

تحلیل ریسک کمیت و کیفیت آب در سیستم‌های تأمین آب شهری با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

مسعود تابش^۳

بنفشه زهرایی^۲

عباس روزبهانی^۱

پذیرش ۹۱/۷/۹

آخرین اصلاحات ۹۱/۵/۲۴

دریافت ۹۰/۱۱/۱

چکیده

تأمین آب شرب کافی با کیفیت مناسب همواره از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی مدیران و تصمیم‌گیرندگان حوزه آب شهری بوده است. وقوع تهدیدات مختلف طبیعی، غیر طبیعی و عملکردی همواره بخش‌های مختلف سیستم‌های آب شهری را تهدید نموده و ممکن است در قابلیت اطمینان کمی و کیفی آبی که در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرد، اثرات جبران‌ناپذیری بگذارد. در این تحقیق مدل تحلیل ریسک سلسله‌مراتبی فازی برای در نظر گرفتن پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های حاکم بر این سیستم‌ها ارائه شد. گام‌های مختلف این مدل عبارت از شناسایی اجزای سیستم، شناسایی خطرات، دریافت اطلاعات مربوط به خطرات مختلف شامل احتمال وقوع، شدت وقوع و آسیب‌پذیری هر بخش از سیستم تحت تأثیر وقوع این خطرات به صورت فازی، و نهایتاً ترکیب ریسک بخش‌های مختلف و محاسبه ریسک نهایی سیستم و بخش‌های مختلف آن است. در کنار معرفی این مدل، روش ارزیابی ریسک سلسله‌مراتبی بر مبنای تحلیل مونت کارلو و استفاده از داده‌های صریح نیز ارائه شد و نتایج هر دو مدل در قالب یک مثال کاربردی از سیستم‌های آب شهری با یکدیگر مقایسه شدند. رویکرد ارائه شده در این تحقیق، کمک شایانی به ساختار تصمیم‌گیری مبتنی بر ریسک در سیستم‌های تأمین آب شهری با در نظر گرفتن خطرات محتمل خواهد نمود.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های آب شهری، تحلیل ریسک سلسله‌مراتبی، عملگرهای فازی، آسیب‌پذیری، تحلیل مونت کارلو

Water Quantity and Quality Risk Assessment of Urban Water Supply Systems with Consideration of Uncertainties

Abbas Roozbahani¹

Banafsheh Zahraie²

Massoud Tabesh³

(Received Jan. 21, 2012 Revised Aug. 14, 2012 Accepted Sep. 30, 2012)

Abstract

Sufficient drinking water supply with acceptable quality has been one of the important challenges that decision makers in urban water systems have always faced. Different natural, non-natural and operational hazards, may threaten different components of urban water systems and they may lead to irreversible consequences. In this research, Fuzzy Hierarchical Risk Assessment model has been presented which is capable of considering the complexities and uncertainties in urban water systems. Different stages of the proposed modeling process include systems components and threatening hazards identification, analyzing the information (i.e. probability of hazard, consequences of hazard and components vulnerabilities) in a fuzzy environment and finally aggregation of estimated risks in different parts of water supply systems and ranking them. Another risk analysis method has been introduced which is based on Monte Carlo simulation using crisp numbers and then results of these models have been compared together for an example of urban water supply system. Presented approaches in this paper, can be very useful for real world risk-based decision making in urban water supply management with respect to the probable hazards.

Keywords: Urban Water Systems, Hierarchical Risk Assessment, Fuzzy Operators, Vulnerability, Monte Carlo Analysis.

1. Ph.D of Civil Eng., Dept. of Engineering, Tehran University
2. Assoc. Prof., Center of Excellence for Engineering and Management of Civil Infrastructures, Dept. of Eng., Tehran University (Corresponding Author)(+98 21) 61112237 bzahraie@ut.ac.ir
3. Prof., Center of Excellence for Engineering and Management of Civil Infrastructures, Dept. of Engineering, Tehran University, Tehran

۱- دکترای مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۲- دانشیار و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) ۶۱۱۱۲۲۳۷ (+۹۸ ۲۱) bzahraie@ut.ac.ir
۳- استاد و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

گرفت، مدل تحلیل ریسک فازی سلسله مراتبی است. لازم به ذکر است که در مراجع علمی دو رویکرد در تحلیل ریسک فازی پیشنهاد شده است: رویکرد استفاده از عملگرهای فازی و استفاده از قوانین فازی [۶]. در این تحقیق از رویکرد اول استفاده شد.

در سالهای اخیر برخی تحقیقات مشابه برای ارزیابی و تحلیل ریسک بخش‌های مختلف سامانه‌های تأمین و توزیع آب شهری به صورت مجزا و یا یکپارچه صورت گرفته است که به برخی از آنها اشاره می‌شود. صدیق و همکاران در سال ۲۰۰۴ روشی را برای تحلیل ریسک فازی کیفیت آب در شبکه‌های توزیع آب ارائه نموده‌اند. آنها با در نظر گرفتن احتمال و شدت خطرات مختلف تهدید کننده کیفیت آب در شبکه‌های آبرسانی به صورت فازی، تبدیل حاصلضرب آنها به شکل اعداد صریح و سپس مقایسه ریسک محاسبه شده با یک سری ریسک‌های بیانی فازی از پیش تعیین شده (کم، متوسط، زیاد)، ریسک کلی این شبکه‌ها را در قالب یک مطالعه موردی محاسبه کرده‌اند [۷]. وایراوامورتی و همکاران در سال ۲۰۰۷ یک ابزار تحلیل ریسک در سیستم‌های آبرسانی بر مبنای استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار GIS ارائه داده‌اند. در حقیقت مدل GIS و مدل تصمیم‌گیری بر مبنای ریسک در محیط ++C با هم مرتبط شده‌اند [۸]. لی در سال ۲۰۰۷، روش تحلیل سلسله مراتبی ریسک سیستم‌های آب شهری را به صورت یکپارچه با استفاده از دو رویکرد فازی و درخت شکست به کار گرفته و از مدل‌سازی شیء گرا برای شبیه‌سازی سیستم استفاده نموده است. لیکن علاوه بر فرضیات ساده کننده متعددی که در نظر گرفت، آسیب‌پذیری سیستم و اجزای آن را نیز در روند تحلیل ریسک نادیده گرفته است [۵]. لی در سال ۲۰۰۹، مشابه تحقیق قبلی، کاربرد رویکرد تحلیل ریسک فازی سلسله مراتبی را در ارزیابی تهدیدات کیفیت آب یکی از سیستم‌های تأمین و توزیع آب شهری در کشور آمریکا مورد بررسی قرار داده و به تحلیل حساسیت نتایج نسبت به تغییر احتمال و اثر خطرات پرداخته است [۹]. تابش و همکاران در سال ۱۳۸۸، مدلی برای مدیریت ریسک حوادث شبکه‌های آبرسانی شهری با استفاده از قابلیت‌های سیستم‌های اطلاعات مکانی و در جهت افزایش کارایی این سیستم‌ها ارائه داده‌اند [۱۰]. فارس و زاید در سال ۲۰۱۰، مدلی را بر مبنای دو روش تحلیل سلسله مراتبی و استنتاج فازی ارائه کرده‌اند. در این مدل قوانین فازی با استفاده از توابع عضویت فازی پارامترهای تأثیر گذار بر شکست لوله‌ها ساخته می‌شوند و نهایتاً بر اساس این قوانین، وضعیت لوله‌ها از نظر ریسک شکست تعیین می‌شود [۶]. چورزوسکا در سال ۲۰۱۱ روشی را برای تحلیل ریسک سامانه‌های آبرسانی بر مبنای ساخت قوانین فازی بر مبنای ارتباط احتمال، شدت و آسیب‌پذیری ارائه داده‌اند و کاربرد آنرا در شبکه‌ای در

سامانه‌های تأمین و توزیع آب شهری شامل منابع تأمین، خطوط انتقال اصلی، تصفیه‌خانه‌ها، مخازن ذخیره و سیستم توزیع آب به طیف وسیعی از مصرف کنندگان خدمات رسانی می‌کنند و از این رو جزو زیرساخت‌های اساسی در هر شهری به شمار می‌روند. بروز حوادث طبیعی و غیر طبیعی می‌تواند موجب شکل‌گیری بحران‌های مختلفی همچون تخریب اجرای این سامانه‌ها، کمبود آب و انتشار آلاینده‌های شیمیایی و بیولوژیکی شود که ممکن است پیامدهایی از قبیل بیماری و مرگ انسان‌ها بر اثر مصرف آب آلوده یا قطع دسترسی به آب کافی را به دنبال داشته باشد. لذا به کارگیری و ارائه یک مدل تحلیل ریسک جامع که قابلیت در نظر گرفتن پیچیدگی حاکم بر این سیستم‌ها و اجزای آنها را داشته باشد، امری ضروری است.

تعاریف مختلفی از تحلیل ریسک در حوزه‌های مختلف علمی و مهندسی به عنوان بخش اصلی مدیریت ریسک ارائه شده است [۱]. از جمله مهم‌ترین این تعاریف ریسک را به عنوان ترکیبی از احتمال خطر، شدت اثرات ناشی از خطر و آسیب‌پذیری اجزاء می‌داند و مبانی بسیاری از استانداردهای مدیریت ریسک مانند رمکپ^۱ و یا فیما^۲ است [۲، ۳ و ۴]. به طور خلاصه احتمال خطر، تواتر یک رویداد تهدید کننده اجزای سیستم آب شهری است. شدت اثرات نیز پیامد یا نتیجه اثرات مستقیم یا غیر مستقیم، فوری، کوتاه مدت یا دراز مدت ناشی از خطر از قبیل جمعیت تحت تأثیر، مرگ و میر و میزان دارایی‌های در معرض تهدید در صورت وقوع حتمی و آسیب‌پذیری کامل سیستم است. همچنین آسیب‌پذیری اجزای سامانه‌های تأمین و توزیع شهری در برگیرنده قابلیت‌های موجود، ترکیبات سازه‌ای و استراتژی‌هایی است که تأثیر زیادی در کاهش اثرات ناشی از تهدیدات و خطرات دارند و جزو خواص ذاتی سیستم محسوب می‌شود [۵]. علاوه بر پیچیدگی‌های حاکم بر سیستم‌های آب شهری، از دغدغه‌های دیگر، بحث عدم قطعیت‌های حاکم بر تعیین پارامترهای ریسک است. به عنوان مثال تخمین احتمال وقوع یک تهدید انسانی، کار ساده‌ای نیست و عمدتاً بر پایه قضاوت‌ها و تجربیات کارشناسان، داده‌های ثبت شده از وقایع قبلی و یا ترکیبی از هر دوی اینها صورت می‌گیرد. لذا استفاده از روشهای تحلیل عدم قطعیت، برای اطمینان از پاسخ‌های حاصل از ارزیابی ریسک و به کارگیری آن در تدوین سناریوهای مدیریت کاهش ریسک، امری ضروری است. یکی از مهم‌ترین روشهایی که در این تحقیق برای در نظر گرفتن پیچیدگی‌ها و همچنین عدم قطعیت‌های حاکم بر سیستم آب شهری و تهدیدات محتمل مورد استفاده قرار

¹ RAMCAP
² FEMA

توجه به این توابع وجود دارد. ساختار کلی رویکرد پیشنهادی در شکل ۱ ارائه شده است.

۲-۱- سیستم‌های تأمین و توزیع آب شهری

به طور کلی سیستم‌های آب شرب از نقطه تحویل آب تا محل دریافت آب، توسط مصرف‌کنندگان شامل اجزای مختلف و خطرپذیری است. ساختار شماتیک و کلی سلسله مراتبی پیچیده سیستم‌های تأمین و توزیع در شکل ۲ نشان داده شده است. اکثر این بخش‌های کلیدی مثل مخازن، تصفیه‌خانه‌ها و غیره قابل دسترس هستند به این دلیل آسیب‌پذیری بالا و ریسک شکست بالایی در برابر خطرات طبیعی و غیر طبیعی دارند. برخی اجزاء مثل لوله‌های آبرسانی نیز با این که مدفون هستند، اما دچار حوادث عملکردی نامرئی مانند شکست، نشست و هدر رفت آب می‌شوند. همچنین بحث یک پارچه بودن این سیستم‌ها، و همکاری مشترک اجزای آنها در تأمین آب نیز بحث قابل توجهی است. این مسائل لزوم توجه بهتر و اصولی‌تر به مسئله تحلیل و مدیریت ریسک را دو چندان می‌نماید. در بخش‌های بعدی چهارچوب پیشنهادی در این تحقیق ارائه می‌شود و اصول آن معرفی می‌شوند.

۲-۲- شناسایی خطرات

در دسته‌بندی کلی، خطرات در قالب سه دسته طبیعی، غیر طبیعی و عملکردی تقسیم بندی می‌شوند.

به طور کلی، هر یک از این خطرات می‌تواند اجزای شبکه را با مشکلات جدی، از نظر کاهش آب مورد نیاز مصرف‌کنندگان و همچنین کاهش استاندارد کیفی آب در افق کوتاه یا بلند مدت روبرو کند. ابراز نظر در خصوص هر یک از این حوادث می‌تواند از سه طریق مصاحبه و دریافت نظرات خبرگان، مدل‌های ریاضی، ادبیات و مراجع فنی و یا حتی ترکیبی از این سه روش صورت گیرد که بدیهی است به دلیل کمبود اطلاعات، از بین رفتن اطلاعات، کمبود دانش افراد و متخصصان و غیره با عدم قطعیت‌های جدی مواجه است.

۲-۳- مدل تحلیل ریسک سلسله مراتبی فازی

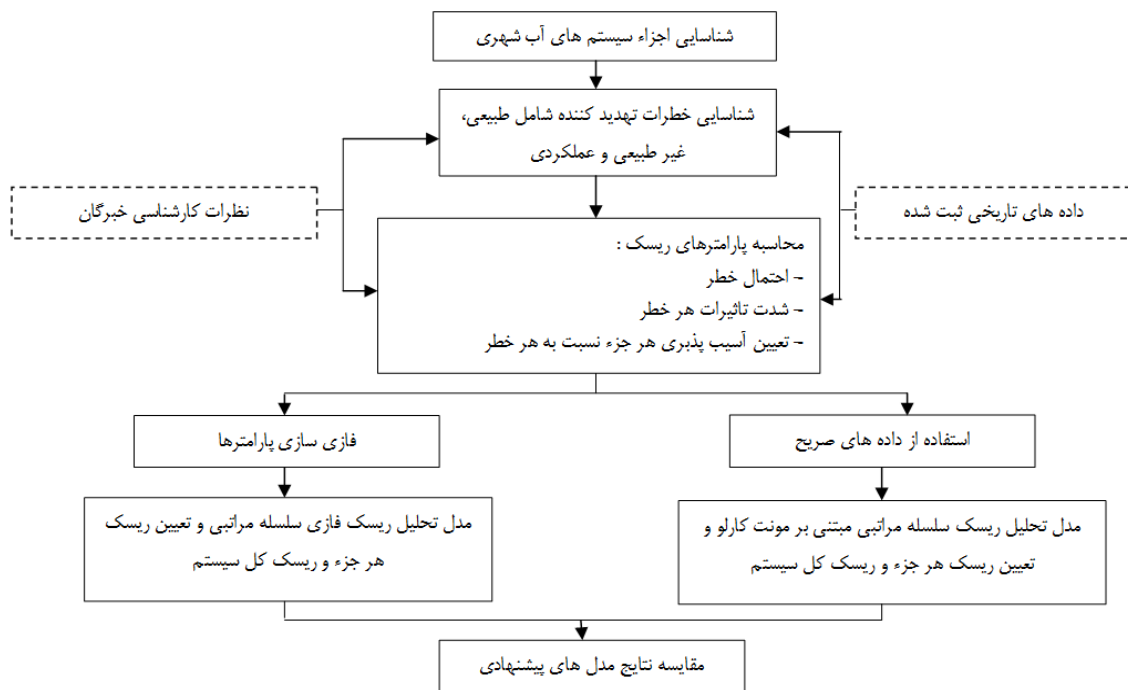
همانطور که در مقدمه نیز اشاره شد، در این تحقیق رویکرد محاسبه ریسک خطرات تهدید کننده کمیّت و کیفیت آب در سیستم‌های آب شهری، به صورت تابعی از احتمال وقوع خطر، اثرات ناشی از وقوع خطر (شدت وقوع) و آسیب‌پذیری سیستم و اجزای تشکیل دهنده آن است. برای روشن شدن مطلب به طور خلاصه این سه پارامتر در زیر توضیح داده می‌شوند:

۱- احتمال وقوع خطر (P): احتمال وقوع خطر در واقع پارامتری

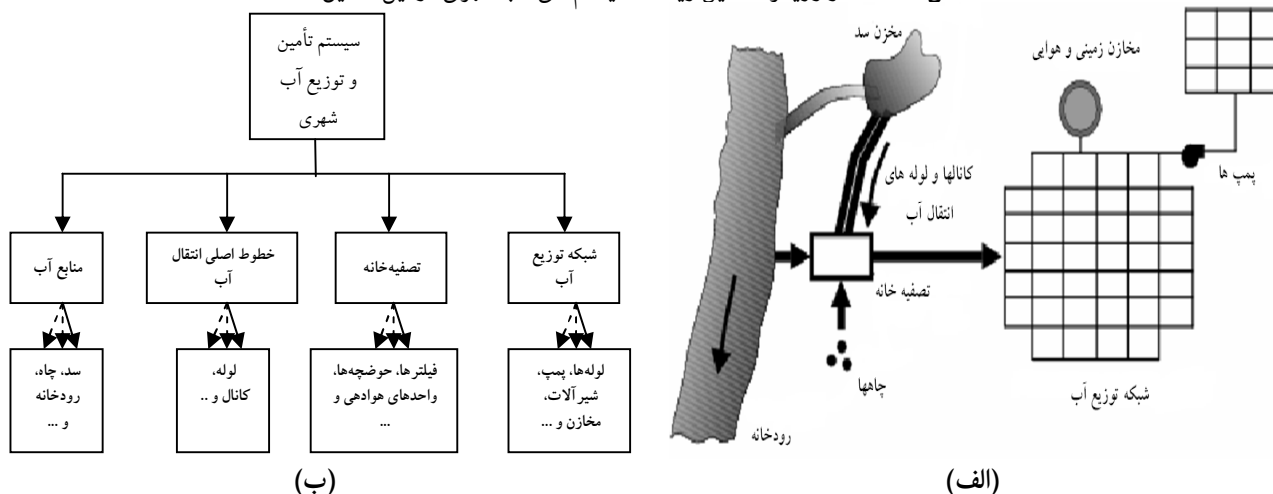
در مطالعات قبلی، تحلیل ریسک کمیّت و کیفیت آب در برابر خطرات محتمل به صورت همزمان صورت نگرفته و علاوه بر این، تحلیل‌های انجام شده و مدل‌های به کار گرفته شده، دیدگاه مجزا نگری به اجزای تأمین، انتقال، تصفیه و توزیع داشته‌اند؛ در حالی که سیستم آب شهری باید به صورت یک پارچه مورد بررسی قرار گیرد. در مقاله حاضر، رویکرد تحلیل ریسک یک پارچه سیستم‌های آب شهری از نقطه تأمین، تا تحویل آب به مصرف‌کننده، و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در قالب مدل تحلیل ریسک سلسله مراتبی فازی، و مدل صریح سلسله مراتبی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو ارائه شد و نتایج هر دو مدل با یکدیگر مقایسه شدند. مدل اول با رویکرد فازی و مدل دوم با رویکرد انتخاب تصادفی و احتمالاتی به در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در طول انجام مراحل تحلیل ریسک می‌پردازند. به طور کلی، هر دو مدل ارائه شده، علاوه بر رفع ضعف‌های نامبرده در مطالعات قبلی، دارای نوآوری‌هایی شامل در نظر گرفتن معیار آسیب‌پذیری در آنالیز ریسک سیستم‌های آب شهری، نحوه تجمیع ریسک خطرات، تجمیع نهایی ریسک اجزای مختلف این سیستم‌ها در قالب یک مدل بهینه‌سازی می‌باشند. رویکرد پیشنهادی با استفاده از مثال نمونه‌ای که توسط لی در سال ۲۰۰۷ ارائه شده، مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روشها

در این بخش از تحقیق، به ارائه رویکرد پیشنهادی تحلیل ریسک یکپارچه سیستم‌های تأمین و توزیع آب شهری پرداخته شد. در همین راستا ابتدا ساختار سلسله مراتبی این سیستم‌ها معرفی و سپس خطرات تهدید کننده این سیستم‌ها به طور خلاصه دسته‌بندی شدند. در ادامه، دو مدل تحلیل ریسک سلسله مراتبی فازی و تحلیل ریسک سلسله مراتبی، مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو، با در نظر گرفتن آسیب‌پذیری زیر سیستم‌های تأمین، انتقال، تصفیه و توزیع تشریح خواهند شد. روش شبیه‌سازی مونت کارلو به این علت انتخاب شد که، دارای قابلیت تحلیل ریسک با لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های پارامترها در قالب توابع توزیع احتمالاتی و با استفاده از رویکرد انتخاب تصادفی است. مدل اول در محیط ویژوال بیسیک و به شکل شیء گرا و مدل دوم با استفاده از نرم‌افزار Risk@، و ترکیب نتایج آن با ساختار سلسله مراتبی در محیط ویژوال بیسیک برنامه نویسی شد. نرم‌افزار Risk@، یکی از معتبرترین و مرسوم‌ترین نرم‌افزارهای کاربر دوست، در زمینه تحلیل و شبیه‌سازی سیستم‌ها با روش مونت کارلو است که با استفاده از آن، امکان استفاده از اکثر توابع توزیع احتمالاتی برای برازش به داده‌ها و همینطور روشهای مختلف انتخاب تصادفی با



شکل ۱- ساختار رویکرد تحلیل ریسک سیستم های آب شهری در این تحقیق



شکل ۲- الف- نقاط کلیدی آسیب پذیر در یک سیستم آب شهری نمونه و ب- ساختار سلسله مراتبی آن [۱۲]

۲- شدت وقوع خطر (C): شدت وقوع یک خطر، به طور عمده پارامتری است که هم به ماهیت خطر و هم به ماهیت سیستم مورد بررسی بستگی دارد. منظور از شدت خطر در این تحقیق، میزان خسارت جانی و مالی است که در صورت وقوع کامل یک خطر و آسیب پذیری کامل جزء مورد بررسی از سیستم تأمین آب شهری رخ می دهد که از آن با عنوان "ارزش دارایی ها" نیز یاد می شود [۴]. این پارامتر به معیارهایی همچون ارزش عملکردی، ارزش اقتصادی، امکان جایگزینی جزء و غیره بستگی دارد و معمولاً می تواند توسط یک مدل تحلیل چند شاخصه^۱ یا مدل های تحلیل

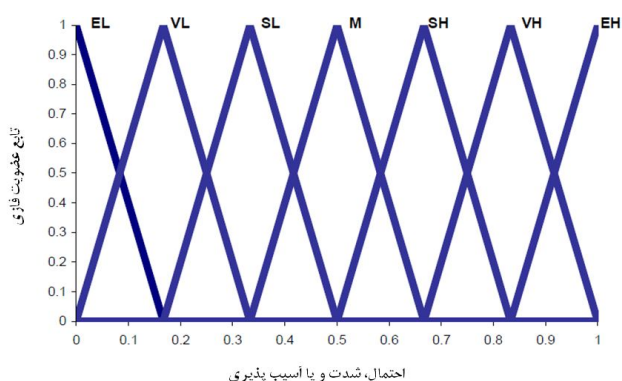
است که به تواتر وقوع یک پدیده در طول زمان بستگی دارد. پیش بینی احتمال وقایع طبیعی، نیازمند استفاده از مدل های پیش بینی قابل اطمینان برای هر خطر و بررسی داده های ثبت شده قبلی است. اما تعیین احتمال وقوع پدیده های غیر طبیعی و انسان ساز به راحتی ممکن نیست و اغلب با استفاده از تلفیق نظرات کارشناسی و تدوین سناریوهای محتمل با مدل های تحلیل عدم قطعیت صورت می گیرد. عموماً در بحث مدیریت ریسک سیستم های منابع آبی، این پارامتر به راحتی قابل کنترل نیست و عمده تلاشها در خصوص کاهش شدت وقوع و آسیب پذیری سیستم است.

¹ Multi Attribute Decision Making

برای بیان میزان پارامترهای مختلف تشکیل دهنده ریسک یعنی احتمال، شدت و آسیب پذیری استفاده می شود.

جدول ۱- توابع فازی احتمال، شدت و آسیب پذیری

شماره تابع	ارزش زبانی	شاخص فازی مثلثی
۱	به شدت کم ^۲	(۰.۰۰/۱۵)
۲	خیلی کم ^۳	(۰.۰/۱۵۰/۳۵)
۳	تا حدی کم ^۴	(۰/۱۵.۰/۳۵.۰/۵)
۴	متوسط ^۵	(۰/۳۵.۰/۵۰/۶۵)
۵	تا حدی زیاد ^۶	(۰/۵۰/۶۵.۰/۸۵)
۶	خیلی زیاد ^۷	(۰/۶۵.۰/۸۵.۱/۱۰۰)
۷	به شدت زیاد ^۸	(۰/۸۵.۱/۱۰۰/۱۰۰)



شکل ۳- توابع فازی بیان کننده پارامترهای تشکیل دهنده ریسک

در این تحقیق پس از دریافت آمار و اطلاعات مربوطه، تدوین پرسشنامه ها و اخذ نظرات متخصصان بخش های مختلف بهره برداری از سیستم های آب شهری و تعیین پارامترهای مربوطه، روابط ۲ تا ۶ برای محاسبه ریسک بخش های مختلف سیستم و همچنین ریسک کل سیستم تحت اثر وقوع خطرات، به صورت مجزا و یکپارچه و تحت قالب سلسله مراتبی که در بخش قبل اشاره شد، تدوین و ارائه گردید:

$$R_{sj} = H_{sj}^L \times H_{sj}^C; \quad j=1, \dots, H_s \quad (2)$$

$$F_s = f(R_{s1}, V_1, \dots, R_{sH_s}, V_{H_s}); \quad s = 1, \dots, S \quad (3)$$

$$R_n = f(F_1, \dots, F_s, \dots, F_S) \quad (4)$$

$$R_m = f(R_1, V_1, \dots, R_n, V_n) \quad (5)$$

² Extremely Low (EL)

³ Very Low (VL)

⁴ Slightly Low (SL)

⁵ Medium (M)

⁶ Slightly High (SH)

⁷ Very High (VH)

⁸ Extremely High (EH)

ارزش طول دوره عمر^۱ در کنار دریافت نظرات کارشناسی محاسبه شود. عمدتاً مدیریت ریسک از طریق کاهش این پارامتر نیز به راحتی امکان پذیر نیست.

۳- آسیب پذیری سیستم (V): این پارامتر، جزو خواص ذاتی سیستم آبی مورد بررسی است و نسبت به ماهیت هر خطر متفاوت است. آسیب پذیری در واقع توان مقابله فعال یا غیر فعال سیستم، در برابر خطر تهدید کننده است. در واقع بسته به وجود اقدامات سازه ای و یا غیر سازه ای صورت گرفته یا پیش بینی شده در سامانه های تأمین، تصفیه و توزیع، این پارامتر می تواند متفاوت باشد. نحوه محاسبه آن نیز به وسیله تحلیل چند معیاره شاخص های مؤثر بر آسیب پذیری، استفاده از مدل های تحلیلی تعیین آسیب پذیری، نظرات کارشناسی و غیره است. عمده تلاش های ممکن برای مدیریت ریسک کمی و کیفی آب در سامانه های آبرسانی، بر کاهش آسیب پذیری و افزایش قابلیت اطمینان اجزا متمرکز است. در این بخش استفاده از روش های بهینه سازی و تدوین سناریوهای کاهش آسیب پذیری، می تواند در کنترل هزینه ها و شدت اثرات جانی و مالی پس از بحران تأثیر بسزایی داشته باشد.

در این تحقیق، برای در نظر گرفتن عدم قطعیت حاکم بر ماهیت ذاتی تحلیل ریسک سیستم های تأمین و توزیع آب شهری، از اعداد فازی مثلثی برای بیان سه پارامتر یاد شده استفاده می شود. در حقیقت محاسبه ریسک نهایی به صورت زیر است [۲]

$$\tilde{R} = \tilde{P} \otimes \tilde{C} \otimes \tilde{V} \quad (1)$$

که در این رابطه

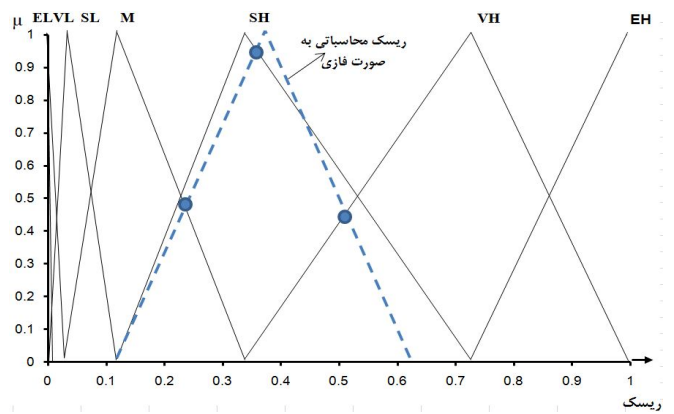
(\tilde{P}) بیانگر اعداد فازی تعیین شده احتمال، (\tilde{C}) شدت و (\tilde{V}) آسیب پذیری توسط مدل های مربوطه و یا نظرات کارشناسی است. داده های موجود به سه دسته تقسیم می شوند. دسته اول داده هایی که ماهیت آنها کاملاً مشخص و حساب شده و صریح است. در این صورت برای استفاده در روش پیشنهادی از یک عدد فازی مثلثی با حدود بالا و پایین یکسان استفاده می شود. دسته دوم داده هایی هستند که محاسبه می شوند، لیکن عدم قطعیت در خصوص آنها وجود دارد و به شکل عدد فازی مثلثی مرسوم بیان می شوند و در واقع عدد وسط با بیشترین مقدار تابع عضویت، محتمل ترین عدد در صورت وقوع حادثه مورد بررسی است. دسته سوم نیز اعدادی هستند که قضاوت در خصوص آنها به راحتی امکان پذیر نیست، و آمار و ارقام قابل استنادی نیز برای بررسی آنها وجود ندارد و تنها مرجع، قضاوت و تجربه متخصصان شرکت های آب منطقه ای و آب و فاضلاب است. در مورد دسته سوم نیز از جدول ۱ و شکل ۳،

¹ Life Cycle Analysis

$$WSR = f(R_1 \cdot V_1, \dots, R_m \cdot V_m) \quad (6)$$

که در این روابط

s اندیس دسته خطر، زانندیس خطر، n اندیس اجزای سیستم آب شهری، m اندیس زیر سیستم‌ها، H_s تعداد خطرات دسته s، H_{sj}^c شدت خطر زاز دسته s، H_{sj}^L احتمال خطر زاز دسته s، R_{sj} ریسک خطر زاز دسته s، $f(\cdot)$ تابع ترکیب مورد نظر، V_{H_s} وزن خطر مورد بررسی H_{sj} ، F_s ریسک دسته خطر s، R_n ریسک هر جزء از سیستم آب شهری، V_n آسیب‌پذیری زیر سیستم مورد بررسی نسبت به خرابی جزء n، R_m ریسک هر زیر سیستم از سیستم آب شهری، V_m آسیب‌پذیری سیستم آب شهری مورد بررسی نسبت به خرابی زیر سیستم m و WSR ریسک کلی سیستم آب شهری است. مراحل انجام کار به این ترتیب است که ابتدا حاصل ضرب فازی دو پارامتر شدت و احتمال برای هر خطر و با توجه به هر دسته خطر s (خطرات طبیعی، انسان ساز و عملکردی)، بر اساس رابطه ۲، تعیین، و ریسک هر خطر j محاسبه می‌شود. این تابع ریسک، بر روی توابع فرضی ۷ گانه اولیه ریسک این تحقیق که نمونه آن در شکل ۴ نشان داده شده است، قرار داده شده و محل برخورد آن با هر یک از توابع پیش فرض تعیین می‌شود و به شکل کلی $(\frac{a}{EL}, \frac{b}{VL}, \frac{c}{SL}, \frac{d}{M}, \frac{e}{SH}, \frac{f}{VH}, \frac{g}{EH})$ بیان می‌گردد تا بتوان وضعیت کیفی ریسک‌ها را با واژه‌های کیفی مناسب تعیین نمود.



شکل ۴- مقایسه ریسک محاسبه شده و ریسک‌های فازی پیش فرض

رابطه ۵، و با در نظر گرفتن آسیب‌پذیری زیر سیستم‌ها نسبت به خرابی هر جزء، محاسبه و در قالب ریسک زیر سیستم مورد بررسی، لحاظ می‌شود. در پایان با استفاده از ترکیب وزنی ریسک زیر سیستم‌ها و همچنین میزان آسیب‌پذیری کل مجموعه سیستم آب شهری، نسبت به هر زیر سیستم، میزان ریسک کلی سیستم آب شهری، با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود. توابع مختلفی برای ترکیب ریسک خطرات، ریسک زیر سیستم‌ها و ریسک کل سیستم وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش دمپستر- شافر توسط لی در سال ۲۰۰۷، روش تصمیم‌گیری چند معیاره OWA و همچنین روش ترکیب وزنی ساده، اشاره نمود [۵ و ۱۳]. در این تحقیق، از روش آخر به دلیل سادگی و کاربردی بودن آن برای هدف مورد نظر استفاده شد. تعیین وزن و اهمیت نسبی خطرات، دسته خطر‌ها، اجزاء و زیر سیستم‌ها نیز از اهمیت خاصی برخوردار است. دسته اول، وزن خطرات مختلفی است که قرار است در قالب رابطه ۲ با یکدیگر ترکیب شوند. این اهمیت باید توسط متخصصان و بر اساس اهمیتی که به احتمال وقوع، شدت خسارت و یا آسیب‌پذیری می‌دهند، تعیین شود. به‌عنوان مثال، می‌توان اهمیت خطری را بیشتر فرض نمود که در صورت وقوع آن به راحتی نتوان بخش آسیب دیده سیستم تأمین آب را به سرعت جایگزین نمود. در بقیه توابع در روابط ۳ تا ۶ نیز این مسئله به همین شکل است. به‌عنوان مثال اگر خارج شدن تصفیه‌خانه از مدار، موجب قطع آب و خسارت شدید در یک بازه زمانی طولانی مدت در سیستم کلی تأمین و توزیع شود، و جایگزینی نیز برای رفع کوتاه مدت این تنش کم آبی وجود نداشته باشد، آنگاه اهمیت تصفیه‌خانه و به تبع آن وزن نسبی آن نیز در رابطه ۶ بیشتر خواهد شد. به‌طور کلی در سطوح بالاتر، وزن زیر سیستم‌ها در تحلیل ریسک، نسبت مستقیمی با آسیب‌پذیری سیستم نسبت به آنها دارد. در حقیقت، آسیب‌پذیری با ماهیت خدمات‌رسانی اجزای و وزن، با امکان جایگزینی آنها در کوتاه مدت و رفع خلأ آنها سر و کار دارد. روشهای مختلفی برای محاسبه وزن‌ها مانند روش دریافت مستقیم از کارشناسان و روش مقایسه زوجی (AHP) وجود دارد که به فراخور مسئله می‌توان از آنها استفاده نمود.

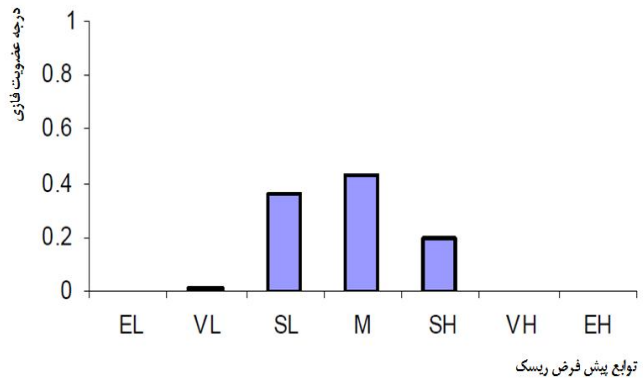
همانطور که در بالا اشاره شد، پس از ترکیب توابع ریسک در سطوح مختلف، ریسک به فرم کلی

$$\left(\frac{a}{EL}, \frac{b}{VL}, \frac{c}{SL}, \frac{d}{M}, \frac{e}{SH}, \frac{f}{VH}, \frac{g}{EH} \right)$$

تبدیل خواهد شد که نمونه آن در شکل ۵ نشان داده شده است. اگر تصمیم‌گیرنده حوزه آب شهری، بخواهد به بیان کیفی ریسک بسنده کند، روش تعیین آن، در واقع مشخص نمودن تابع ریسکی است که بزرگ‌ترین درجه عضویت را داشته باشد. به‌عنوان مثال در شکل ۵ ریسک سیستم یا

سپس با استفاده از تابع ترکیبی مورد نظر $(f(\cdot))$ ، و با در نظر گرفتن وزن و اهمیت هر خطر، توسط رابطه ۳ با یکدیگر ترکیب شده و به‌عنوان ریسک دسته خطر لحاظ می‌شوند. سپس این ریسک‌ها با استفاده از تابع دیگر و در قالب رابطه ۴ تلفیق و ریسک هر جزء مورد بررسی، مثل فیلترها یا مخازن ته‌نشینی در زیرسیستم تصفیه‌خانه، و یا پمپ‌ها در زیر سیستم شبکه توزیع آب، محاسبه می‌شود. در مرحله بعد، ریسک تمامی اجزاء با استفاده از

زیر سیستم تأمین یا توزیع آب مورد بررسی، در برابر خطر متوسط (M) است، زیرا بیشترین درجه عضویت را دارد.



شکل ۵- نمونه‌ای از نتیجه خروجی تحلیل ریسک

شواهد و داده‌ها نشان می‌دهند که به احتمال زیاد، ریسک در برابر خطر مفروض در حد متوسط است و همچنین تأکید می‌کند که هیچ نشانی از خیلی کم بودن و خیلی زیاد بودن ریسک نیز وجود ندارد. اما چنانچه تحلیل‌گر به دنبال کمی نمودن نتایج تحلیل ریسک برای مقاصد دیگر مانند کنترل و مدیریت ریسک باشد، دو روش وجود دارد که عبارت‌اند از:

الف- روش مرکز سطح: در این روش که مرسوم‌ترین روش مورد استفاده در تحقیقات قبلی است، محاسبه ریسک کلی، از مجموع حاصلضرب‌های مقدار درجه عضویت فازی توابع هفت‌گانه پیش فرض ریسک (شکل ۵) در مرکز سطح آن (شکل ۴) محاسبه می‌شود (شکل‌های ۴ و ۵) [۱۴].

$$\text{Risk} = \sum_{i=1}^7 L_{G_i} \mu_i \quad (7)$$

که در این رابطه

L_{G_i} مرکز سطح توابع عضویت فازی هفت‌گانه ریسک i و μ_i نیز میزان درجه عضویت محاسبه شده تابع مورد نظر از مدل تحلیل ریسک است (شکل ۵).

ب- روش بهینه‌سازی: در این روش که در این تحقیق ارائه شده و مورد استفاده قرار گرفت، میزان ریسک کلی از رابطه بهینه‌سازی زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^7 \left[\mu_i \frac{L_{G_i}}{\sum_{i=1}^7 L_{G_i}} (X - L_{G_i})^2 \right] \quad (8)$$

s.t. $0 \leq X \leq 1$

که در این رابطه

X همان ریسک کلی است که متغیر تصمیم مسئله بهینه‌سازی است، و عددی است بین صفر و یک یا بین صفر تا ۱۰۰ درصد، که

می‌تواند از طریق بسته‌های نرم‌افزاری ساده بهینه‌سازی مانند لینگو حل شود. لازم به ذکر است که در واقع در این تابع هدف، برای به دست آوردن ریسک کلی، سعی شده است تا مجموع وزن دار فواصل ریسک کلی تا هر یک از مراکز هفت‌گانه پیش فرض، حداقل شود با این شرط که به فاصله ریسک کلی از هر یک از توابع هفت‌گانه پیش فرض، وزنی بر اساس مرکز سطح و مقدار درجه عضویت تابع فازی خروجی از مدل اختصاص داده شده است.

عبارت $\mu_i \frac{L_{G_i}}{\sum_{i=1}^7 L_{G_i}}$ نشان دهنده این است که هر چه قدر مقدار

ریسک پیش فرض (EL تا EH) و همچنین میزان درجه عضویت محاسبه شده تابع مورد نظر توسط مدل تحلیل ریسک بزرگ‌تر باشد، اهمیت بیشتری در تابع هدف پیدا می‌کند.

۲-۴- مدل تحلیل ریسک سلسله مراتبی مبتنی بر شبیه‌سازی

مونت کارلو

از آنجا که در مدیریت ریسک سیستم‌های آب شهری و بخش‌های مختلف آن چندین منبع عدم قطعیت اساسی وجود دارد و روش شبیه‌سازی مونت کارلو نیز از جمله روشهای احتمالاتی مناسب برای تحلیل عدم قطعیت و ریسک سیستم‌های پیچیده و مبهم است [۱۵]. لذا در بخش دوم این تحقیق، این روش برای تحلیل ریسک سیستم‌های آب شهری در تعامل با ساختار سلسله مراتبی آن، ارائه شد و نتایج آن با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی که در بخش قبل ارائه شد، مقایسه گردید. ورودی‌های مدل مونت کارلو، عموماً اعداد صریحی هستند که به صورت تصادفی از توابع احتمالاتی برازش داده شده به پارامترهای دارای عدم قطعیت ورودی انتخاب می‌شوند، لذا منطقی است که در این تحقیق نیز، مراکز اعداد فازی مثلی مربوط به احتمال، شدت و آسیب‌پذیری به عنوان مبنا قرار گرفته و سپس با برازش تابع احتمالاتی مانند توزیع نرمال به آنها، عمل شبیه‌سازی چندین بار صورت گیرد. لیکن، عملاً تعیین یک توزیع مناسب آماری، برای این کار میسر نیست و حتی برازش تابع نرمال و انتخاب میزان انحراف از معیار نیز، باعث افزایش عدم قطعیت‌ها خواهد شد. لذا در این تحقیق، برای حل این مسئله، اعداد فازی مورد استفاده در بخش قبل به شکل بازه‌های یکنواخت (تابع یکنواخت) فرض شد که حد بالا و پایین این بازه‌ها همان مرز بالا و پایین اعداد فازی مثلی، با درجه عضویت صفر هستند. انتخاب اعداد تصادفی از این بازه‌ها، با یک میزان احتمال و به عبارت دیگر با فرض برابر بودن درجه عضویت کلیه اعداد درون بازه، صورت می‌گیرد. ورود مکرر مقدار صریح این پارامترها (احتمال، شدت و آسیب‌پذیری خطرات) به مدل تحلیل ریسک سلسله مراتبی و محاسبه روابط ارائه شده در بخش قبلی (روابط ۲ تا ۷)، منجر به

رودخانه، یک سد و مجموعه‌ای از چاهها برای برداشت آب زیر زمینی است که آب خام را به یک تصفیه‌خانه در پایین دست توسط خطوط انتقال اصلی (۲ خط لوله و یک کانال) منتقل می‌کند. سپس آب تصفیه شده به یک شبکه آبرسانی ساده ۲۹ لوله ای با مجموعاً ۲۲ گره مصرف، پمپاژ می‌شود.

۱-۳- تشریح سیستم

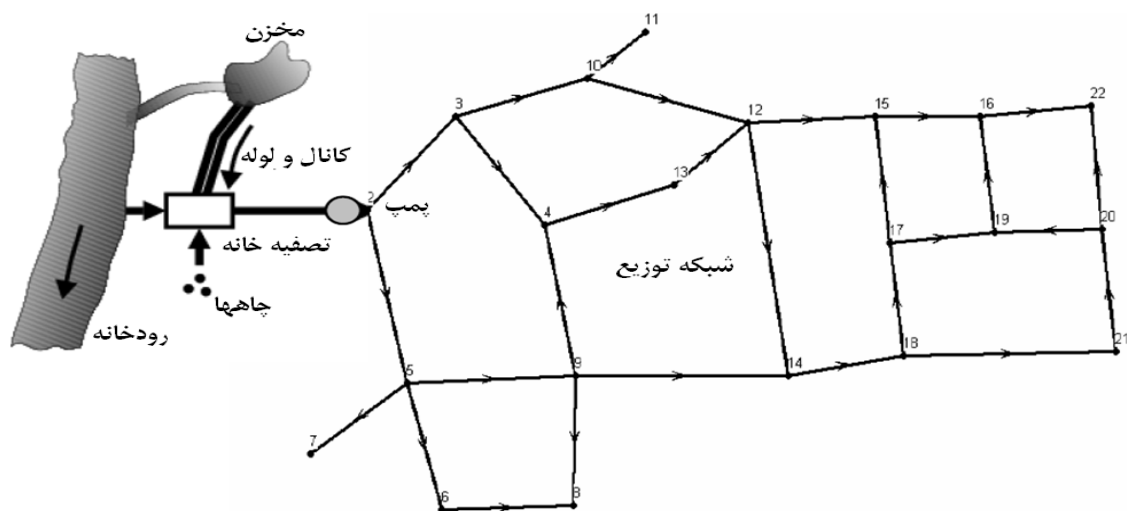
ساختار سلسله مراتبی این سیستم فرضی، برای تحلیل ریسک کمیت و کیفیت آب به‌طور جداگانه استخراج شده و به‌ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ قابل مشاهده است. بدیهی است که ساختار اصلی سلسله مراتبی، بسیار بزرگ‌تر از اشکال ارائه شده است، زیرا در زیر هر یک از زیر سیستم‌ها و اجزاء آنها، ساختار خطرات نیز در سطوح پایین‌تر اضافه خواهد شد که به دلیل محدودیت صفحات گنجانده نشده است. لیکن کلیه مشخصات خطرات تهدید کننده این سیستم شامل احتمال، شدت و آسیب‌پذیری در جدول ۲ ارائه شده است. در ادامه خطراتی که منجر به بالا رفتن ریسک کمی و کیفی آب شرب در سیستم مورد نظر می‌شوند، به‌طور جداگانه به‌همراه وزن تأثیر زیر سیستم‌ها، اجزاء و میزان اهمیت خطرات در تحلیل یکپارچه سیستم که با استفاده از روش وزن دهی مستقیم به‌دست آمده است در جدول ۳ به‌عنوان نمونه و برای ریسک کیفیت آب ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، فرایند وزن‌دهی به شکلی صورت گرفته و استاندارد شده است که مجموع وزن‌ها در هر سطح از ساختار سلسله مراتبی، واحد باشد. لازم به‌ذکر است که در سطوح دسته خطرات و همچنین خود خطرات، وزن به‌صورت یکسان و یکنواخت توزیع شده است، لیکن در خصوص سطوح اصلی سیستم، و زیر سیستم وزن اجزای تأمین و توزیع آب، متفاوت در نظر گرفته شده است.

محاسبه تابع خروجی ریسک خواهد شد. به این ترتیب خلاصه مراحل انجام تحلیل ریسک سلسله مراتبی با روش شبیه‌سازی مونت کارلو به‌صورت زیر است:

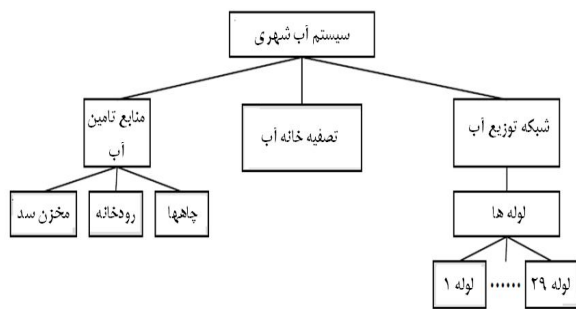
- ۱- در نظر گرفتن پارامترهای فازی تشکیل دهنده معادله ریسک برای تمامی خطرات و وزن معیارها به شکل توابع توزیع یکنواخت؛
- ۲- انتخاب یک مجموعه اعداد تصادفی از بین بازه‌های احتمالاتی تعیین شده در بند ۱؛
- ۳- اجرای مدل تحلیل ریسک سلسله مراتبی با فرض داده‌های صریح و با استفاده از روابط ۲ تا ۷، (در این مرحله، محل برخورد داده صریح تولید شده توسط شبیه‌سازی مونت کارلو، مشابه شکل ۴ با توابع پیش فرض فازی ریسک، تعیین می‌شود)؛
- ۴- تکرار مراحل ۲ و ۳؛
- ۵- ترسیم تابع توزیع تجمعی (CDF) برای خروجی‌های ریسک محاسبه شده و تعیین حدود به‌ترتیب اطمینان ۵، ۵۰ و ۹۵ درصد مورد انتظار ریسک کلی سیستم و تفسیر نتایج آن؛
- ۶- کنترل همگرایی الگوریتم مونت کارلو (لازم به‌ذکر است که ثابت شدن شکل تابع توزیع تجمعی، معیار توقف الگوریتم و کافی تشخیص دادن تعداد تکرارهای مورد اشاره است).

۳- مثال کاربردی

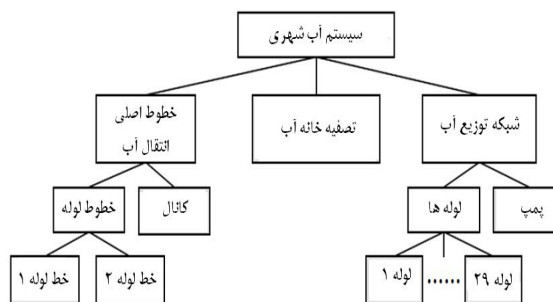
سیستم تأمین آب شهری، که به‌عنوان مطالعه موردی در این بخش از مقاله برای ارزیابی روشهای پیشنهادی بررسی شد، توسط لی در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است و با توجه به داده‌های پایه مربوط به حوادث مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما از آنجا که در تحقیق ایشان از پارامتر آسیب‌پذیری صرف‌نظر گردیده، در این تحقیق مقادیر آسیب‌پذیری، معادل مقادیر شدت خطرات فرض شدند. این سیستم کلی در شکل ۶ قابل مشاهده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، سیستم دارای سه منبع تأمین آب شامل برداشت مستقیم از



شکل ۶- مثال ارائه شده برای تحلیل ریسک در این تحقیق [۵]



شکل ۸- ساختار سلسله مراتبی سیستم آب شهری مورد استفاده در تحقیق - ریسک کاهش کیفیت آب در دسترس



شکل ۷- ساختار سلسله مراتبی سیستم آب شهری مورد استفاده در تحقیق - ریسک کاهش میزان آب در دسترس

جدول ۲- مشخصات خطرات تهدیدکننده سیستم آب شهری مورد بررسی در این تحقیق

اجزاء سیستم	دسته خطر	خطرات	احتمال	شدت و آسیب پذیری
رودخانه	طبیعی	سیلاب	۰/۰۲	VH
	غیر طبیعی	تخلیه فاضلاب	SL	VH
		تخلیه مواد صنعتی	SL	EL
مخزن	طبیعی	سیلاب	۰/۰۲	SH
	غیر طبیعی	آلوده کردن آب	SH	VH
چاهها	طبیعی	وجود مواد معدنی	VH	M
	غیر طبیعی	آلوده کردن آب	SH	SH
خطوط لوله انتقال	طبیعی	سیلاب	۰/۰۱	EH
		زلزله	در حدود ۰/۰۱	EH
		خرابکاری	VL	SH
		دما	در حدود ۰/۰۲	VH
			در حدود ۰/۰۲	
کانال انتقال	غیر طبیعی	سیلاب	۰/۰۲	VH
		زلزله	در حدود ۰/۰۱	VH
		خرابکاری	VL	SH
		دما	در حدود ۰/۰۲	SL
تصفیه خانه	غیر طبیعی	سیلاب	۰/۰۲	SH
		آلودگی شیمیایی	VL	M
		مشکل فرآیندی	VL	VH
		تجهیزات	SL	M
		سیستم پایش	SL	M
		ذخیره اطلاعات	VL	SH
			SL	EH
پمپ	غیر طبیعی	سیلاب	۰/۰۲	SH
		زلزله	حدود ۰/۰۱	EH
		بمب گذاری	EL	EH
		تجهیزات	SL	M
		سیستم پایش	SL	M
لوله های ۱ تا ۱۳ و ۲۳	غیر طبیعی	زلزله	حدود ۰/۰۱	VH
		نشت فاضلاب	SL	M
		بار خارجی	M	M
		جنس خاک	SL	SH
لوله های ۱۴ تا ۲۴	غیر طبیعی	زلزله	حدود ۰/۰۱	VH
		نشت فاضلاب	SH	SH
		بار خارجی	M	VH
		جنس خاک	VL	SL

جدول ۳- شاخص وزن برای محاسبه ریسک کلی کاهش کیفیت آب در سیستم آب شهری مورد بررسی

سطح اول	سطح دوم	سطح سوم	سطح چهارم	دسته خطرات	خطرات
سیستم آب شهری	منابع تامین آب (w=0.2)	رودخانه (w=0.5)		طبیعی (w=0.5)	سیلاب (w=1) تخلیه فاضلاب (w=0.5) تخلیه مواد صنعتی (w=0.5)
		مخزن سد (w=0.2)		طبیعی (w=0.5)	سیلاب (w=1) آلوده کردن آب (w=1)
		چاهها (w=0.3)		طبیعی (w=0.5)	وجود مواد معدنی (w=1) آلوده کردن آب (w=1)
	تصفیه خانه آب (w=0.5)			طبیعی (w=0.33)	سیلاب (w=1) آلودگی شیمیایی (w=1) مشکل فرآیندی (w=0.25) تجهیزات (w=0.25) سیستم مونیتورینگ (w=0.25) ذخیره اطلاعات (w=0.25)
	شبکه توزیع آب (w=0.3)	لوله ها (w=1)	لوله های ۱ تا ۲۹ (w=1)	غیر طبیعی (w=1)	نشت فاضلاب (w=1)

بحث کیفیت نیز به ترتیب شبکه توزیع، تصفیه خانه و منابع تأمین آب، دارای بیشترین ریسک شکست آلودگی آب در صورت وقوع خطر هستند که البته عمدتاً همگی دارای ریسک کمتر از متوسط اند و نشان دهنده وضعیت نسبتاً مناسب برای سیستم آب مورد بررسی است.

از آنجا که محاسبات ریسک مربوط به هر جزء سیستم آب ارائه شده مفصل بوده و ذکر تمامی آنها میسر نیست، به عنوان نمونه ارزیابی ریسک کیفیت آب رودخانه در برابر خطرات در جدول ۶ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می شود، بیشترین تهدید خطرات، به ترتیب مربوط به تخلیه مواد صنعتی و تخلیه فاضلاب است، دلیل اصلی آن نیز، آسیب پذیری زیاد رودخانه در محل برداشت آب، و بالادست آن به خطرات نامبرده است. رودخانه نیز از نظر کلی دارای ریسک ۰/۱۶۲ (حد متوسط با درجه عضویت فازی ۰/۳۴۸) است. برای دیگر بخش ها و دیگر خطرات نیز نتایج محاسبه شده و در قالب جدولهای ۴ و ۵ خلاصه شده است.

در ادامه، نتایج تحلیل ریسک با روش شبیه سازی مونت کارلو استخراج، و در قالب حد اطمینان ۵۰ درصد (مقدار متوسط قابل انتظار صدک ۵۰) در جدولهای ۷ و ۸ ارائه شده است. توضیح این که حد اطمینان ۵۰ درصد به این معنی است که ۵۰ درصد داده های ریسک خروجی (از مجموع ۱۰۰۰ بار اجرای برنامه)، از این مقدار کمتر یا مساوی هستند که این مقدار از تابع توزیع

به این ترتیب و با داده های ارائه شده، هر دو مدل تحلیل ریسک ارائه شده در بخش روش شناسی اجرا و نتایج آن در بخش بعدی تشریح شده اند. لازم به ذکر است که مدل شبیه سازی مونت کارلو در قالب ۱۰۰۰ بار تولید اعداد تصادفی اجرا شد و در واقع پس از این مقدار تکرار، تغییری در شکل تابع CDF ایجاد نشده و همگرایی صورت گرفته است.

۳-۲- نتایج حاصل و تعیین اجزای آسیب پذیر

در ابتدا نتایج مدل تحلیل ریسک سلسله مراتبی فازی، ارائه می شود. این نتایج، برای تحلیل ریسک کمی و کیفی آب و با در نظر گرفتن ساختار سلسله مراتبی در هر یک از زیر سیستم های اصلی تأمین و توزیع در جدولهای ۴ و ۵ ارائه شده است. در هر یک از جداول، در زیر محتمل ترین و در واقع بزرگ ترین تابع ریسک خروجی، خط کشیده شده است. به عنوان مثال تصفیه خانه از نظر کیفی و کمی در وضعیت ریسک متوسط (M) قرار دارد. نتایج نشان می دهد که کل سیستم از نظر تحلیل کیفی ریسک کمی و کیفیت آب به ترتیب در وضعیت تا حدی کم و متوسط قرار دارد و از نظر تحلیل کمی ریسک نیز به ترتیب ریسک کم بود و ریسک آلودگی آب سیستم برابر با ۰/۱۳۹ و ۰/۲۲۳ است. همچنین می توان نتیجه گرفت که در بحث کمبود آب ناشی از در نظر گرفتن خطرات، به ترتیب شبکه توزیع، تصفیه خانه و خطوط انتقال و در

جدول ۴- نتایج ریسک تلفیقی کاهش میزان آب در سیستم آب شهری مورد بررسی با روش سلسله مراتبی فازی

سطوح ریسک	EL	VL	SL	M	SH	VH	EH	ریسک کل
خطوط انتقال	۰/۰۷۱	۰/۱۸۰	۰/۵۵۵	۰/۱۹۴	۰	۰	۰	۰/۱۲۳
تصفیه خانه	۰/۰۸۱	۰/۳۰۶	۰/۲۶۳	۰/۳۲۰	۰/۰۳	۰	۰	۰/۱۳۸
شبکه توزیع	۰/۱۷۱	۰/۲۰۵	۰/۳۵۴	۰/۱۴۸	۰/۱۰۲	۰/۰۲	۰	۰/۱۴۹
کل سیستم	۰/۱۲۳	۰/۲۱۷	۰/۳۹۶	۰/۱۹۶	۰/۰۵۷	۰/۰۱	۰	۰/۱۳۹

جدول ۵- نتایج ریسک تلفیقی کاهش کیفیت آب در سیستم آب شهری مورد بررسی با روش سلسله مراتبی فازی

سطوح ریسک	EL	VL	SL	M	SH	VH	EH	ریسک کل
منابع تامین آب	۰/۰۳۲	۰/۱۷۵	۰/۴۰۱	۰/۳۷۰	۰/۰۲۲	۰	۰	۰/۱۵۸
تصفیه خانه	۰/۰۵۱	۰/۱۸۹	۰/۲۵۱	۰/۴۱۲	۰/۰۹۵	۰/۰۰۲	۰	۰/۱۸۵
شبکه توزیع	۰	۰/۰۱۵	۰/۳۱۰	۰/۲۸۵	۰/۲۰۱	۰/۱۸۹	۰	۰/۳۳۱
کل سیستم	۰/۰۳۲	۰/۱۳۴	۰/۲۹۹	۰/۳۶۵	۰/۱۱۲	۰/۰۵۷	۰	۰/۲۲۳

جدول ۶- نتایج ریسک کاهش کیفیت آب در رودخانه با توجه به هر خطر تهدید کننده با روش سلسله مراتبی فازی

سطوح ریسک	EL	VL	SL	M	SH	VH	EH	ریسک کل
سیلاب	۰/۰۷۹	۰/۹۱۹	۰/۰۰۲	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲۸
تخلیه فاضلاب	۰	۰	۰/۰۴۶	۰/۷۹۶	۰/۱۵۷	۰/۰۰۲	۰	۰/۲۷۵
تخلیه مواد صنعتی	۰	۰	۰/۰۲۶	۰/۵۹۸	۰/۳۷۳	۰/۰۰۲	۰	۰/۳۲۰
خطرات طبیعی	۰/۰۷۹	۰/۹۱۹	۰/۰۰۲	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲۸
خطرات غیر طبیعی	۰	۰	۰/۰۳۶	۰/۶۹۷	۰/۲۶۵	۰/۰۰۲	۰	۰/۲۹۷
رودخانه	۰/۰۳۹	۰/۴۵۹	۰/۰۱۹	۰/۳۴۸	۰/۱۳۲	۰/۰۰۱	۰	۰/۱۶۲

بین دو تحلیل دیده می شود. لیکن همانطور که مشاهده می شود، مقادیر محاسباتی ریسک توسط روش فازی، کمی دست بالاتر از نتایج روش دوم است، که البته قابل اغماض است. در مدل دوم، به طور کلی، رتبه بندی اجزاء سیستم آب شهری، ثابت مانده و نتایج تحلیل ریسک فازی نیز تقریباً برابر با متوسط نتایج خروجی از تحلیل مونت کارلو است که برای تحلیل ریسک کاهش میزان آب و کاهش کیفیت آب به ترتیب برابر با ۱۳۷/۰ و ۲۱۶ است.

تجمعی محاسبه می شود؛ این تابع نیز از تابع برازش داده شده، به خروجی تحلیل مونت کارلو، به دست می آید. لازم به ذکر است که، توابع خروجی به دست آمده برای هر یک از توابع هفت گانه ریسک، متمایل به توزیع نرمال بوده اند. لذا مقدار صدک ۵۰ نزدیک به میزان متوسط داده های خروجی است. با توجه به نتایج، مشاهده می شود که شباهت زیادی بین نتایج تحلیل فازی و شبیه سازی مونت کارلو در این وضعیت وجود دارد و در واقع، اختلاف اندکی

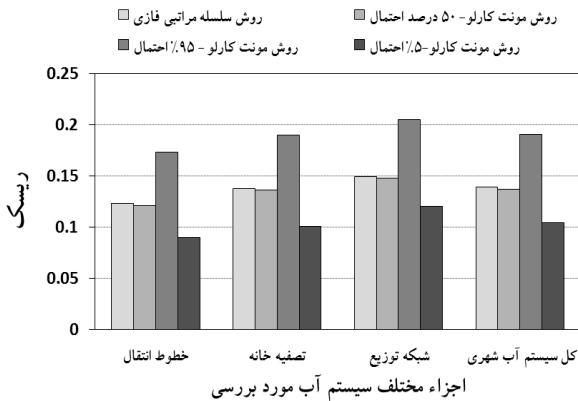
جدول ۷- نتایج ریسک تلفیقی کاهش میزان آب در سیستم آب شهری مورد بررسی با روش سلسله مراتبی مونت کارلو (توزیع یکنواخت)

سطوح ریسک	EL	VL	SL	M	SH	VH	EH	ریسک کل
خطوط انتقال	۰/۰۹۰	۰/۱۸۲	۰/۵۴۰	۰/۱۸۸	۰	۰	۰	۰/۱۲۱
تصفیه خانه	۰/۰۸۸	۰/۳۱۰	۰/۲۶۱	۰/۳۱۲	۰/۰۲۸	۰/۰۰۱	۰	۰/۱۳۶
شبکه توزیع	۰/۱۸۱	۰/۲۰۸	۰/۳۵۰	۰/۱۴۰	۰/۱۰۰	۰/۰۲۱	۰	۰/۱۴۸
کل سیستم	۰/۱۳۵	۰/۲۲۰	۰/۳۸۹	۰/۱۸۸	۰/۵۵۶	۰/۱۰۷	۰	۰/۱۳۷

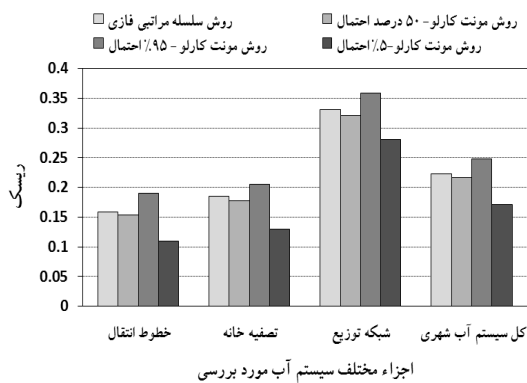
جدول ۸- نتایج ریسک تلفیقی کاهش کیفیت آب در سیستم آب شهری مورد بررسی با روش سلسله مراتبی مونت کارلو (توزیع یکنواخت)

سطوح ریسک	EL	VL	SL	M	SH	VH	EH	ریسک کل
منابع تامین آب	۰/۰۴۵	۰/۱۸۰	۰/۳۹۶	۰/۳۶۰	۰/۰۱۹	۰	۰	۰/۱۵۴
تصفیه خانه	۰/۰۶۷	۰/۱۹۴	۰/۲۴۹	۰/۴۰۵	۰/۰۸۵	۰	۰	۰/۱۷۸
شبکه توزیع	۰/۰۱۹	۰/۰۳۲	۰/۳۰۰	۰/۲۶۹	۰/۲۰۰	۰/۱۸۰	۰	۰/۳۲۱
کل سیستم	۰/۰۴۸	۰/۱۴۲	۰/۲۹۳	۰/۳۵۵	۰/۱۰۶	۰/۰۵۴	۰	۰/۲۱۶

مختلفی با لحاظ نمودن معیارهای مختلف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی تعریف و به کار گرفت.



شکل ۹- نتایج تحلیل ریسک کمبود آب در سیستم تأمین و توزیع آب ارائه شده در این تحقیق به تفکیک اجزاء



شکل ۱۰- نتایج تحلیل ریسک کاهش کیفیت آب در سیستم تأمین و توزیع آب ارائه شده در این تحقیق به تفکیک اجزاء

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، دو رویکرد نوین تحلیل ریسک سلسله مراتبی فازی و تحلیل ریسک سلسله مراتبی صریح مبتنی بر شبیه سازی مونت کارلو، در بحث ارزیابی ریسک حوادث تهدید کننده سیستم های تأمین و توزیع آب شرب از نظر کمیّت و کیفیت، ارائه شد که قابلیت در نظر گرفتن عدم قطعیت های حاکم بر نظرات کارشناسی، کمبود داده ها و یا عدم وجود اطلاعات در خصوص خطرات تهدید کننده را با نگرش فازی و احتمالاتی دارا می باشد، به ویژه در مورد ماهیت خطرات غیر طبیعی که در اکثر موارد دارای کمبود اطلاعات است. رویکرد پیشنهادی، نه تنها ساختار بهم پیوسته سیستم آب شهری را از نقطه تأین تا نقاط مصرف، به صورت یکپارچه در نظر می گیرد، بلکه قادر به در نظر گرفتن همزمان خطرات مختلف است. مقایسه قابلیت کاربرد دو روش بر روی مطالعه موردی ارائه شده، نشان دهنده متناسب بودن میزان ریسک محاسبه شده توسط دو

در ادامه برای تبیین بهتر نتایج شبیه سازی مونت کارلو، بازه اطمینان ۹۰ درصد یعنی بازه بین صدک ۵ و ۹۵، برای تعیین ریسک اجزاء اصلی سیستم آب مورد بررسی، استخراج و در قالب شکل های ۹ و ۱۰، با مدل سلسله مراتبی فازی، مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود، بیشترین ریسک محتمل در بحث کمبود آب ناشی از وقوع وقایع طبیعی و غیر طبیعی مربوط به شبکه توزیع و در حدود ۰/۲، و در بحث کیفیت آب نیز، مجدداً شبکه توزیع با ریسک ۰/۳۶، از بیشترین ریسک ممکن برخوردار است، که این مقادیر مربوط به حد اطمینان ۹۰ درصد است. در خصوص کمترین ریسک محتمل نیز در این مدل، این مقدار به ترتیب برای تحلیل ریسک کمیّت و کیفیت آب مربوط به خطوط انتقال و منابع تأمین آب و به میزان ۰/۰۸ و ۰/۱۱ با حد اطمینان ۵ درصد است. همچنین همانطور که قبلاً نیز توضیح داده شد و از این شکل ها نیز مشخص است، نتایج تحلیل سلسله مراتبی فازی در حد متوسط، حد اطمینان ۵ تا ۹۵ درصد قرار گرفته است. در مورد زمان اجرای این دو مدل، باید اشاره کرد که سرعت اجرای هر دو مدل بالا بوده، ولی به طور کلی، زمان اجرای مدل سلسله مراتبی فازی، کمتر از روش سلسله مراتبی مونت کارلو است، به طوری که زمان اجرای متوسط آنها برای سیستم مورد مطالعه در این تحقیق، روی رایانه ای با پردازشگر 2.53GHz و حافظه 4GB، به ترتیب ۳۵ و ۱۹۵ ثانیه بوده است، که دلیل آن نیز اجرای مکرر محاسبات توسط مدل دوم و در نتیجه صرف زمان بیشتر است.

به طور کلی، با دقت بیشتر در شبکه توزیع آب، به عنوان بالاترین رتبه از نظر خطر پذیری کمی و کیفی در سیستم فرضی ارائه شده، و بررسی ریسک خطرات در آن، این نتیجه حاصل شد که در بحث ریسک کاهش آب در دسترس، خطر زلزله و خطرات عملکردی منجر به شکست لوله، شامل بار خارجی و همچنین خوردگی دارای بیشترین ریسک ممکن و در بحث ریسک کیفی آب نیز، خطر نشت فاضلاب مؤثرترین عامل مؤثر بر خطر پذیری سیستم است. در خصوص دسته اول برنامه ریزی کوتاه مدت و دراز مدت برای بازسازی، نوسازی و مقاوم سازی با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی و هیدرولیکی سیستم، کمک شایانی به کاهش شکست لوله ها و کمبود آب خواهد نمود. در مورد دسته دوم نیز، احداث سیستم پایش کیفیت آب در شبکه، کنترل و مدیریت فشار و نشت و همچنین بازسازی سیستم فاضلاب از جمله سناریوهای مدیریت ریسک شبکه می تواند باشد. البته لازم به ذکر است که با توجه به این که میزان ریسک محاسباتی زیاد و در حد بحرانی نیست، برنامه ریزی ها می تواند در دراز مدت صورت گیرد. در مورد دیگر اجزاء مهم سیستم آب شهری مانند منابع تأمین آب و تصفیه خانه نیز، مشابه سیستم توزیع، می توان سناریوهای مدیریتی

سیس به امر مدیریت ریسک در دو وجه مهم کمی و کیفی آب پرداخت. در حقیقت مدل های پیشنهادی در کنار بخش مدیریت کاهش ریسک (انتخاب سناریوهای مؤثر)، می تواند به عنوان یک سیستم پشتیبان در تصمیم گیری مبتنی بر نظر متخصصان و پایش داده ها به صورت همزمان مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات آتی نویسندگان این مقاله بر روی توسعه شاخص های تعیین پارامترهای شدت و آسیب پذیری در سامانه های آب شهری و همچنین کاربرد نتایج تحقیق در امر مدیریت ریسک و انتخاب سناریوهای بهینه در یک مطالعه موردی واقعی در کشور تمرکز دارد.

مدل، در لایه های مختلف ساختار سلسله مراتبی هم به شکل توصیف کیفی و هم توصیف کمی آن است به طوری که نتایج هر دو مدل نشان دهنده اولویت بندی یکسان در مورد میزان ریسک و خطرپذیری اجزای سیستم آب شهری مفروض بوده اند. همچنین نحوه کمی سازی ریسک در این تحقیق نیز، دارای نوآوری بود. همانطور که در مثال ارائه شده نیز مشاهده شد، رویکرد ارائه شده نه تنها دید کلی از ریسک سیستم تأمین آب شرب به صورت یکپارچه ارائه می دهد، بلکه از خروجی نتایج آن، می توان برای رتبه بندی اجزاء مختلف از نظر خطر پذیری و آسیب پذیری استفاده نمود، و

۵- مراجع

- 1- Aven, T. (2011). "On some recent definitions and analysis frameworks for risk, vulnerability and resilience." *J. of Risk Analysis*, 31, 515-522.
- 2- Torres, J., Brumbelow, K., and Guikema, S. (2009). "Risk classification and uncertainty propagation for virtual water distribution systems." *J. of Reliability Engineering and System Safety*, 94, 1259-1273.
- 3- ASME. (2006). *RAMCAP: Risk analysis and management for critical asset protection-version 2.0*, Innovative Technologies Institute, LLC, Washington DC.
- 4- Federal Emergency Management America (FEMA). (2003). *Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks*, Risk Management Series.
- 5- Li, H. (2007). "Hierarchical risk assessment of water supply systems." Ph.D. Thesis, Loughborough University.
- 6- Fares, H., and Zayed, T. (2010). "Hierarchical fuzzy expert system for risk of failure of water mains." *J. of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 1(1), 53-62.
- 7- Sadiq, R., Kleiner, Y., and Rajani, B. (2004). "Aggregative risk analysis for water quality failure in distribution networks." *J. of Water Supply Research and Technology*, 53(4), 241-261.
- 8- Vairavamorthy, K., Yan, J., Gagale, H.M., and Gorantiwar, S.D. (2007). "IRA-WDS: A GIS-based risk analysis tool for water distribution systems." *J. of Environmental Modeling and software*, 22, 951-965.
- 9- Lee, M., McBean, E., Ghazali, M., Schuster, C., and Huang, J. (2009). "Fuzzy-logic modeling of risk assessment for a small drinking-water supply system." *J. of Water Resources Planning and Management*, 135(6), 547-552.
- 10- Tabesh, M., Jafari, H., and Delavar, M. R. (2009). "A water distribution network accident management model using GIS." *J. of Water and Wastewater*, 70, 2-15. (In Persian)
- 11- Tchorzewska, B. (2011). "Fuzzy failure risk analysis in drinking water technical system." *RT&A*, 1(20), 138-148.
- 12- Haestad, M., Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Backwith, S., and Koelle, E. (2003). *Advanced water distribution modeling and management*, Haestad Press, Waterbury, CT USA.
- 13- Sadiq, R., Rodríguez, M., and Tesfamariam, S. (2010). "Integrating indicators for performance assessment of small water utilities using ordered weighted averaging (OWA) operators." *J. of Expert Systems with Application*, 37, 4881-4891.
- 14- Lee, H. M. (1996). "Applying fuzzy set theory to evaluate the rate of aggregative risk in software development." *J. of Fuzzy Sets and Systems*, 79, 323-336.
- 15- Rausand, M., and Høyland, A. (2004). *System reliability theory: Models, statistical methods, and applications*, Wiley-Interscience, Hoboken, N.J.