

Research Paper

مقاله پژوهشی

## Determining the Risk Level of Water Supply Wells in Imam Ali Rural Complex of Mashhad City by FMEA Method

## تعیین سطح ریسک چاه‌های تأمین‌کننده آب مجتمع روستایی امام علی شهرستان مشهد به روش FMEA

Samaneh Moqarab Elahi<sup>1\*</sup> and Hashem Kouchakzadeh Dandansaz<sup>1</sup>

1- M.Sc. of Civil Engineering-Environmental Engineering, Expert of Mashhad Water and Wastewater Company, Mashhad, Iran.

\* Corresponding Author, Email: [sababakht88@gmail.com](mailto:sababakht88@gmail.com)

سامانه مقرب الهی<sup>۱\*</sup> و هاشم کوچک‌زاده دندانساز<sup>۱</sup>  
۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-مهندسی محیط‌زیست، کارشناس شرکت آب و فاضلاب مشهد، مشهد، ایران.  
\* نویسنده مسئول، ایمیل: [sababakht88@gmail.com](mailto:sababakht88@gmail.com)

Received: 27/02/2024  
Revised: 26/07/2024  
Accepted: 07/10/2024  
© IWWA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۸  
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۵/۰۵  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶  
© انجمن آب و فاضلاب ایران

### Abstract

Water safety planning is a comprehensive assessment and risk management approach that includes all stages of a drinking water supply chain, from the catchment to the consumer. A Water Safety Plan (WSP) ensures the safety of drinking water through this approach. In this study, risk factors were first identified and evaluated. In this research, the level of risks threatening the water supply sources of Imam Ali rural complex of Mashhad city was determined. A descriptive survey method based on the guide of the water safety program and the FMEA method of information analysis was implemented in which the required information was collected using the interview method, past records, a summary of experts' opinions, questionnaires and field visits. By calculating the RPN risk priority number, it was shown that water pollution due to the inflow of agricultural land effluent with a weight of 48.74 was the highest risk and the inflow of pollutants due to the lack of improvement of the wells with a weight of 19.25 was the lowest risk.

**Keywords:** Drinking water, Risk assessment, water safety program, Imam Ali rural complex.

### چکیده

برنامه‌ریزی ایمنی آب یک ارزیابی جامع و مدیریت ریسک است، رویکردی که شامل تمام مراحل یک زنجیره تأمین آب آشامیدنی، از حوضه آبریز تا مصرف‌کننده است. یک طرح ایمنی آب (WSP) ایمنی آب آشامیدنی را از طریق این رویکرد تضمین می‌کند. در این مطالعه، عوامل خطر در ابتدا شناسایی و ارزیابی می‌شوند. در این پژوهش برای تعیین سطح ریسک‌های تهدیدکننده منابع تأمین آب مجتمع روستایی امام علی شهرستان مشهد از روش توصیفی پیمایشی که در آن اطلاعات موردنیاز با استفاده از روش مصاحبه، سوابق گذشته، جمع‌بندی نظرات خبرگان و پرسشنامه و بازدیدهای میدانی جمع‌آوری شده‌اند و به استناد راهنمای برنامه ایمنی آب و روش FMEA تجزیه تحلیل اطلاعات انجام شده است. با محاسبه عدد اولویت ریسک RPN نشان داده شد که آلودگی آب بر اثر ورود پساب زمین‌های کشاورزی با وزن ۴۸/۷۴ بالاترین ریسک و ورود آلاینده‌ها به دلیل عدم بهسازی دهانه چاه‌ها با وزن ۱۹/۲۵ دارای کمترین ریسک تشخیص داده شد.

**کلمات کلیدی:** آب شرب، ارزیابی ریسک، برنامه ایمنی آب، مجتمع روستایی امام علی (ع).

شناسایی کنند. مفاهیم مدرن «برنامه ایمنی آب» مشتمل بر پیش‌آگاهی لازم و پیشگیری در مورد آلودگی‌های محتمل، هشداردهی تغییرات در سامانه‌های آبی، حفاظت مصرف‌کنندگان آب در مقابل حملات بیولوژیکی، فیزیکی، شیمیایی و سایبری آب است. عملکرد قابل‌قبول شبکه‌های آبرسانی از نظر کیفیت، وابسته به برنامه‌های بهره‌برداری و نگهداری است که از محاسبه و مدیریت ریسک می‌توان به‌عنوان یکی از این برنامه‌ها اشاره کرد (تفرشی و تابش، ۱۴۰۳).

طرح ایمنی آب یک رویکرد سیستماتیک است که هدف آن تضمین کیفیت آب توزیع‌شده بین مصرف‌کنندگان است. در سال ۲۰۰۴، سازمان بهداشت جهانی بیانیه‌ای مبنی بر اجرای طرح ایمنی آب صادر کرد. این طرح هم‌اکنون در ایران در حال انجام است (Kishipour and et al., 2021). ریسک در وسیع‌ترین معنای آن زیرمجموعه‌ای از عدم قطعیت‌ها است. تمام موقعیت‌های ریسک دارای عدم قطعیت هستند؛ اما عناصری از ریسک وجود دارد که معمولاً برای تشخیص مجموعه بزرگی از عدم قطعیت استفاده می‌شود. فرهنگ لغت بین‌المللی وبستر ریسک را به این شرح تعریف می‌کند: (۱) احتمال از دست دادن، آسیب، ضرر و یا تخریب؛ احتمال خطر، تهدید و مخاطره؛ (۲) شانس از دست دادن و یا مخاطره یک موضوع مهم تحت پوشش بیمه و (۳) مقداری از محصول که ممکن است از دست برود و احتمال از دست دادن آن.

ریسک به‌عنوان معیار و نشانگری برای پایداری باید برای در پروژه‌های مدیریت منابع آب مدنظر قرارگیرد. مدیریت هوشمند ریسک به کمک مدیران عدم قطعیت و پیامدهای مرتبط با ریسک در مراحل طراحی و بهره‌برداری از پروژه‌های مهندسی منابع آب، امری اجتناب‌ناپذیر است. همواره در پروژه‌های منابع آب، احتمالاتی مبنی بر عدم دستیابی به اهداف از پیش تعیین‌شده وجود دارد. چنین مواردی نشان‌دهنده آن است که بسیاری از پروژه‌های مهندسی منابع آب در مراحل طرح‌ریزی، طراحی، اجرا (پیاپی‌سازی) و بهره‌برداری به‌درستی ارزیابی نشده و به عدم قطعیت‌های موجود توجه نمی‌شود (Cazemier et al., 2014).

ریسک در اصطلاح عبارت است از امکان تفاوت «نتیجه مورد انتظار» از نتیجه وقوع یافته. هم‌چنین هنگامی که عدم قطعیت پدیده قابل‌اندازه‌گیری (عینی) یا تخمین (ذهنی) نباشد؛ ریسکی تعریف نمی‌شود. ریسک همواره با عدم قطعیت همراه است. معنای عمومی ریسک؛ احتمال از دست دادن (آسیب، ضرر و یا تخریب)، تهدید، مخاطره و در نهایت احتمال از دست دادن منفعت است. گزارش کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای سال ۲۰۱۶ آمریکا

دسترسی به آب آشامیدنی سالم یک نیاز اساسی و از حقوق اولیه انسان‌ها است. افزایش تقاضای آب در تمامی بخش‌های مصرفی، اعم از «شرب و خدمات»، «صنعت» و «کشاورزی» موجب تغییر و کاهش کیفیت آب شده است. در حال حاضر نیز حجم بالایی از پساب‌های کشاورزی، شهری و صنعتی کنترل نشده‌ای وجود دارد که خطر بالقوه‌ای برای کاهش کیفیت منابع آب به حساب می‌آید و پیش‌بینی می‌شود این روند در سال‌های آتی ادامه داشته باشد. مأموریت اصلی تأسیسات بخش آب ارائه آبی پاک و سالم مطابق با تمام استانداردها و الزامات قابل‌اجرا با قیمتی مقرون به‌صرفه به‌منظور حفظ سلامت عمومی و افزایش پایداری اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی جوامعی است که به آن‌ها خدمت می‌کند.

بهترین روش برای اطمینان از کیفیت آب آشامیدنی اجرای سیستم مدیریتی جامع و یکپارچه با همکاری کلیه سازمان‌های ذی‌ربط است. شرکت‌های آب و فاضلاب در مناطق خشک با مسائل چندوجهی آلودگی آب‌های زیرزمینی طبیعی، هزینه‌های بالای تصفیه و نرخ پایین آب سر و کار دارند. این تأسیسات به منابع متناوب متکی هستند که منجر به خرابی‌های متعدد کیفیت آب در منبع، تصفیه، توزیع و سیستم‌های لوله‌کشی داخلی می‌شود (Haider et al., 2021). «برنامه ایمنی آب» (WSP) روشی سامان‌مند برای اطمینان از کمیت و کیفیت آب از منبع تا مصرف است. برنامه ایمنی آب براساس یک برنامه جامع، مخاطرات کیفیت آب و ریسک آن‌ها را بررسی می‌کند. عبارت «برنامه ایمنی آب» بیشتر در اروپا کاربرد داشته و در جاهای دیگر دنیا اغلب با عنوان «برنامه مدیریت خطر» به‌کار می‌رود.

برنامه ایمنی آب به‌عنوان مهم‌ترین اقدام برای تضمین کیفیت آب بوده که توسط سازمان جهانی بهداشت تهیه و اجرای آن به کشورهای عضو توصیه شده است. گستره عمل برنامه ایمنی آب از حوضه آبریز تا مصرف‌کننده را در بر گرفته و بر مبنای مدیریت ریسک تهیه می‌شود. برنامه ایمنی آب بهترین روش برای اطمینان پایدار از ایمن بودن یک سیستم تأمین آب آشامیدنی، استفاده از راه‌کارهای ارزیابی کامل ریسک‌ها و مدیریت کردن آن را شامل می‌شود، به‌طوری‌که در تمامی مراحل تأمین آب شرب از ابتدای حوضه آبریز تا نقطه مصرف را در برگیرد. وزارت نیرو به‌عنوان تأمین‌کننده و توزیع‌کننده آب آشامیدنی و شرکت آب و فاضلاب از طریق شناسایی ریسک‌های مربوط به سامانه‌های آبرسانی می‌توانند از بروز اتفاقاتی که می‌تواند آبرسانی را مختل نماید را

(WASH-1400) یکی از ساده‌ترین تعاریف فنی در زمینه ریسک را به شرح رابطه (۱) ارائه داده است:

$$(۱) \quad \text{بزرگی} \times \text{فراوانی} = \text{ریسک}$$

روش‌های تحلیل و ارزیابی ریسک را می‌توان براساس دو نگرش تقسیم‌بندی کرد: الف) روش‌های گذشته‌نگر و ب) روش‌های آینده‌نگر. روش‌های گذشته‌نگر به دنبال کشف ریشه حوادث ناهنجار و متضاد در گذشته هستند. هدف اصلی در این روش مشخص کردن علت وقوع حوادث ناخوشایند است. در این روش مقصر و یا مسئول حوادث ناخوشایند معلوم می‌شود و لذا از

تکرار این‌گونه اتفاقات جلوگیری می‌نماید. مدل تحلیلی ریشه‌یابی علی که کاربرد آن برای محیط‌های پیچیده توصیه می‌شود، از این دست است. روش‌های آینده‌نگر برای ارزیابی و تحلیل ریسک از روش‌های گذشته‌نگر مفیدتر هستند. از جمله مدل‌های آینده‌نگر می‌توان به ۱- مدل تحلیل مخاطرات و نقاط کنترل بحرانی (HACCP) (Kanyesigye et al., 2019)؛ ۲- مدل شکست و تحلیل اثر (FMEA) (Dominguez-Chicas and Scrimshaw, 2010)؛ و ۳- مدل تحلیل درخت خطا (FTA) (Hong et al., 2009) اشاره نمود. برخی دیگر از روابط ارزیابی ریسک که بیشتر از رابطه (۱) توسعه یافته‌اند جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- روابط ارزیابی ریسک (Ferrier and Haque, 2003; Arnold, 2005; Ekwere and et al., 2021)

شماره فرمول	معادله ارزیابی (برآورد) ریسک	تعریف متغیرها
(۲)	$R = C * T * C_m * S$	C: شانس (احتمال)؛ T: میزان مخاطره؛ $C_m$ : شدت؛ S: مدت در معرض قرارگیری
(۳)	$R = H * V$	H: مخاطره (اثر و احتمال)؛ V: آسیب‌پذیری
(۴)	$R = P * V * n$	P: احتمال وقوع؛ V: آسیب‌پذیری؛ n: عواقب (اثر نامطلوب)
(۵)	$R = L * C$ $C = I * V$	L: احتمال (فراوانی)؛ C: عواقب؛ I: اثر؛ V: آسیب‌پذیری
(۶)	$R = F * V$ $V = \frac{Human + Built + Natural + Systems + Sevirity}{5}$	F: فراوانی؛ V: آسیب‌پذیری
(۷)	$R = H * E$	H: مخاطره؛ E: در معرض قرارگیری (به چه میزان و چه مدت)

همان‌گونه که در جدول ۱ مشخص است در اکثر روابط برآورد ریسک، دو عامل فراوانی و شدت اثر نقش دارند. در بسیاری از موارد، ارزیابی ریسک بر مبنای روش‌های کیفی نظیر ماتریس احتمال-اثر (FEMA) و موارد مشابه صورت می‌پذیرد. این روش‌ها برای ارزیابی ریسک مبتنی بر نظرات خبرگان هستند. در مطالعات دیگر نیز، ریسک به‌عنوان حاصل ضرب احتمال در اثر یک رخداد محسوب شده و دو شاخص «میزان تأثیر» و «احتمال وقوع» ریسک در قالب ماتریس احتمال-اثر ریسک مورد استفاده قرار گرفت (Shamsuzzoha et al., 2018; Figueras and Borrego, 2010). هم‌چنین در تهادی از پژوهش‌ها نیز از برخی روش‌های دیگر ارزیابی ریسک، نظیر FMEA استفاده شده است که میزان بزرگی ریسک بر اساس حاصل ضرب سه شاخص شدت، میزان کشف و احتمال وقوع ریسک محاسبه می‌شود (Wee et al., 2007).

عدم قطعیت در همه سامانه‌های مهندسی محور وجود دارد. زیرا همه این سیستم‌ها روی مدل‌سازی پدیده‌های فیزیکی تکیه دارند که ذاتاً تصادفی یا مدل‌سازی آن‌ها دشوار است. عدم

قطعیت‌ها ممکن است در حالت‌های خاص به ریسک تبدیل شوند و بر روی عملکرد سیستم منابع آب تأثیر ناخوشایندی داشته باشد. بنابراین در کارکرد سامانه‌های منابع آب به‌اندازه کافی انواع مختلف عدم قطعیت در نظر گرفته نشود، باید انتظار شکست پروژه‌ها را داشت. با این ذهنیت مدیران نیاز دارند تا تهدیدات اساسی را شناسایی و ریسک هرکدام را ارزیابی و مدیریت کنند (Bichai et al., 2022).

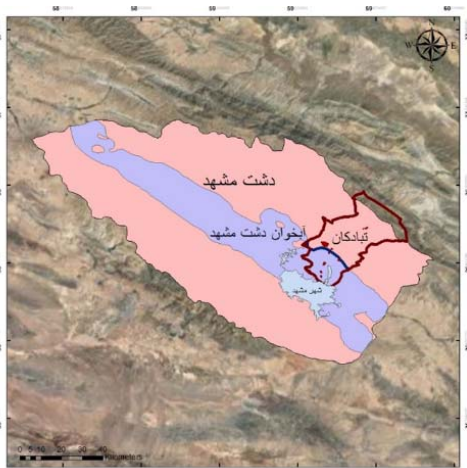
محسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی ارزیابی ریسک را با روش بررسی حالات بالقوه خرابی و خطر و تحلیل اثرات ناشی از آن در واحدهای کلرزنی ۴ تصفیه‌خانه منتخب در مشهد انجام دادند. نتایج نشان داد که به‌صورت کلی خطرات بالقوه با اولویت نخست بیشتر مربوط به سیستم‌های الکتریکی و در بخش حمل و نقل است و استفاده از تجهیزات استاندارد و حمل و نقل با استفاده از وسایل نقلیه مناسب برای کاهش ریسک این خطرات پیشنهاد شد. در تحقیق دیگری (Zhang et al., 2022) ریسک گزینه‌های انتقال آب به‌وسیله لوله را از مسافت‌های طولانی از طریق روش فازی برآورد نمودند. در انتها ایشان برنامه اضطراری

برخی از نقاط نظارت‌شده در ساختمان‌ها مقادیر پایین کلر باقی‌مانده و مقادیر بالای باکتری‌های را نشان دادند که نشان‌دهنده خطرات بالقوه مربوط به حضور بیوفیلیم‌ها است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه به نام مجتمع امام علی (ع) واقع در دشت مشهد و در قسمت شمال شرقی شهر مشهد (شکل ۱) قرار گرفته و مشتمل بر ۴ حلقه چاه است.



شکل ۱- موقعیت مجتمع امام علی (ع) نسبت به دشت و آبخوان مشهد

### ۲-۲- روش نمونه‌گیری

داده‌های جمع‌آوری‌شده در این تحقیق بر مبنای چهارچوب‌های ارائه‌شده در برنامه ایمنی سازمان بهداشت از طریق مشاهده کردن، مکالمه نمودن، مصاحبه، پرسشنامه‌های گردآوری‌شده از ۱۵ نفر از همکاران آب و فاضلاب منطقه ۵ مشهد و اعضای گروه کمیته برنامه ایمنی آب شهرستان متشکل از ادارات مربوطه در زمینه برنامه ایمنی آب جمع‌آوری شد. روش تحقیق بر مبنای یک‌روش استاندارد در اجرای برنامه ایمنی آب ارائه‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی و دستورالعمل‌های اجرای برنامه ایمنی آب شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور طراحی شد. پس از آن‌که اطلاعات جمع‌آوری، استخراج و طبقه‌بندی شد جدول‌های توزیع‌های فراوانی و نسبت‌های توزیع آن تهیه شد. در مرحله تجزیه و تحلیل داده‌ها، اول اطلاعات و داده‌های جمع‌آوری‌شده در مسیر هدف پایه‌ریزی شده، پاسخ به سؤال یا سؤالات پژوهش و ارزیابی کردن فرضیه‌های تحقیق، مورد تجزیه

را برای حفاظت سامانه‌های انتقال در برابر مخاطرات تهیه نمودند. معصوم بیگی و همکاران (۱۴۰۰) شناسایی و ارزیابی ریسک تأسیسات آب شرب شهر طالقان را به روش FMEA مطالعه کردند. این مطالعه از نوع توصیفی تحلیلی بود که در سال ۱۳۹۹ در کل تأسیسات آب شرب طالقان انجام شد. شناسایی و تعیین انواع خطرات و تهدیدات بالقوه تأسیسات آبی با بررسی مستندات لازم، بازدیدهای میدانی، مشاهده، مصاحبه و نظرخواهی از متخصصان آبفای استان البرز انجام شد. در ادامه به کمک روش FMEA، ارزیابی ریسک و اولویت‌بندی خطرات انجام و راه‌کارهای لازم برای کاهش خطر ارائه شد. در این مطالعه ۴۰ خطر بالقوه شناسایی شد. بیشترین خطرات متعلق به چاه‌های آب (۳۷/۵ درصد) بود. خطرات شناسایی‌شده ۷/۵، ۴۰ و ۵۲/۵ درصد به ترتیب مرتبط با کمیت، کیفیت آب و بهره‌برداری و نگهداری بودند. بالاترین عدد اولویت ریسک به ترتیب ۵۷۶، ۳۹۲ و ۳۴۳ مرتبط با تهدیدات بحرانی متعلق به آلودگی ناشی از منابع نقطه‌ای آلودگی اطراف چاه آب، حفاظت و امنیت ضعیف ایستگاه پمپاژ و نوسانات جریان آب در شبکه توزیع و مخازن بود. به ترتیب ۴۲/۳، ۳۵ و ۲۲/۵ درصد از ریسک‌ها در سطح بحرانی، متوسط و غیر بحرانی بودند. نتایج این مطالعه نشان داد زیرساخت آب از نظر بهره‌برداری و نگهداری در بخش‌های تأمین، تصفیه و توزیع تحت تأثیر تهدیدات مختلف شناسایی‌شده آسیب‌پذیر هستند و انجام اصلاحات لازم بر اساس اولویت‌های تعیین‌شده، برای پیشگیری از بروز حوادث احتمالی ضروری است.

(Nasari et al. (2022) با بررسی خطرات سیستم‌های آبرسانی روستایی شهر خرمشهر براساس طرح ایمنی آب با شناسایی و ارزیابی ۱۴ عامل خطر در شبکه توزیع و نقاط مصرف نشان به این نتیجه رسیدند که ۷۱/۵ درصد آن‌ها در سطح ریسک متوسط و ۲۸/۵ درصد در سطح ریسک بالا (بحرانی) قرار دارند که پس از تعیین اقدامات کنترلی و اصلاحی ۹۲/۹ درصد عوامل خطر به سطح متوسط (قابل مدیریت) و ۷/۱ درصد به سطح بحرانی رسید. (Pérez Vidal et al. (2022) در پژوهش خود ریسک مصرف‌کننده آب در شهر کالی را ارزیابی کردند که در چارچوب برنامه‌های ایمنی آب (WSP) قرار می‌گیرد. ابزارهایی مانند ماتریس ریسک یا و یک ماتریس نیمه کمی برای تخمین ریسک استفاده شد. نتایج نشان داد درک پایین مصرف‌کنندگان از خطر سلامتی و عدم آگاهی در مورد مسئولیت خود در قبال حفاظت از کیفیت آب آشامیدنی، می‌تواند منجر به رفتار نامناسبی شود که بر یکپارچگی سیستم توزیع داخلی تأثیر می‌گذارد. اگرچه اکثر متغیرهای تجزیه و تحلیل شده با مقررات ملی مطابقت داشتند،

و تحلیل قرار گرفت.

در این تحقیق برای شناسایی کردن رابطه‌ها و تعیین کردن معیارهای تحقیق فعلی از روش اجرایی برنامه ایمنی آب سازمان بهداشت و روش FMEA و برای تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار EXEL و همچنین نرم‌افزار GIS استفاده شد. FMEA روشی تحلیلی در ارزیابی ریسک است که سعی می‌کند تا حد امکان ریسک‌های بالقوه در منطقه‌ای که ارزیابی ریسک انجام می‌شود و همچنین علل و آثار مرتبط با آن شناسایی و ارزیابی شود. این روش براساس به‌دست آوردن شماره اولویت ریسک (RPN) است. این عدد از ضرب احتمال وقوع یک خطر در احتمال تشخیص خطر در شدت خطر حاصل می‌شود. نمرات ریسک براساس سطوح پایین، متوسط و بالا (بحرانی) درجه‌بندی می‌شوند (Soliman, 2021).

### ۲-۳- روش انجام پژوهش

برای شناسایی ریسک از روش دلفی (ابتدا مصاحبه و سپس پرسشنامه) استفاده شد. در گام بعدی، شناسایی مخاطرات است که طی آن لیست کاملی از مخاطرات مرتبط با منابع آبی تهیه شد. در یک نگاه کلی منشأ مخاطرات را می‌توان به رخداد‌های

طبیعی (سیل، خشک‌سالی، تغییر اقلیم و غیره)، مدیریتی (اقتصادی، مالی، سیاستی و غیره)، فنی (توسعه و غیره)، اجتماعی (ارزش‌ها، تعارضات و غیره) و سیاسی-امنیتی (امنیت و غیره) تفکیک نمود. برای تحلیل مخاطرات، برای هر کدام از مخاطرات شناسایی‌شده در گام اول، شدت و احتمال مخاطره برآورد شد. در واقع در این مرحله ریسک تعیین خواهد شد. بدین ترتیب ابعاد هر مخاطره، مشخص می‌شود، سپس مخاطرات اولویت‌بندی شدند. معیارها و گزینه‌های تحقیق با حروف اختصاری به‌صورت جدول ۲ نام‌گذاری شده‌اند تا در جریان پژوهش به‌سادگی قابل‌ردیابی و مطالعه باشند.

به‌منظور بررسی میزان آسیب‌پذیری (ریسک کمی)، مواجهه با خطر و مخاطرات موجود در سیستم تأمین ابتدا میزان آسیب‌پذیری کمی سامانه تأمین در مجتمع امام علی (ع) بررسی شد. برای بررسی آسیب‌پذیری کیفی و میزان مواجهه با خطر ریسک کیفی در سامانه تأمین آب مجتمع امام علی (ع) مشخصات نقاط دفع پساب شامل دامداری‌ها، مراکز کشاورزی-پرورش طیور، کشتارگاه‌ها، حمام‌ها و غیره مشخص شد. ریسک‌های رایج براساس نظر صاحب‌نظران نیز مشخص شد (جدول ۳).

جدول ۲- معیارهای مطالعه

نماد	معیار	نماد	گزینه
O	احتمال وقوع خطر	W	منبع
S	شدت اثر خطر		
D	احتمال کشف خطر		

جدول ۳- رایج‌ترین ریسک‌های مشخص‌شده در سیستم آبرسانی مجتمع امام علی (منبع تأمین آب)

سامانه آبرسانی	عامل رویداد مخاطره‌آمیز	کد رویداد	نوع مخاطره	رویدادهای مخاطره‌آمیز
آب زیرزمینی	عدم آب‌بندی جداره چاه	W1	میکروبی- شیمیایی	آلودگی میکروبی به‌دلیل حصارکشی نامناسب و عدم وجود محدودیت دسترسی به چاه
آب زیرزمینی	مخازن سپتیک-فاضلاب خانگی	W2	میکروبی	آلودگی آب به‌علت وجود چاه‌های جذبی فاضلاب در مجاورت چاه آب شرب
آب زیرزمینی	خانگی-صنعت	W3	میکروبی- شیمیایی	آلودگی به‌دلیل دفن غیربهداشتی زباله در محدوده منبع آب زیرزمینی
آب زیرزمینی	کشاورزی	W4	شیمیایی	آلودگی آب در اثر ورود پساب زمین‌های کشاورزی مجاور چاه
آب زیرزمینی	خوردگی و یا نقص لوله جدار چاه	W5	میکروبی و شیمیایی	ورود آلاینده‌ها به‌دلیل غیرقابل نفوذ نبودن دهانه چاه
آب زیرزمینی	سیلاب‌های فصلی	W6	میکروبی و شیمیایی	کاهش کیفیت آب به‌دلیل سیل و بارندگی‌های شدید
آب زیرزمینی	خوردگی و یا نقص لوله جدار چاه	W7	میکروبی و شیمیایی	آلودگی آب در اثر ورود پساب زمین‌های صنعتی مجاور چاه
آب زیرزمینی	تغییرات فصلی	W8	فیزیکی	کاهش کیفیت شیمیایی آب به دلیل خشک‌سالی

### ۲-۳-۱- تعیین اولویت‌ها براساس هدف

در ابتدای کار همه مخاطرات فیزیکی-شیمیایی و میکروبی در منابع، به تفکیک شناسایی و نتایج آن طبق بندی و لیست شد. در این بخش از پژوهش برای تعیین وزن معیارها از نرم‌افزار ارزیابی ریسک FMEA و وزن‌دهی مطابق با دستورالعمل برنامه ایمنی آب استفاده شده است.

### ۲-۳-۲- تعیین میزان ریسک

تعیین میزان ریسک‌های شناسایی‌شده از رابطه (۸) تعیین شد. شدت ریسک یا خطر، احتمال وقوع و احتمال کشف به‌ترتیب براساس جدول‌های ۴ تا ۶ جای‌گذاری می‌شوند.

$$RPN = Severity \times Occurance \times Detection \quad (8)$$

(احتمال کشف خطر) × (احتمال وقوع خطر) × (شدت خطر)

جدول ۴ - شدت ریسک (S)

رتبه	شدت اثر	شرح پیامد
۱۶	خیلی شدید	بیماری بالقوه
۸	شدید	اثرات بالقوه طولانی‌مدت بر سلامت
۴	متوسط	اثرات گسترده زیبایی‌شناختی یا درازمدت از نقطه‌نظر مقبولیت و مرتبط با سلامت
۲	خفیف	اثرات کوتاه‌مدت یا موضعی از نقطه‌نظر موضوعات زیبایی‌شناسی یا مقبولیت یا مرتبط با سلامت
۱	ناچیز	آب سالم و بدون خطر

جدول ۵ - احتمال وقوع (O)

رتبه	شدت اثر	شرح پیامد
۵	تقریباً قطعی	در گذشته رخ داده و می‌تواند مجدد روی دهد
۴	خیلی محتمل	در گذشته رخ داده و امکان بالقوه روی دادن مجدد را دارا است
۳	قابل پیش‌بینی	احتمال رخ دادن آن وجود دارد و تحت شرایط معینی می‌تواند به وقوع پیوندد
۲	غیرمحتمل	احتمال رخ دادن آن وجود دارد و به‌طور کامل نمی‌توان از آن جلوگیری نمود
۱	خیلی غیرمحتمل	در گذشته روی نداده است و احتمال زیاد در آینده رخ نخواهد داد

جدول ۶ - احتمال کشف (D)

رتبه	شدت اثر	شرح پیامد
۵	خیلی کم	احتمال خیلی کم دارد که با کنترل‌های موجود خطر ردیابی شود
۴	کم	احتمال کم دارد که با کنترل‌های موجود خطر ردیابی و آشکار شود
۳	متوسط	در نیمی از موارد محتمل است که با کنترل موجود خطر بالقوه آشکار شود
۲	زیاد	احتمال زیادی وجود دارد که با کنترل موجود خطر بالقوه آشکار شود
۱	خیلی زیاد	احتمال خیلی زیادی وجود دارد که با کنترل موجود خطر بالقوه آشکار شود

### ۲-۳-۳- تعیین عدد RPN

برای وزن‌دهی میزان شدت خطر هرکدام از رویدادها، از نظر کارشناسان متخصص استفاده شد. به این شکل که پرسشنامه تهیه‌شده در هر واحد برای تکمیل و اظهارنظر در اختیار آن‌ها قرار گرفت و بالاترین تعداد از نظر فراوانی شدت خطر برای هر معیار در نظر گرفته‌شد. سپس با انجام بازدیدهای میدانی و مصاحبه با کارشناسان، همراه با گروه کارشناسان زیرمجموعه منطقه ۵ و تیم کارگروه ایمنی آب مجتمع امام علی، احتمال وقوع و کشف خطر هر رویداد جداگانه مشخص و وزن‌دهی شده و عدد RPN هر گزینه محاسبه و برطبق آن ریسک‌ها اولویت‌بندی شد. با توجه به

تعداد بالای محاسبات، عدد RPN به‌صورت میانگین محاسبه و به‌علت نداشتن ریسک بالا، ریسک‌های متوسط و پایین برای اقدامات کنترلی موردتوجه قرارگرفت (شکل ۲).

### ۲-۳-۴- تعیین سطح ریسک

در این مرحله، اولویت‌بندی ریسک‌ها به‌ترتیب ریسک زیاد، متوسط، کم انجام شد. در واقع به‌ترتیب از بالاترین عدد ریسک تا کمترین میزان اولویت‌بندی شد. در این پژوهش برای میزان سطح ریسک قابل‌قبول از معیار ریسک استفاده‌شد. معیار ریسک، شاخصی برای تفکیک ریسک‌های قابل‌قبول و غیر قابل‌قبول است.

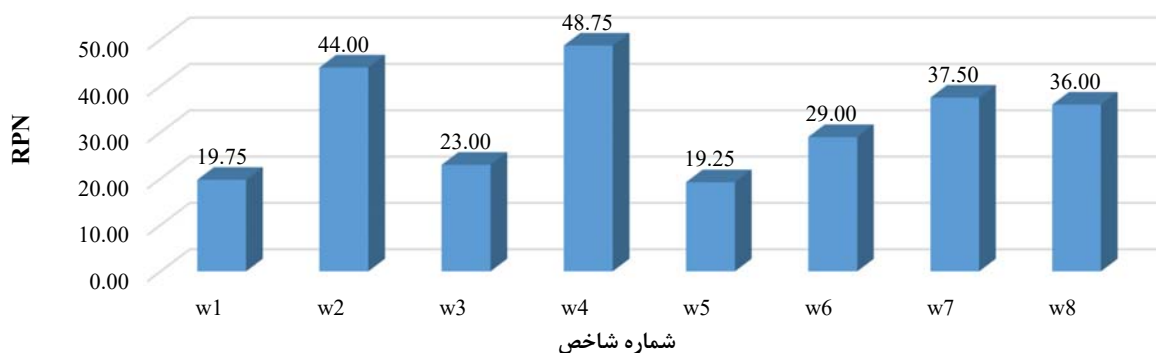
مدنظر قرار گرفته است. عدد ریسک منابع تأمین آب مجتمع امام علی نیز در جدول ۸ ارائه شده است.

ریسک‌هایی که عدد RPN آن‌ها بالاتر از معیار ریسک باشد غیر قابل قبول و اگر پایین‌تر از معیار ریسک باشد قابل قبول خواهد بود (جدول ۷).

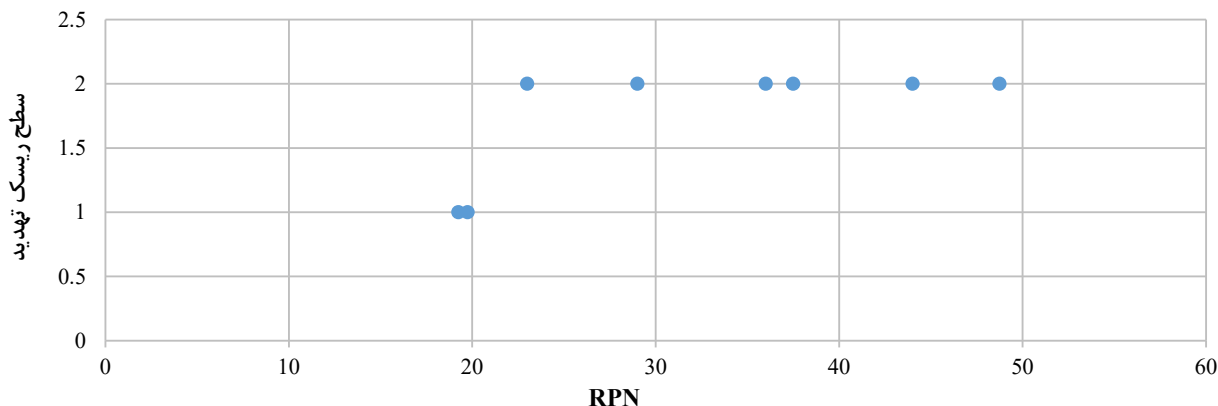
جدول ۷- میزان سطح ریسک

عدد RPN	سطح ریسک
$RPN < 200$	غیر قابل قبول (ریسک‌های بالا)
$20 < RPN < 200$	قابل قبول (ریسک‌های متوسط)
$RPN > 20$	عادی (ریسک‌های پایین)

برای تعیین میزان ریسک معیار برای هر جزء براساس عدد RPN و سطح بحران آن جزء نمودار نقطه‌ای ترسیم شد (شکل ۳). با توجه به نمودار اولین نقطه‌ای که در سطح نیمه‌بحرانی ۲ (ریسک متوسط) قرار گرفت، به‌عنوان ریسک معیار در نظر گرفته شد. این سطح با توجه به عدم وجود ریسک بالا و بحرانی



شکل ۲- عدد RPN ریسک چاه‌های آب شرب مجتمع امام علی



شکل ۳- میزان ریسک معیار تهدیدات احتمالی مؤثر بر چاه‌های آب شرب مورد مطالعه براساس RPN در روش FMEA

جدول ۸- عدد ریسک منابع تأمین آب مجتمع امام علی

درصد فراوانی ریسک پایین	فراوانی ریسک پایین	درصد فراوانی ریسک متوسط	فراوانی ریسک متوسط	میانگین حسابی RPN	شماره شاخص
۷۵	۴۸	۲۵	۱۶	۱۹/۷۵	w1
۵۰	۳۲	۵۰	۳۲	۴۴/۰۰	w2
۵۶	۳۶	۴۴	۲۸	۲۳/۰۰	w3
۶۶	۴۲	۳۴	۲۲	۴۸/۷۵	w4
۶۶	۴۲	۳۴	۲۲	۱۹/۲۵	w5
۴۷	۳۰	۵۳	۳۴	۲۹/۰۰	w6
۶۶	۴۲	۳۴	۲۲	۳۷/۵۰	w7
	۰	۱۰۰	۶۴	۳۶/۰۰	w8

### ۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در گذشته، آب به‌عنوان منبع فراوان و ارزان تلقی می‌شد و فاضلاب نیز بدون هیچ هزینه و محدودیتی به منابع آب سطحی و یا به سامانه‌های فاضلاب تخلیه می‌شد، اما در حال حاضر توزیع ناهمگون زمانی و مکانی آب شیرین به لحاظ کمی از یک‌طرف و محدودیت‌ها و مشکلات روزافزون کیفی، تأمین منابع آب را برای بسیاری از کشورها به یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر تبدیل نموده است. علاوه بر این تقاضا برای منابع آبی به‌طور پیوسته در حال افزایش است. لذا تأمین آب کافی و باکیفیت همواره از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی مدیران و تصمیم‌گیران حوزه آب شهری بوده است.

به‌دلیل عدم قطعیت‌های فراوانی که در پروژه‌های تأمین آب وجود دارد، ریسک‌ها با درجه وقوع متفاوتی اهداف تأمین آب را تهدید می‌نمایند. لذا هدف این تحقیق، بررسی مخاطرات سیستم تأمین آب مجتمع امام علی و بررسی عدم قطعیت‌های موجود خواهد بود. این مهم با تحلیل کیفی و کمی ریسک با استفاده از تکنیک FMEA صورت‌گرفت و برای وزن‌دهی هر یک از گزینه‌ها از راهنمای برنامه ایمنی سازمان بهداشت جهانی و با استفاده از نظر خبرگان اقدام شد. تمامی شرکت‌کنندگان با توجه به سابقه و تحصیلات متفاوت دارای وزن یکسان در نظر گرفته شدند.

#### ۳-۱- نتایج اولویت ریسک منابع تأمین آب از منظر وزنی

میزان ریسک چاه‌های آب شرب مجتمع امام علی به ترتیب اولویت عبارت بودند از:

- گزینه آلودگی سفره آب در اثر پساب‌های کشاورزی با وزن ۴۸/۷۵

- گزینه آلودگی آب به‌دلیل چاه‌های جذبی فاضلاب در مجاورت چاه با وزن ۴۴

- گزینه ورود آلودگی شیمیایی به‌علت نزدیکی شهرهای صنعتی با وزن ۳۷/۵

- گزینه کاهش کیفیت به‌علت خشک‌سالی و کمبود آب با وزن ۳۶

- گزینه تخریب کیفیت آب به‌دلیل سیل و باران‌های شدید با وزن ۲۹

- گزینه آلودگی آب به دلیل دفن غیربهداشتی زباله در محدوده حوضه آبریز با وزن ۲۳

- گزینه آلودگی میکروبی آب به‌علت عدم حصارکشی مناسب و عدم وجود محدودیت در دسترسی به چاه با وزن ۱۹/۷۵

- گزینه ورود آلاینده به‌علت غیرقابل نفوذ نبودن دهانه چاه با وزن ۱۹/۲۵

همچنین مشخص شد که سطح ریسک چاه‌های آب شرب مجتمع به‌طور کلی در محدوده ایمن است و با توجه به نبود مقادیر RPN بسیار بالا، احتمال وقوع مشکلات جدی در منابع آب این منطقه پایین است.

#### ۳-۲- محدودیت‌های تحقیق و پیشنهادات

با توجه به محدودیت‌های موجود در پژوهش مانند عدم بررسی عیب‌های چندگانه و همچنین محدودیت‌های اولویت‌بندی ریسک براساس عدد RPN است که در برخی از مواقع ممکن است این اعداد باهم یکسان بوده و یا در صورت داشتن فاصله کم از یک‌دیگر اولویت‌بندی ریسک‌ها با مشکل مواجه شود. استفاده از سایر روش‌های ارزیابی ریسک مانند RAMCAP و ETA نیز پیشنهاد می‌شود. همچنین ارزیابی ریسک تهدیدات نوظهور مانند خطرات شیمیایی و بیولوژیکی در تأسیسات، حملات سایبری، حملات هوایی و موشکی، حوادث طبیعی و خرابکاری انسانی و سرقت براساس روش تحلیل خاکستری نیز پیشنهاد می‌شود.

#### ۴- مراجع

- محسن‌زاده، ح.، رزم آرا، ح.، دشتی، ع.، روستا، ه.، نخعی فدافن، ه.، توکلی امینیان، ث.، روحبخش، م.، و فضائلی ترابی، ع.، (۱۳۹۹)، "ارزیابی ریسک در واحدهای کلرزی تصفیه آب و فاضلاب به‌روش FMEA"، *نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، (۴)۵، ۳۱-۴۰. <https://doi.org/10.22112/jwwse.2020.221545.1193>
- مشهدی تفرشی، س.، و تابش، م.، (۱۴۰۳)، "محاسبه احتمال شکست کیفیت شبکه‌های توزیع آب به‌منظور برآورد ریسک با استفاده از شبکه‌های بی‌زین"، *نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، (۹)۱، ۳۲-۴۲. <https://doi.org/10.22112/JWWSE.2023.389324.1356>
- معصوم بیگی، ح.، سادات رسول، م.، و غنی‌زاده، ق.، (۱۴۰۰)، "شناسایی و ارزیابی ریسک در تأسیسات آب شرب شهر طالقان به‌روش FMEA (حالات شکست و آنالیز خطرات) در سال ۱۳۹۹"، *مجله تحقیقات سلامت در جامعه*، (۴)۷، ۱-۱۴. <https://doi.org/20.1001.1.24236772.1400.7.4.1.3>
- Arnold, J., (2005), "Risk and risk assessment in health emergency management, prehospital and disaster medicine", *Prehospital and Disaster Medicine*, 20(3),143-54.
- Bichai, F., Smeets, P., Barrette, S., Deere, D., Ashbolt,

- Health Research*, 10(1), 47-58, <https://doi.org/10.32598/JAEHR.10.1.1236>.
- Pérez-Vidal, A., Amézquita-Marroquín, C. and Torres-Lozada, P., (2013), "Water safety plans: Risk assessment for consumers in drinking water supply systems", *Ingeniería y Competitividad*, 15, 237-251.
- Shamsuzzoha, M., Kormoker, T., and Ghosh, R.C., (2018), "Implementation of water safety plan considering climatic disaster risk reduction in Bangladesh: A study on Patuakhali Pourashava water supply system", *Procedia Engineering*, 212, 583-590, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.075>.
- Soliman, M.H.A., (2021), *Risk assessment using FMEA: A case of reliable improvement*, Amazon Digital Services LLC-KDP Print US, Washington.
- U.S.NRC, (2016), *Wash-1400: The introduction of risk assessment to the regulation of nuclear reactors*, United States Nuclear Regulatory Commission.
- Wee, S.Y., and Aris, A.Z., (2017), "Endocrine disrupting compounds in drinking water supply system and human health risk implication", *Environment international*, 106, 207-233, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.004>.
- World Health Organization (WHO), International Water Association (IWA), (2011), *Water safety plan quality assurance tool*, Geneva.
- Zhang, M., Zhao, H., Fan, L., and Yi, J., (2022), "Dynamic modulus prediction model and analysis of factors influencing asphalt mixtures using gray relational analysis methods", *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 1312-1321, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.120>.
- N.J., and Ferrero, G., (2022), "Water safety management during the initial phase of the Covid-19 pandemic: Challenges, responses and guidance", *International Journal of Water Resources Development*, 39(2), 337-359, <https://doi.org/10.1080/07900627.2021.2016378>.
- Cazemier, D.R., Lagacherie, P., and Martin-Clouaire, R., (2014), "A possibility theory approach for estimating available water capacity from imprecise information contained in soil databases", *Geoderma*, 103, 113-132.
- Dominguez-Chicas, A. and Scrimshaw, M.D., (2010), "Hazard and risk assessment for indirect potable reuse schemes: An approach for use in developing water safety plans", *Water Research*, 44(20), 6115-6123, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.007>.
- Ekwere, A.S., Oyonga, O.A., and Banda, M.M., (2021), "Assessment of effectiveness of Water Safety Plans (WSP) on water quality in rural communities of Anambra State, South-Eastern Nigeria", *Water Supply*, 21(2), 878-885, <https://doi.org/10.2166/ws.2020.353>.
- Ferrier, N., Emdad Haque, C., (2003), "Hazards risk assessment methodology for emergency managers: A standardized framework for application", *Natural Hazards*, 28, 271-290.
- Figuera, M.J. and Borrego, J.J., (2010), "New perspectives in monitoring drinking water microbial quality", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7, 4179-4202, <https://doi.org/10.3390/ijerph7124179>.
- Haider, H., Alkhowaiter, M.H., Shafiquzzaman, M.D., Alreshedi, M., AlSaleem, S.S., and Ghumman, A.R., (2021), "Source to tap risk assessment for intermittent water supply systems in arid regions: An integrated FTA-Fuzzy FMEA methodology", *Environmental Management*, 67(2), 324-341, <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01400-7>.
- Hong, E.S., Lee, I.M., Shin, H.S., Nam, S.W., and Kong, J.S., (2009), "Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: Application to the design of shield TBM", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(3), 269-277, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.09.004>.
- Kanyesigye, C., Marks, S.J., Nakanjako, J., Kansime, F., and Ferrero, G., (2019), "Status of water safety plan development and implementation in Uganda", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(21), 4096, <https://doi.org/10.3390/ijerph16214096>.
- Kishipour, A., Mostafaloo, R., Mehdipour Rabori, M., Ghordouei-Milan, E., and Hosseini, F., (2021), "Experience of implementing water safety plan in Iran: A systematic review", *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 6(2), 43-55, <https://doi.org/10.18502/jehsd.v6i2.6536>.
- Naseri, I., Jalilzadeh, R., Verijkazemi, K., and Cheraghi, M., (2022), "Study of risks in rural water supply systems of Khorramshahr City, Iran, based on water safety plan", *Journal of Advanced in Environmental*



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.