Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 1, pp: 110-123

Multi-Criteria Evaluation of the Vulnerability of the Urban Water Supply Network Against Biological Attacks

S. Safari[1], M. Mosaferi[2], S. Javadi[3], M. Zarghami[4], M. Jahangiri[5]*

1. PhD. Student, Civil Engineering-Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran
and Researcher of Environmental Research Institute of Tabriz University, Tabriz, Iran
(Corresponding Author) soheilssafarii@gmail.com
2. Prof., Health and Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran
3. Assoc., Prof., Dept. of Water Engineering College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran
4. Prof., Faculty of Civil Engineering and Institute of Environment, University of Tabriz, Iran
and Adjunct Prof., Policy Research Institute, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
5. Former Graduated Student, Civil Engineering-Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran

(Received July 13, 2022 Accepted Oct. 31, 2022)

To cite this article:
Safari, S., Mosaferi, M., Javadi, S., Zarghami, M., Jahangiri, M. 2023. "Multi-criteria evaluation of the vulnerability of the urban water supply network against biological attacks" Journal of Water and Wastewater, 34(1), 110-123. Doi: 10.22093/wwj.2022.351591.3276. (In Persian)

Abstract

The water supply network is one of the most critical infrastructures of human societies, which could cause illness or death in many consumers due to its expanding nature. Water pollution is one of the ways of spreading biological pollutants among the population, which is known as bioterrorism today. Biological contamination usually occurs with the use of pathogens and biotoxins. Therefore, recognizing the vulnerable stages of the water supply network against various pollutants is of particular importance. In this research, in the first stage, a selection of five pathogens (Bacillus anthracis, Cryptosporidiosis, Francisella tularensis, Vibrio cholerae, Shigella) that are more likely to pollute water sources have been made. Thus, employing each component of the water supply system (including raw water source (dam)), Raw water storage tank, water treatment plant, treated water transmission line, treated water tanks, and distribution network (30 scenarios) were defined. In the next step, using multi-criteria group decision-making and employing three main criteria (vulnerability of each water supply stage, the amount of contaminant damage power, the amount of contaminant risk in each of the water supply stages) and their sub-criteria, the weight of each criterion was determined from the perspective of decision-makers by utilizing GFDM software. After analyzing the scenarios, the risk level of each scenario was ranked. Scenario 26 created the most risk, which consists of introducing the pathogen Bacillus anthracis into the distribution network. The entry of contamination into the distribution network due to high availability and lack of subsequent treatment steps, as well as the slight chance of preventing the contaminant from reaching consumers, can cause many diseases and deaths. Furthermore, it has a high resistance against chloride and is stable in water, so the entry of this contaminant into the distribution network can be dangerous. Considering the existing conditions, recognizing and calculating the risk of different scenarios can lead to readiness and increase the speed of action in response to possible biological attacks.

Keywords: Water Supply Network, Biological Attacks, Multi-Criteria Decision Making, Passive Defense.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۱، صفحه: ۱۲۳-۱۱۰

ارزیابی چند معیاره میزان آسیب‌پذیری شبکه آب‌رسانی شهری در مقابل حملات بیولوژیکی

سهیل صفری[۱*]، محمد مسافری[۲]، سامان جوادی[۳]، مهدی ضرغامی[۴]، مهدی جهانگیری[۵]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران- مهندسی محیط‌زیست دانشکده عمران،
دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
و پژوهشگر پژوهشکده محیط‌زیست دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
soheilssafarii@gmail.com (نویسنده مسئول)
۲- استاد، مرکز تحقیقات سلامت و محیط‌زیست،
دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی آب پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۴- استاد، دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده محیط‌زیست، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
و استاد همکار پژوهشکده سیاست‌گذاری دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
۵- دانش‌آموخته مهندسی عمران- مهندسی محیط‌زیست، دانشکده عمران،
دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

(دریافت ۱۴۰۱/۴/۲۲ پذیرش ۱۴۰۱/۸/۹)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
صفری، س.، مسافری، م.، جوادی، س.، ضرغامی، م.، جهانگیری، م.، ۱۴۰۲، "ارزیابی چند معیاره میزان آسیب‌پذیری شبکه آب‌رسانی شهری در مقابل حملات بیولوژیکی" مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۱)، ۱۲۳-۱۱۰. **Doi: 10.22093/wwj.2022.351591.3276**

چکیده

شبکه آب‌رسانی یکی از مهمترین زیر ساخت‌های جوامع بشری است که در صورت وقوع آلودگی به‌دلیل گستردگی می‌تواند موجب بیماری یا مرگ بسیاری از مصرف‌کنندگان شود. آلودگی آب یکی از مسیرهای انتشار آلاینده‌های بیولوژیکی در بین جمعیت است که امروزه به‌عنوان بیوتروریسم از آن یاد می‌شود. آلودگی‌های بیولوژیکی معمولاً با استفاده از پاتوژن‌ها و بیوتوکسین‌ها رخ می‌دهد. ازاین‌رو شناخت مراحل آسیب‌پذیر شبکه آب‌رسانی در مقابل آلاینده‌های مختلف اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش، در مرحله اول پنج پاتوژن (باسیلوس آنتراسیس، کریپتوسپوریدیوزیس، فرانسیسلا تولارنسیس، ویبریو کلرا، شیگلا) که قابلیت بیشتری در ایجاد آلودگی منابع آب دارند، انتخاب و با هر یک از اجزا سامانه آب‌رسانی (مشتمل بر منبع آب خام(سد)، مخزن ذخیره آب خام، تصفیه‌خانه آب، خط انتقال آب تصفیه شده، مخازن آب تصفیه شده و شبکه توزیع) ۳۰ سناریو تعریف شد. در مرحله بعد با استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره گروهی و با بهره‌گیری از سه معیار اصلی (میزان آسیب‌پذیری هر یک از مراحل آب‌رسانی، میزان قدرت آسیب‌رسانی آلاینده، میزان ایجاد خطر آلاینده در هر یک از مراحل آب‌رسانی) و زیر معیار آنها و با استفاده از نرم‌افزار GFDM وزن هر معیار از دیدگاه تصمیم‌گیران مشخص شد و پس از تحلیل سناریوها، میزان خطر هر یک از سناریوها رتبه‌بندی شد که سناریو ۲۶ رتبه اول در ایجاد خطر را کسب کرد که متشکل از وارد کردن پاتوژن باسیلوس آنتراسیس به شبکه توزیع بود. ورود آلودگی به شبکه توزیع به‌دلیل دسترسی زیاد و نبود مراحل تصفیه بعدی و همچنین فرصت کم برای جلوگیری از رسیدن آلاینده به مصرف‌کنندگان می‌تواند موجب بیماری و مرگ بسیاری از مصرف‌کنندگان شود، از طرفی پاتوژن باسیلوس آنتراسیس در مقابل کلر مقاومت زیادی داشته و در آب پایدار است، ازاین‌رو ورود این آلاینده به شبکه توزیع می‌تواند بسیار خطرناک باشد. با در نظر گرفتن شرایط موجود شناخت و محاسبه میزان خطر سناریوهای مختلف می‌تواند موجب آمادگی و افزایش سرعت عمل در واکنش با حملات بیولوژیک احتمالی شود.

واژه‌های کلیدی: شبکه آب‌رسانی، حملات بیولوژیکی، تصمیم‌گیری چند معیاره، پدافند غیرعامل

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.351591.3276

۱- مقدمه

در بین زیرساخت‌های مختلف، شبکه آب‌رسانی شهری به عنوان یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های مرتبط با بقای جوامع و به‌دلیل برخی خصوصیات مانند فراگیر بودن، قابلیت دسترسی و اهمیت فراوانی دارد. در واقع، در صورت آسیب به زیرساخت‌های دیگر مانند برق و گاز می‌توان به راحتی شبکه‌های موردنظر را قطع کرد و نیاز شهروندان را به گونه‌ای دیگر برطرف کرد، اما شبکه آب‌رسانی به گونه‌ای است که امکان قطع و جایگزینی آن در شرایط بحران وجود ندارد. ازاین‌رو باید با ارزیابی انواع تهدیدات و میزان تأثیر آنها بر این شبکه، نقاط آسیب‌پذیر را شناسایی کرد (Bitarafan et al., 2015).

از آنجا که تأسیسات انتقال آب اهداف مناسبی برای اقدامات خراب‌کارانه محسوب می‌شوند، چنانچه در اثر یک اقدام خراب‌کارانه شبکه آب شهری آلوده شود، احیای شبکه در کوتاه‌ترین زمان و با کمترین هزینه، می‌تواند دامنه آسیب‌های جانی و مالی را به حداقل، کاهش دهد. با توجه به اهمیتی که جان انسان‌ها دارد، پیش‌بینی راهکار مناسب در وقوع چنین بحران‌هایی ضروری است. از طرفی در کشور ما اغلب پروژه‌ها بدون در نظر گرفتن مبانی پدافند غیرعامل طراحی و اجرا شده است. ازاین‌رو تأسیسات زیربنایی کشور در برابر بحران آسیب‌پذیرند و اغلب، اهداف مناسبی برای عملیات خراب‌کارانه به شمار می‌روند (Ghazizadeh et al., 2008). از طرفی تجربه جنگ‌های گذشته و کنونی در عراق، کوزوو و یمن نشان می‌دهد که مراکز و تأسیسات حیاتی شهرها جزء اهداف اولیه و اصلی هستند که مورد تهاجم قرار می‌گیرند (Bakhshi Shadmehri et al., 2016).

ریشه بحث پدافند غیرعامل به نیازهای انسان برای زندگی برمی‌گردد. پدافند غیرعامل به‌منظور تأمین ایمنی و سلامت انسان در برابر پتانسیل‌های بروز خطر است و در واقع مجموع تهدیدات و اقدامات و طرح‌هایی است که با استفاده از ابزار، شرایط و در صورت امکان بدون نیاز به نیروی انسانی به‌صورت خود اتکا انجام می‌شود (Azadi et al., 2020). پدافند غیرعامل به‌منظور دفاع از مراکز، زیر ساخت‌ها، جان و سرمایه‌های انسانی در تمام ملت‌ها جزئی ضروری از یک کشور است. بیشتر اقدامات عمده پدافند غیرعامل بر شناسایی تهدیدات، کنترل تهدیدات، کاهش تأثیر تهدیدات و مدیریت کردن تهدیدات و بحران‌ها بر کشور متمرکز می‌شود و کارکرد عمده پدافند غیرعامل افزایش پایداری کشور و تداوم خدمات به مردم در شرایط بحران است. پدافند غیرعامل یک مدیریت جامع بحران در عرصه دفاع است (Mohammadian et al., 2019).

نگرانی عمده در مورد حمله تروریستی به منابع آبی دو نوع کلی دارد: یا شالوده‌ها و زیرساختارهای سیستم‌های آبی می‌تواند به‌طور مستقیم مورد حمله تروریستی قرار گیرد و تأسیسات، مخازن، لوله‌کشی، سدها و تصفیه‌خانه‌ها به‌طور فیزیکی تخریب شود یا به‌واسطه ورود یک عامل توکسیک یا یک عامل بیماری‌زا در منابع آبی مختلف این حمله انجام شود. نتیجه هر دو عمل، غیرقابل‌شرب شدن آب، به خطر انداختن سلامت جامعه و ایجاد هراس عمومی است. آسیب‌پذیری منابع و مخازن آبی در مقابل تروریسم، در گذشته بیشتر مربوط به تخریب فیزیکی تأسیسات آبی بوده ولی در سال‌های اخیر به‌ویژه از سال ۲۰۰۰، موضوع حملات شیمیایی و بیولوژیک جدی شده است (Rice, 2011).

برخلاف اغلب عوامل تروریستی، تشخیص تهدیدات مربوط به منابع آبی بسیار مشکل است و از آنجا که چنین حملاتی تنها با پخش شدن آب آلوده و تلفات تعداد زیادی از افراد در یک طغیان یا اپیدمی مشخص می‌شود، تشخیص و مقابله سریع، بسیار اهمیت دارد (Ahmadi and Soleimanian, 2020).

نسیمی و همکاران در پژوهشی میزان آسیب‌پذیری و احتمال تهدید حملات بیوتروریستی در هریک از عناصر زیرساخت منابع آب را ارزیابی کردند و بر اساس آن مشخص شد که بین میزان آسیب‌پذیری و احتمال وقوع حملات بیوتروریستی در بخش‌های مختلف زیرساخت آب شهری تفاوت وجود دارد، به‌این ترتیب مشخص شد از نظر معیار «میزان آسیب‌پذیری»، در بین بخش‌های مختلف زیرساخت آب، «شبکه توزیع آب شهری در معرض تهدید بیشتری است و از نظر «احتمال وقوع تهدید» نیز بخش منابع تأمین» آب شهری در معرض تهدید بیشتری قرار دارد (Nasimi et al., 2019).

رشیدی و همکاران با به‌کارگیری روش SWOT ضمن شناسایی ۱۰ مورد از نقاط قوت و ۱۳ مورد از نقاط ضعف سیستم آب و فاضلاب شهرستان فردوس واقع در استان خراسان جنوبی، در ارزیابی‌های محیطی ۱۲ مورد فرصت و ۶ مورد تهدید را مورد شناسایی قرار دادند. نتیجه این ارزیابی نشان‌دهنده موقعیت ضعف

شهرستان فردوس در محیطی در بردارنده فرصت‌های مناسب است. در پایان، ضمن شناسایی استراتژی‌های مناسب نسبت به رتبه‌بندی استراتژی‌های پدافند غیرعامل در حوزه آب و فاضلاب شهرستان فردوس اقدام شد (Rashidi, 2014).

دوست حسینی و خانجانی در پژوهشی با استفاده از معادله دیفرانسیل به‌روش تقریب تفاضلات محدود، در هر گام زمانی غلظت ماده آلاینده را تخمین زدند. در ادامه یک شبکه در نرم‌افزار EPANET در نظر گرفته شد و با ورود ماده آلاینده با غلظت معین و در زمان صفر، با گذر زمان پیش‌روی ماده آلاینده و نحوه انتشار آن بررسی شد. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان‌دهنده آن است که گره‌های پرمصرف باید از چند خط لوله تغذیه کنند تا درصد کمتری از آلودگی وارد گره شود (Doost Hosseini and Khanjani, 2011).

در بیشتر پژوهش‌های انجام شده مانند پژوهش نسیمی و همکاران آسیب‌پذیری مراحل مختلف شبکه آب‌رسانی به تنهایی و بدون در نظر گرفتن آلاینده بررسی شده است (Nasimi et al., 2019) و یا در پژوهش احمدی و سلیمانی در سال ۲۰۲۰ که فقط به بررسی و ارزیابی میزان خطر آلاینده‌ها پرداخته‌اند (Ahmadi and Soleimanian, 2020).

با توجه به این امر که هر یک از آلاینده‌ها خصوصیات متفاوتی دارند و هر یک از مراحل شبکه آب‌رسانی شرایط خاص خود را دارند، در نتیجه میزان آسیب‌پذیری هر یک از مراحل در مقابل آلاینده‌های مختلف متفاوت است. در این پژوهش تلاش شد میزان آسیب‌پذیری هریک از مراحل شبکه آب‌رسانی با در نظر گرفتن ورود هر یک از آلاینده‌ها مشخص شود. همچنین با در نظر گرفتن آلاینده استفاده شده در حمله بیولوژیکی و مرحله ورود این آلاینده به مراحل مختلف شبکه آب‌رسانی و با در نظر گرفتن خصوصیات آلاینده استفاده شده و مرحله موردنظر شبکه آب‌رسانی تلاش شد میزان آسیب‌پذیری هریک از مراحل شبکه آب‌رسانی در مقابل آلاینده‌های موردنظر محاسبه شود.

در این راستا در مرحله اول پنج پاتوژن باسیلوس آنتراسیس، کریپتوسپوریدیوزیس، فرانسیسلا تولارنسیس، ویبریو کلرا و شیگلا که قابلیت بیشتری در ایجاد آلودگی منابع آب را دارند انتخاب و با هر یک از اجزا سامانه آب‌رسانی (مشتمل بر منبع آب خام (سد)، مخزن ذخیره آب خام، تصفیه‌خانه آب، خط انتقال آب تصفیه شده، مخازن آب تصفیه شده و شبکه توزیع) ۳۰ سناریو تعریف شد. در مرحله بعد با استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره گروهی و با بهره‌گیری از سه معیار اصلی (میزان آسیب‌پذیری هر یک از مراحل آب‌رسانی، میزان قدرت آسیب‌رسانی آلاینده، میزان ایجاد خطر آلاینده در هر یک از مراحل آب‌رسانی) و زیر معیار آنها و نیز با استفاده از نرم‌افزار GFDM وزن هر معیار از دیدگاه تصمیم‌گیران مشخص شد و پس از تحلیل سناریوها، میزان خطر هر یک از سناریوها رتبه‌بندی شد.

۱-۱- شبکه آب‌رسانی

مراحل اصلی تولید آب و آب‌رسانی می‌تواند به‌ترتیب شامل منابع آب، ذخایر آب خام، ایستگاه پمپاژ، خط انتقال آب خام، تصفیه‌خانه آب، خط انتقال آب تصفیه شده، مخازن آب تصفیه شده و شبکه‌های توزیع باشد (Ghazizadeh et al., 2008).

سیستم‌های آب‌رسانی وسعت زیادی دارند و احتمال آلودگی آنها بسیار زیاد است، از طرفی این سیستم‌ها از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است که میزان آسیب‌پذیری آنها در مقابل حملات بیولوژیکی یکسان نیست (Habibi, 2018).

شبکه‌های آب‌رسانی عمومی آسیب‌پذیری کمتری نسبت به شبکه‌های مستقل دارند و به بیان دیگر دسترسی به شبکه‌های آب شهری و آلوده کردن آن از آنچه که در ذهن اکثریت وجود دارد، مشکل‌تر است. عواملی مثل رقیق‌سازی ایجاد شده به‌وسیله حجم زیاد آب در شبکه‌های عمومی، فاصله دور نقطه پخش و انتشار اولیه آلودگی و همچنین اجرای کلرزنی می‌تواند بخش عمده ارگانیسم‌های بیماری‌زا را برای انسان از بین برده و تحمیل تلفات زیاد را از این طریق به‌شدت غیرمحتمل می‌سازد (Chandler and Landrigan, 2004).

دریاچه‌های بزرگ و رودخانه‌ها قابلیت دسترسی بیشتری دارند و آلوده شدن آنها بستگی به حجم آب دارد. از آنجا که آلوده شدن آب به غلظت آلاینده بستگی دارد، منابع بزرگتر، آسیب‌پذیری کمتری دارد. به‌علاوه، به تأثیر گذشت زمان و قرار گرفتن آب آلوده در معرض نور خورشید نیز باید اشاره کرد. قابلیت خودپالایی منابع آب، آلوده ساختن آنها را با مشکل مواجه می‌کند. گذشته از عوامل بیان شده، آلوده شدن منابع آب به سمیّت آلاینده و حجم آب بستگی دارد (Kroll, 2006).

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.351591.3276

۱-۲- عوامل آلاینده بیولوژیکی

بیوتروریسم به مفهوم استفاده عمدی از باکتری‌ها، ویروس‌ها یا سموم طبیعی به‌عنوان یک سلاح برای کشتن، زخمی کردن یا ایجاد بیماری در انسان، جانوران و یا گیاهان است که با هدف ایجاد رعب و وحشت، اختلال در اقتصاد یا برای دریافت پاسخ از دولت، توسط یک گروه تروریست یا یک رژیم نامشروع به کار می‌رود (Nasimi et al., 2019).

عوامل میکربی و شیمیایی برای حمله به منابع آبی و مخازن آب شرب باید خواص خاصی داشته باشند از جمله:

- قابلیت تبدیل به سلاح بیولوژیک را داشته باشد: باید در مقدار کافی تولید و پخش شود تا اثر موردنظر را داشته باشد.
- برای انتشار در آب مناسب باشد: در آب زنده بماند، حل شود، پایدار باشد و قابل انتقال باشد.
- عفونی، ویرولانت یا سمّی باشد: باید بتواند در ایجاد بیماری یا مرگ، مؤثر و کارآمد باشد و در جامعه هدف ایمنی القا نکند.
- دارای دوز عفونی‌کننده، ناتوان‌کننده یا کشنده کمی بوده و در عوض قابلیت سرایت زیاد داشته باشند.
- در طول زمان و طی تریتمان، تأثیر خود را حفظ کند: باید به اندازه‌ای در آب حفظ شود که بتواند به محل موردنظر رسیده و تأثیر کند و در این مسیر با سیستم‌های تریتمان استاندارد آب خنثی نشود.
- ابزار درمان یا پیشگیری در دسترس نباشد (Ahmadi and Soleimanian, 2020).

آژانس حفاظت محیط‌زیست در آمریکا فهرستی از تهدیدهای بیولوژیک مربوط به آب شرح داده که به کلاس‌های مختلف تهدید تقسیم می‌شود. بعضی از این موارد؛ تنها در سیستم نظامی وجود دارند و بعضی دیگر می‌توانند توسط گروه‌های تروریستی تولید شوند. در کل دو نوع عمده تهدیدهای بیولوژیک در ارتباط با منابع آبی وجود دارد: پاتوژن‌ها و بیوتوکسین‌ها. پاتوژن‌ها ارگانیسم‌های زنده‌ای شامل باکتری‌ها، ویروس‌ها و انگل‌ها هستند. توکسین‌ها مواد سمّی تولید شده توسط موجودات زنده‌اند که خصوصیات سمّی برای موجودات دیگر دارند (Burrows and Renner, 1999).

در مجموع قابلیت تبدیل پاتوژن‌ها به تهدید بیوتروریسم بیشتر از توکسین‌ها است. نمونه‌هایی از انواع پاتوژن‌ها و توکسین‌های مطرح در بیوتروریسم که قابلیت تهدید مخازن آبی را دارند، در جدول ۱ (بیوتوکسین‌های مطرح در بیوتروریسم با قابلیت تهدید مخازن آبی) و جدول ۲ (نمونه‌هایی از انواع پاتوژن‌های مطرح در بیوتروریسم با قابلیت تهدید مخازن آبی) آمده است (Ahmadi and Soleimanian, 2020).

به‌واسطه مقدار خیلی زیاد سم موردنیاز برای مخازن با حجم‌های زیاد آب آشامیدنی، منطقی آن است که مخازن خیلی

جدول ۱- بیوتوکسین‌های مطرح در بیوتروریسم با قابلیت تهدید مخازن آبی

Table 1. Biotoxins in bioterrorism with the potential to threaten water reservoirs

Biotoxin	Has it become a biological weapon?	Stability in water	Chlorine resistance
Botulism toxin	Yes	Stable	Inactivates at 6 ppm in 20 minutes
Toxin T-2	Likely	Stable	Resistant at 100ppm
Ricin	Yes	Stable	Resistant at 100ppm
Saxitoxin	Likely	Stable	Resistant at 100ppm
Microcystin	Likely	Probably stable	Probably resistant
Aflatoxin	Yes	Probably stable	Unknown
Staphylococcal enterotoxin	Likely	Probably stable	Unknown
Tetrodotoxin	Likely	Probably stable	Disabled at 50ppm
Anatoxin A	Unknown	Deactivated within a few days	Probably resistant

جدول ۲- نمونه‌هایی از انواع پاتوژن‌های مطرح در بیوتروریسم با قابلیت تهدید مخازن آبی (Tavakoli et al., 2005, Ahmadi and Soleimanian, 2020)

Table 2. Models of various pathogens in bioterrorism with the potential to threaten water reservoirs (Tavakoli et al., 2005, Ahmadi and Soleimanian, 2020)

Pollutant	Has it become a biological weapon?	Stability in water	Chlorine resistance	Infectious dose	Vaccine
Bacillus anthracis	Yes	2 years (spore form)	Spores are resistant	5000-8000 spores	Yes
Cryptosporidiosis	Unknown	A few days or more	Resistant	10-100 pieces	No
Francisella Tularensis	Yes	Up to 90 days	At 1ppm, it becomes inactive in 10 min	10-50 pieces	No
Vibrio cholerae	Unknown	It survives perfectly	Kills quickly	10-500 pieces	No
Shigella	Unknown	2-3 days	At 0.05ppm, it is deactivated in 10 min	100 pieces	No

کوچکتر برای آلوده کردن با توکسین‌ها انتخاب شوند. بنابراین حملات بیوتروریستی به منابع آب، بیشتر احتمال دارد که روی منابع خیلی کوچک آب آشامیدنی (مثل یک تانکر آب شرب که در مناطق نظامی کاربرد دارد، روی دهد (Donaghy, 2006).

با توجه به این امر که در این پژوهش شبکه آب‌رسانی شهری موردنظر بود و در این شبکه در مرحله تصفیه از کلر استفاده شد، در سناریوها فقط از پاتوژن‌های پایدار در آب و مقاوم به کلر استفاده شد. پاتوژن‌های انتخاب شده در دوزهای پایین هم بسیار خطرناک بوده و قابلیت ایجاد بیماری و مرگ‌ومیر را دارند، همچنین این پاتوژن‌ها پایداری زیادی در آب دارند و مقاومت زیادی در مقابل دوزهای بالای کلر دارند که این خصوصیات موجب ایجاد خطر و آسیب‌پذیری بیشتر شبکه آب‌رسانی خواهد شد. ازاین‌رو این پنج پاتوژن برای تشکیل سناریوها استفاده شدند.

۱-۲-۱- باسیلوس آنتراسیس

باسیلوس آنتراسیس یک باکتری گرم مثبت و عامل بیماری سیاه زخم است. این باکتری سال‌ها در آب قابلیت ادامه حیات دارد و اگر در شرایط غیرمناسب محیطی مانند دمای ۳۲ درجه و بیشتر قرار گیرد، از شکل رویشی که قدرت تکثیر و تقسیم شدن دارد، به شکل مقاوم در آمده و در این حالت می‌تواند به‌مدت طولانی در محیط باقی بماند (Shahpari, 2017). مرگ‌ومیر سیاه زخم گوارشی نسبتاً زیاد است، به‌طوری که در ۷۰ تا ۸۰ درصد موارد منجر به مرگ می‌شود (Bigdelou and Malakoutikhah, 2012).

۱-۲-۲- کریپتوسپوریدیوزیس

کریپتوسپوریدیوم، یک انگل اجباری داخل سلولی است. تا سال ۱۹۸۱ تنها ۸ مورد آلودگی با این انگل گزارش شده بود. در سال ۱۹۹۳ در یک اپیدمی بیش از ۴۰۰۰۰۰ نفر از یک ایالت آمریکا به‌علت مصرف آب آشامیدنی آلوده به این انگل آلوده شدند (Tzipori and Ward, 2002). تاکنون بیش از ۲۳ گونه از این انگل شناسایی شده که ۸ گونه از آنها به عنوان مهم‌ترین گونه‌های شایع معرفی شده‌اند که از میان آنها می‌توان کریپتوسپوریدیوم پاروووم ژنوتیپ (ژنوتیپ انسانی) و کریپتوسپوریدیوم پاروووم (ژنوتیپ حیوانی و یا گاوی) را نام برد که باعث اغلب عفونت‌های انسانی می‌شوند (Cicirello et al., 1997).

۱-۲-۳- فرانسیسلا تولارنسیس

بیماری تولارمی یکی از بیماری‌های مشترک بین انسان و حیوان است که به نام‌های مختلف مانند تب خرگوش (Rabbit Fiver)، تب دی فلای (Dee-Fly Fever)، بیماری اوهارا (Ohara Disease) نامیده می‌شود. عامل بیماری فرانسیسلا تولارنسیس است. وسعت انتشار آن با مخازن حیوانی مختلف است. نشانه‌های بالینی آن برحسب راه ورود عامل عفونی به بدن و شدت بیماری‌زایی سویه‌های مختلف آن متفاوت و به اشکال تنفسی، تیفوئیدی، چشمی، غده‌ای و احشایی دیده می‌شود. بیماری تولارمی می‌تواند برای مقاصد جنگ میکربی و بیوتروریسمی به‌صورت انتشار افشانه‌ای به‌کار گرفته شود (Amirkhani, 2010).

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.351591.3276

۱-۲-۴- ویبریو کلرا

بیماری وبا یکی از بیماری‌های عفونی است که در اثر خوردن غذا یا آب آلوده به باکتری گرم منفی، به نام *Vibrio Cholera* ایجاد می‌شود. حالت شدید بیماری با از دست دادن مقدار فراوان از آب و الکترولیت‌ها و در نتیجه ایجاد اسیدوز و کاهش فشار خون و در نهایت بی‌حالی، کما و مرگ رخ می‌دهد (Ataii et al., 2005).

۱-۲-۵- شیگلا

مسکن طبیعی شیگلا محدود به روده انسان است که در آنجا اسهال خونی باسیلی را موجب می‌شود. ارگانیسم‌های جنس شیگلا، باسیل‌های گرم منفی هستند. عفونت‌های شیگلا تقریباً همواره محدود به سیستم گوارشی هستند و تهاجم آنها در گردش خون کاملاً نادر است. ارگانیسم‌های شیگلا به شدت مسری هستند(Riedel et al., 2019).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سناریوها

با توجه به تنوع زیاد آلاینده‌ها و تفاوت در خصوصیات مختلف آنها و متفاوت بودن هریک از مراحل سیستم آب‌رسانی از نظر پارامترهای مطرح در پدافند غیرعامل در این پژوهش هریک از مراحل آب‌رسانی با ۵ آلاینده انتخاب شده است.

در جدول ۳ (سناریوهای حملات بیولوژیک به شبکه آب‌رسانی) سناریوهای حملات بیولوژیک به شبکه آب‌رسانی را تشکیل دادند و با استفاده از معیارهای مختلف و با در نظر گرفتن نظر تصمیم‌گیران به کمک نرم‌افزار GFDM میزان خطر هر سناریو محاسبه شده است.

جدول ۳- سناریوهای حملات بیولوژیک به شبکه آب‌رسانی

Table 3. Scenarios of biological attacks on the water supply network

Scenario	Water supply network stage	
Scenario 1	Water supply sources (dams)	Bacillus anthracis
Scenario 2	Water supply sources (dams)	Cryptosporidiosis
Scenario 3	Water supply sources (dams)	Francisella Tularensis
Scenario 4	Water supply sources (dams)	Vibrio cholerae
Scenario 5	Water supply sources (dams)	Shigella
Scenario 6	Raw water tanks	Bacillus anthracis
Scenario 7	Raw water tanks	Cryptosporidiosis
Scenario 8	Raw water tanks	Francisella Tularensis
Scenario 9	Raw water tanks	Vibrio cholerae
Scenario 10	Raw water tanks	Shigella
Scenario 11	Refinery	Bacillus anthracis
Scenario 12	Refinery	Cryptosporidiosis
Scenario 13	Refinery	Francisella Tularensis
Scenario 14	Refinery	Vibrio cholerae
Scenario 15	Refinery	Shigella
Scenario 16	Purified water transmission line	Bacillus anthracis
Scenario 17	Purified water transmission line	Cryptosporidiosis
Scenario 18	Purified water transmission line	Francisella Tularensis
Scenario 19	Purified water transmission line	Vibrio cholerae
Scenario 20	Purified water transmission line	Shigella
Scenario 21	Purified water tanks	Bacillus anthracis
Scenario 22	Purified water tanks	Cryptosporidiosis
Scenario 23	Purified water tanks	Francisella Tularensis
Scenario 24	Purified water tanks	Vibrio cholerae
Scenario 25	Purified water tanks	Shigella
Scenario 26	Distribution network	Bacillus anthracis
Scenario 27	Distribution network	Cryptosporidiosis
Scenario 28	Distribution network	Francisella Tularensis
Scenario 29	Distribution network	Vibrio cholerae
Scenario 30	Distribution network	Shigella

۲-۲- آنالیز چند معیاره

آنالیز تصمیم، علم و هنر طراحی و یا انتخاب بهترین گزینه بر اساس اهداف و ترجیحات تصمیم‌گیرنده است. تصمیم‌گیری مستلزم آن است که گزینه‌های دیگری نیز برای انتخاب موجود باشد. در چنین مواردی، نیازی نیست تا تمامی گزینه‌های ممکن شناسایی شود، اما لازم است بهترین مورد انتخاب شود که متناسب با اهداف، خواسته‌ها، شیوه زندگی و ارزش‌ها باشد. به‌عبارت دیگر، تصمیم‌گیری، علم انتخاب است. به‌عنوان مثال، انتخاب بهترین فناوری برای تأمین آب شهری، تدوین راهکارهای حفاظت از سیل و یا بهینه‌سازی عملکرد مخزن، همگی از مشکلات تصمیم‌گیری و انتخاب هستند (Zarghami and Szidarovszky, 2011).

۲-۲-۱- روش جمع وزنی ساده

این روش ساده‌ترین و پرکاربردترین روش تحلیل چند معیاره است. در این روش، همه معیارها به یک مقیاس متعارف تبدیل می‌شوند. این مقیاس، معمولاً بین صفر و ۱ اختیار می‌شود که عدد ۱، نمایانگر بهترین عملکرد است. انتخاب گزینه‌ها بر اساس مقدار S_i است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_j r_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} w_j} \qquad (۱)$$

که در آن

w_j وزن معیار jام و r_{ij} امتیاز نرمال گزینه iام از دید معیار jام است که با معادله ۷ محاسبه می‌شود.

۲-۲-۲- روش تاپسیس

در این روش گزینه انتخابی باید کوتاه‌ترین فاصله از جواب ایده‌آل و بیشترین فاصله از جواب غیرایده‌آل را داشته باشد. مقدار فاصله هر گزینه با جواب‌های ایده‌آل S_{i^*} و غیرایده‌آل S_{i^-} که به‌ترتیب زیر نشان داده می‌شوند

$$S_{i^*} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(v_{ij} - v_j^*)^2} \text{ for } i = 1,2,\cdots,m \qquad (۲)$$

$$S_{i^-} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(v_{ij} - v_j^-)^2} \text{ for } i = 1,2,\cdots,m \qquad (۳)$$

که در آن

v_{ij} مقدار نرمال موزون عملکرد گزینه iام از دید معیار jام و v_j^* و v_j^- به‌ترتیب مقدارهای آرمانی و نامطلوب برای معیار jام هستند. رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از محاسبه نزدیکی نسبی c_i^* هر گزینه به جواب ایده‌آل به دست می‌آید (Zarghami and Szidarovszky, 2011)

$$C_{i^*} = \frac{S_{i^-}}{S_{i^*} + S_{i^-}}, \text{for } i = 1,2,\cdots,m \qquad (۴)$$

- مراحل انجام آنالیز چند معیاره با کمک نرم‌افزار GFDM

در این پژوهش، از دو گروه متخصص استفاده شد. گروه اول، شامل مجموعه‌ای از متخصصان، استادان، کارشناسان، نویسندگان پژوهش‌ها و کتاب‌های علمی بودند که متناسب با هریک از بخش‌های هر گزینه، انتخاب شدند و در هر بخش متفاوت بودند تا امتیاز هر سناریو در جدول ۴ مشخص شود. گروه دوم، چهار نفر از مسئولین و استادان دانشگاه بودند که گروه تصمیم‌گیر را تشکیل دادند و برای تکمیل جدول ۵ از نظرات آنها استفاده شد.

در ابتدا برای انجام آنالیز چند معیاره با در نظر گرفتن شرایط هریک از مراحل شبکه آب‌رسانی و خصوصیات آلاینده‌های مختلف اقدام به تعریف ۳۰ سناریو برای مراحل آب‌رسانی شد. سپس ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل شد و امتیاز هر گزینه نسبت به زیرمعیار مشخص شده محاسبه شد. محاسبه امتیاز هر بخش به این صورت بود که یک امتیاز به‌صورت بیانی از بین گزینه‌های خیلی کم، کم، نسبتاً کم، متوسط، زیاد، نسبتاً زیاد و خیلی زیاد، توسط استادان متخصص و نویسندگان پژوهش‌ها و کتاب‌های علمی انتخاب شد. نظر هریک از کارشناسان برای هر بخش مشخص شد و میانگین نظرات، امتیاز آن بخش در نظر گرفته شد. همچنین برای محاسبه در برخی از بخش‌ها امتیازات بیانی به‌صورت عددی، از ۱ تا ۷، در نظر گرفته شد. درضمن، نقد پژوهش‌ها و کتاب‌ها به پرسش‌نامه انتقال داده شد. در مرحله بعدی قدرت هر تصمیم‌گیر از گروه تصمیم‌گیران با توجه به مسئولیت، سابقه کاری، تجربه و تحصیلات عالی هر تصمیم‌گیرنده، مشخص شد. سپس نظرات هر تصمیم‌گیر نسبت به میزان اهمیت هر زیر معیار برای تصمیم‌گیری مشخص شد. در نهایت با نظر تصمیم‌گیران و با کمک نرم‌افزار GFDM امتیاز هرسناریو مشخص شد.

جدول ۴- ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل داده شده در نرم‌افزار GFDM برای مشخص کردن میزان خطر هر یک از سناریوها

Table 4. Decision matrix formed in GFDM software to determine the risk level of each scenario

Number	Index name	Access rate	The amount of time to prevent contamination from reaching the consumer	Extent of pollution	Infectious dose of the pollutant	Stability in water	Chlorine resistance	The possibility of removal in the next stages of purification
	Index data type	Explanatory	Explanatory	Explanatory	Explanatory	Explanatory	Explanatory	Explanatory
	Index weight	w:0.7766	w:0.6641	w:0.6947	w:0.7005	w:0.7284	w:0.6265	w:0.6047
1	Scenario 1	Much	Very much	Very much	Medium	Much	Much	Low
2	Scenario 2	Much	Very much	Very much	Much	Medium	Very much	Very little
3	Scenario 3	Much	Very much	Very much	Very much	Relatively much	Relatively much	Relatively little
4	Scenario 4	Much	Very much	Very much	Very much	Very much	Very little	Relatively much
5	Scenario 5	Much	Very much	Very much	Relatively much	Relatively little	Medium	Medium
6	Scenario 6	Very much	Much	Much	Medium	Much	Much	Low
7	Scenario 7	Very much	Much	Much	Much	Medium	Very much	Very little
8	Scenario 8	Very much	Much	Much	Very much	Relatively much	Relatively much	Relatively little
9	Scenario 9	Very much	Much	Much	Very much	Very much	Very little	Relatively much
10	Scenario 10	Very much	Much	Much	Relatively much	Relatively little	Medium	Medium
11	Scenario 11	Low	Medium	Relatively much	Medium	Much	Much	Low
12	Scenario 12	Low	Medium	Relatively much	Much	Medium	Very much	Very little
13	Scenario 13	Low	Medium	Relatively much	Very much	Relatively much	Relatively much	Relatively little
14	Scenario 14	Low	Medium	Relatively much	Very much	Very much	Very little	Relatively much
15	Scenario 15	Low	Medium	Relatively much	Relatively much	Relatively little	Medium	Medium
16	Scenario 16	Relatively much	Relatively little	Relatively much	Medium	Much	Much	Low
17	Scenario 17	Relatively much	Relatively little	Relatively much	Much	Medium	Very much	Very little
18	Scenario 18	Relatively much	Relatively little	Relatively much	Very much	Relatively much	Relatively much	Relatively little
19	Scenario 19	Relatively much	Relatively little	Relatively much	Very much	Very much	Very little	Relatively much
20	Scenario 20	Relatively much	Relatively little	Relatively much	Relatively much	Relatively little	Medium	Medium
21	Scenario 21	Very much	Low	Medium	Medium	Much	Much	Low
22	Scenario 22	Very much	Low	Medium	Much	Medium	very much	Very little
23	Scenario 23	Very much	Low	Medium	Very much	Relatively much	Relatively much	Relatively little
24	Scenario 24	Very much	Low	Medium	Very much	Very little	Very little	Relatively much
25	Scenario 25	Very much	Low	Medium	Relatively much	Relatively little	Medium	Medium
26	Scenario 26	Much	Very little	Medium	medium	Much	Much	Low
27	Scenario 27	Much	Very little	Medium	Much	Medium	Very much	Very little
28	Scenario 28	Much	Very little	Medium	Very much	Relatively much	Relatively much	Relatively little
29	Scenario 29	Much	Very little	Medium	Very much	Very much	Very little	Relatively much
30	Scenario 30	Much	Very little	Medium	Relatively much	Relatively little	Medium	Medium

برای استفاده از نظر تصمیم‌گیران در نرم‌افزار GFDM، سیستم به‌صورت زیر عمل می‌کند:

الف) تبدیل ورودی‌های بیانی به عددی: بسیاری از تصمیم‌گیران در ارزیابی گزینه‌ها و معیارها ترجیح می‌دهند که نظرات خود را با عبارات بیانی ارائه کنند، ولی برای انجام محاسبات، نیاز به معادل‌سازی آنها است.

ب) نرمال‌سازی داده‌ها: مقدار ارزیابی معیارهای مختلف، ابعاد متفاوتی خواهند داشت. برای تجمیع این داده‌ها نیاز به نرمال‌سازی است. البته روش نرمال‌سازی تأثیر بسیار زیادی روی نتایج استفاده از روش‌های تحلیل چند معیاره دارند؛ بنابراین این روش باید یکسان باشد. در این پژوهش از معادله ۵ استفاده شد که در آن r_{ij} نرمال داده و x_{ij} داده ورودی است (Safari et al., 2021)

(۵)

برای معیار مثبت $r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\text{Max } x_{ij}}$

برای معیار منفی $r_{ij} = \frac{\text{Min } x_{ij}}{x_{ij}}$

- نرم‌افزار GFDM

برای ارزیابی هرچه بهتر گزینه‌های پیشنهادی، از نرم‌افزار تصمیم‌گیری چند معیاره فازی گروه GFDM استفاده شد. این نرم‌افزار با توجه به نظرات تصمیم‌گیران، ابتدا اقدام به تعیین وزن معیارها کرده و سپس با مقایسه روش‌های ارائه شده، بر اساس روش موجود، نتایج حاصل را، بر اساس اولویت و اهمیت معیارها، برای تصمیم‌گیران مشخص می‌کند. در این بخش نرم‌افزار از روش‌های TOPSIS و جمع وزنی ساده استفاده شده است. در واقع ابتدا به کمک یک سیستم هوشمند بین دو روش بیان شده، انتخاب انجام نشد. این انتخاب با یک قانون اگر-آنگاه و به‌صورت زیر است:

اگر در ماتریس تصمیم‌گیری تعداد گزینه‌ها کمتر از نصف تعداد معیارها باشد، آنگاه روش جمع وزنی ساده، به‌خاطر عملکرد بهتر، انتخاب می‌شود. در غیر این صورت، از روش TOPSIS برای انجام محاسبات استفاده می‌شود (Ardakanian and Zarghami, 2010). همچنین در این پژوهش سعی شد از تصمیم‌گیران متخصص و با تجربه دربخش‌های مرتبط با این پژوهش کمک گرفته شود.

معیارهای اصلی برای تصمیم‌گیری در سه معیار اصلی و زیر معیارها عنوان شده‌اند که عبارت‌اند از:

در انتخاب معیارها تلاش شد از معیارها و زیر معیارهایی که بیشترین نقش را در میزان آسیب‌پذیری در مقابل حملات بیولوژیکی دارند استفاده شود. همچنین معیارها و زیر معیارهای انتخاب شده عمومیت داشته و در بیشتر شبکه‌های آب‌رسانی شهرها و کشورهای جهان صدق می‌کند. در انتخاب معیارها و زیر معیارهای مربوط به آلاینده‌های استفاده شده در حملات بیولوژیکی تلاش شد معیارهایی که بیشترین اهمیت را در مورد تأثیر آلاینده در صورت حمله بیولوژیکی دارند انتخاب شوند.

میزان آسیب‌پذیری هر یک از مراحل آب‌رسانی عبارت‌اند از: میزان قابلیت دسترسی، میزان زمان برای جلوگیری از رسیدن آلاینده به مصرف‌کننده، میزان گستردگی آلودگی در صورت پخش آلاینده.

میزان قدرت آسیب‌رسانی آلاینده عبارت‌اند از: پایداری در آب، مقاومت در برابر کلر، دوز عفونی.

میزان ایجاد خطر آلاینده در هر یک از مراحل آبرسانی عبارت‌اند از: امکان حذف آلاینده در مراحل بعدی آب‌رسانی و تصفیه.

- تنظیمات نرم‌افزار GFDM

در جدول ۴ (ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل شده در نرم‌افزار GFDM برای مشخص کردن میزان خطر هر یک از سناریوها) ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل یافته و سناریوها و مقدار هر معیار برای تمامی سناریوها وارد شده است. مقدار وارد شده به نرم‌افزار، بر اساس پژوهش‌ها در منابع علمی معتبر و نظر اساتید متخصص انجام شده است. همچنین زیر معیارهایی که تأثیر منفی بر ارزیابی دارند، با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. تأثیر منفی به این معنی است که افزایش مقدار آنها سبب کاهش مطلوبیت آن معیار می‌شود؛ بنابراین با تغییر نحوه محاسبه آن به ارائه ماتریس مذکور پرداخته شد.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.351591.3276

جدول ۵- نظرات تصمیم‌گیران و وزن هر یک

Table 5. Decision makers' opinions and weight of each

Rank	Decisive name	D_1	D_2	D_3	D_4
	Decisive power	Much	Very much	Relatively mucl	Very much
1	Access rate	Very much	Very much	Very much	Much
2	The amount of time to prevent contamination from reaching the consumer	Much	Much	Much	Relatively much
3	Extent of pollution	Very much	Relatively much	Much	Much
4	Infectious dose of the pollutant	Relatively much	Relatively much	Very much	Very much
5	Stability in water	Very much	Much	Very much	Much
6	Chlorine resistance	Medium	Relatively much	Much	Much
7	The possibility of removal in the next stages of purification	Much	Medium	Low	Much

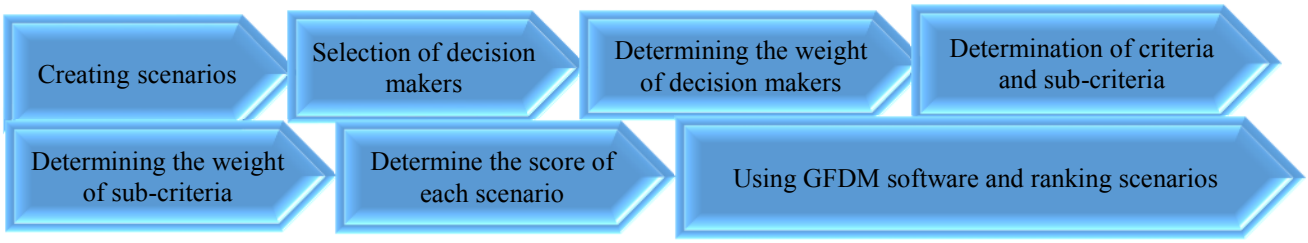

Fig. 1. Flowchart

شکل ۱- روندنما

در جدول ۵ (نظرات تصمیم‌گیران و وزن هریک) نیز نظر هر تصمیم‌گیرنده برای هر معیار و همچنین وزن هر تصمیم‌گیرنده، به‌صورت مقدار بیانی آمده است (نام تصمیم‌گیران به‌صورت حروف الفبای انگلیسی آورده شده است). با توجه به مسئولیت، سابقه کاری، تجربه و تحصیلات عالی هر تصمیم‌گیرنده، وزن هر تصمیم‌گیرنده عنوان شده است.

- روند نما

در شکل ۱ (روندنما) کل روش پژوهش به‌صورت شماتیک و در قالب فلوچارت نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

نتایج آنالیز، در جدول۶ (جدول امتیازدهی گزینه‌ها) مشخص شده است. این نتایج حاکی از آن است که سناریو ۲۶، بیشترین امتیاز را بر اساس نظرات تصمیم‌گیران کسب کرده است که با بیشتر پژوهش‌های علمی مانند (Nasimi et al., 2019) در این زمینه هم‌خوانی دارد. این سناریو خطرناک‌ترین حمله بیولوژیکی به شبکه آب‌رسانی در بین سناریوها بوده که با وارد کردن پاتوژن باسیلوس آنتراسیس که عامل بیماری سیاه زخم است، در شبکه توزیع آب رخ می‌دهد. این پاتوژن در آب پایدار است و در مقابل کلر مقاومت زیادی دارد، از طرفی با ورود آلاینده به شبکه توزیع به‌دلیل زمان بسیار کم برای تشخیص و جلوگیری از انتشار آلودگی و نبود تصفیه در مراحل بعدی، بیشترین خطر را دارد. سناریو ۲۷، رتبه بعدی را با اختلاف کمی دارد که با وارد کردن کریپتوسپوریدیوزیس به شبکه توزیع رخ می‌دهد و مقاومت خوبی در مقابل کلر دارد، اما پایداری آن نسبت به باسیلوس آنتراسیس کمتر است.

سناریو ۲۱، رتبه سوم را دارد که آلوده کردن مخازن آب تصفیه شده با باسیلوس آنتراسیس است، مخازن آب تصفیه شده به‌دلیل اینکه دسترسی به آنها بیشتر بوده و در مراحل بعدی تصفیه انجام نمی‌شود، همچنین به‌دلیل نبود زمان کافی برای جلوگیری از رسیدن

جدول ۶- جدول امتیازدهی گزینه‌ها

Table 6. Scoring table of options

Number	Scenarios	Score
1	Scenario 26	R: 73.25
2	Scenario 27	R: 72.33
3	Scenario 21	R: 70.71
4	Scenario 22	R: 69.87
5	Scenario 17	R: 68.10
6	Scenario 28	R: 66.74
7	Scenario 16	R: 66.45
8	Scenario 23	R: 66.10
9	Scenario 18	R: 61.04
10	Scenario 7	R: 60.01
11	Scenario 29	R: 58.93
12	Scenario 24	R: 58.29
13	Scenario 6	R: 58.08
14	Scenario 2	R: 56.40
15	Scenario 12	R: 56.00
16	Scenario 1	R: 54.28
17	Scenario 8	R: 53.51
18	Scenario 11	R: 53.50
19	Scenario 30	R: 49.94
20	Scenario 3	R:49.74
21	Scenario 25	R: 49.08
22	Scenario 13	R: 48.00
23	Scenario 19	R: 46.10
24	Scenario 20	R: 45.93
25	Scenario 9	R: 42.68
26	Scenario 10	R: 41.63
27	Scenario 4	R: 40.14
28	Scenario 5	R: 38.44
29	Scenario 14	R: 37.20
30	Scenario 15	R: 34.04

آلودگی به مصرف‌کننده یکی از آسیب‌پذیرترین مراحل شبکه آب‌رسانی است. با دقت به نتایج به‌دست آمده میزان خطر در مراحل بعدی تصفیه بیشتر از مراحل قبلی است که به‌دلیل زمان کمتر برای جلوگیری از رسیدن آلودگی به مصرف‌کننده و عدم وجود مراحل تصفیه بعدی و دسترسی بالا به این مراحل است. از طرفی بعضی از آلاینده‌ها در مقابل کلر مقاومت چندانی ندارند و همچنین پایداری کم آنها موجب کاهش نگرانی آلوده شدن شبکه با این آلاینده‌ها می‌شود.

نتایج به دست‌آمده نشان داد در دسترس بودن آزمایش‌ها و روش‌های تشخیص آلاینده‌های خطرناکی مانند باسیلوس آنتراسیس و کریپتوسپوریدیوزیس در مراحل آب‌رسانی آسیب‌پذیرتر مانند شبکه توزیع و مخازن آب تصفیه شده ضروری بوده و ایجاد آمادگی در صورت وجود آلاینده برای کاهش آسیب‌های وارده و تلفات احتمالی اهمیت زیادی دارد که با نتایج پژوهش‌هایی مانند (Ahmadi and Soleimanian, 2020) هم‌خوانی دارد.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.351591.3276

۴- نتیجه‌گیری

شبکه آب‌رسانی شهری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های مرتبط با بقای جوامع به‌دلیل برخی خصوصیات مانند فراگیر بودن، قابلیت دسترسی بسیار اهمیت دارد. حملات بیولوژیکی و وارد کردن آلاینده‌های مختلف می‌تواند سلامت مصرف‌کنندگان را به‌صورت جدی به خطر اندازد. شناخت نقاط ضعف شبکه آب‌رسانی و آمادگی برای برخورد با آلودگی و حملات بیولوژیکی احتمالی اهمیت زیادی دارد و از اقدامات پدافند غیرعامل است.

در این پژوهش سعی شد میزان خطر مراحل مختلف شبکه آب‌رسانی با آلاینده‌های بیولوژیکی مختلف رتبه‌بندی شود. با توجه به نتایج پژوهش، میزان آسیب‌پذیری مراحل انتهای شبکه آب‌رسانی (مخازن آب تصفیه شده و شبکه توزیع) به‌دلیل نزدیکی به مصرف‌کننده و نداشتن زمان برای جلوگیری از رسیدن آلودگی به مصرف‌کننده و عدم وجود مراحل تصفیه بعدی بیشتر بود. همچنین منابع تأمین آب به‌دلیل گستردگی و دسترسی بالا در صورت آلودگی می‌تواند مشکلات زیادی را برای تأمین آب ایجاد کند. قابل بیان است برای آلوده کردن منابع تأمین آب به مقدار زیادی آلاینده با دوز عفونی زیاد نیاز است. همچنین آلاینده‌ای که مقاومت بیشتری به کلر دارند و دارای پایداری بیشتر در آب هستند، خطر بیشتری دارند.

در سناریوهایی که در آنها این آلاینده‌ها در مراحل انتهایی (مخازن آب تصفیه شده و شبکه توزیع) استفاده شده‌اند بیشترین خطر را برای مصرف‌کننده خواهند داشت. با توجه به مقاومت کم گروهی از آلاینده‌ها به کلر در صورت آلوده شدن شبکه به وسیله این آلاینده‌ها خطر کمتری سلامت مصرف‌کنندگان را تهدید می‌کند. بهترین روش برای پیشگیری از ایجاد حملات بیولوژیکی کاهش امکان دسترسی به مراحل مختلف شبکه آب‌رسانی است، اما با در نظر گرفتن شرایط موجود شناخت و محاسبه میزان خطر سناریوهای مختلف می‌تواند موجب آمادگی و افزایش سرعت عمل در واکنش با حملات بیولوژیک احتمالی شود.

۵- قدردانی

نویسندگان این پژوهش، از حمایت‌ها و زحمات پژوهشکده محیط‌زیست دانشگاه تبریز و کلیه پژوهشگرانی که با نظرات ارزشمند خود در انجام این پژوهش ما را یاری کردند، کمال تقدیر و تشکر را دارند.

References

Ahmadi, A. & Soleimanian, J. 2020. Pollution of drinking water sources with biological toxins; potential threat of bioterrorism. *Journal of Marine Medicine*, 1**,** 182-189. (In Persian)

Amirkhani, A. 2010. Epidemiology of tularemia and its role in bioterrorism. *Journal of Knowledge and Health*, 5**,** 64. (In Persian)

Ardakanian, R. & Zarghami**,** M. 2010. Management of water resources development projects. Iranian Student Book Agency (Jihad Daneshgahi, Pub.), Tehran, Iran. (In Persian)

Ataii, R., Mehrabi-Tavana, A. & Ghorbani, G. 2005. Analysis of the cholera epidemic in the summer of 2005 in Iran. *Journal of Military Medicine*, 7**,** 177-185. (In Persian)

Azadi, N., Mir Hosseini, S. M. A. & Torkfar, A. 2020. Designing sport guild complex with a passive defense approach to provide shelter during occurring earthquake in Kerman Province. *Geography (Regional Planning*), 10**,** 1-22. (In Persian)

Bakhshi Shadmehri, F., Zarghani, S. H. & Kharzmi, O. A. 2016. Analysis of passive defense considerations in urban infrastructure with an emphasis on water infrastructure. *Geographical Researches*, 31**,** 103-117. (In Persian)

Bigdelou, M. & Malakoutikhah, A. 2012. *Bioterrorism*. Shirazi Martyr General Sayad Shirazi Educational and Research Center Pub., Tehran, Iran. (In Persian)

Bitarafan, M., Joneidi, M. & Laleh Arefi, Sh. 2015. *Urban Water Supply Network Design: with Passive Defense Approach*, Emarat Pars, Tehran, Iran. (In Persian)

Burrows, W. D. & Renner, S. E. 1999. Biological warfare agents as threats to potable water. *Environmental Health Perspectives*, 107**,** 975-984.

Chandler, D. & Landrigan, I. 2004. *Bioterrorism: a Journalist's Guide to Covering Bioterrorism*, 2nd Ed., Radio and Television News Directors Foundation. New York. USA.

Cicirello, H., Kehl, K., Addiss, D., Chusid, M., Glass, R., Davis, J., et al. 1997. Cryptosporidiosis in children during a massive waterborne outbreak in milwaukee, wisconsin: clinical, laboratory and epidemiologic findings. *Epidemiology and Infection*, 119**,** 53-60.

Donaghy, M. 2006. Neurologists and the threat of bioterrorism. *Journal of the Neurological Sciences*, 249**,** 55-62.

Doost Hosseini, E. & Khanjani, M. J. 2011. How to spread pollution in the urban water supply system. *The 3rd National Conference on Civil Engineering*. Isfahan, Iran. (In Persian)

Ghazizadeh, A., Jalili Ghazizadeh, M. & Ghane, A. A. 2008. Evaluation of water supply system components from the perspective of passive defense. *2nd National Conference on Operation and Maintenance of Water and Wastewater Systems (NCWW02)*. Tehran, Iran. (In Persian)

Habibi, M. 2018. Application of hard set method in detecting intentional contamination of urban water distribution systems. M.Sc. Thesis, Islamic Azad University East Tehran, Iran. (In Persian)

Kroll, D. 2006. Securing Our Water Supply: Protecting a Vulnerable Resource. Pennwell publishers. Tulsa, Oklahama, USA.

Mohammadian, M., Hosieni, S. A. & Hajiaghaei Kamrani, M. 2019. Analysis of the role of passive defense in Tabriz with crisis management approach. *Journal of Research and Urban Planning*, 9(35)**,** 69-82. (In Persian)

Nasimi, Z., Zarghani, S. H. & Kharazmi, O. A. 2019. The analysis of risk and likelihood of bioterrorism attacks on urban water infrastructure. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, 9**,** 125-146. (In Persian)

Rashidi, Y. 2014. Design of a strategic plan for passive defense in municipal and industrial water and wastewater forecasting 2025 (case study: Ferdous City). MSc. Thesis, University of Birjand, Iran. (In Persian)

Rice, E. W. 2011. Microbial Issues in Drinking Water Security. In: Clark, R. M., Hakim, S. & Ostfeld, A. ed. *Handbook of Water and Wastewater Systems Protection*. Springer. 151-161.

Riedel, S., Morse, S. A., Mietzner, T. A. & Miller, S. 2019. *Jawetz Melnick and Adelbergs Medical Microbiology 28 E*, McGraw Hill Professional.

Safari, S., Zarghami, M., Yegani, R. & Mosaferi, M. 2021. Fuzzy multi-criteria group decision making on water treatment methods for a university complex. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 6**,** 30-40. (In Persian)

Shahpari, M. 2017. *Introduction to Bioprotection*, Boostan Hamid. Tehran, Iran. (In Persian)

Tavakoli, H. R., Sarafpour, R. & Samadi, M. 2005. Water and food bioterrorism. *Journal of Military Medicine*, 7(1)**,** 75-82. (In Persian)

Tzipori, S. & Ward, H. 2002. Cryptosporidiosis: biology, pathogenesis and disease. *Microbes and Infection*, 4**,** 1047-1058.

Zarghami, M. & Szidarovszky, F. 2011. *Multicriteria Analysis: Applications to Water and Environment Management*, Springer Science & Business Media, Arizona, USA.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License