شود. رویداد نامطلوب در این ساختار، کمیت و کیفیت نامناسب آب بود. نتایج پژوهش نشان داد که عملکرد تصفیه‌خانه در رویکرد فازی با احتمال ۱۹ درصد و در حالت غیر فازی حدود ۱۰ درصد با شکست مواجه می‌شود که این مقدار ریسک در بازه کم تا متوسط به وجود می‌آید. عوامل مختلفی موجب تهدید عملکرد و راندمان تصفیه می‌شود. با رتبه‌بندی رویدادهای پایه مشخص شد تهدیداتی از جمله طراحی نامناسب مخزن، خرابی تجهیزات برق‌رسانی، شکست لوله انتقال و تعمیر و نگهداری نامناسب پمپ‌ها، بیشترین سهم را در رویکرد و عملکرد تصفیه‌خانه دارند.

واژه‌های کلیدی: درخت خطای فازی، تحلیل ریسک، آسیب‌پذیری، تصفیه‌خانه آب

۱- مقدمه

سامانه‌های آبرسانی از جمله زیر ساخت‌های اساسی محسوب می‌شوند که نقش اصلی را در تأمین آب با کمیت و کیفیت مناسب بر عهده دارند. هر گونه اخلال در عملکرد آنها می‌تواند موجب عدم دسترسی بخش زیادی از جامعه به آب سالم شود که این مسئله باعث ایجاد مشکلات بهداشتی و اثرات سوء روی سلامت افراد جامعه می‌شود. از اجزای اصلی سامانه‌های آبرسانی تصفیه‌خانه‌های آب هستند. تهدیدات یک تصفیه‌خانه آب شامل منشأ انسانی از جمله حملات تروریستی و حملات نظامی؛ دارای منشأ طبیعی از قبیل زلزله، سیل و خشکسالی و یا حتی دارای منشأ عملکردی مانند خطای مدیریتی، عدم وجود طراحی صحیح و کنترل منظم اجزای یک تصفیه‌خانه آب است. عدم توجه کافی به عملکرد صحیح قسمت‌های مختلف تصفیه‌خانه و همچنین بی‌توجهی به شناخت نقاط آسیب‌پذیر، می‌تواند سلامت افراد جامعه را تهدید کرده و هزینه‌های درمانی را بالا ببرد. با توجه به این عوامل، بررسی وضعیت فعلی تصفیه‌خانه‌ها و نیز پیش‌بینی و بررسی شرایط اضطراری و بحرانی محتمل در این سیستم‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به عوامل یاد شده، بررسی وضعیت سیستم تصفیه‌خانه آب برای مواجهه با شرایط اضطراری و بحرانی ضروری است.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.67314.2273

تعاریف مختلفی از تحلیل ریسک در حوزه‌های مختلف علمی و مهندسی ارائه شده است. در مهم‌ترین تعریف، ریسک به‌عنوان ترکیبی از احتمال خطر، شدت اثرات ناشی از خطر و آسیب‌پذیری اجزا معرفی می‌شود که مبنای بسیاری از استانداردهای مدیریت ریسک مانند آیین‌نامه‌های FEMA[1] و یا RAMCAP[2] است (FEMA-452, 2005).

در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی برای ارزیابی و تحلیل ریسک سیستم‌های آب شهری شامل تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب به روش‌های گوناگون و از جمله روش درخت خطا انجام شده است که به برخی از آنها اشاره می‌شود.

کلی و آلیسون در سال ۱۹۸۱ به‌کمک روش درخت خطا به بررسی رویداد کلر باقیمانده در خروجی تصفیه‌خانه پرداختند؛ شکست این رویداد باعث تخطی از استانداردهای موجود برای کلر باقیمانده در خروجی می‌شود (Kelley and Allison, 1981).

در سال ۱۹۹۳ در پژوهشی قابلیت اطمینان سیستم‌های تأمین آب شهری را با در نظر گرفتن شاخص‌های اطمینان‌پذیری تصفیه‌خانه‌های آب مورد بررسی قرار گرفت و ریسک شکست عملکرد سیستم تصفیه‌خانه در تأمین کمّی و کیفی آب محاسبه شد (Fujiwara and Chen, 1993).

طاهریون و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از رویکرد درخت خطای فازی به تحلیل ریسک کیفیت نامطلوب خروجی تصفیه‌خانه‌های ۳ و ۴ تهرانپارس پرداختند و اطمینان‌پذیری آن را محاسبه نمودند (Taheriyoun et al., 2014).

در پژوهشی در سال ۲۰۰۶ از چارچوبی مبتنی بر آنالیز سلسله مراتبی برای مدیریت ریسک تصفیه آب آشامیدنی استفاده شد. خروجی نهایی این الگوریتم منجر به انتخاب فناوری تصفیه و گندزدایی شد که ضمن پایین بودن هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری، کمترین ریسک را به لحاظ تولید محصولات جانبی خطرناک و مضر برای سلامتی انسان نشان داد (Chowdhury and Husain, 2006).

صدیق و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی ریسک شکست‌های موجود در شبکه توزیع آب شهری با استفاده از آنالیز درخت خطا پرداختند (Sadiq et al., 2008).

شکست‌های ممکن کیفیت آب در شبکه توزیع آب شهری شامل نفوذ آلودگی، شکست در تصفیه‌خانه، آب‌شویی مواد شیمیایی با خوردگی اجزا سیستم و نفوذ مواد آلی به لوله‌های پلاستیکی است.

رحمان و زاید در سال ۲۰۰۹ روشی را برای محاسبه شاخص وضعیت تصفیه‌خانه‌های آب شرب شهرها با در نظر گرفتن پارامترهای اقتصادی، فیزیکی، محیط‌زیستی و عملکردی و با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره ارائه نمودند (Rahman and Zayed, 2009).

توکلی‌فر در سال ۲۰۰۸ یک الگوریتم برای ارزیابی و افزایش آمادگی تصفیه‌خانه‌های آب شهری در برابر شرایط بحرانی و حوادث به‌کار گرفت که در آن از رویکرد ساده ماتریس ریسک برای تخصیص احتمالات و سطوح خسارات وارده از جانب هر ریسک استفاده شده است (Tavakkolifar, 2008).

در پژوهشی در سال ۲۰۱۰ به معرفی خطرات فنی و بهره‌برداری تصفیه‌خانه فاضلاب و تحلیل ریسک آنها با استفاده از درخت خطا پرداخته شد. هدف اصلی این پژوهش، ارائه فاکتورهای فنی و بهره‌برداری مؤثر بر حذف کیست‌های کریپتوسپوریدیم به‌وسیله فناوری‌های مختلف تصفیه فیزیکی و شیمیایی بوده است (Beauchamp et al., 2010).

جیان و همکاران در سال ۲۰۱۱ از روش درخت خطای فازی برای مشخص کردن پتانسیل آلودگی آب در منطقه اقتصادی خلیج بیبو در چین استفاده کردند (Jian et al., 2011).

روزبهانی و همکاران در سال ۲۰۱۳ مدل تحلیل ریسک سلسله مراتبی فازی برای در نظر گرفتن پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های حاکم بر سیستم‌های آب شهری ارائه نمودند (Roozbahani et al., 2013).

گام‌های مختلف این مدل عبارت بود از شناسایی اجزای سیستم، شناسایی خطرات، دریافت اطلاعات مربوط به خطرات مختلف شامل احتمال وقوع، شدت وقوع و آسیب‌پذیری هر بخش از سیستم و نهایتاً ترکیب ریسک بخش‌های مختلف و محاسبه ریسک نهایی سیستم و بخش‌های مختلف.

عسگریان و همکاران در سال ۲۰۱۵ 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 نمودند (Asgaraian et al.,

[1] Federal Emergency Management Agency
[2] Risk Analysis and Management for Critical Asset Protection

(2015). 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.

طاهریون و مرادی‌نژاد در سال ۲۰۱۵ ارزیابی قابلیت اطمینان مربوط به تصفیه‌خانه شهرک غرب را توسط روش درخت خطا بررسی کردند. رویداد رأس، تخطی BOD پساب خروجی از میزان استاندارد و رویدادهای پایه مواردی از قبیل خطای اپراتور، آسیب فیزیکی و مشکلات مربوط به طراحی بود (Taheriyoun and Moradinejad, 2015).

عنبری و تابش در سال ۲۰۱۶ مدلی برای تحلیل ریسک شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از شبکه‌های بیزین ارائه کردند. در این مدل، میزان ریسک با ترکیب احتمال شکست و پیامدهای شکست محاسبه شد و شکست‌ها و آسیب‌های ممکن در شبکه‌ها به دو دسته شکست‌های سازه‌ای و شکست‌های هیدرولیکی تقسیم شدند (Anbari and Tabesh, 2016).

در بسیاری از پژوهش‌های قبلی، ریسک کمیت و کیفیت نامناسب آب در برابر تهدیدات به‌صورت هم زمان با لحاظ عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته نشده است. در پژوهش حاضر برای لحاظ نمودن این موارد، روش درخت خطا با دو رویکرد فازی و غیرفازی برای ارزیابی خطرپذیری تصفیه‌خانه آب و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها ارائه شد. در این رویکرد بر مبنای نظرات کارشناسان مختلف، احتمال شکست رویدادهای پایه محاسبه شد و با استفاده از ساختار سلسله مراتبی در درخت خطا، رویداد نامطلوب رأس که کمیت و کیفیت نامناسب آب آشامیدنی است، به‌دست آمد. همچنین عوامل و تهدیدات با توجه به سهم آنها در وقوع رویداد رأس، رتبه‌بندی شدند.

۲- روش‌شناسی

در این پژوهش برای ارزیابی و تحلیل ریسک تصفیه‌خانه آب از روش درخت خطا با دو رویکرد فازی و ساده استفاده شد که شامل این مراحل است: انتخاب بخشی از سیستم، انتخاب یک رویداد نامطلوب، رسم درخت خطا، تعیین احتمال شکست رویداد پایه، تحلیل کمی رویداد رأس، تعیین رویدادهای پایه با سهم بالا در وقوع رویداد رأس.

۲-۱- انتخاب بخشی از سیستم

در این مرحله محدوده‌ای از سیستم در حال بهره‌برداری که نیاز به تحلیل ریسک دارد مشخص می‌شود. این محدوده بر اساس معیارهایی چون سابقه بروز اشکال، نیاز به کاهش شدت بروز رویدادهای مخاطره‌آمیز، امکانات فنی و یا حتی ارزیابی قابلیت اطمینان بخش‌هایی از سیستم که زمان زیادی از ایجاد آن نمی‌گذرد، انتخاب می‌شود.

۲-۲- انتخاب یک رویداد نامطلوب

در این بخش یک رویداد نامطلوب که احتمال بالایی برای وقوع داشته و در صورت وقوع می‌تواند مخاطرات بسیاری را به وجود آورد انتخاب می‌شود و رویداد رأس نامیده می‌شود. در این پژوهش رویداد نامطلوب کمیت نامناسب و کیفیت بد شامل کدورت بالا و گندزدایی نامناسب آب خروجی از تصفیه‌خانه بود.

۲-۳- رسم درخت خطا

در این مرحله با استفاده از دروازه‌های منطقی و مجموعه‌ای از قواعد پایه، درخت خطای مرتبط با رویداد رأس تعیین شده در مرحله قبل، رسم می‌شود. به این منظور در ابتدا رویدادهایی که بی‌واسطه و بلافاصله منجر به رخداد رویداد رأس می‌شوند، تحت عنوان رویدادهای فرعی، فهرست شده و در ساختار درخت قرار می‌گیرند. سپس روند یافتن علل رویدادها تا رسیدن به رویدادهای پایه ادامه پیدا می‌کنند. رویدادهای پایه می‌توانند ترکیبی از عوامل انسانی، طبیعی و یا عملکردی (مدیریتی) در ساختار یک درخت خطا باشند.

۲-۴- تعیین احتمال شکست رویدادهای پایه

برای تعیین احتمال شکست رویدادهای پایه به‌دلیل آنکه امکان دارد سابقه اطلاعات نرخ شکست ناقص بوده و یا اصلاً وجود نداشته باشد، به ناچار باید از نظرات کارشناسان و طراحان استفاده کرد. به‌دلیل وجود عدم قطعیت‌ها در نظرات کارشناسی و ماهیت خطرات تهدیدکننده، رویکرد مورد استفاده در این پژوهش استفاده از منطق فازی در ساختار تحلیل درخت خطا و استفاده از آن برای تعریف احتمال شکست رویدادهای پایه است. در این رویکرد روش کار به این صورت است که به جای تخصیص یک مقدار منحصر به فرد به احتمال شکست رویداد پایه، این مقادیر به‌صورت مجموعه‌ای فازی

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.67314.2273

تعریف می‌شوند. راه‌های گوناگونی برای تولید این مجموعه‌های فازی وجود دارد اما روشی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از متغیرهای زبانی است که به‌وسیله پرسش‌نامه گرفته می‌شود. در این پژوهش از مجموعه‌های فازی مثلثی و ذوزنقه‌ای استفاده می‌شود که هر مجموعه فازی، معرف وضعیت زبانی از احتمال شکست در مورد یک رویداد پایه است که در شکل ۱ مشاهده می‌شود (Yuhua and Datao, 2005).

در تحلیل درخت خطا در حالت غیر فازی، مجموعه‌های فازی بر اساس رویکرد ارائه شده توسط یاگر، غیر فازی‌سازی می‌شوند که در واقع همان مرکز سطح مجموعه‌های فازی است که برای بیان احتمال شکست به‌صورت یک عدد غیر فازی استفاده می‌شود (Yager, 1980).

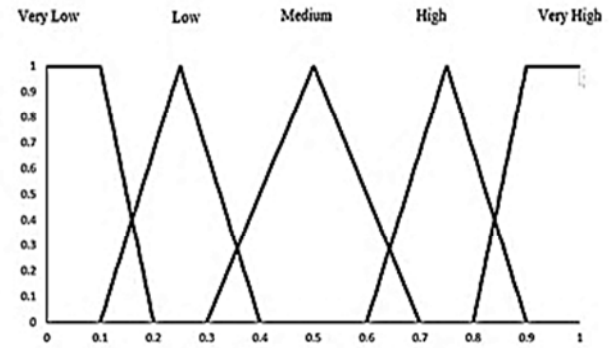

Fig. 1. Fuzzy expression for probability of failure

شکل ۱- بیان زبانی احتمال شکست به صورت توابع فازی

$$Y(\tilde{A})=\frac{\int_0^1 g(x)\mu_{A(x)}dx}{\int_0^1 \mu_{A(x)}dx} \qquad (۱)$$

که مقدار $g(x)$ تابع فازی و $\mu_{A(x)}$ درجه عضویت آن است. همچنین در جدول ۱ مقادیر غیر فازی‌شده هر مجموعه فازی مشاهده می‌شود.

جدول ۱- مرکز سطح مجموعه‌های فازی

Table 1. Center of fuzzy sets

Very Low	0.07
Low	0.25
Moderate	0.5
High	0.75
Very High	0.93

به‌دلیل آنکه پرسش‌شوندگان درباره یک رویداد پایه، نظراتی متفاوت ارائه می‌دهند، کل نظرات باید به یک مجموعه فازی تبدیل شود. به این منظور از رویکرد ارائه شده توسط تیاجی و همکاران استفاده می‌شود. اگر فرض شود که مجموعه‌های فازی به‌صورت $\tilde{A}_i=(a_i-c_i,a_i,a_i',a_i'+c_i)$ توسط کارشناسان به یک رویداد پایه نسبت داده شده است، بهترین مجموعه فازی که با تمام اعداد ارائه شده همپوشانی مطلوبی داشته باشد، توسط معادلات زیر بیان می‌شود (Tyagi et al., 2011)

(۲)
$$\tilde{B}=(b-d,b,b',b'+d)$$

$$d=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}c_i \qquad (۳)$$

$$b=\frac{\min a_i+\max a_i}{2},\quad 1\le i\le n \qquad (۴)$$

$$b'=\frac{\min a_i'+\max a_i'}{2},\quad 1\le i\le n \qquad (۵)$$

که $a_i'+c_i$ و a_i-c_i به‌ترتیب بیان کننده حد بالا و پایین مجموعه‌های فازی تخصیصی از طرف هر کارشناس، a_i و a_i' مقادیری که در مجموعه فازی اختصاص داده شده دارای درجه عضویت یک باشند و n تعداد کل کارشناسان است. بدیهی است اگر عبارت فازی بیانی به شکل مثلثی باشد، a_i و a_i' با هم برابر خواهند بود. $\tilde{B}$ نیز عدد فازی حاصل از تلفیق نظرات کل کارشناسان برای هر رویداد پایه است. لازم به ذکر است در رویکرد غیر فازی، نظرات کارشناسان با استفاده از میانگین حسابی، تجمیع می‌شوند.

۲-۵- تحلیل کمّی رویداد رأس

رویدادهای پایه به وسیله دروازه‌های منطقی AND و OR به رویدادهای میانی متصل می‌شوند تا به رویداد رأس ختم شود. برای نشان دادن دروازه "یا" از نماد ∩ و برای نشان دادن دروازه "و"

از نماد استفاده می‌شود. دروازه‌ها در حالت غیر فازی بر اساس روابط زیر بیان می‌شوند

دروازه AND

$$P=\prod_{i=1}^{n}P_i \qquad (۶)$$

دروازه OR

$$P=1-\prod_{i=1}^{n}(1-P_i) \qquad (۷)$$

که P_i مقدار احتمال شکست رویداد پایه i ام است.

در حالت فازی روابط میان دروازه‌های منطقی بر اساس روابط زیر و با استفاده از روش برش‌های آلفا بیان می‌شود (Ferdous et al., 2011).

لازم به‌ذکر است هر عدد فازی می‌تواند به راحتی به‌وسیله مجموعه برش‌های α نشان داده شوند و با هر مقدار از α یک بازه حاصل خواهد شد. به این ترتیب احتمال شکست یک رویداد پایه می‌تواند به شکل بازه $\left[P_L^{\alpha},P_R^{\alpha}\right]$ نمایش داده شود که نشان دهنده مرز راست و چپ برش آلفا از مجموعه فازی مربوط به احتمال محاسبه شده است

دروازه AND

$$P_L^a=\prod_{i=1}^{n}P_{iL}^{\alpha};\quad P_R^a=\prod_{i=1}^{n}P_{iR}^{\alpha} \qquad (۸)$$

دروازه OR

$$P_L^a=1-\prod_{i=1}^{n}(1-P_{iL}^{\alpha});\quad P_R^a=1-\prod_{i=1}^{n}(1-P_{iR}^{\alpha}) \qquad (۹)$$

که در این معادلات

P_{iL}^{α} و P_{iR}^{α} به‌ترتیب برش آلفای حد چپ و راست احتمال شکست رویداد پایه i ام و همچنین P_L^a و P_R^a به‌ترتیب مقدار احتمال در حد چپ و راست مجموعه فازی در برش آلفای مورد نظر برای رویداد رأس می‌باشند.

۲-۶- تعیین رویدادهای پایه با سهم بالا در وقوع رویداد رأس

اگر احتمال شکست رویداد رأس که از قسمت قبلی به‌دست آمد رضایت‌بخش باشد، کار تحلیل درخت خطا تمام شده است، اما اگر رضایت‌بخش نباشد، نیاز به کاهش احتمال شکست رویداد رأس و انجام اقدامات اصلاحی است که در واقع سیستم وارد فاز مدیریت ریسک خواهد شد. یکی از ابزارهای مفید در این زمینه، اندازه‌گیری اهمیت رویدادهای پایه و یا حتی رویدادهای میانی است که موجب افزایش قابلیت اطمینان سیستم، هزینه‌کرد مؤثر بودجه‌ها در اقدامات پیشگیرانه و کمک به تدوین دستورالعملی مناسب برای پروسه‌های تعمیر و نگهداری است.

در این پژوهش از شاخص اهمیت فازی FIM[1] استفاده شد که توسط معادلات زیر بیان می‌شود (Suresh, 1996)

$$Q=f(q_1,q_2,\ldots,q_i,\ldots,q_n) \qquad (۱۰)$$

$$FIM=ED\left[Q_{qi=0},Q_{qi=1}\right]=\sum_{\alpha_i=1,2,\ldots,n}\left(\left(Q_{qi=1}^{L}-Q_{q_i=0}^{L}\right)^2+\left(Q_{q_i=1}^{U}-Q_{q_i=0}^{U}\right)^2\right)^{0.5}_{\alpha_i} \qquad (۱۱)$$

که

$Q_{qi=1}$ تابع فازی احتمال شکست رویداد رأس زمانی است که شکست رویداد پایه i ام به طور کامل رخ دهد، $Q_{qi=0}$ تابع فازی احتمال شکست رویداد رأس زمانی است که شکست رویداد پایه iام اصلاً رخ ندهد و $Q_{qi=1}^{L}$ و $Q_{qi=1}^{U}$ به ترتیب حد پایین و بالای مجموعه فازی احتمال شکست رویداد رأس در هر برش آلفا در حالتی که شکست رویداد i ام به‌طور کامل رخ دهد، است.

به‌طور مشابه $Q_{qi=1}^{L}$ و $Q_{qi=1}^{U}$ نیز به‌ترتیب حد پایین و بالای مجموعه فازی احتمال شکست رویداد راس در هر برش آلفا در حالتی است که شکست رویداد iام رخ ندهد. به این ترتیب با محاسبه FIM تمام رویدادهای پایه آنها از لحاظ سهمی که بر شکست رویداد رأس دارند، رتبه‌بندی می‌شوند. بدیهی است که هرچه FIM یک رویداد پایه بزرگ‌تر باشد، سهم آن در شکست رویداد رأس بیشتر خواهد بود. برای رتبه‌بندی رویدادهای پایه در صورتی که احتمال شکست آنها اعدادی غیر فازی باشند، از شاخص بیرنبام (BI[2]) استفاده می‌شود که توسط معادله ۱۲ تعریف می‌شود (Pan and Tai, 1988)

[1] Fuzzy Importance Measure
[2] Birnbaum Index

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.67314.2273

$$BI=Q_{qi=1}-Q_{qi=0} \quad (۱۲)$$

که $Q_{qi=1}$ تابع فازی احتمال شکست رویداد رأس زمانی است که شکست رویداد پایه i ام به‌طور کامل رخ دهد و $Q_{qi=0}$ تابع فازی احتمال شکست رویداد رأس زمانی است که شکست رویداد پایه i ام اصلا رخ ندهد. هر چقدر مقدار شاخص بزرگ‌تر باشد، سهم رویداد پایه در وقوع رویداد رأس بیشتر است.

۳- مطالعه موردی: تصفیه‌خانه جلالیه تهران

تصفیه‌خانه جلالیه قدیمی‌ترین تصفیه‌خانه تهران است. منبع تأمین آب این تصفیه‌خانه رودخانه کرج در پایین دست سد امیرکبیر، مجاور روستای بیلقان است. آب خام بعد از آشغال‌گیری اولیه و انجام کلرزنی مقدماتی در این آبگیر توسط دو خط لوله فولادی به قطر ۱۰۰۰ میلی‌متر و به‌طول ۴۰ کیلومتر به‌صورت ثقلی به تصفیه‌خانه انتقال می‌یابد. مراحل اصلی تصفیه‌خانه عبارت‌اند از: ۱- آشغال‌گیری ۲- تزریق ماده منعقدکننده ۳- تزریق ماده کمک‌منعقدکننده (شیر آهک) ۴- زلال‌سازی ۵- فیلتراسیون ۶- کلرزنی. لازم به ذکر است که نوع زلال‌ساز به کار رفته در تصفیه‌خانه از نوع اکسیلاتور است. به این صورت که قسمتی از لجن‌های ته‌نشین شده در اثر چرخش آب که ناشی از حرکت همزن است به ناحیه اختلاط و انعقاد راه یافته و در فعل و انفعال مربوط به لخته‌سازی شرکت می‌کند. در واقع لخته‌سازی و ته‌نشینی مواد در این حوض‌ها صورت می‌گیرد. عمده مشخصات تصفیه‌خانه و شماتیک فرایندها و عملیات واحد تصفیه‌خانه در شکل ۲ ارائه شده است.

برای ارزیابی ریسک تصفیه‌خانه با مشورت با کارشناسان درخت خطای تصفیه‌خانه تهیه شد و ۳۳ تهدید به عنوان رویدادهای پایه درخت خطا مشخص شدند. این خطاها شامل خطای عملکردی و طبیعی بودند که خطاهای عملکردی شامل طراحی نامناسب مخزن لاله، خرابی تجهیزات برق‌رسانی، شکست لوله انتقال، تعمیر و نگهداری نامناسب پمپ ها، خطا در سیستم استارت آپ، عدم تعمیر به موقع نازل‌ها، طراحی نامناسب فیلتر، عدم تمیز نمودن به موقع آشغال گیرها، شکست فیزیکی تجهیزات لوله‌های انتقال، شکست تجهیزات برداشت آب در محل آبگیر، مشکلات طراحی واحد اکسیلاتور، کاهش ظرفیت حوضچه ها به دلیل خرابی در تجهیزات دفع لجن، اختلاط نامناسب، خراب شدن شیر کنترل جریان ورودی به تصفیه‌خانه، طراحی نامناسب منعقد کننده، خطای اپراتور، خطا در اندازه گیری دستگاه دبی سنج، زمان کارکرد بالای صافی، گندزدایی نامناسب، پیش کلرزنی نامناسب، بهره برداری به هنگام گرفتگی، خطا در اندازه‌گیری دبی سنج جریان، طراحی نامناسب، شکست تجهیزات کلرزنی (کلریناتور)، خطای اپراتور، بالا بودن ارتفاع ماسه، طراحی نامناسب بلوئر(هوادهی بد)، دبی بالاتر از ظرفیت و خطاهای طبیعی شامل خشکسالی، افزایش بار ورودی در مواقع بحرانی، افزایش بار کیفی (کدورت)، هدایت بالای آب خام و دما بودند. برای دریافت اطلاعات مربوط به احتمال شکست هر رویداد پایه از ۹ کارشناس و بهره‌بردار این تصفیه‌خانه نظرخواهی شد که پس از تجمیع نظرات با استفاده از روابط ۲ تا ۵ در نهایت برای هر رویداد پایه یک مجموعه فازی تعریف شد و با استفاده از

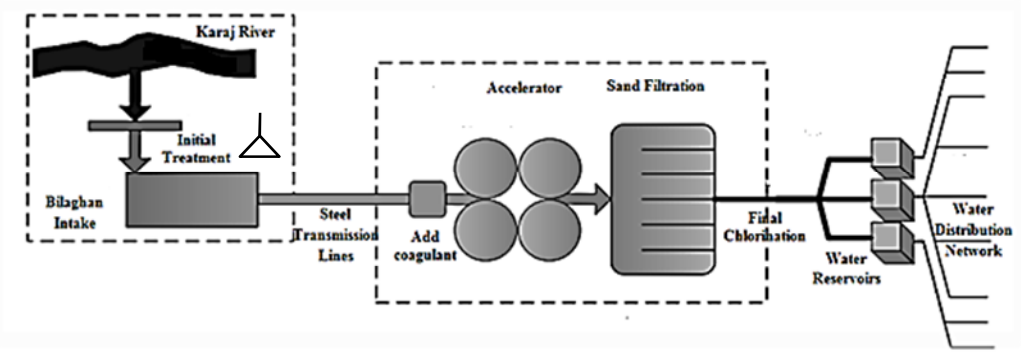

Fig. 2. Schematic of Jalaliyeh water treatment plant (Tavakolifar, 2008)

شکل ۲- شماتیک عملیات و واحدهای تصفیه خانه جلالیه (**Tavakolifar 2008**)

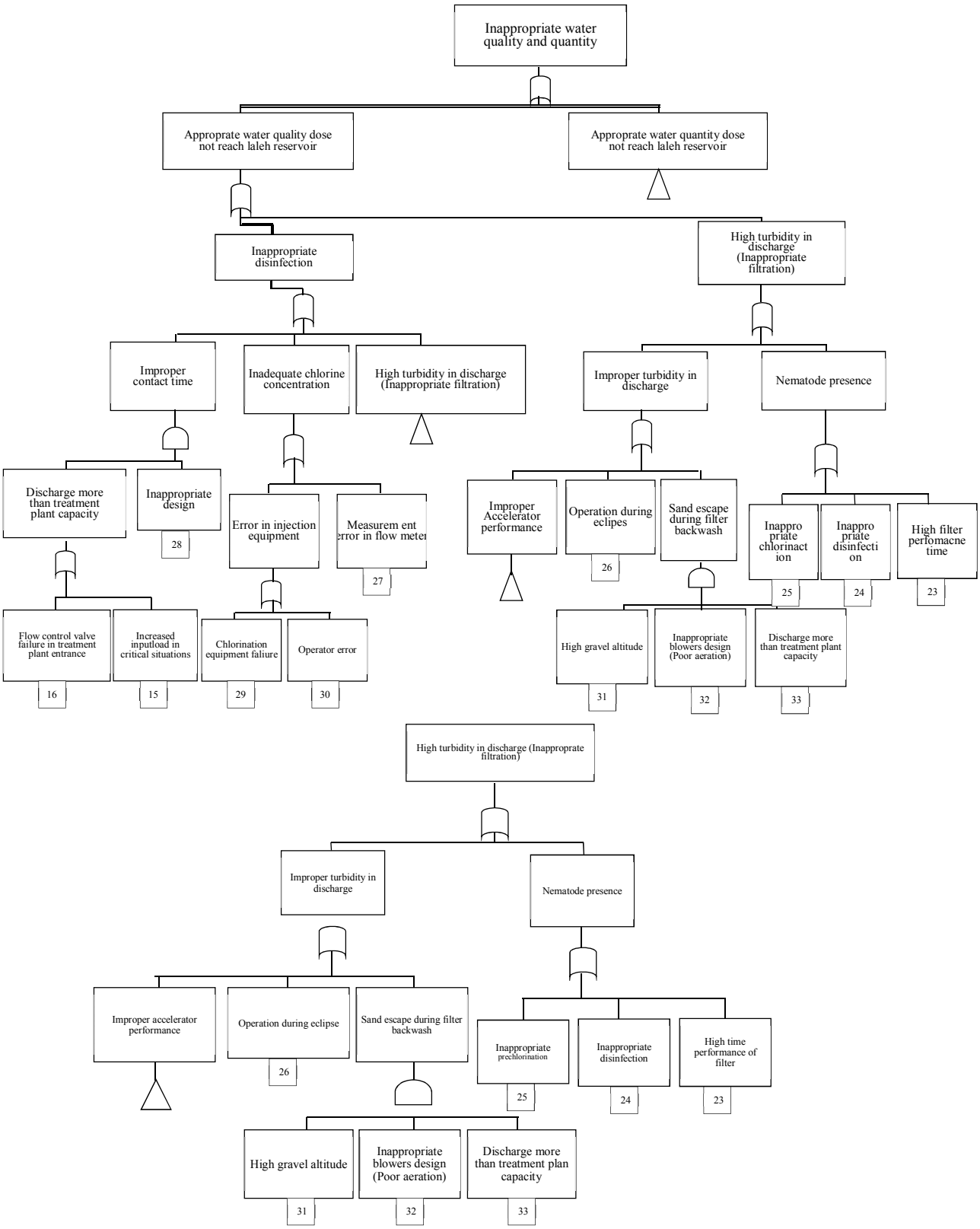

Fig. 3. Jalaliyeh water treatment plant's fault tree- water quality

شکل ۳- درخت خطای تصفیه‌خانه جلالیه –کیفیت آب

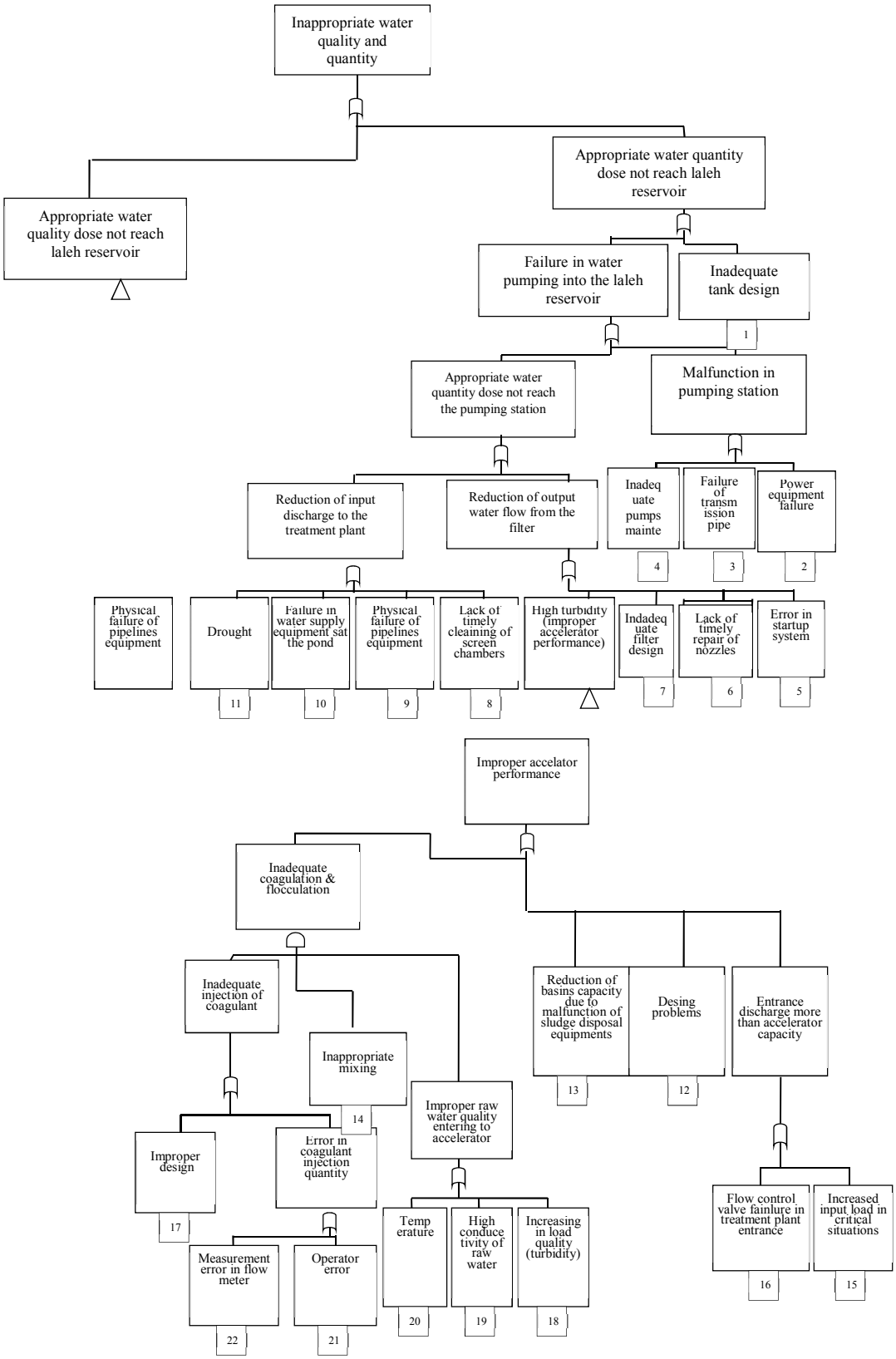

Fig. 4. Jalaliyeh water treatment plant's fault tree- water quantity

شکل ۴- درخت خطای تصفیه‌خانه جلالیه- کمیّت آب

آن درخت خطا تحلیل شد. همچنین در شکل‌های۳ و ۴ درخت خطای تصفیه‌خانه جلالیه نشان داده شده است که به دلیل بزرگ بودن ساختار درخت از نماد ⏃ برای شکستن درخت به مجموعه‌های کوچک‌تر استفاده شده است.

۴- اجرای مدل تحلیل ریسک و تحلیل نتایج

پس از رسم درخت خطا و دریافت اطلاعات از کارشناسان، با استفاده از کدنویسی در محیط فرترن، درخت خطا با دو رویکرد فازی و غیر فازی با استفاده از روش برش‌های آلفا تحلیل می‌شود. جدول ۲ مقادیر احتمال شکست رویدادهای پایه را در حالت غیرفازی نشان می‌دهد.

شکل ۵ خروجی احتمال شکست رویداد رأس به فرم یک مجموعه فازی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بازه احتمال شکست بین ۰/۰۲ و ۰/۲۷ قرار می‌گیرد. با استفاده از شاخص غیر فازی‌ساز و به‌دست آوردن مرکز سطح، احتمال شکست تصفیه‌خانه در تأمین آب مناسب، مقداری برابر با ۰/۱۹۴۳ به‌دست می‌آید که معادل میزان ریسک کم تا متوسط است. همچنین مقدار احتمال شکست رویداد رأس در حالت غیرفازی، مقداری برابر با ۰/۱۰۱۳است که مقداری کمتر از مقدار به‌دست‌آمده در رویکرد فازی است.

با استفاده از شاخص FIM و نوشتن کد مربوط به آن در محیط فرترن، مقادیر مربوط به شاخص اهمیت فازی هر رویداد پایه به‌دست می‌آید که در جدول ۳ مقادیر متناظر به‌ترتیب مقدار بزرگی نمایش داده شده‌است.

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود رویداد طراحی نامناسب مخزن، خرابی تجهیزات برق‌رسانی، شکست لوله انتقال و تعمیر و نگهداری نامناسب پمپ‌ها بالاترین سهم را در وقوع رویداد رأس دارند که باید استراتژی‌های مدیریت ریسک بر روی این خطرات و آسیب‌ها متمرکز شود.

رویدادهای پایه از نظر میزان سهم آنها در رویدادهای فرعی کمیت نامطلوب آب و همچنین کیفیت نامطلوب آن بر اساس شاخص FIM و به‌صورت نزولی و از چپ به راست در جداول ۴ و ۵ به‌ترتیب نشان داده شده‌اند.

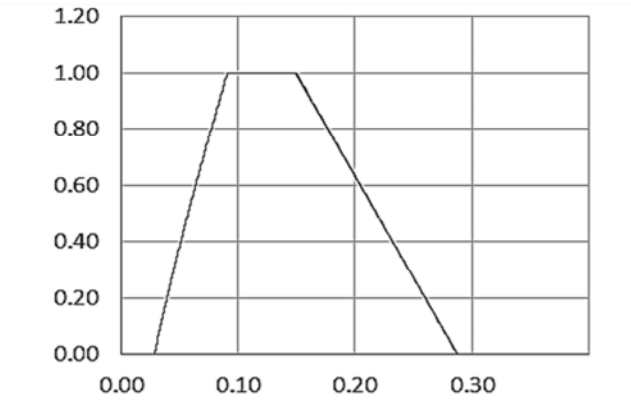

Fig. 5. Fuzzy output of top event

شکل ۵- خروجی فازی رویداد رأس

جدول ۲- اعداد غیرفازی تجمیع شده احتمال هر رویداد پایه

Table 2. Aggregated crisp numbers for probability of each basic event

Basic event number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Probability	0.13	0.47	0.32	0.42	0.31	0.5	0.31	0.33	0.27	0.46	0.42
Basic event number	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Probability	0.15	0.5	0.48	0.65	0.21	0.35	0.65	0.8	0.4	0.5	0.42
Basic event number	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Probability	0.42	0.47	0.4	0.46	0.31	0.19	0.42	0.36	0.27	0.46	0.52

جدول۳ - رتبه‌بندی رویدادهای پایه بر اساس شاخص FIM

Table 3. Ranking of basic events based on FIM index

Basic event	5	26	25	24	23	13	12	4	3	2	1
FIM	23.05659	23.06381	23.06381	23.06381	23.0638	23.0934	23.0934	25.65743	25.65743	25.65743	107.265
Basic event	32	17	28	14	6	10	11	9	8	16	7
FIM	22.81568	22.84543	22.88181	22.89037	22.8934	22.91494	22.91543	22.92122	22.94122	22.98022	23.0558
Basic event	20	19	18	21	30	29	27	33	22	15	31
FIM	22.78571	22.78571	22.78571	22.79725	22.7982	22.7982	22.7982	22.8044	22.80493	22.80854	22.8156

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.67314.2273

جدول ۴- رتبه‌بندی رویدادهای پایه از نظر میزان تأثیر بر کمیت نامطلوب آب بر اساس شاخص FIM

Table 4. Ranking of basic events from the aspect of influencing undesirable water quantity based on FIM index

Basic event	1	2	3	4	5	7	8	9
FIM	111.1563	26.14125	26.14125	26.14125	23.34521	23.34422	23.2276	23.20717
Basic event	11	10	6	12	13	16	14	17
FIM	23.20176	23.20115	23.17812	23.0934	23.0934	23.08463	23.07615	23.07085
Basic event	22	15	21	18	19	20		
FIM	23.06661	23.06655	23.06581	23.06426	23.06426	23.06426		

جدول ۵- رتبه‌بندی رویدادهای پایه از نظر میزان تأثیر بر کیفیت نامطلوب آب بر اساس شاخص FIM

Table 5. Ranking of basic events from the aspect of influencing undesirable water quality based on FIM index

Basic event	12	13	23	24	25	26	16	14
FIM	141.4215	141.4215	141.4215	141.4214	141.4213	141.4211	137.8455	135.5553
Basic event	28	17	32	15	31	33	22	27
FIM	135.1757	134.7304	134.1568	134.116	134.0973	133.9455	133.8827	133.8748
Basic event	29	30	21	18	19	20		
FIM	133.8748	133.8746	133.7222	133.5892	133.5892	133.5892		

جدول ۶- رتبه‌بندی رویدادهای پایه بر اساس شاخص BI

Table 6. Ranking of basic events based on BI index

Basic event	6	5	25	23	26	24	13	3	4	2	1
BI	8.16E-04	8.16E-04	2.15E-03	2.34E-03	2.70E-03	2.84E-03	3.63E-03	1.17E-02	1.82E-02	2.21E-02	0.1013591
Basic event	33	32	31	11	10	9	8	16	15	12	7
BI	2.21E-04	2.21E-04	2.21E-04	4.48E-04	4.48E-04	4.48E-04	4.48E-04	6.00E-04	6.00E-04	6.41E-04	8.16E-04
Basic event	22	21	20	19	18	17	14	27	30	29	28
BI	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.01E-05	6.41E-05	8.09E-05	1.84E-04

جدول ۷- رتبه‌بندی رویدادهای پایه از نظر میزان تأثیر بر کمیت نامطلوب آب بر اساس شاخص BI

Table 7. Ranking of basic events from the aspect of influencing undesirable water quantity based on BI index

Basic event	1	2	4	3	5	6	7
BI	0.104509	2.28E-02	1.88E-02	1.21E-02	8.42E-04	8.42E-04	8.42E-04
Basic event	13	8	9	10	11	12	15
BI	4.83E-04	4.62E-04	4.62E-04	4.62E-04	4.62E-04	8.53E-05	7.98E-05
Basic event	16	14	17	18	19	20	21
BI	7.98E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

با توجه به جدول ۴ رویدادهای پایه طراحی نامناسب مخزن، خرابی تجهیزات برق‌رسانی، شکست لوله انتقال و تعمیر و نگهداری نامناسب پمپ‌ها بالاترین سهم را در شکست کمّی تصفیه‌خانه بر اساس شاخص FIM دارند. همچنین با توجه به جدول ۵ رویدادهای پایه مشکلات طراحی واحد اکسیلاتور، کاهش ظرفیت حوضچه‌ها به‌دلیل خرابی تجهیزات دفع لجن، زمان کارکرد بالای صافی و گندزدایی نامناسب بالاترین سهم را در شکست کیفی تصفیه‌خانه بر اساس شاخص FIM دارا هستند.

در رویکرد غیر فازی درخت خطا، از شاخص BI برای رتبه‌بندی رویدادها استفاده شد که در جدول ۶ مقادیر مربوط به‌ترتیب بزرگی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود رویدادهای پایه طراحی نامناسب مخزن، خرابی تجهیزات برق‌رسانی، تعمیر و نگهداری نامناسب پمپ‌ها و شکست لوله انتقال، بالاترین سهم را در وقوع رویداد رأس به خود اختصاص داده‌اند که مشابه رتبه‌بندی به‌دست آمده در رویکرد فازی است.

رویدادهای پایه از نظر میزان سهم آنها در رویدادهای فرعی کمیت و همچنین کیفیت نامطلوب آب بر اساس شاخص BI و به‌صورت نزولی و از راست به چپ در جداول ۷ و ۸ به‌ترتیب نشان داده شده‌اند.

با توجه به جدول ۷ رویدادهای پایه طراحی نامناسب مخزن، خرابی تجهیزات برق‌رسانی، تعمیر و نگهداری نامناسب پمپ‌ها و شکست لوله انتقال، بالاترین سهم را در شکست کمّی تصفیه‌خانه بر اساس

جدول ۸- رتبه‌بندی رویدادهای پایه از نظر میزان تأثیر بر کیفیت نامطلوب آب بر اساس شاخص BI

Table 8. Ranking of basic events from the aspect of influencing undesirable water quality based on FIM index

Basic event	12	13	21	24	22	23	14	16
BI	6.69E-05	1.98E-05	1.98E-05	1.72E-05	1.34E-05	1.34E-05	1.07E-05	4.77E-06
Basic event	25	26	27	19	18	15	29	20
BI	4.47E-06	3.34E-06	3.04E-06	2.98E-06	2.74E-06	2.56E-06	9.54E-07	4.77E-07
Basic event	17	28	30	31	32	33		
BI	3.58E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00		

شاخص BI دارند و همچنین با توجه به جدول ۸ رویدادهای پایه مشکلات طراحی واحد اکسیلاتور، کاهش ظرفیت حوضچه‌ها به دلیل خرابی تجهیزات دفع لجن و خطای اپراتور، بالاترین سهم را در شکست کیفی تصفیه‌خانه بر اساس شاخص BI دارند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با توجه به اهمیت تصفیه‌خانه‌های آب در سامانه تأمین و توزیع آب شهری، مدل ارزیابی و تحلیل ریسک تصفیه‌خانه‌های آب با روش درخت خطا در دو رویکرد ساده و فازی ارائه شد. همچنین در این پژوهش رویداد نامطلوب، کمیت و کیفیت نامناسب آب خروجی از تصفیه‌خانه بود. تهدیدات و عواملی که موجب ایجاد این مشکل می‌شدند با همکاری کارشناسان و اطلاعات موجود برای تصفیه‌خانه جلالیه تهران تدوین و به‌عنوان رویدادهای فرعی و پایه در درخت خطا منظور شدند و احتمال شکست آنها با استفاده از نظرات کارشناسان، مقداردهی شد. پس از آنالیز، ریسک تصفیه‌خانه حدود ۱۹ درصد به‌دست آمد که ریسک کم تا متوسطی است. همچنین مقدار عدد ریسک در رویکرد غیر فازی درخت خطا حدود ۱۰ درصد به‌دست آمد. سهم هر یک از تهدیدات در شکست تصفیه‌خانه بر اساس اهمیت در دو حالت فازی و غیرفازی درخت خطا رتبه‌بندی شدند. نتایج حاکی از یکسان بودن تهدیدات با درجه اهمیت بالاتر در هر دو رویکرد بوده است که می‌توانند معیاری مناسب برای در نظر گرفتن اولویت‌ها برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان در جهت بهسازی و مدیریت ریسک تصفیه‌خانه‌ها در کشور باشند. بر اساس نتایج حاصله، رویداد طراحی نامناسب مخزن، خرابی تجهیزات برق‌رسانی، شکست لوله انتقال و تعمیر و نگهداری نامناسب پمپ‌ها بالاترین سهم را در وقوع رویداد رأس داشته‌اند. علاوه بر این، رویدادهای پایه در دو شاخه شکست کیفیت و کمیت تصفیه‌خانه در هر دو رویکرد رتبه‌بندی شدند تا عوامل با سهم بالا در هر بخش مشخص شوند. در انتها پیشنهاد می‌شود که به‌عنوان پژوهش‌های آتی از روش‌هایی مانند شبیه‌سازی مونت کارلو برای تحلیل عدم قطعیت‌های موجود در تحلیل ریسک تصفیه‌خانه استفاده شود و نتایج با رویکرد فازی درخت خطا مقایسه شوند، تا امکان مقایسه روش‌های مختلف تحلیل ریسک و عدم قطعیت با توجه به نوع و تعداد داده‌های در دسترس فراهم شود.

۶- قدردانی

به این وسیله از مسئولان و بهره‌برداران تصفیه‌خانه جلالیه که در فراهم نمودن اطلاعات لازم برای انجام این پژوهش همکاری نمودند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

References

Anbari, M. & Tabesh. 2016. Failure event probability calculation in wastewater collection systems using the bayesian network. *Journal of Water and Wastewater*, 27 (3), 48-61. (In Persian)

Asgarian, M., Tabesh, M. & Roozbahani. 2015. Risk assessment of wastewater collection performance using the fuzzy decision-making approach. *Journal of Water and Wastewater*, 26 (4), 74-87. (In Persian)

Beauchamp, N., Lence, B. & Bouchard, C. 2010. Technical hazard identification in water treatment using fault tree analysis. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(6), 897-906.

Chowdhury, S. & Husain, T. 2006. Evaluation of drinking water treatment technology: An entropy-based fuzzy application. *Journal of Environmental Engineering*, 132(10), 1264-1271.

FEMA 452. 2005. A how to guide to mitigate potential terrorist attacks against buildings. *Risk Management Series*, Fema 452, USA

Ferdous, R., Khan, F., Sadiq, R., Amyotte, P. & Veitch, B. 2011. Fault and event tree analyses for process systems risk analysis. *Uncertainty Handling Formulations Risk Analysis*, 31(1)**,** 86-107.

Fujiwara, O. & Chen, H.J. 1993. Reliability analysis of water supply systems integrating with treatment plant operations. *Reliability Engineering & System Safety,* 42(1)**,** 47-53.

Jian, H., Junying, C., Jiahong, L. & Dayong, Q. 2011. Risk identification of sudden water pollution on fuzzy fault tree in beibu-gulf economic zone. *Procedia Environmental Sciences,* 10(3)**,** 2413-2419.

Kelley, D. & Allison, R. 1981. Fault tree analysis and treatment plant instrumentation. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 53(1)**,** 43-47.

Pan, Z. J. & Tai, Y. C. 1988. Variance importance of system components by Monte Carlo. *IEEE Transactions on Reliability*, 37(4)**,** 421-423.

Rahman, S. & Zayed, T. 2009. Condition assessment of water treatment plant components. *Journal of Performance of Constructed Facilities,* 23(4)**,** 276-287.

Roozbahani, A., Zahraie, B. & Tabesh, M. 2013. Integrated risk assessment of urban water supply systems from source to tap. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(4)**,** 923-944.

Sadiq, R., Saint-Martin, E. & Kleiner, Y. 2008. Predicting risk of water quality failures in distribution networks under uncertainties using fault-tree analysis. *Urban Water Journal,* 5(4)**,** 287-304

Suresh, P., Babar, A. & Raj, V. 1996. Uncertainty in fault tree analysis: A fuzzy approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 83(2)**,** 135-141.

Taheriyoun, M. & Moradinejad, S. & Fardi, Gh. 2014. Reliability evaluation of water treatment plant using fuzzy fault tree analysis. *8th National Congress on Civil Engineering*, Babol, Iran. (In Persian)

Taheriyoun, M. & Moradinejad, S. 2015. Reliability analysis of a wastewater treatment plant using fault tree analysis and Monte Carlo simulation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(1)**,** 1-13.

Tavakkolifar, H. 2008. Development of algorithm for urban water treatment plants system readiness evaluation under crises. MSc Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)

Tyagi, S. K., Pandey, D. & Kumar, V. 2011. Fuzzy fault tree analysis for fault diagnosis of Cannula fault in power transformer. *Applied Mathematics*, 2(11)**,** 1346-1355.

Yager, R.R. 1980. On a general class of fuzzy connectives. *Fuzzy Sets and Systems*, 4(3)**,** 235-242.

Yuhua, D. & Datao, Y. 2005. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 18(2)**,** 83-88.