# ارزیابی سناریوهای مختلف خرابی سیستم تأمین آب در اثر وقوع زلزله به‌منظور مدیریت ریسک

## مطالعه‌ی موردی: سیستم تأمین آب مربوط به تصفیه‌خانه‌ی یک کلان‌شهر

**بابک امیدوار:** دانشیار دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران، bomidvar@ut.ac.ir
**محمود محمودیان:** کارشناس ارشد مدیریت در سوانح طبیعی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران
**سعید کاکایی:** کارشناس ارشد مدیریت در سوانح طبیعی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

**تاریخ دریافت:** ۹۵/۴/۲۱
**تاریخ پذیرش:** ۹۶/۱۱/۱۶

**چکیده**

تأمین پیوسته‌ی آب آشامیدنی همواره از مهم‌ترین دغدغه‌های جوامع و ملل مختلف بوده است. سیستم تأمین آب آشامیدنی در معرض گستره‌ی وسیعی از مخاطرات و ریسک‌ها قرار دارد و از آسیب‌پذیرترین شریان‌های حیاتی است. در میان این مخاطرات، سانحه‌ی طبیعی زلزله از اهمیت بسزایی برخوردار است. پتانسیل لرزه‌خیزی بالای نواحی مختلف کشور ایران، به‌ویژه در کلان‌شهرها، و همچنین عواقب و پیامدهای سنگین ناشی از وقوع چنین سانحه‌ای، اهمیت انجام مطالعات در این زمینه را بیش از پیش روشن می‌سازد. این مقاله به‌منظور ارزیابی سناریوهای مختلف خرابی سیستم تأمین آب در اثر وقوع زلزله با ملاحظه‌ی کل زنجیره‌ی تأمین آب تهیه گردیده است. منظور از کل زنجیره‌ی تأمین آب، سیستمی است که دربردارنده‌ی هر سه بخش آب خام، تصفیه‌خانه و شبکه‌ی توزیع است. در این مقاله سعی شده است با استفاده از روش تحلیل درخت خطا (FTA)[1] به ارزیابی ریسک عدم تأمین آب توسط سیستم آب‌رسانی در محدوده‌ی تصفیه‌خانه‌ی یک کلان‌شهر در اثر وقوع سناریوهای مختلف زلزله پرداخته شود. راهکارهایی نیز به‌منظور کاهش ریسک ارائه گردیده است و تأثیر این راهکارها مورد تحلیل قرار گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** *سیستم تأمین آب، زلزله، مدیریت ریسک، درخت خطا، استراتژی کاهش اثرات*



# Seismic Risk Analysis and Scenario Development of Water Supply Systems

**Babak Omidvara[1*], Mahmoud Mahmoudianb[2], Saeed Kakaieec[3]**

## Abstract

Continuous supply of potable water after an earthquake has always been one of the most important concerns of every nation and society. Water-supply system is encountered with a wide range of hazards and risks that makes this system one of the most vulnerable lifelines. The high seismic potential of different areas in Iran, and also catastrophic consequences of the earthquake shows the urgent need to carry out researches in this field. This study has been done in order to assess different failure scenarios of a water-supply system, considering the whole water supply chain (including raw water, water treatment plant and distribution network). In this research, the risk of population being without water after occurrence of earthquake scenarios in a Metropolitan area around a water-treatment plant is analyzed using Fault Tree Analysis method. Three different risk reduction strategies are suggested in order to reduce the risk. Finally, the results are compared with each other, and the best strategy is selected.

**Keywords:** *Water supply system, Earthquake, Risk management, Fault Tree Analysis (FTA), Mitigation strategy*

1 Associate Professor, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran; Email:bomidvar@ut.ac.ir
2 MS of Natural Disaster Management, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran
3 MS of Natural Disaster Management, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Irana

## مقدمه

زیرساخت‌های حیاتی، همان‌گونه که از نامشان پیداست، لازمه‌ی ادامه‌ی حیات جوامع بشری امروزی بوده‌اند و شایسته‌ی توجه روزافزون در تحقیقات و مطالعات علمی هستند، چرا که جوامع بشری بسیار متکی به خدماتی هستند که این زیرساخت‌ها باید به‌طور پیوسته تولید و ارائه نمایند. سیستم تأمین آب آشامیدنی بی‌تردید یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های حیاتی است که در معرض گستره‌ی وسیعی از ریسک‌ها قرار دارد و بسیار آسیب‌پذیر است. از یک سو با توجه به اهمیت فراوان این سیستم به‌منزله‌ی یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های حیاتی، و از سوی دیگر با توجه به احتمال بالای وقوع زلزله در نقاط مختلف ایران از جمله در کلان‌شهرها، ضرورت انجام تحلیل ریسک این سیستم‌ها برای شرایط وقوع زلزله و همچنین اتخاذ راهکارهای مناسب برای کاهش ریسک آن‌ها، بیش از پیش احساس می‌شود.

به‌منظور غلبه بر کمبودهای موجود در روش‌های تحلیل سنتی و مقابله با پیچیدگی‌ها و طیف گسترده‌ی تهدیدات، نیاز به توسعه‌ی قابلیت‌های تحلیلی به صورت روزافزون بیشتر احساس می‌شود. در راستای نیل به این هدف، سیاست‌های ارزیابی و مدیریت ریسک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از آنجایی که امکان حذف تمامی ریسک‌ها و ایجاد یک جامعه‌ی کاملاً خالی از ریسک وجود ندارد، به یک مدیریت کارآمد ریسک، برای دستیابی به سطح قابل قبولی از ریسک، نیاز است. مدیریت ریسک کارآمد با هدف دستیابی به سطح قابل قبول ریسک، رویکردی متشکل از چند گام است که به صورت مکرر باید انجام گیرد.

رویکرد تحلیل ریسک با در نظر گرفتن کل سیستم، از منبع تا محل مصرف، روشی مفید و ضروری برای اجتناب از بهینه‌سازی‌های جزئی مؤلفه‌های سیستم تأمین آب آشامیدنی است. چنین رویکردی نیاز به ابزاری دارد که قادر به مدل‌سازی اندرکنش‌های میان رویدادهای مختلف باشد. در این راستا استفاده از روش تحلیل درخت خطا (FTA)، ابزاری بسیار سودمند است. در ویرایش سوم راهبردهای کیفیت آب آشامیدنی، که سازمان بهداشت جهانی (WHO)[2] منتشر کرده است، رویکرد مدیریت ریسک جامع، مؤثرترین راه اطمینان از سلامت عرضه‌ی آب آشامیدنی معرفی شده است [۱].

در زمینه‌ی ارزیابی ریسک و سناریوهای خرابی سامانه‌های آب‌رسانی تحقیقات متعددی در سراسر دنیا صورت گرفته است که در اکثر آن‌ها فقط جنبه‌ی کیفیت آب مدنظر بوده است. هر چند مطالعات بسیار ارزشمندی نیز سناریوهای خرابی را با نگاهی همه‌جانبه مد نظر قرار داده‌اند. زانگژو[3] و همکاران در سال ۱۹۹۸ شهر فوکوآکا[4] را به‌منظور پیش‌بینی میزان تقاضای آب با در نظر گرفتن پنج شاخص ریسک مورد مطالعه قرار دادند [۲]. ازل[5] و همکاران مدل تحلیل ریسک شریان حیاتی برای یک شهر کوچک را معرفی کردند. در این مطالعه جنبه‌های مختلف سازه‌ای، سیاسی، زمانی و اقتصادی در نظر گرفته شده است [۳]. توهاوکاک[6] و همکاران در سال ۲۰۰۶ متداول‌ترین روش‌های تحلیل ریسک سیستم‌های تأمین آب آشامیدنی را معرفی کرده‌اند و به شناسایی ریسک‌های کمی و کیفی مؤلفه‌های سیستم پرداخته‌اند [۴]. سویک[7] لزوم ملاحظه‌ی عدم قطعیت در داده‌های ورودی و پارامترهای مدل در حین انجام چنین مطالعاتی را بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو و الگوریتم ژنتیک مطرح نمود [۵]. در تحقیقی با عنوان «بررسی عملکرد خطوط لوله توزیع آب در برابر زلزله» توپراک[8] و همکاران به بررسی عملکرد لوله‌های انتقال و توزیع در نمونه‌هایی از زلزله‌های کشورهای ترکیه، ایالات متحده‌ی امریکا، ژاپن و تایوان پرداخته‌اند و همچنین جنس‌های مختلف لوله را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند [۶]. لیندی[9] در مطالعه‌ای به تحلیل ریسک جامع شبکه‌ی آب شرب شهر گوتبورگ[10] پرداخته است. نتایج برای شهر گوتبورگ نشان می‌دهد که مخازن ذخیره‌ی آب خام بیشترین سهم در افزایش سطح ریسک را دارا است [۷]. در مقاله‌ای با عنوان «تحلیل درخت خطا برای آنالیز ریسک احتمالاتی و جامع سیستم آب شرب» لیندی و همکاران به محاسبه‌ی احتمالات وقوع و شکست سیستم پرداخته‌اند. آنان از داده‌های شریان آب و نظر خبرگان استفاده کرده و به‌منظور تحلیل عدم قطعیت از روش مونت کارلو بهره برده‌اند [۸]. همچنین در مقاله‌ای با عنوان «تجزیه و تحلیل ریسک یکپارچه از منبع تا شیر آب» از درخت خطا برای تحلیل ریسک‌ها در تمامی اجزای شبکه‌ی توزیع آب شرب شهری استفاده شده است. در این تحقیق از روش مونت کارلو برای آنالیز عدم قطعیت استفاده شده است [۹]. لو[11] و همکاران در سال ۲۰۰۹ تحلیل ریسک لرزه‌ای سیستم تأمین آب را انجام داده‌اند و آسیب‌پذیری لرزه‌ای هر یک از مؤلفه‌های سیستم را تعیین نمودند [۱۰]. بونئو[12] و اوروک[13] در تحقیقی به بررسی عملکرد شبکه‌ی آب شرب در زمان زلزله با استفاده از مدل‌سازی هیدرولیکی پرداخته‌اند [۱۱]. دوگوئن یو[14] و همکاران در سال ۲۰۱۶ اثرات زلزله را مبنایی برای طراحی بهینه‌ی شبکه‌ی توزیع آب قرار داده‌اند که هدف آن افزایش بازگشت‌پذیری شبکه‌ی توزیع آب شرب است [۱۲].

در برخی از تحقیقات داخلی نیز به ارزیابی آسیب‌پذیری و تحلیل خسارت شبکه‌ی آب در برابر زلزله پرداخته شده است. آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه‌ی آب کرمانشاه در برابر زلزله با استفاده از تحلیل هیدرولیکی توسط عرب‌پور داهویی مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۳]. معقولی نیز به تحلیل خسارت لرزه‌ای شبکه‌ی آب شیراز پرداخته است [۱۴]. امیدوار و همکاران [۱۵] و حجتی [۱۵] به بررسی تأثیر وابستگی عملکرد لرزه‌ای شبکه‌ی آب به شبکه‌ی برق با استفاده از پتری نت و زنجیره‌ی مارکوف پرداخته‌اند. شبیه‌سازی عملکرد لرزه‌ای شبکه‌های توزیع آب شهری و بررسی تأثیر اقدامات مدیریت مصرف بر عملکرد لرزه‌ای شبکه‌ی توزیع آب شهری اسلام‌شهر با استفاده از مدل عصبی فازی و شبیه‌سازی مونت کارلو توسط صدرالساداتی صورت گرفته است [۱۷]. محمودیان به ارزیابی سناریوهای خرابی شبکه‌ی آب در اثر زلزله به‌منظور مدیریت ریسک با استفاده از درخت خطا پرداخته است [۱۸]. تأثیر شبکه‌ی برق بر عملکرد لرزه‌ای شبکه‌ی توزیع آب با استفاده از روش درخت خطا توسط نعیمی [۱۹] و نعیمی و امیدوار [۲۰] مورد بررسی قرار گرفته است و مسئله‌ی وابستگی

**جدول ۱: خلاصه‌ای از روش‌های مناسب برای تحلیل ریسک سیستم‌های تأمین آب [۲۵]**

| روش تحلیل ریسک | مرحله در فرایند تحلیل ریسک | نوع تحلیل | بخش سیستم تأمین آب | کیفیت یا کمیّت آب | سطح اطلاعات مورد نیاز | سطح نیاز به آموزش |
|---|---|---|---|---|---|---|
| HAZID | شناسایی مخاطرات | کیفی | همه‌ی بخش‌ها | هردو | پایین | تازه‌کار |
| HAZOP | شناسایی مخاطرات | کیفی | تصفیه‌خانه و توزیع | هردو | متوسط | متخصص |
| PHA/RVA | شناسایی مخاطرات و تخمین ریسک | کیفی | همه‌ی بخش‌ها | هردو | متوسط | تازه‌کار |
| FMECA | شناسایی مخاطرات و تخمین ریسک | کیفی | تصفیه‌خانه و توزیع | هردو | بالا | متخصص |
| تحلیل درخت خطا (FTA) | تخمین ریسک (علت‌ها) | هردو | همه‌ی بخش‌ها | هردو | بالا | خبره |
| بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان | تخمین ریسک (علت‌ها) | هردو | همه‌ی بخش‌ها | هردو | بالا | خبره |
| تحلیل درخت رویداد (ETA) | تخمین ریسک (پیامدها) | هردو | همه‌ی بخش‌ها | هردو | بالا | متخصص |
| HRA | تخمین ریسک (علت‌ها) | هردو | تصفیه‌خانه و توزیع | هردو | بالا | خبره |
| مدل‌های فیزیکی | تخمین ریسک (پیامدها) | کمّی | همه‌ی بخش‌ها | هردو | بالا | خبره |
| QMRA /QCRA | تخمین ریسک (پیامدها) | کمّی | همه‌ی بخش‌ها | کیفی | بالا | خبره |

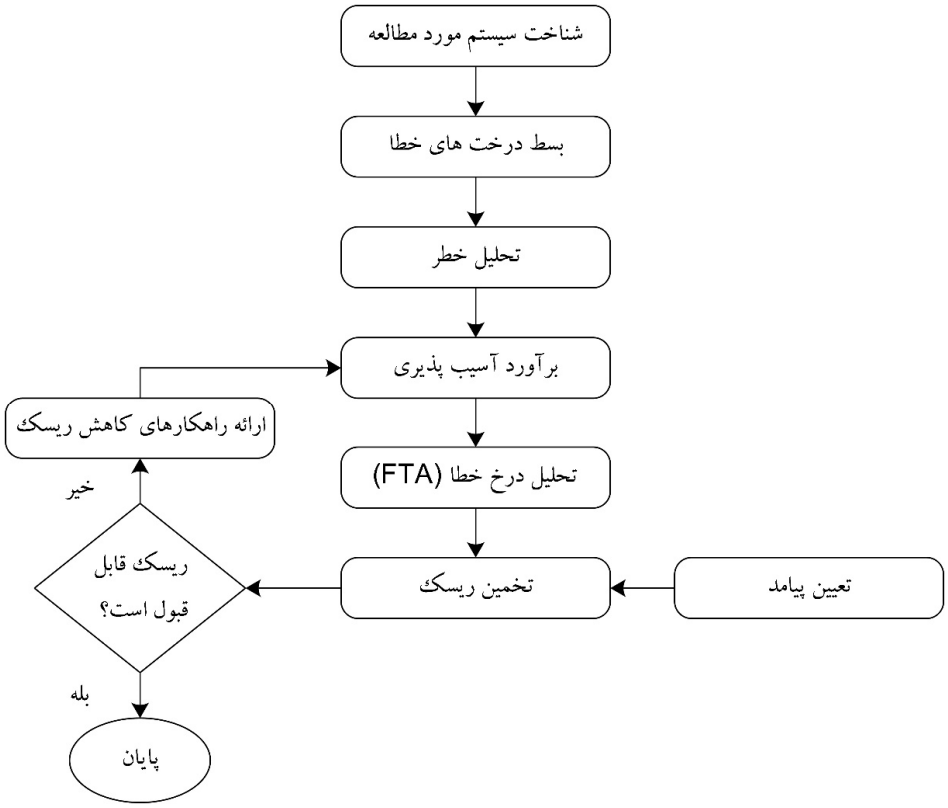
عملکرد شبکه‌ی آب به شبکه‌ی برق در منحنی‌های شکست مربوطه لحاظ گردیده است. صادقی تأثیر خرابی‌ها با دلیل مشترک و افزونگی را در تصفیه‌خانه‌های آب مورد بررسی قرار داده است [۲۱]. حسنی به بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و راهکارهای مقابله با زلزله در سامانه‌های آب‌رسانی ایران پرداخته است [۲۲]. توکلی با استفاده از تئوری گراف و روش داده ستانده اندرکنش عملکردی شبکه‌ی آب و برق را هنگام زلزله مورد بررسی قرار داده است [۲۳]. توسعه‌ی توانمندی‌های نرم‌افزار ArcGIS برای استفاده در برآورد آسیب‌پذیری لرزه‌ای لوله‌های شبکه‌ی آب‌رسانی منطقه‌ی یازده تهران توسط راهنما صورت گرفته است [۲۴].

خلاصه‌ای از روش‌های مناسب برای تحلیل ریسک سیستم‌های تأمین آب به همراه ویژگی‌های این روش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۱ به‌منظور تعیین میزان نیاز به تخصص و آموزش، از سه اصطلاح «خبره»، «متخصص» و «تازه‌کار» استفاده شده است. منظور از خبره این است که به‌منظور توانایی استفاده از روش مورد نظر، نیاز به آموزش رسمی وجود دارد. از اصطلاح تازه‌کار برای مواردی استفاده شده است که فرد پس از آشنایی با روش و بدون نیاز به تجربه یا آموزش خاص، قادر به استفاده از روش است. اصطلاح متخصص برای حالتی بینابین دو حالت پیشین به کار رفته است [۱۳]. هرچند رویدادهای خطرناک ممکن است متفاوت باشند، ولی پیامدهای آن‌ها معمولاً به دو دسته‌ی کمی و کیفی طبقه‌بندی می‌شوند. رویداد شکست کلی که در این روش در نظر گرفته می‌شود، شکست (عدم موفقیت) در عرضه‌ی آب است که می‌تواند به دو صورت تعریف شود: ۱. شکست کمی، یعنی هیچ آبی به مصرف‌کننده تحویل داده نشود؛ ۲. شکست کیفی، یعنی آب تحویل داده شود ولی با استانداردهای کیفیت آب مطابقت نداشته باشد.

در این مقاله، تحلیل ریسک سیستم تأمین آب آشامیدنی با استفاده از روش تحلیل درخت خطای احتمالاتی انجام شده است. بدین منظور با بررسی‌های صورت گرفته، از میان نواحی مختلف یک کلان‌شهر، گزینه‌ای که شامل هر سه بخش آب خام، تصفیه‌خانه و شبکه‌ی توزیع بود و کمترین اندرکنش را با نواحی دیگر سیستم تأمین آب این کلان‌شهر داشت، انتخاب شد و مطالعات بر روی این محدوده انجام گرفت. همچنین با بررسی زلزله‌های تاریخی به وقوع پیوسته در محدوده‌ی مورد مطالعه و وضعیت گسل‌های منطقه، سه سناریوی زلزله در اثر فعالیت گسل‌های موجود برای انجام تحلیل‌ها انتخاب شدند. ابزار مورد استفاده برای تحلیل احتمال شکست در این پژوهش، روش تحلیل درخت خطا (FTA) است که از روش‌های تحلیل منطقی عملکرد سیستم‌های پیچیده در علوم مختلف است. پس از شناخت کامل سیستم مورد مطالعه، عملکرد این سیستم در اثر وقوع زلزله با استفاده از روش تحلیل درخت خطا مدل گردید و تحلیل‌های مربوط برای سناریوهای مختلف انجام شد. سپس احتمالات مربوط به عدم تأمین آب توسط مخازن ذخیره‌ی موجود در محدوده‌ی مورد مطالعه در اثر وقوع زلزله‌های سناریو، برای سناریوها و حالات مختلف به دست آمد. همچنین ریسک مربوط به هر یک از این حالات، که به‌منزله‌ی جمعیت بدون آب در اثر وقوع زلزله (به‌منزله‌ی شاخص کمی عدم عملکرد شبکه) تعریف گردیده است، محاسبه شد. در ادامه سه راهکار فنی برای کاهش ریسک سیستم به‌منزله‌ی نمونه و برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی انتخاب گردیده و تأثیر هر یک از این راهکارها در میزان ریسک در سناریوهای مختلف بررسی شد. در پایان با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین راهکار از میان این راهکارها معرفی گردیده است.

## روش‌شناسی تحقیق

رویکرد مورد استفاده در این پژوهش رویکردی جامع است که در آن تمامی اجزای سیستم تأمین آب، شامل بخش‌های تولید،




**تصویر ۱: الگوریتم تحلیل ریسک پیشنهادی**

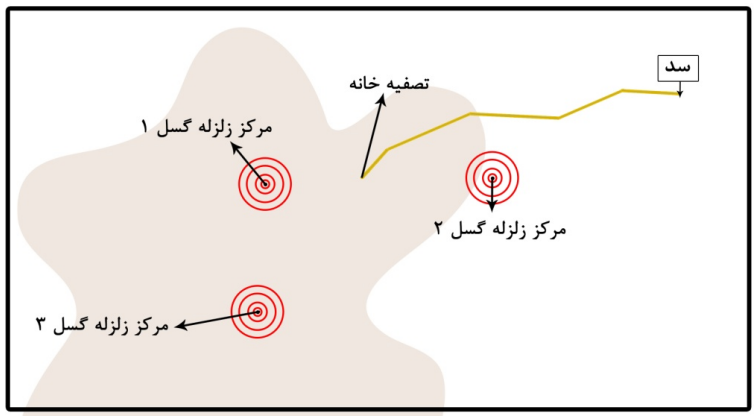
انتقال و توزیع در نظر گرفته شده است. روش مورد استفاده به‌منظور مدل کردن سیستم مورد مطالعه، تعیین روابط بین اجزای سیستم و ارزیابی ریسک شکست سیستم در اثر وقوع زلزله، روش تحلیل درخت خطا (FTA) است که با وجود قدمت فراوان همچنان از پرکاربردترین روش‌های تحلیل ریسک سیستم‌های پیچیده است. از آنجایی که این روش یک روش احتمالاتی است و در روش‌های احتمالاتی وجود عدم قطعیت انکارناپذیر است، انجام تحلیل عدم قطعیت در این مطالعه ضروری است. بدین منظور در این مطالعه از رویکرد مونت کارلو استفاده شده است. الگوریتم کلی پژوهش انجام گرفته شده در تصویر ۱ نشان داده شده و در ادامه هر یک از مراحل به صورت مختصر و در قالب یک مطالعه‌ی موردی شرح داده شده‌اند.

**شناخت سیستم و تعیین دامنه‌ی مطالعه (مطالعه‌ی موردی)**

یک سیستم تأمین آب آشامیدنی به‌طور معمول از سه بخش عمده یا زیرسیستم آب خام، تصفیه‌خانه و شبکه‌ی توزیع تشکیل شده است. در بخش آب خام مؤلفه‌هایی مانند دریاچه‌ها، سدها، آبگیرها، چاه‌های آب، خطوط لوله و تونل‌های انتقال آب و انواع دیگری از تأسیسات دیده می‌شوند. بخش تصفیه‌خانه متشکل از فرایندهای مختلف تصفیه است که بسته به نوع تصفیه‌خانه می‌تواند متفاوت باشد. اما به‌طورکلی یک تصفیه‌خانه شامل مراحلی از قبیل کلرزنی اولیه، آشغال‌گیری، رسوب‌گیری، انعقاد، ته‌نشینی، فیلتراسیون سریع، کلرزنی ثانویه و در نهایت ذخیره‌سازی است. آب پس از طی مراحل تصفیه وارد شبکه‌ی توزیع می‌شود که زنجیره‌ی نهایی تأمین آب است. در این زیرسیستم اجزایی از قبیل لوله‌های انتقال و توزیع، مخازن ذخیره‌ی آب، ایستگاه‌های پمپاژ، چاه‌های آب شرب، ایستگاه‌های کلرزنی و غیره یافت می‌شوند. با توجه به روابط سلسله‌مراتبی و تأثیرات متقابل مابین اجزای مذکور سیستم تأمین آب، تحلیل ریسکی واقع‌گرایانه خواهد بود که بتواند تمامی این مؤلفه‌ها را در نظر بگیرد و سیستم مورد نظر را به طور جامع مدل کند.

در این پژوهش محدوده‌ی آب‌رسانی یکی از تصفیه‌خانه‌های کلان‌شهر مورد نظر با ظرفیت طراحی ۷/۵ متر مکعب در ثانیه به‌منزله‌ی مطالعه‌ی موردی در نظر گرفته شده است. این تصفیه‌خانه پاسخ‌گوی ۲۳ درصد از نیاز آبی کلان‌شهر مذکور است. آب خام این تصفیه‌خانه از طریق یک سد و همچنین مجموعه‌ای از چاه‌ها تأمین می‌گردد. موقعیت این تصفیه‌خانه نسبت به کلان‌شهر، سد تأمین‌کننده‌ی آن و گسل‌های منطقه در تصویر ۲ نمایش داده شده است. آب خام پس از انجام مراحل تصفیه در تصفیه‌خانه از طریق خطوط لوله‌ی انتقال به مخازن ذخیره‌ی آب در نقاط مختلف منتقل شده و سپس از طریق این مخازن به‌صورت ثقلی یا با استفاده از ایستگاه‌های پمپاژ به مخازن ذخیره‌ی دیگر انتقال می‌یابد. در نهایت آب موجود در مخازن ذخیره به‌وسیله‌ی لوله‌های فرعی توزیع در شبکه توزیع می‌گردد. برخی از مخازن ذخیره نیز وجود دارند که علاوه بر آب وصولی از تصفیه‌خانه، از آب زیرزمینی حاصل از چاه‌های اطرافشان نیز استفاده می‌کنند که این آب پس از کلرزنی در محل مخزن به شبکه‌ی توزیع ارسال می‌گردد.

معمولاً مؤلفه‌های موجود در سامانه‌های تأمین آب آشامیدنی، دارای وابستگی عملکردی و اندرکنش با یکدیگر هستند. روش




**تصویر ۲: مختصات محل وقوع زلزله‌های سناریوی انتخابی**

تحلیل درخت خطا رویکرد مناسبی برای تحلیل عملکرد این نوع سیستم‌ها است، چرا که با استفاده از این روش، بهتر می‌توان روابط و اندرکنش میان مؤلفه‌های سیستم را مدل و تحلیل کرد.

**بسط درخت خطای سیستم تأمین آب**

از روش تحلیل درخت خطا می‌توان به‌منزله‌ی ابزاری برای تحلیل فرایند ایمنی سیستم‌ها به‌ویژه در هنگام ارزیابی سیستم‌های بسیار پیچیده استفاده نمود. بسیاری از تحلیل‌گران ایمنی سیستم در بررسی حالات و سناریوهای مختلف احتمالی که می‌توانند منجر به بروز رویدادهای مطلوب یا نامطلوب در سطح سیستم شوند، به علت استفاده از رویکرد قیاسی (رسیدن از کل به جزء)، این روش را به کار می‌بندند [۲۶].

روش تحلیل درخت خطا شامل ایجاد یک درخت خطا، وارد نمودن احتمال خطای رویدادهای پایه، توزیع احتمالات خطاها برای تعیین احتمال رویداد اصلی و تعیین مجموعه‌های برشی[۱۵] است. یک مجموعه‌ی برشی عبارت است از گروهی از آغازگرها، که اگر همگی اتفاق بیفتند موجب وقوع رویداد اصلی می‌شوند. یک مجموعه‌ی برشی حداقل[۱۶]، عبارت است از کوچک‌ترین مجموعه‌ای از آغازگرها که اگر همگی اتفاق بیفتند منجر به وقوع رویداد اصلی می‌گردند.

به‌منظور بسط درخت‌های خطا برای سیستم مورد مطالعه نیاز به ابزاری است که قادر به انجام این امر باشد، چرا که با توجه به وسعت محدوده‌ی مورد مطالعه، تعدد مؤلفه‌های آن و همچنین سناریوهای مختلف مورد نظر، انجام این امر به صورت دستی غیرممکن و دور از انتظار است. امروزه نرم‌افزارهای متعددی برای روش تحلیل درخت خطا وجود دارند که هر یک دارای توانایی‌ها و کاربردهای خاص خود هستند. از آنجایی‌که در تحقیق حاضر از روش تحلیل ریسک احتمالاتی استفاده شده است، بررسی عدم قطعیت موجود در داده‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است. لذا نیاز به ابزاری وجود دارد که علاوه بر بسط درخت خطا و تحلیل آن، قادر به تحلیل عدم قطعیت نیز باشد.

اولین گام در تشکیل یک درخت خطا، تعیین رویداد اصلی یا رویداد فوقانی است. در این تحقیق از عناوین مختلفی برای رویدادهای اصلی موجود در بخش‌های مختلف استفاده شده است. در این میان مهم‌ترین رویداد اصلی در فضای شکست عبارت است از «عدم تأمین آب توسط هر یک از مخازن آب در محدوده‌ی مورد مطالعه در اثر وقوع زلزله». نمونه‌ای از یک درخت خطای تولید شده برای یک سیستم در تصویر ۳ نشان داده شده است.

**تحلیل خطر**

نظر به اینکه هدف این پژوهش بررسی سناریوهای خرابی شبکه‌ی آب و تحلیل ریسک این شبکه در شرایط وقوع زلزله است، ضروری است که با توجه به مشخصات محدوده‌ی مورد مطالعه، سناریوهایی برای وقوع زلزله انتخاب گردیده و تحلیل خطر انجام گیرد. گفتنی است که در این قسمت، از نتایج حاصل از مطالعات ریزپهنه‌بندی موجود برای منطقه‌ی مورد مطالعه، به‌منظور انتخاب زلزله‌های سناریوی احتمالی استفاده شده است.

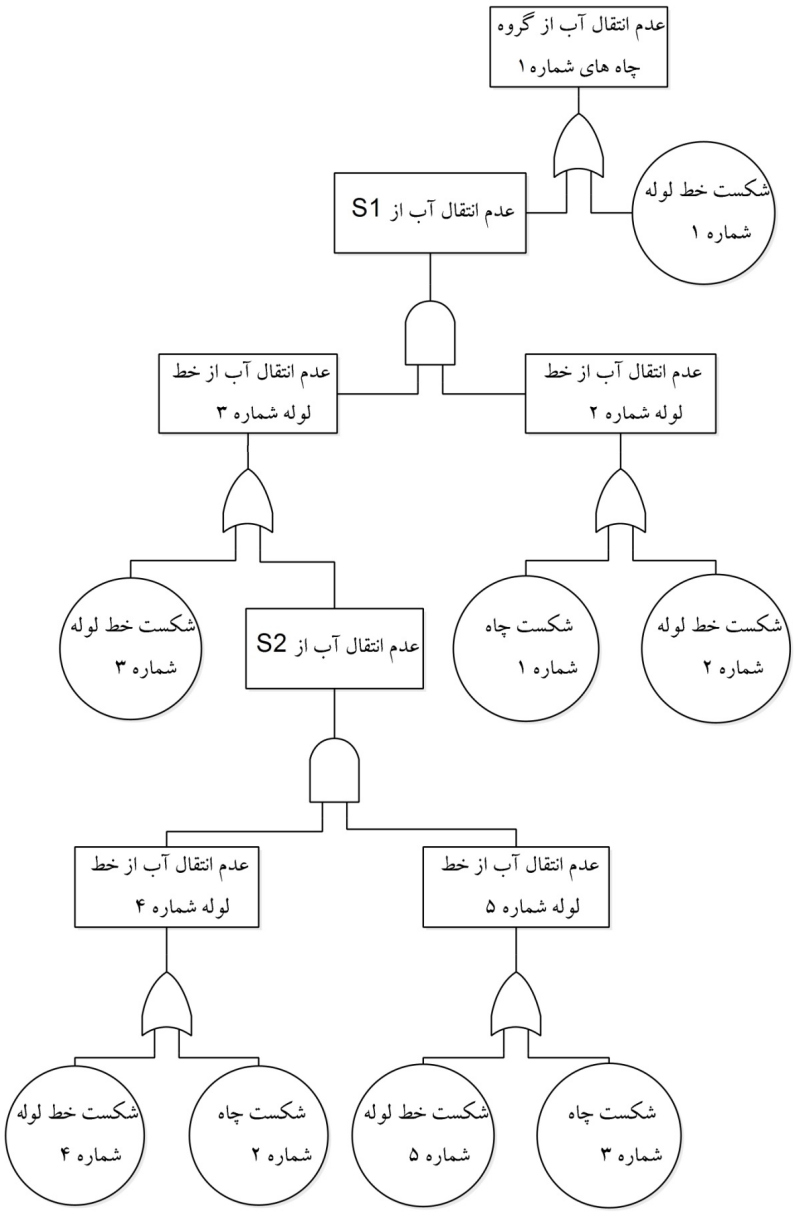
- **سناریوهای وقوع زلزله**

بهره‌گیری از سناریوهای وقوع زلزله برای برنامه‌ریزی واکنش اضطراری و برنامه‌ریزی پیشگیری از اثر بحران ناشی از زلزله در یک شهر می‌تواند بسیار مفید باشد. بنابراین، باید زلزله‌هایی را فرض نمود که بیشترین خسارت را به محدوده‌ی مورد مطالعه وارد خواهند نمود. زلزله‌ای که کلان‌شهر مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار خواهد داد، در گسلی فعال در نزدیکی شهر رخ خواهد داد. کلان‌شهر مورد مطالعه به اندازه‌ی کافی وسیع است و امکان زیادی وجود دارد که یک منطقه متحمل خسارت شدید شود، اما منطقه‌ی دیگر کمتر خسارت ببینند.

از میان بسیاری از گسل‌های فعال در منطقه، سه گسل از زمره‌ی محتمل‌ترین گسل‌های خطرناک منطقه است. مشخصات این گسل‌ها به همراه بزرگای زلزله‌ی احتمالی در جدول ۲ و موقعیت نسبی مربوط به مرکز زلزله‌های مربوط به آن‌ها در تصویر ۲ نشان داده شده است.

- **محاسبه‌ی پارامترهای لرزه‌ای مربوط به سناریوهای وقوع زلزله**

پس از انتخاب سناریوهای وقوع زلزله برای محدوده‌ی مورد مطالعه، باید پارامترهای لرزه‌ای مربوط به این زلزله‌ها محاسبه گردند، چرا که این پارامترها لازمه‌ی محاسبه‌ی احتمال خرابی اجزای سیستم تأمین آب با استفاده از توابع خسارت هستند. این پارامترها عبارتند از شتاب بیشینه‌ی زمین (PGA)، سرعت بیشینه‌ی زمین (PGV) و تغییر شکل دائمی زمین (PGD). در این مطالعه، به‌منظور محاسبه‌ی این پارامترها در محل هر یک




**تصویر ۳: نمونه‌ای از یک درخت خطای مربوط به بخشی از سیستم تأمین آب مورد مطالعه**

**جدول ۲: مشخصات گسل‌های سناریوهای انتخابی وقوع زلزله برای محدوده‌ی مورد مطالعه**

| گسل سناریو | طول (Km) | بزرگای زلزله (Mw) | سرعت موج برشی (Km/s) | عمق لبه‌ی بالایی گسل (Km) |
|---|---|---|---|---|
| گسل ۱ | ۹۰ | ۷/۲ | ۳/۵ | ۵ |
| گسل ۲ | ۲۰۰ | ۷/۲ | ۳/۵ | ۵ |
| گسل ۳ | ۲۰ | ۶/۵ | ۳ | ۵ |

از تأسیسات موجود در سیستم تأمین آب مورد مطالعه، از روابط کاهندگی ارائه‌شده توسط زارع و همکاران و همچنین قدرتی و همکاران، که برای کشور ایران ارائه شده‌اند، استفاده شده است [۲۷، ۲۸].

**برآورد آسیب‌پذیری اجزای سیستم مورد مطالعه**

پس از محاسبه‌ی پارامترهای بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA) و بیشینه‌ی سرعت زمین (PGV) برای سناریوهای مختلف زلزله در محل اجزای موجود در سیستم مورد مطالعه، نوبت به آن رسیده است که احتمال خرابی این اجزا در شرایط مختلف تخمین زده شود، چرا که این احتمالات به‌منزله‌ی ورودی درخت‌های خطا، که در بخش بعدی بسط می‌یابند، خواهند بود. در این پژوهش از روش‌شناسی ارائه شده در مرجع [۲۹] به‌منظور تخمین احتمال خرابی استفاده شده است. برای استفاده از توابع خسارت (منحنی‌های شکنندگی) ارائه شده در این روش‌شناسی، نیاز به

محاسبه‌ی پارامترهای لرزه‌ای در محل اجزای سیستم است، که در بخش پیش انجام شد. با قرار دادن این مقادیر در توابع خسارت، میزان احتمال خسارت (ناچیز، متوسط، گسترده و کامل) را می‌توان به دست آورد.

- **برآورد آسیب‌پذیری اجزا در اثر لرزش زمین (غیر از خطوط لوله)**

مؤلفه‌های سیستم تأمین آب آشامیدنی، به‌جز خطوط لوله، بیشتر نسبت به لرزش زمین حساس‌اند و در اثر آن خسارت می‌بینند. پارامتر لرزه‌ای مربوط به لرزش زمین، شتاب بیشینه‌ی زمین (PGA) است که باید محل تمامی اجزای سیستم محاسبه گردد. در اینجا لازم به یادآوری است که با توجه به روش‌شناسی به کار گرفته شده، مخازن ذخیره‌ی آب دارای دو نوع الگوریتم خسارت در اثر وقوع زلزله است. مخازنی که مدفون هستند نسبت به شکست زمین حساس‌اند و الگوریتم خسارت ارائه‌شده برای آن‌ها با توجه به پارامتر تغییر شکل دائمی زمین (PGD) است. مخازن ذخیره‌ای که از انواع دیگر و غیر مدفون است، نسبت به لرزش زمین حساس است و الگوریتم خسارت آن بر اساس پارامتر بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA) ارائه شده است [۲۹]. پارامتر تغییر شکل دائمی زمین، وابسته به استعداد و احتمال روان‌گرایی زمین محدوده‌ی مورد نظر است. با توجه به ناچیز بودن استعداد روان‌گرایی در محدوده‌ی مورد مطالعه، احتمال خسارت مخازن موجود در منطقه که تماماً از نوع بتنی مدفون است در اثر روان‌گرایی صفر در نظر گرفته می‌شود.

- **برآورد آسیب‌پذیری خطوط لوله**

شکست خطوط لوله هنگام زلزله در اثر شکست و لرزش زمین به ترتیب با پارامترهای تغییر شکل دائمی زمین (PGD) و بیشینه‌ی سرعت حرکت زمین (PGV) قابل بررسی است [۲۹]. با توجه به ناچیز بودن استعداد روان‌گرایی و تغییر شکل دائمی زمین در محدوده‌ی مورد مطالعه، در رویکرد انتخابی این پژوهش، به‌منظور محاسبه‌ی احتمال خرابی خطوط لوله، اثر لرزش زمین هنگام عبور امواج زلزله با پارامتر بیشینه‌ی سرعت حرکت زمین (PGV) مورد نظر است.

رابطه‌ی ۱: $RR \approx ۰,۰۰۰۱ \times PGV^{(۲,۲۵)}$

همان‌طور که در رابطه‌ی ۱ مشاهده می‌گردد، با این معادله می‌توان نرخ خرابی RR (تعداد تعمیرات در واحد طول لوله) مربوط به خطوط لوله را با استفاده از حداکثر سرعت زمین (PGV بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه) محاسبه نمود. اما هدف این بخش محاسبه‌ی احتمالات مربوط به خرابی خطوط لوله‌ی موجود است. بدین منظور می‌توان از رابطه‌ی ۲ که از توزیع پواسون تبعیت می‌کند، استفاده نمود:

رابطه‌ی ۲: $P_f = ۱- \exp(-RR*L)$

در این معادله، $P_f$ احتمال خرابی، L معادل طول خط لوله بر حسب کیلومتر و RR نرخ خرابی است. جنس تمامی خطوط لوله‌ی انتقال آب در شبکه‌ی توزیع مورد مطالعه از نوع فولادی است که در طبقه‌بندی لوله‌های انعطاف‌پذیر قرار می‌گیرد. در نتیجه برای محاسبه‌ی نرخ تعمیر این خطوط لوله باید از ضریب اصلاح ۰/۳ استفاده نمود [۲۹]. اما تمامی خطوط جمع‌آوری و انتقال آب چاه‌ها در محدوده‌ی مورد مطالعه از جنس چدن است که در طبقه‌بندی لوله‌های ترد و شکننده قرار می‌گیرند و برای محاسبه‌ی نرخ تعمیر این لوله‌ها نیازی به استفاده از ضریب نیست. باید اشاره شود که الگوریتم خسارت ارائه شده برای محاسبه‌ی نرخ تعمیر، در بردارنده‌ی تعمیرهای مورد نیاز در اثر نشت و شکست لوله است. حال اینکه با توجه به هدف این پژوهش، که در نهایت بررسی عدم تحویل آب به مخازن ذخیره‌ی موجود است، ضروری به نظر می‌رسد که فقط حالت شکست لوله مدنظر قرار گیرد، چرا که در حالت نشت خطوط لوله، باز هم تحویل آب به مقصد صورت خواهد گرفت. در روش‌شناسی مورد استفاده، اشاره شده است که در اثر عبور امواج زلزله، ٪۸۰ خرابی‌ها و تعمیرات خطوط لوله از نوع نشت و ٪۲۰ آن‌ها از نوع شکست خواهد بود. در نتیجه باید برای محاسبه‌ی احتمال شکست خطوط لوله، در معادله‌ی ۲ از ضریب ۰/۲ برای نرخ تعمیر محاسبه شده استفاده نمود. با توجه به آنچه ذکر شد، احتمالات مربوط به شکست تمامی خطوط لوله‌ی موجود در شبکه در هر سه سناریوی زلزله‌ی احتمالی محاسبه گردید.

**تحلیل درخت خطا**

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، در این پژوهش به دلیل حجم بالای محاسبات و گستردگی سیستم مورد مطالعه، ناگزیر به بهره‌گیری از امکانات نرم‌افزاری هستیم. بدین‌منظور از نرم‌افزار Open FTA استفاده شده است [۳۰]. این نرم‌افزار امکان سه نوع تحلیل را به کاربر می‌دهد که عبارتند از: ۱: تحلیل کیفی، به‌منظور به دست آوردن مجموعه برش‌های حداقل؛ ۲. تحلیل کمی، به‌منظور محاسبه‌ی احتمال وقوع رویدادهای اصلی و ۳. شبیه‌سازی مونت کارلو، به‌منظور انجام تحلیل عدم قطعیت. گفتنی است که به‌منظور دستیابی به نتایج این پژوهش، تعداد ۱۰۰۸ درخت خطا (ترکیبات مختلف ۳ سناریوی زلزله، ۲ سطح خرابی، ۴ استراتژی مقاوم‌سازی و ۴۲ واقعه‌ی فوقانی مربوط به اجزای مختلف شبکه) مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. در تحلیل کیفی درخت خطا، حداقل تعداد اجزایی از سیستم مشخص می‌شود که در صورت از کار افتادن آن‌ها سیستم‌ها از کار می‌افتند که به آن مجموعه‌های برشی حداقل می‌گویند. در تحلیل کمی درخت خطا احتمال وقوع واقعه‌ی فوقانی در فضای شکست که همان احتمال شکست سیستم است محاسبه می‌گردد. در واقع در تحلیل کیفی درخت خطا، عبارت منطقی معادل وقوع شکست سیستم بر حسب مجموعه‌های برشی حداقل به صورت تساوی منطقی و با استفاده از منطق بول حاصل می‌شود. برای به دست آوردن احتمال شکست سیستم (به بیان دیگر برای تحلیل کمی درخت خطای سیستم) کافی است که از دو طرف رابطه‌ی منطقی مذکور که ارتباط منطقی بین شکست سیستم و شکست اجزای آن برقرار می‌کند احتمال گرفت. منطق سیستم و ارتباطات مختلف عملکردی بین اجزای آن، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تحلیل کیفی سیستم است. از طرف دیگر در هنگام تحلیل کمی سیستم، علاوه بر مجموعه‌های برشی حداقل که از معماری سیستم نتیجه می‌گیرد، احتمال شکست اجزای سیستم در اثر زلزله از شاخص‌های تأثیرگذار بر احتمال شکست سیستم است. بنابراین هر شاخصی که

بر احتمال شکست اجزای سیستم در اثر زلزله تأثیرگذار باشد، از شاخص‌های مهم در تحلیل کمی سیستم محسوب می‌گردد که شامل شاخص‌های مرتبط با خطر، شاخص‌های آسیب‌پذیری اجزا و شاخص عواقب منفی اختلال در عملکرد سیستم است. در تحقیق حاضر «تعداد جمعیت بدون آب پس از زلزله» به‌منزله‌ی عواقب منفی زلزله مورد بررسی قرار گرفته و مقدار متوسط تعداد جمعیت بدون آب پس از زلزله به‌منزله‌ی ریسک سیستم در تحلیل کمی شبکه در نظر گرفته شده است که از حاصل ضرب احتمال شکست هر مخزن در جمعیت تحت پوشش آن محاسبه شده است. شاخص‌های خطر زلزله شامل بزرگای زلزله، عمق کانونی، فاصله‌ی سایت تا مرکز زلزله، نوع گسل و نوع خاک است که بر اساس آن‌ها حداکثر شتاب زمین و حداکثر سرعت زمین در محل اجزا محاسبه می‌شود. شتاب آستانه‌ی ورود به سطوح مختلف خرابی برای اجزای مختلف و انحراف معیار آن، وجود یا عدم وجود مهار لرزه‌ای و برق پشتیبان از دیگر شاخص‌ها و عوامل تعیین‌کننده‌ی آسیب‌پذیری لرزه‌ای اجزای سیستم است. در این تحقیق تعداد جمعیت تحت پوشش هر مخزن به عنوان شاخصی در نظر گرفته شده است که در صورت از کار افتادن و شکست مخزن، نمایانگر عواقب آن از لحاظ تعداد جمعیت بدون آب پس از زلزله است.

- **عدم قطعیت**

به‌منظور کمی اثر عدم قطعیت در محاسبات درخت خطا و تخمین‌های مربوطه روش‌ها و ابزار گوناگونی موجود است. یکی از روش‌های معروف تحلیل عدم قطعیت، مدل شبیه‌سازی مونت کارلو[17] است که در این پژوهش نیز از این روش استفاده شده است. این مدل رفتار سیستم‌های پیچیده را که در معرض رویدادهای احتمالاتی قرار دارند، شبیه‌سازی می‌کند. بدین ترتیب که به جای استفاده از تخمین‌های نقطه‌ای برای متغیرهای مورد نظر (مقادیر میانگین متغیرهای تصادفی)، از مقادیر تصادفی متغیرها بر اساس توزیع‌های احتمالات آن‌ها استفاده می‌شود. این شبیه‌سازی به تعداد زیادی تکرار شده و در هر تکرار مقادیر تصادفی از توزیع متغیرهای ورودی مورد نظر انتخاب می‌گردد و محاسبات مربوطه با توجه به این مقادیر تصادفی انجام می‌گیرد. در نتیجه می‌توان به این اطمینان رسید که به جای یک تخمین نقطه‌ای از یک متغیر مورد نظر، تعداد قابل توجهی (حداقل ۱۰۰۰۰ عدد) مقادیر تصادفی آن متغیر در محاسبات شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه برای دستیابی به نتایج این پژوهش، تعداد ۱۰۰۸ درخت مورد تحلیل قرار گرفته‌اند و در هر یک از تحلیل‌های انجام گرفته از ۱۰۰۰۰ تکرار شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده گردیده، بنابراین برای رسیدن به نتایج، بیش از ده میلیون تحلیل درخت خطا در تحقیق حاضر صورت گرفته است.

## نتایج تحلیل

پس از تشکیل ۱۰۰۸ درخت خطای مربوط به سیستم مورد مطالعه و با استفاده از اطلاعات مربوط به احتمالات خرابی حالات مختلف خسارت مؤلفه‌های سیستم، تحلیل‌های لازم با استفاده از نرم‌افزار Open FTA انجام گرفت. در بخش اول نتایج تحلیل، نتایج مربوط به تحلیل سیستم در شرایط موجود ارائه خواهند شد. منظور از شرایط موجود حالتی است که مؤلفه‌های سیستم از قبیل تصفیه‌خانه‌ها و ایستگاه‌های پمپاژ از مهاربندی مناسب لرزه‌ای برخوردار نیستند و همچنین ایستگاه‌های پمپاژ و چاه‌ها دارای سیستم تأمین برق اضطراری نیستند و فقط متکی به برق سراسری هستند. خوشبختانه تصفیه‌خانه‌های موجود در کلان‌شهر مورد بررسی مجهز به سیستم تأمین برق اضطراری نیز هستند. بخش دوم نتایج تحلیل، مربوط به بررسی مهاربندی تصفیه‌خانه‌ها و ایستگاه‌های پمپاژ و همچنین تجهیز ایستگاه‌های پمپاژ و چاه‌ها به سیستم تأمین برق اضطراری است. در حقیقت این دو اقدام، راهکارهای فنّی برای کاهش ریسک است که میزان تأثیر آن‌ها بر کاهش ریسک سیستم برای نمونه‌ی مورد مطالعه، بررسی خواهد گردید.

### نتایج تحلیل حالت فعلی سیستم مورد مطالعه

در ابتدا تحلیل‌هایی به‌منظور بررسی سیستم مورد مطالعه در حالت موجود با استفاده از روش تحلیل درخت خطا (FTA) صورت گرفت. این مرحله شامل شش حالت است که دربردارنده‌ی بررسی وقوع سه زلزله با دو حالت خسارت متوسط و گسترده است. در حالت خسارت متوسط، فرض بر این بوده است که مؤلفه‌های سیستم، از قبیل تصفیه‌خانه‌ها، ایستگاه‌های پمپاژ، چاه‌ها و تونل‌های انتقال آب، در اثر وقوع زلزله دچار خسارت متوسط شوند. در حالت خسارت گسترده نیز، فرض بر ایجاد خسارت گسترده در این مؤلفه‌های سیستم بوده است. در نهایت برای هر یک از این حالات، احتمال عدم تأمین آب توسط هر یک از مخازن موجود در شبکه‌ی توزیع، در اثر وقوع زلزله، با در نظر گرفتن اندرکنش میان مؤلفه‌ها با استفاده از روش تحلیل درخت خطا، محاسبه گردیده است. همه‌ی احتمالات مربوط به عدم تأمین آب توسط مخازن در سناریوهای ارزیابی شده به همراه جمعیت تحت پوشش هر مخزن در وضعیت نرمال، در جدول ۳ ارائه شده است.

- **تخمین ریسک**

نتایج ارائه شده در این بخش، هرچند دیدی کلی از آنچه با آن مواجه هستیم به دست می‌دهند، اما در حقیقت تعدادی عدد مربوط به احتمال هستند که گویای جنبه‌های دیگر موجود نیستند. بدین منظور باید از این اعداد مفاهیمی را استخراج نمود که بیشتر قابل فهم و استفاده برای تصمیم‌گیری باشند. یکی از این مفاهیم سودمند که از اهداف این پژوهش نیز هست، ریسک‌های مربوطه است. در این تحقیق، مقدار ریسک متشکل از دو جزء اصلی احتمال شکست مخزن و پیامد آن (تعداد جمعیت بدون آب) است و می‌توان آن را از طریق ضرب این دو مقدار در هم محاسبه نمود. در نتیجه می‌توان پتانسیل بدون آب ماندن جمعیت و یا به بیان دیگر مقدار متوسط جمعیت بدون آب را در اثر زلزله به دست آورد.

تا این مرحله جزء اول ریسک یعنی احتمال به دست آمد. انتخاب بخش دوم ریسک، که پیامد یا عواقب مربوط به یک رویداد نامطلوب است، می‌تواند موارد مختلفی را در بر گیرد که این عواقب به اهداف و سؤالات تحقیق وابسته است. نظر به

**جدول ۳: احتمال عدم تأمین آب توسط هر یک از مخازن موجود در محدوده‌ی مورد مطالعه، برای سناریوهای مختلف زلزله**

| مخزن | | زلزله‌ی گسل ۱ | | زلزله‌ی گسل ۲ | | زلزله‌ی گسل ۳ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| شماره | جمعیت تحت پوشش | حالت خسارت متوسط | حالت خسارت گسترده | حالت خسارت متوسط | حالت خسارت گسترده | حالت خسارت متوسط | حالت خسارت گسترده |
| ۱ | ۸۸۶۱۹ | ۰٫۶۳۶۰ | ۰٫۰۹۶۹ | ۰٫۰۸۵۶ | ۰٫۰۰۷۴ | ۰٫۰۰۳۰ | ۰٫۰۰۲۳ |
| ۲ | ۱۰۷۸۳۱ | ۰٫۹۹۵۰ | ۰٫۰۵۰۸ | ۰٫۰۶۰۰ | ۰٫۰۰۰۰ | ۰٫۰۱۰۰ | ۰٫۰۰۰۰ |
| ۳ | ۴۶۰۵۵ | ۰٫۷۸۱۱ | ۰٫۰۹۰۶ | ۰٫۲۶۰۳ | ۰٫۰۰۳۰ | ۰٫۰۱۱۶ | ۰٫۰۰۰۱ |
| ۴ | ۶۳۹۸ | ۰٫۴۸۴۸ | ۰٫۱۳۶۰ | ۰٫۰۲۲۶ | ۰٫۰۰۱۱ | ۰٫۰۰۰۳ | ۰٫۰۰۰۲ |
| ۵ | ۴۵۹۷۸ | ۰٫۹۹۹۷ | ۰٫۶۵۴۵ | ۰٫۵۳۹۹ | ۰٫۰۶۶۲ | ۰٫۳۶۳۵ | ۰٫۰۳۸ |
| ۶ | ۳۲۰۰۰ | ۰٫۹۹۸۸ | ۰٫۵۴۷۹ | ۰٫۵۸۳۳ | ۰٫۰۸۰۶ | ۰٫۳۴۵۶ | ۰٫۰۳۵۵ |
| ۷ | ۷۹۵۲ | ۰٫۹۹۹۹ | ۰٫۸۶۸۴ | ۰٫۷۶۶۶ | ۰٫۱۲۲۱ | ۰٫۵۸۷۳ | ۰٫۰۷۲۱ |
| ۸ | ۸۰۱۳ | ۰٫۹۹۹۹ | ۰٫۷۴۹۶ | ۰٫۸۳۹۷ | ۰٫۱۵۷۳ | ۰٫۵۴۸۲ | ۰٫۰۶۳۵ |
| ۹ | ۶۰۳۶ | ۰٫۹۹۹۹ | ۰٫۹۴۹۴ | ۰٫۸۷۳۵ | ۰٫۱۶۷۱ | ۰٫۷۲۷۱ | ۰٫۱۰۲۶ |
| ۱۰ | ۴۲۹۱۹ | ۰٫۷۸۱۱ | ۰٫۰۰۳۹ | ۰٫۰۰۲۷ | ۰٫۰۰۰۰ | ۰٫۰۰۰۰ | ۰٫۰۰۰۰ |
| ۱۱ | ۵۰۴۴۴ | ۰٫۷۵۳۳ | ۰٫۰۱۲۷ | ۰٫۰۶۶۱ | ۰٫۰۰۰۰ | ۰٫۰۰۱۲ | ۰٫۰۰۰۰ |
| ۱۲ | ۲۵۱۰۰ | ۰٫۸۱۷۶ | ۰٫۱۹۳۳ | ۰٫۶۶۷۳ | ۰٫۰۷۱۸ | ۰٫۰۸۲ | ۰٫۰۰۵۹ |
| ۱۳ | ۲۹۷۳۹ | ۰٫۹۹۵۳ | ۰٫۴۶۶۲ | ۰٫۹۱۹۶ | ۰٫۱۹۳۳ | ۰٫۳۷۴۳ | ۰٫۰۳۶۵ |
| ۱۴ | ۲۱۱۱۴ | ۰٫۹۹۹۸ | ۰٫۶۳۸۷ | ۰٫۹۸۱۰ | ۰٫۳۰۰۸ | ۰٫۵۵۸۲ | ۰٫۰۶۳۰ |

**جدول ۴: ریسک عدم تأمین آب در اثر وقوع زلزله‌های سناریو، برای حالات خسارت متوسط و گسترده (بر حسب نفر)**

| شماره‌ی مخزن | زلزله‌ی گسل ۱ | | زلزله‌ی گسل ۲ | | زلزله‌ی گسل ۳ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | خسارت متوسط | خسارت گسترده | خسارت متوسط | خسارت گسترده | خسارت متوسط | خسارت گسترده |
| ۱ | ۵۶۳۶۲ | ۸۵۸۷ | ۷۵۸۶ | ۶۵۶ | ۲۶۶ | ۲۰۴ |
| ۲ | ۱۰۷۲۹۲ | ۵۴۷۸ | ۶۴۷۰ | ۲ | ۱۰۷۸ | ۰ |
| ۳ | ۳۵۹۷۳ | ۴۱۷۳ | ۱۱۹۸۸ | ۱۳۸ | ۵۳۴ | ۵ |
| ۴ | ۳۱۰۲ | ۸۷۰ | ۱۴۵ | ۷ | ۲ | ۱ |
| ۵ | ۴۵۹۶۴ | ۳۰۰۹۳ | ۲۴۸۲۳ | ۳۰۴۴ | ۱۶۷۱۳ | ۱۷۴۷ |
| ۶ | ۳۱۹۶۱ | ۱۷۵۳۳ | ۱۸۶۶۵ | ۲۵۷۹ | ۱۱۰۵۹ | ۱۱۳۶ |
| ۷ | ۷۹۵۱ | ۶۹۰۵ | ۶۰۹۶ | ۹۷۱ | ۴۶۷۰ | ۵۷۳ |
| ۸ | ۸۰۱۲ | ۶۰۰۶ | ۶۷۲۸ | ۱۲۶۰ | ۴۳۹۳ | ۵۰۹ |
| ۹ | ۶۰۳۵ | ۵۷۳۱ | ۵۲۷۲ | ۱۰۰۹ | ۴۳۸۹ | ۶۱۹ |
| ۱۰ | ۳۳۵۲۴ | ۱۶۷ | ۱۱۶ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۱۱ | ۳۷۹۹۹ | ۶۴۱ | ۳۳۳۴ | ۰ | ۶۰ | ۰ |
| ۱۲ | ۲۰۵۲۲ | ۴۸۵۲ | ۱۶۷۴۹ | ۱۸۰۲ | ۲۰۵۸ | ۱۴۸ |
| ۱۳ | ۲۹۵۹۹ | ۱۳۸۶۴ | ۲۷۳۴۸ | ۵۷۴۸ | ۱۱۱۳۱ | ۱۰۸۵ |
| ۱۴ | ۲۱۱۱۰ | ۱۳۴۸۵ | ۲۰۷۱۳ | ۶۳۵۱ | ۱۱۷۸۶ | ۱۳۳۰ |
| **مجموع** | ۴۴۵۴۰۶ | ۱۱۸۳۸۵ | ۱۵۶۰۳۳ | ۲۳۵۶۷ | ۶۸۱۳۹ | ۷۳۵۷ |

اینکه هدف از انجام این پژوهش بررسی سیستم تأمین آب در شرایط وقوع سانحه‌ی زلزله است، یکی از مهم‌ترین پیامدهایی که می‌توان در این زمینه در نظر گرفت جمعیت افراد تحت تأثیر زلزله خواهد بود. لذا در این مقاله بخش پیامد ریسک به‌منزله‌ی جمعیت تحت تأثیر در نظر گرفته خواهد شد. منظور از جمعیت تحت تأثیر، تعداد افرادی است که در اثر وقوع زلزله دچار بی‌آبی خواهند گردید. بنابراین در این مقاله منظور از ریسک، میانگین تعداد افرادی است که در اثر وقوع زلزله دچار بی‌آبی خواهند شد. عدد ریسک را می‌توان از ضرب احتمال عدم تأمین آب توسط هر یک از مخازن در جمعیت تحت پوشش آن مخزن محاسبه نمود. ریسک مربوط به محدوده‌ی تحت پوشش هر یک از مخازن، به‌وسیله‌ی احتمال عدم تأمین آب و جمعیت تحت پوشش هر مخزن محاسبه گردید. این نتایج در جدول ۴ ارائه گردیده است.

**نتایج تحلیل راهکارهای پیشنهادی**

در بخش قبل نحوه‌ی محاسبه‌ی جمعیت بدون آب در اثر وقوع زلزله، که به‌منزله‌ی ریسک معرفی گردید، ارائه شد. همچنین نتایج مربوط به جمعیت بدون آب در اثر وقوع زلزله‌های سناریو برای هر یک از محدوده‌های تحت پوشش مخازن، در دو

**جدول ۵: احتمال عدم تأمین آب توسط مخازن در اثر وقوع زلزله‌های سناریو، برای حالت فعلی و سه راهکار پیشنهادی**

| شماره‌ی مخزن | زلزله‌ی گسل ۱ | | | | زلزله‌ی گسل ۲ | | | | زلزله‌ی گسل ۳ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | حالت موجود | راهکار اول | راهکار دوم | راهکار سوم | حالت موجود | راهکار اول | راهکار دوم | راهکار سوم | حالت موجود | راهکار اول | راهکار دوم | راهکار سوم |
| ۱ | ۰,۶۳۶ | ۰,۲۴۷۹ | ۰,۶۲۱۳ | ۰,۲۲۷۳ | ۰,۰۸۵۶ | ۰,۰۱۶۲ | ۰,۰۴۸۵ | ۰,۰۱ | ۰,۰۰۳ | ۰,۰۰۲۳ | ۰,۰۰۲۷ | ۰,۰۰۲۳ |
| ۲ | ۰,۹۹۵ | ۰,۹۹۱۷ | ۰,۶۳۱ | ۰,۴۹۳۴ | ۰,۰۶ | ۰,۰۵۵۶ | ۰,۰۰۶ | ۰,۰۰۳۸ | ۰,۰۱ | ۰,۰۰۹۵ | ۰,۰۰۱۲ | ۰,۰۰۰۵ |
| ۳ | ۰,۷۸۱۱ | ۰,۴۳۴۶ | ۰,۷۶۴۲ | ۰,۳۶۷۵ | ۰,۲۶۰۳ | ۰,۰۸۵۴ | ۰,۱۷۱۶ | ۰,۰۳۴۱ | ۰,۰۱۱۶ | ۰,۰۰۱۹ | ۰,۰۰۶۹ | ۰,۰۰۰۹ |
| ۴ | ۰,۴۸۴۸ | ۰,۰۹۱۱ | ۰,۴۶۷ | ۰,۰۷۷۳ | ۰,۰۲۲۶ | ۰,۰۰۱۸ | ۰,۰۰۹۲ | ۰,۰۰۱۳ | ۰,۰۰۰۳ | ۰,۰۰۰۳ | ۰,۰۰۰۳ | ۰,۰۰۰۳ |
| ۵ | ۰,۹۹۹۷ | ۰,۹۹۹۱ | ۰,۹۹۲ | ۰,۹۱۴۲ | ۰,۵۳۹۹ | ۰,۴۷۷۳ | ۰,۴۰۱ | ۰,۲۶۹ | ۰,۳۶۳۵ | ۰,۳۴۱۷ | ۰,۲۶۸۲ | ۰,۱۹۵۱ |
| ۶ | ۰,۹۹۸۸ | ۰,۹۹۶۶ | ۰,۹۸ | ۰,۸۵۵۷ | ۰,۵۸۳۳ | ۰,۵۴۳۸ | ۰,۴۳۸۲ | ۰,۳۰۶ | ۰,۳۴۵۶ | ۰,۳۲۵۱ | ۰,۲۵۴۳ | ۰,۱۸۶ |
| ۷ | ۰,۹۹۹۹ | ۰,۹۹۹۹ | ۰,۹۹۹ | ۰,۹۹۰۳ | ۰,۷۶۶۶ | ۰,۷۲۰۳ | ۰,۶۲۱۴ | ۰,۴۵۹۲ | ۰,۵۸۷۳ | ۰,۵۵۹۳ | ۰,۴۵۷۴ | ۰,۳۴۶۸ |
| ۸ | ۰,۹۹۹۹ | ۰,۹۹۹۹ | ۰,۹۹۸ | ۰,۹۶۹۲ | ۰,۸۳۹۷ | ۰,۸۱ | ۰,۶۹۹۷ | ۰,۵۳۱۸ | ۰,۵۴۸۲ | ۰,۵۲۱۷ | ۰,۴۲۳ | ۰,۳۲۲۳ |
| ۹ | ۰,۹۹۹۹ | ۰,۹۹۹۹ | ۰,۹۹۹۹ | ۰,۹۹۸۹ | ۰,۸۷۳۵ | ۰,۸۴۱ | ۰,۷۵ | ۰,۵۸۹۶ | ۰,۷۲۷۱ | ۰,۶۹۹۷ | ۰,۵۹۲۳ | ۰,۴۶۵۵ |
| ۱۰ | ۰,۷۸۱۱ | ۰,۵۳۹۳ | ۰,۰۶۹۲ | ۰,۰۳۹۴ | ۰,۰۰۲۷ | ۰,۰۰۱۸ | ۰,۰۰۰۷ | ۰,۰۰۰۵ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۱۱ | ۰,۷۵۳۳ | ۰,۴ | ۰,۴۲۷۶ | ۰,۱۹۶۶ | ۰,۰۶۶۱ | ۰,۰۱۹۳ | ۰,۰۰۸۱ | ۰,۰۰۱۷ | ۰,۰۰۱۲ | ۰,۰۰۰۱ | ۰,۰۰۰۱ | ۰,۰۰۰۰۴ |
| ۱۲ | ۰,۸۱۷۶ | ۰,۵۴۸۵ | ۰,۸۱۶ | ۰,۵۴۶۳ | ۰,۶۶۷۳ | ۰,۴۶۲۳ | ۰,۵۹۱۷ | ۰,۳۴۰۱ | ۰,۰۸۲ | ۰,۰۲۲۶ | ۰,۰۸۲۶ | ۰,۰۲۲۶ |
| ۱۳ | ۰,۹۹۵۳ | ۰,۹۸۳۷ | ۰,۹۷۶ | ۰,۸۶۰۳ | ۰,۹۱۹۶ | ۰,۸۵۳ | ۰,۸۳۵۶ | ۰,۶۱۶۷ | ۰,۳۷۴۳ | ۰,۳۱۵۳ | ۰,۲۹۶۵ | ۰,۱۹۰۸ |
| ۱۴ | ۰,۹۹۹۸ | ۰,۹۹۳ | ۰,۹۹۶ | ۰,۹۵۴۹ | ۰,۹۸۱ | ۰,۹۶ | ۰,۹۳۳۷ | ۰,۷۷۸۹ | ۰,۵۵۸۲ | ۰,۵۰۴۶ | ۰,۴۴۷۲ | ۰,۳۲۰۳ |

حالت ایجاد خسارت متوسط و گسترده ارائه گردید. نتایج ارائه شده مربوط به شرایط فعلی سیستم تأمین آب بودند. یعنی شرایطی که در آن تصفیه‌خانه‌ها و ایستگاه‌های پمپاژ از مهاربندی لرزه‌ای برخوردار نیستند و همچنین چاه‌های موجود و ایستگاه‌های پمپاژ مجهز به سیستم تأمین برق اضطراری نیستند.

در این بخش هدف بررسی تأثیر عوامل مهاربندی و برق اضطراری بر ریسک مورد نظر است. در حقیقت هدف پی بردن به این امر است که آیا این عوامل تأثیری در ریسک دارند و آن را کاهش می‌دهند یا نه و اینکه اگر ریسک را کاهش می‌دهند، میزان این کاهش به چه مقدار است. بر اساس اصول مدیریت کاهش ریسک، گاهی با تلاش‌های اندک می‌توان نتایج قابل توجهی در کاهش ریسک به دست آورد. برای مدیران بحران که عمدتاً در شرایط محدودیت منابع قرار دارند استفاده از این‌گونه ایده‌ها (به‌کارگیری دیدگاه مدیریت پیشگیرانه در کنار اصل پارتو) بسیار کارساز است. بدین منظور سه راهکار به صورت زیر معرفی گردید: ۱. مهاربندی مناسب لرزه‌ای اجزای تصفیه‌خانه‌ها و ایستگاه‌های پمپاژ؛ ۲. تجهیز ایستگاه‌های پمپاژ و ساختمان چاه‌های موجود به سیستم تأمین برق اضطراری[۱۸] و ۳. به‌کارگیری هر دو مورد. با توجه به توضیحات فوق، راهکارهای ارائه شده نمونه‌ای از کارهای نسبتاً ساده‌ای است که فرض می‌شود بر اساس آن‌ها بتوان مقدار ریسک را به صورت قابل توجهی کاهش داد و اثربخشی آن‌ها در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

گفتنی است که تأثیر این عوامل را فقط می‌توان در حالت خسارت متوسط مشاهده نمود [۲۹]. با ملاحظه‌ی توابع خسارت مؤلفه‌های سیستم مشاهده می‌گردد که احتمالات مربوط به حالت خسارت گسترده و کامل در حالات با مهاربندی یا بدون مهاربندی، با برق اضطراری یا بدون آن، تفاوتی با هم ندارند. در نتیجه تأثیر این راهکارها در حالت خسارت متوسط نمایان خواهد بود.

برای به دست آوردن احتمال خسارت متوسط ایستگاه‌های پمپاژ و چاه‌ها در حالت بدون برق اضطراری، از تکنیک تحلیل درخت خطا استفاده شد. در اینجا باید اشاره گردد که توابع خسارت فقط برای تجهیزاتی از قبیل تصفیه‌خانه، ایستگاه پمپاژ و چاه، با فرض وجود برق اضطراری است. لذا به‌منظور حذف تأثیر این عامل در اعداد احتمال حاصل از توابع مذکور، درخت‌های خطایی برای ایستگاه‌های پمپاژ و چاه‌ها (بدون وجود برق اضطراری) تشکیل گردید و تحلیل شد.

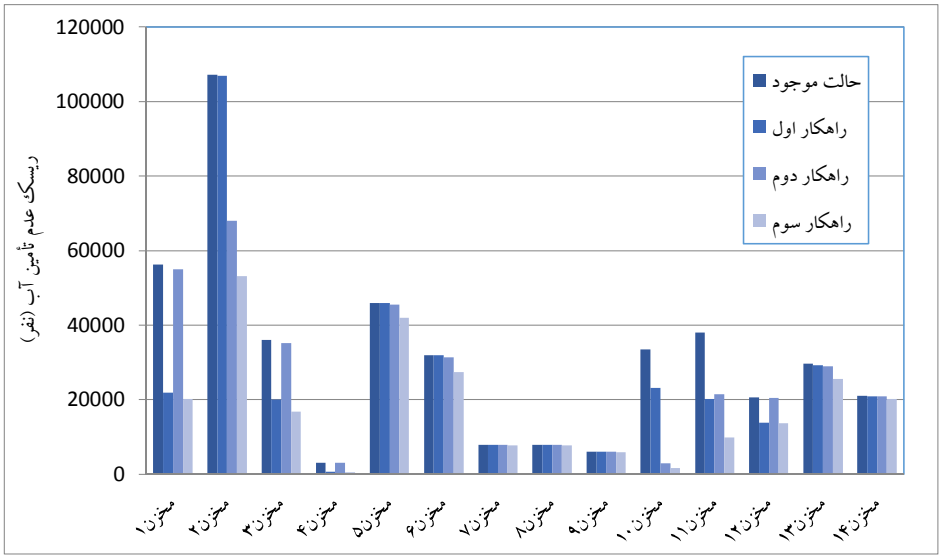
پس از اطمینان از محاسبه‌ی تمامی احتمالات مربوط به رویدادهای پایه‌ی درخت‌های خطا در حالات استفاده از راهکارهای ارائه شده، تحلیل‌های فراوانی با استفاده از نرم‌افزار Open FTA انجام گرفت و نتایج قابل توجهی به دست آمد. برخی از این نتایج به صورت خلاصه در ادامه آورده شده‌اند. نتایج مربوط به احتمال عدم تأمین آب توسط هر یک از مخازن در اثر وقوع زلزله‌های سناریو برای حالت موجود و سه راهکار پیشنهادی، به صورت جامع در جدول ۵ خلاصه شده است.

جدول ۶: ریسک عدم تأمین آب در اثر وقوع زلزله‌های سناریو، با ملاحظه‌ی راهکارهای ارائه شده (نفر)

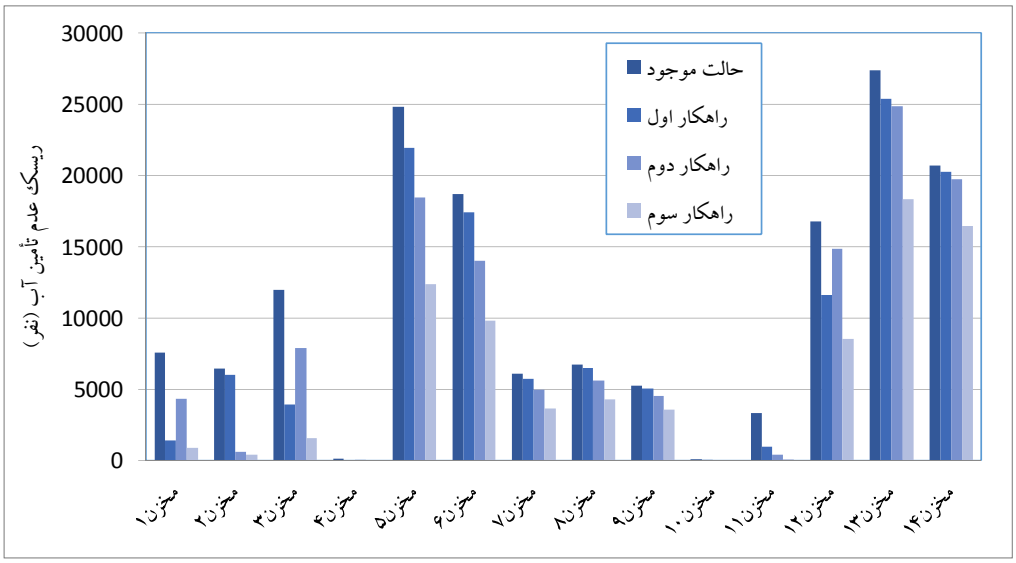
| شماره‌ی مخزن | زلزله‌ی گسل ۱ | | | | زلزله‌ی گسل ۲ | | | | زلزله‌ی گسل ۳ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | حالت موجود | راهکار اول | راهکار دوم | راهکار سوم | حالت موجود | راهکار اول | راهکار دوم | راهکار سوم | حالت موجود | راهکار اول | راهکار دوم | راهکار سوم |
| ۱ | ۵۶۳۶۲ | ۲۱۹۶۹ | ۵۵۰۵۹ | ۲۰۱۴۳ | ۷۵۸۶ | ۱۴۳۵ | ۴۲۹۸ | ۸۸۶ | ۲۶۶ | ۲۰۴ | ۲۳۹ | ۲۰۴ |
| ۲ | ۱۰۷۲۹۲ | ۱۰۶۹۳۶ | ۶۸۰۴۱ | ۵۳۲۰۴ | ۶۴۷۰ | ۵۹۹۵ | ۶۴۷ | ۴۱۰ | ۱۰۷۸ | ۱۰۲۴ | ۱۲۹ | ۵۴ |
| ۳ | ۳۵۹۷۳ | ۲۰۰۱۵ | ۳۵۱۹۵ | ۱۶۹۲۵ | ۱۱۹۸۸ | ۳۹۳۳ | ۷۹۰۳ | ۱۵۷۰ | ۵۳۴ | ۸۷ | ۳۱۸ | ۴۱ |
| ۴ | ۳۱۰۲ | ۵۸۳ | ۲۹۸۷ | ۴۹۵ | ۱۴۵ | ۱۱ | ۵۹ | ۸ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ |
| ۵ | ۴۵۹۶۴ | ۴۵۹۳۷ | ۴۵۶۱۰ | ۴۲۰۳۳ | ۲۴۸۲۳ | ۲۱۹۴۵ | ۱۸۴۳۷ | ۱۲۳۶۸ | ۱۶۷۱۳ | ۱۵۷۱۰ | ۱۲۳۳۱ | ۸۹۷۰ |
| ۶ | ۳۱۹۶۱ | ۳۱۸۹۱ | ۳۱۳۶۰ | ۲۷۳۸۲ | ۱۸۶۶۵ | ۱۷۴۰۱ | ۱۴۰۲۲ | ۹۷۹۲ | ۱۱۰۵۹ | ۱۰۴۰۳ | ۸۱۳۸ | ۵۹۵۲ |
| ۷ | ۷۹۵۱ | ۷۹۵۱ | ۷۹۴۴ | ۷۸۷۵ | ۶۰۹۶ | ۵۷۲۸ | ۴۹۴۱ | ۳۶۵۱ | ۴۶۷۰ | ۴۴۴۷ | ۳۶۳۷ | ۲۷۵۸ |
| ۸ | ۸۰۱۲ | ۸۰۱۲ | ۷۹۹۷ | ۷۷۶۶ | ۶۷۲۸ | ۶۴۹۰ | ۵۶۰۷ | ۴۲۶۱ | ۴۳۹۳ | ۴۱۸۰ | ۳۳۸۹ | ۲۵۸۳ |
| ۹ | ۶۰۳۵ | ۶۰۳۵ | ۶۰۳۵ | ۶۰۲۹ | ۵۲۷۲ | ۵۰۷۶ | ۴۵۲۷ | ۳۵۵۹ | ۴۳۸۹ | ۴۲۲۳ | ۳۵۷۵ | ۲۸۱۰ |
| ۱۰ | ۳۳۵۲۴ | ۲۳۱۴۶ | ۲۹۷۰ | ۱۶۹۱ | ۱۱۶ | ۷۷ | ۳ | ۲ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۱۱ | ۳۷۹۹۹ | ۲۰۱۷۸ | ۲۱۵۷۰ | ۹۹۱۷ | ۳۳۳۴ | ۹۷۴ | ۴۰۹ | ۸۶ | ۶۰ | ۵ | ۵ | ۲ |
| ۱۲ | ۲۰۵۲۲ | ۱۳۷۶۷ | ۲۰۴۸۱ | ۱۳۷۱۲ | ۱۶۷۴۹ | ۱۱۶۰۴ | ۱۴۸۵۲ | ۸۵۳۶ | ۲۰۵۸ | ۵۶۷ | ۲۰۷۳ | ۵۶۷ |
| ۱۳ | ۲۹۵۹۹ | ۲۹۲۵۴ | ۲۹۰۲۵ | ۲۵۵۸۴ | ۲۷۳۴۸ | ۲۵۳۶۸ | ۲۴۸۵۰ | ۱۸۳۴۰ | ۱۱۱۳۱ | ۹۳۷۷ | ۸۸۱۸ | ۵۶۷۴ |
| ۱۴ | ۲۱۱۱۰ | ۲۰۹۶۶ | ۲۱۰۲۹ | ۲۰۱۶۲ | ۲۰۷۱۳ | ۲۰۲۷۰ | ۱۹۷۱۴ | ۱۶۴۴۶ | ۱۱۷۸۶ | ۱۰۶۵۴ | ۹۴۴۲ | ۶۷۶۳ |
| مجموع | ۴۴۵۴۰۶ | ۳۵۶۶۴۰ | ۳۵۵۳۰۳ | ۲۵۲۹۱۸ | ۱۵۶۰۳۳ | ۱۲۶۳۰۷ | ۱۲۰۲۶۹ | ۷۹۹۱۵ | ۶۸۱۳۹ | ۶۰۸۸۳ | ۵۲۰۹۶ | ۳۶۳۸۰ |

در این قسمت نیز به‌منظور تصمیم‌گیری مستدل‌تر نیاز به محاسبه‌ی ریسک خواهد بود. چرا که اعداد مربوط به احتمال به تنهایی نشان‌دهنده‌ی واقعیات مسئله نیست. بنابراین تمامی این احتمالات در جمعیت تحت پوشش مخازن مربوطه ضرب گردیدند تا میزان ریسک، که همان جمعیت بدون آب در اثر وقوع زلزله است، به دست آید. نتایج به دست آمده به صورت جامع در جدول ۶ ارائه شده‌اند. برای مشاهده‌ی بهتر روند تغییرات، اعداد ارائه شده در جدول ۶ به صورت نمودارهایی در تصاویر ۴، ۵، ۶ ترسیم شده‌اند.

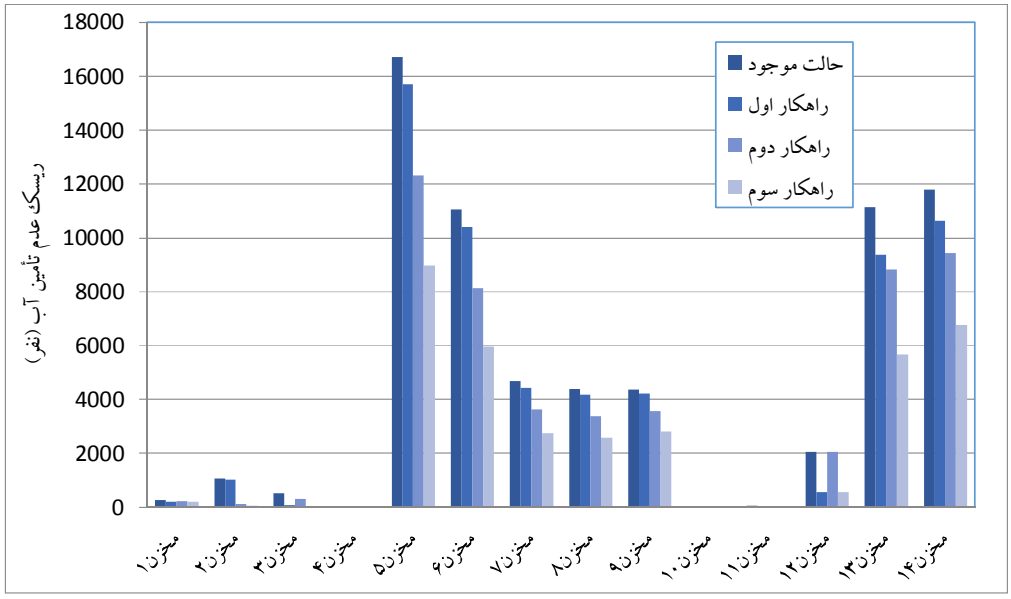
نمودارهای ارائه‌شده کارایی بسیاری در شناخت رفتار بخش‌های مختلف سیستم مورد مطالعه در شرایط وقوع زلزله دارند، اما معمولاً به‌منظور اتخاذ سیاست‌ها و تصمیمات مهم در مورد سیستم‌های تأمین آب نیاز به اطلاعاتی است که رفتار کل سیستم مورد مطالعه را نیز به صورت ملموس نمایان سازد. به‌طور مثال در مورد راهکارهای پیشنهادی در این پژوهش، نمی‌توان صرفاً با تکیه بر اطلاعاتی که تمرکز بر نقاط خاصی از سیستم مورد مطالعه دارند، برای کل سیستم تصمیم‌گیری نمود. لذا ضروری به نظر می‌رسد که میزان تأثیر این راهکارها را در ریسک کل سیستم نیز



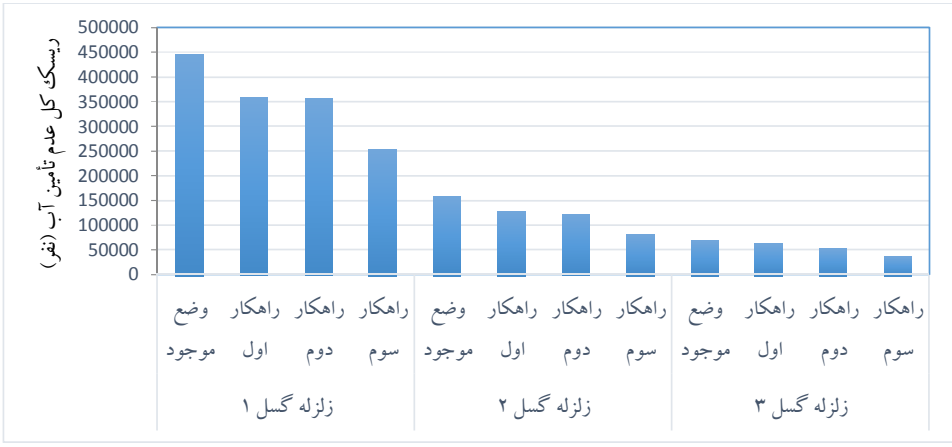

تصویر ۴: تأثیر راهکارهای پیشنهادی در میزان ریسک عدم تأمین آب (نفر) در اثر وقوع زلزله‌ی گسل ۱




**تصویر ۵: تأثیر راهکارهای پیشنهادی در میزان ریسک عدم تأمین آب (نفر) در اثر وقوع زلزله‌ی گسل ۲**




**تصویر ۶: تأثیر راهکارهای پیشنهادی در میزان ریسک عدم تأمین آب (نفر) در اثر وقوع زلزله‌ی گسل ۳**




**تصویر ۷: میزان تأثیر راهکارهای پیشنهادی در ریسک کل عدم تأمین آب (نفر) در اثر وقوع زلزله‌های سناریو**

**جدول ۷: میزان کاهش ریسک کل در اثر استفاده از راهکارهای پیشنهادی (نفر - درصد)**

| | زلزله‌ی گسل ۱ | | زلزله‌ی گسل ۲ | | زلزله‌ی گسل ۳ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| راهکار اول | ۸۸۷۶۶ | ٪۱۹/۹۳ | ۲۹۷۲۶ | ٪۱۹/۰۵ | ۷۲۵۶ | ٪۱۰/۶۵ |
| راهکار دوم | ۹۰۱۰۳ | ٪۲۰/۲۳ | ۳۵۷۶۴ | ٪۲۲/۹۲ | ۱۶۰۴۳ | ٪۲۳/۵۴ |
| راهکار سوم | ۱۹۲۴۸۸ | ٪۴۳/۲۲ | ۷۶۱۱۸ | ٪۴۸/۷۸ | ۳۱۷۵۹ | ٪۴۶/۶۱ |

بررسی نماییم. برای رسیدن به این هدف، میزان تأثیر راهکارهای پیشنهادی در ریسک کل سیستم (کل جمعیت بدون آب در اثر وقوع زلزله) در تصویر ۷ ارائه شده است.

جدول ۷ نیز به‌منظور مشاهده‌ی میزان کاهش ریسک (جمعیتی که در اثر وقوع زلزله دچار بی‌آبی خواهند شد) در اثر استفاده از هر یک از راهکارهای پیشنهادی، برای سناریوهای مختلف زلزله ارائه گردیده است.

با توجه به جدول و نمودار ارائه شده در تمامی سناریوها عملکرد راهکار دوم (استفاده از سیستم تأمین برق اضطراری)، بهتر از راهکار اول (مهاربندی مؤلفه‌ها) است. هرچند تفاوت میزان تأثیر این دو راهکار در برخی از سناریوها چندان قابل ملاحظه نیست.

## بحث و نتیجه‌گیری

روش تحلیل درخت خطا (FTA) که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، رویکرد بسیار مناسبی برای ارزیابی و تحلیل ریسک‌های مربوط به سیستم‌های تأمین آب است. از روش مذکور می‌توان به‌طور جداگانه برای ارزیابی هر یک از زیرسیستم‌های آب خام، تصفیه‌خانه و شبکه‌ی توزیع استفاده نمود، اما مسلماً رویکرد ارزیابی جامع با ملاحظه‌ی هر سه بخش نتایج بهتر و واقع‌گرایانه‌تری را به دست خواهد داد. گفتنی است که این فقط تحلیل کمی و نتایج عددی حاصل از تحلیل درخت خطا نیست که اهمیت آن را مشخص می‌سازد، بلکه تحلیل کیفی درخت‌های خطا و بسط مجموعه‌های برشی حداقل نیز به تنهایی از اهمیت و ارزش بالایی برخوردار است، چرا که با استفاده از آن‌ها، می‌توان به صورت اصولی‌تری به اندرکنش‌ها و روابط موجود بین اجزای مختلف سیستم‌های پیچیده پی برد. روش تحلیل درخت خطا با اینکه قدمت بسیار زیادی دارد، اما هنوز هم در صدر روش‌های مورد استفاده به‌منظور ارزیابی و تحلیل ریسک و بررسی رفتار سیستم‌های پیچیده قرار دارد.

نتایج حاصل از تحلیل درخت خطای یک سیستم تأمین آب، می‌تواند بستری مناسب برای اتخاذ تصمیمات مدیریت کاهش ریسک در زمینه‌های مختلف مانند مقاوم‌سازی مؤلفه‌ها، واکنش در شرایط اضطرار و طراحی سیستم باشد. برای مثال با مشخص شدن نقاط حساس سیستم که تأثیر بیشتری در مقدار ریسک دارند می‌توان اجزای سیستم را به‌منظور مقاوم‌سازی اولویت‌بندی نمود. همچنین می‌توان از نتایج مربوط به جمعیت بدون آب در اثر وقوع زلزله، در تصمیم‌گیری‌های واکنش اضطراری، امدادرسانی شرایط بحرانی و آب‌رسانی اضطراری پس از سانحه استفاده نمود. شناسایی نقاط ضعف و قوت سیستم مورد مطالعه می‌تواند موجب اتخاذ تصمیمات مناسبی برای طراحی سیستم‌های مشابه در آینده شود.

با بررسی نتایج حاصل از تحلیل احتمال عدم تأمین آب توسط مخازن در اثر وقوع زلزله در منطقه‌ی مورد مطالعه (جدول ۵) می‌توان به موارد زیر پی برد:

- احتمال عدم تأمین آب در شرایط وقوع زلزله در مخازنی که آب آن‌ها از طریق چند خط لوله تأمین می‌گردد، به علت افزونگی[19] بیشتر، کمتر است و این مخازن عملکرد بهتری از خود نشان خواهند داد. در این میان می‌توان به مخازن شماره‌ی ۳ و ۴ در سیستم مورد مطالعه اشاره نمود. احتمال عدم تأمین آب توسط این مخازن بر اساس جدول ۵ به ترتیب ۷۸ و ۴۸ درصد در حالت وضعیت موجود سناریوی زلزله‌ی گسل ۱ است.
- مخازنی که در منتهی‌الیه زنجیره‌های تأمین آب در شبکه‌ی توزیع قرار می‌گیرند، مانند مخازن شماره‌ی ۷، ۸ و ۹ در شرایط بسیار وخیم‌تری نسبت به مخازن دیگر قرار دارند. احتمال عدم تأمین آب توسط این مخازن برای وضعیت موجود همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود در سناریوی زلزله‌ی گسل ۱ برابر ۹۹,۹۹ درصد است. نتایج تحلیل‌های انجام گرفته حاکی از این است که احتمال عدم تأمین آب مربوط به این‌گونه مخازن در تمامی سناریوها، حتی با ملاحظه‌ی راهکارهای پیشنهادی، بسیار بالا است. علت اصلی این امر، پایین بودن افزونگی این مخازن است. چرا که آب این‌گونه مخازن فقط از طریق مخزن ماقبل تأمین می‌گردد و با افزایش ناچیز احتمال خرابی مربوط به مخزن قبل، احتمال خرابی مربوط به این مخازن به شدت افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج، بهترین راه حل برای کاهش ریسک این مخازن، افزایش افزونگی آن‌ها است.
- یکی از عوامل اصلی بالا بودن احتمال عدم تأمین آب توسط بسیاری از مخازن، این است که این مخازن از طریق پمپاژ آب‌رسانی می‌گردند و ایجاد خسارت در ایستگاه پمپاژ مربوطه، تهدیدی جدی برای آن‌ها محسوب می‌گردد. در صورت تأمین آب به صورت ثقلی، احتمالات مربوط به این مخازن کاهش قابل توجهی خواهد داشت، البته این مورد باید در مراحل طراحی سیستم مدنظر قرار گیرد.
- احتمالات خرابی مربوط به مخازن شماره‌ی ۲، ۱۰ و ۱۱ که آب آن‌ها علاوه بر مخازن دیگر، از طریق چاه‌ها نیز تأمین می‌گردند، به مراتب پایین‌تر از مخازنی است که صرفاً از طریق آب مخازن دیگر تأمین می‌شوند.
- یکی از مهم‌ترین اجزای سیستم‌های تأمین آب، خطوط لوله‌ی مربوط به آن‌ها است، چرا که این خطوط به‌منزله‌ی شریان‌های سیستم هستند. خوشبختانه جنس خطوط لوله‌ی مورد استفاده در سیستم مورد مطالعه از نوع انعطاف‌پذیر (فولادی) است که آسیب‌پذیری آن در حدود ٪۳۰ خطوط لوله‌ی ترد (مانند لوله‌های چدنی) است. البته باید توجه داشت

که خطوط لوله‌ی جمع‌آوری و انتقال آب چاه‌های سیستم مورد مطالعه از نوع ترد (چدنی) است که سبب افزایش احتمال عدم تأمین آب توسط چاه‌ها می‌گردد. با جایگزینی این خطوط با نوع انعطاف‌پذیر می‌توان ریسک مربوط به عدم تأمین آب توسط چاه‌ها را کاهش داد.

- یکی از امتیازات مهم سیستم تأمین آب آشامیدنی در محدوده‌ی مورد مطالعه، استعداد پایین روان‌گرایی خاک منطقه است، چرا که یکی از عوامل مؤثر ایجاد خسارت در مؤلفه‌های سیستم تأمین آب، تغییر شکل دائمی زمین (PGD) در اثر وقوع زلزله است که بستگی زیادی به استعداد روان‌گرایی خاک منطقه دارد. در حالت کلی استعداد روان‌گرایی خاک هر منطقه تأثیر بسیاری در احتمال ایجاد خسارت در خطوط لوله‌ی مدفون، مخازن مدفون و تونل‌ها و کانال‌های انتقال آب آن منطقه دارد.
- یکی دیگر از امتیازات سیستم مورد مطالعه این است که بخش تأمین آب خام این سیستم از مقاومت مناسبی در برابر زلزله برخوردار است، چرا که انتقال آب در این بخش از طریق تونل انجام می‌گیرد و احتمال ایجاد خسارت در تونل در اثر وقوع زلزله بستگی به پارامتر تغییر شکل دائمی زمین دارد که در محدوده‌ی مورد مطالعه به علت کم بودن استعداد روان‌گرایی خاک، تغییر شکل دائمی زمین ناچیز است. از طرفی آب خام تصفیه‌خانه‌ی مورد مطالعه هم از طریق آب‌های سطحی و هم از طریق آب زیرزمینی (مجموعه‌ای از چاه‌ها) تأمین می‌گردد، که این امر سبب کاهش احتمال عدم تأمین آب خام تصفیه‌خانه‌ی مورد نظر می‌گردد.
- برخی از مخازن، مانند مخازن شماره‌ی ۱ و ۲، با وجود اینکه احتمال عدم تأمین آب پایینی داشتند، از ریسک بالایی برخوردار بودند. علت این امر جمعیت بالایی است که توسط این مخازن آب‌رسانی می‌شوند. در نتیجه یکی از راهکارهای مناسب برای کاهش ریسک مربوط به این‌گونه مخازن، کاهش جمعیت تحت پوشش با تأسیس مخازن جدید در منطقه است.

همان‌گونه که در تصویر ۷ مشاهده می‌شود، در میان سه سناریوی زلزله‌ی انتخابی، سناریوی زلزله‌ی گسل ۱ منجر به بیشترین ریسک عدم تأمین آب برای محدوده‌ی مورد مطالعه خواهد شد. علت اصلی این امر فاصله‌ی اندک میان محدوده‌ی مورد مطالعه و مرکز احتمالی وقوع زلزله‌ی مذکور است. مشاهده می‌گردد که پیامدهای حاصل از وقوع زلزله‌ی گسل ۲، با اینکه با بزرگای برابر زلزله‌ی گسل ۱ در نظر گرفته شده است، از ریسک کمتری برخوردار خواهد بود. نکته‌ی جالب توجه در اینجا، پیامدهای حاصل از وقوع سناریوی زلزله‌ی گسل ۳ است، که به مراتب سبک‌تر از دو سناریوی دیگر خواهد بود. این امر نشان‌دهنده‌ی این واقعیت است که کلان‌شهر مورد بررسی به اندازه‌ای وسعت دارد که ممکن است در اثر وقوع زلزله در آن، در بخشی از شهر شاهد خسارات قابل توجه و بسیار گسترده باشیم، درحالی‌که در بخشی دیگر خسارات وارده بالا یا حتی قابل ملاحظه نباشد. این امر به‌وضوح در مورد سناریوی زلزله‌ی گسل ۳ قابل مشاهده است، چرا که در اثر وقوع این زلزله مسلماً نواحی جنوبی کلان‌شهر دچار خسارات گسترده‌ای خواهند گردید.

نتایج حاصل دلالت بر این دارند که استفاده‌ی توأم از برق اضطراری و مهاربندی مؤلفه‌ها (راهکار سوم) بیشترین تأثیر را در میزان کاهش ریسک خواهد داشت. هرچند این نتیجه دور از انتظار نبود اما باید توجه داشت که میزان این کاهش ریسک بسیار قابل اهمیت است. راهکار سوم نسبت به راهکار اول در حدود ۵۴ درصد بیشتر باعث کاهش ریسک می‌گردد. راهکار منتخب بعدی، استفاده از سیستم تأمین برق اضطراری برای ایستگاه‌های پمپاژ و چاه‌های موجود در محدوده‌ی مورد مطالعه است (راهکار دوم). چرا که میزان کاهش ریسک مربوط به این راهکار بیشتر از راهکار اول است. با این وجود این اختلاف در سناریوی زلزله‌ی گسل ۱ حدود ۱٫۵ درصد است. البته انتخاب راهکار مناسب از میان راهکارهای پیشنهادی، نیازمند ملاحظه‌ی جنبه‌های مختلف مانند جنبه‌ی اقتصادی است که خارج از محدوده‌ی این تحقیق است. نتایج حاصل از بررسی این راهکارها می‌تواند منبع مناسبی برای اتخاذ تصمیمات آینده باشد.

## پی‌نوشت

1. Fault Tree Analysis
2. World Health Organization
3. Zongxue
4. Fukuaka
5. Ezell
6. Tuhovcak
7. Savic
8. Toprak
9. Lindhe
10. Göteborg
11. Lu
12. Bonneau
13. O'Rourke
14. Do Guen Yoo
15. Cut Sets
16. Minimal Cut Sets (MCS)
17. Monte Carlo Simulation
18. Back-up
19. redundancy

## منابع


1. WHO (2004). *Guidelines for drinking-water quality*. Vol. 1, Recommendations, 3 ed., World Health Organization, Geneva.
2. Zongxue, X., Jinno, K., Kawamura, A., Takesaki, S., & Ito, K. (1998). Performance risk analysis for Fukuoka water supply system. *Water Resources Management*, 12(1), 13-30.
3. Ezell C. and Farr V., (2000, September). Infrastructure Risk Analysis of Municipal Water Distribution System. *Journal of Infrastructure Systems*, 118.
4. Tuhovcak, L., Rucka, J., (2006, Springer). Risk Analysis of Water Distribution Systems, 169–182.

5. Savic, D., (2006). Robust Design and Management of Water Systems, 91–100.

6. Toprak, S., Koc, A. C., & Taskın, F. (2007, June). Evaluation of Water Distribution Pipeline Performance against Earthquakes. *In 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, (pp. 25-28).

7. Lindhe, A. (2008). Integrated and Probabilistic Risk Analysis of Drinking Water Systems, Thesis for the degree of licentiate of engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.

8. Lindhe, A., L. Rosen, T. Norberg, and O. Bergstedt (2009). Fault tree analysis for integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems, Water Research, 1641-1653.

9. Lindhe, A., Rosén, L., Norberg, T., Pettersson, T. J., Bergstedt, O., Åström, J., & Bondelind, M. (2008, June). Integrated risk analysis from source to tap: Case study Göteborg. In *The 6th Nordic Drinking Water Conference, Oslo, Norway, 9-11,* ۲۳۱-۲۴۱.

10. Lu, J., Wang, C., & Huang, T. (2009). Analysis on Seismic Risk of Urban Water Supply System. In *ICPTT 2009: Advances and Experiences with Pipelines and Trenchless Technology for Water, Sewer, Gas, and Oil Applications,* 1158-4466, ASCE.

11. Bonneau, A. L., & O'Rourke, T. D. (2009). *Water supply performance during earthquakes and extreme events* (No. 3). MCEER.

12. Yoo, D. G., Jung, D., Kang, D., & Kim, J. H. (2016). Seismic-Reliability-Based Optimal Layout of a Water Distribution Network. *Water*, *8*(2), 50.

۱۳. عرب‌پور راهویی، فرهاد (۱۳۸۸). *ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه‌ی آب کرمانشاه*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران.

۱۴. معقولی، آزاده (۱۳۸۸). *تحلیل خسارت لرزه‌ای شبکه‌ی آب شیراز*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران.

15. Omidvar, B., Malekshah, M. H., & Omidvar, H. (2014). Failure risk assessment of interdependent infrastructures against earthquake, a Petri net approach: case study—power and water distribution networks. *Natural hazards*, 71(3), 1971-1993.

۱۶. حجتی ملکشاه، محمد (۱۳۸۸). *تحلیل عملکرد لرزه‌ای شریان‌های حیاتی با در نظر گرفتن اندرکنش متقابل آن‌ها*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران.

۱۷. صدرالساداتی، سید علی (۱۳۸۹). *شبیه‌سازی عملکرد لرزه‌ای شبکه‌ی توزیع آب شهری با استفاده از مدل عصبی فازی، مطالعه‌ی موردی: شبکه‌ی توزیع آب اسلامشهر*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران.

۱۸. محمودیان، محمود (۱۳۸۹). *ارزیابی سناریوهای خرابی شبکه‌ی آب در اثر زلزله به‌منظور مدیریت ریسک*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران.

۱۹. نعیمی، مهرداد (۱۳۹۰). *کاربرد درخت خطا و الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر در بررسی اندرکنش لرزه‌ای شریان‌های حیاتی*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران.

۲۰. نعیمی، مهرداد؛ امیدوار، بابک (۱۳۹۲). نحوه‌ی محاسبه‌ی اثر برق در تجهیزات شبکه‌ی آب، مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی ۶ تهران. *دوفصلنامه‌ی مدیریت بحران*، دوره‌ی ۱، شماره‌ی ۲، ۱۷-۳۳.

۲۱. صادقی کمیجانی، نیلوفر (۱۳۹۱). *تحلیل ریسک لرزه‌ای شبکه‌ی آب رسانی با در نظر گرفتن اندرکنش افزونگی و خرابی‌های وابسته و ارائه‌ی راهکارهای مدیریتی*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران.

۲۲. حسنی، نعمت (۱۳۹۰). آسیب‌پذیری لرزه‌ای و راهکارهای مقابله با زلزله در سامانه‌های آب‌رسانی ایران. *فصلنامه علمی تخصصی دانش مدیریت بحران*.

۲۳. توکلی ثانی، محمد صادق (۱۳۹۰). *مدل‌سازی وابستگی شریان‌های حیاتی با به‌کارگیری مدل گراف و ماتریس مجاورت (مطالعه‌ی موردی شبکه‌های آب و برق)*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران.

۲۴. راهنما، رضا (۱۳۹۴). *توسعه‌ی توانمندی‌های نرم‌افزار ArcGIS جهت استفاده در برآورد آسیب‌پذیری لرزه‌ای لوله‌های مدفون (مطالعه‌ی موردی: لوله‌های شبکه‌ی آبرسانی منطقه‌ی یازده تهران)*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی دانشکده عباسپور.

25. TECHNEAU (2007). Generic Framework and Methods for Integrated Risk Management in Water Safety Plans. Chalmers University of Technology.

۲۶. محمدفام، ایرج (۱۳۸۸). تکنیک‌های ایمنی: *آنالیز درخت خطا (FTA)*. فن‌آوران، همدان.

27. Zare, M., Bard, P. Y., & Ghafory-Ashtiany, M. (1999). Site characterizations for the Iranian strong motion network. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *18*(2), 101-123.

28. Ghodrati Amiri G., A. Mahdavian and F. Manuchehri Dana (2007). Attenuation Relationships for Iran. *Journal of Earthquake Engineering*, 11 (4), 469-492.

29. HAZUS99-SR2 Technical Manual (1999). Developed by Federal Emergency Management Agency.

30. Participants, F. S. C. (2005). Open FTA Version 1.0 User Manual. Formal Software Construction Ltd., UK.