بازیافت آب، دورهٔ ۲، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۱۸-۱۰۳

ارائهٔ الگوریتم مبتنی‌بر ریسک برای انتخاب گزینهٔ برتر بازیافت پساب

حسین شاکری، سارا نظیف*

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکدهٔ مهندسی عمران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۲/۱۰- تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۵/۰۷)

چکیده

بازیافت پساب از اقدامات ضروری در مدیریت منابع آب است، اما گزینه‌های بازیافت پساب مخاطراتی دارند. مدیریت مخاطرات به کمی‌سازی و ارزیابی ریسک مصارف بازیافت پساب نیازمند است. هدف این مطالعه، توسعهٔ الگوریتمی برای تحلیل ریسک گزینه‌های بازیافت پساب است. از این‌رو، با تجمیع نظرهای کارشناسان و خبرگان، مدل محاسبه و ارزیابی ریسک به کمک سیستم استنتاج فازی تدوین می‌شود و ریسک گزینه‌ها از منظر مخاطرات زیست‌محیطی، بهداشتی- اجتماعی و اقتصادی بررسی می‌شود. در این مدل، ریسک ترکیبی از مؤلفه‌های احتمال وقوع، شدت مخاطره و آسیب‌پذیری سیستم است. با استفاده از مقادیر ریسک محاسباتی گزینه‌ها و به کمک روش ویکور فازی، گزینه‌های بازیافت پساب اولویت‌بندی و سپس گزینهٔ برتر مشخص می‌شود. در این تحقیق، سیستم بازیافت پساب اکباتان با سه مصرف «آبیاری فضای سبز تصفیه‌خانه»، «آبیاری فضای سبز شهرک اکباتان» و «تخلیهٔ مازاد پساب بازیافتی به نهر فیروزآباد»، ارزیابی و گزینهٔ اول به‌عنوان گزینهٔ برتر انتخاب شد. همچنین، گزینهٔ دوم نیز به‌دلیل ریسک‌های حداقلی، انتخاب و حفظ شد، اما می‌توان گزینهٔ سوم را به‌دلیل ریسک بیشتر حذف کرد و با گزینه‌های بالقوهٔ سیستم اکباتان مانند «مصارف تفریحی» جایگزین کرد. رویکرد حاضر درک و بهره‌گیری ساده‌تری را برای کاربران فراهم می‌آورد و نتایج آن، اهمیت زیادی در مدیریت ریسک بازیافت پساب دارد.

واژه‌های کلیدی: استنتاج فازی، بازیافت پساب، پساب شهری، تحلیل ریسک، تصمیم‌گیری چندمعیاره، ویکور فازی.

۱. مقدمه و هدف

افزایش تقاضای آب در پنجاه سال اخیر، افت کمی و کیفی منابع آب دردسترس و نبود مدیریت صحیح منابع آب، بحران آب را تشدید کرده است [۱]. با پیشرفت فناوری تصفیهٔ فاضلاب، به‌منظور تأمین منابع آب، بحث بازیافت پساب مطرح شد. بازیافت پساب شامل تمام مراحل جمع‌آوری فاضلاب، تصفیه و بازگرداندن آن به چرخهٔ آب و مصرف مجدد آن متناسب با کیفیت خروجی است. مصرف انرژی و هزینهٔ این فرایند زیاد است [۲]. مصرف پساب بازیافتی از جنبه‌های مختلفی بررسی می‌شود که مهم‌ترین جنبه‌ها مسائل زیست‌محیطی، اقتصادی، بهداشتی و اجتماعی است [۳].

از دهه‌های گذشته مطالعات وسیعی روی منابع پساب و مصارف آن‌ها صورت گرفته است، اما در این میان تحقیق در زمینهٔ تحلیل و مدیریت ریسک گزینه‌های بازیافت پساب از جنبه‌های مختلف زیست‌محیطی، بهداشتی، اقتصادی و اجتماعی بسیار کم یا نادر است و به‌ندرت سیستم‌های درحال بهره‌برداری تحلیل ریسک شده است. همچنین، در تحقیقات موجود از تعاریف صحیح و معتبر ریسک در محاسبه و ارزیابی ریسک استفاده نشده است و اغلب هدف اصلی، بررسی آثار یا ارزیابی مخاطرات مصارف مجدد بوده است. این کمبود به‌ویژه در تحقیقات داخلی به‌وضوح قابل‌مشاهده است. تحلیل ریسک جامع گزینه‌های بازیافت پساب نیازمند شناخت ابعاد تکنیکی،

* نویسندهٔ مسئول: تلفن: ۶۱۱۱۲۲۳۷-۰۲۱ نمابر: ۶۱۱۱۲۲۳۷-۰۲۱ Email: snazif@ut.ac.ir

اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی منطقهٔ مورد مطالعه است و باید عدم‌قطعیت‌های موجود در هرکدام از این ابعاد کمی شوند [۳]؛ برای مثال، بایراموف با بهره‌گیری از روش‌های آماری و محاسبات منطبق بر احتمال وقوع، ریسک‌های استفاده از پساب‌های بازیافتی شهری را فقط از نظر خطرهای بهداشتی ارزیابی کرد. او ریسک را تابعی از غلظت مواد سمی در محیط‌زیست تعریف کرده است که با افزایش غلظت، ریسک افزایش می‌یابد [۴]. در کنار مزایای اقتصادی بازیافت پساب، هزینه‌های مرتبط با بهره‌برداری، نگهداری و تهیهٔ مواد اولیه از مباحث قابل‌بررسی هستند [۵]. علاوه بر این مسائل، مخاطرات اجتماعی نیز از موضوعات بسیار مهم در ارزیابی مصرف پساب است. دریکسل و همکاران بیان کردند اهمیت مخاطرات اجتماعی به‌حدی است که اگر حتی تمام ملاحظات فنی، بهداشتی و زیست‌محیطی پیش‌بینی شده باشند، باز هم ممکن است سیستم با شکست مواجه شود و این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که طراحان، پذیرش اجتماعی مصرف پساب بازیافتی را به‌خوبی ارزیابی نکرده باشند [۶]. پژوهش گانولیس [۷] یکی از معدود مطالعاتی است که جنبه‌های مختلف زیست‌محیطی، اقتصادی و بهداشتی در آن درنظر گرفته شده است. وی در این تحقیق، چارچوبی برای ارزیابی و مدیریت ریسک بازیافت پساب ارائه داده، اما مؤلفه‌های ریسک را لحاظ نکرده است. درواقع، در تحقیق او ریسک زمانی تعریف می‌شود که غلظت بارهای ورودی از حد مجاز فراتر رود و ارزیابی ریسک‌های بهداشتی و زیست‌محیطی در قالب ارزیابی بارهای ورودی به سیستم و مقاومت آن‌ها و با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره از جمله برنامه‌ریزی آرمانی[1] و برنامه‌ریزی توافقی[2] صورت گیرد. در این تحقیق، فقط مصارف مجدد پساب برای کشاورزی بررسی شده است و راهکار مشخصی برای ارزیابی ریسک‌های اجتماعی ارائه نشده است.

در مراجع، تعاریف مختلفی از تحلیل ریسک به‌عنوان بخش اصلی مدیریت ریسک ارائه شده است. در مهم‌ترین و معتبرترین این تعاریف، ریسک (R) ترکیبی از سه مؤلفهٔ احتمال وقوع خطر (L)، شدت خطر (S) و آسیب‌پذیری سیستم (V) درنظر گرفته می‌شود ($R=L\times S\times V$) [۸، ۹ و ۱۰]؛ برای نمونه، چورزوسکا با ارائهٔ مدلی بر مبنای قوانین فازی و با درنظرگرفتن سه مؤلفهٔ احتمال، شدت و آسیب‌پذیری، ریسک «سامانه‌های آبرسانی» را محاسبه کرد [۱۱]، اما بررسی تحقیقات مرتبط با مخاطرات بازیافت پساب نشان می‌دهد نقش مؤلفه‌های ریسک در تحلیل ریسک مغفول مانده است. از روش‌های مختلفی با هدف کمی‌کردن ریسک‌های بازیافت پساب استفاده شده است که مهم‌ترین این روش‌ها شامل تحلیل آماری داده‌ها، مدل‌های احتمالاتی و تئوری مجموعه‌های فازی هستند [۱۲]. براساس تحقیقات چودری، درصورتی‌که داده‌های زیست‌محیطی محدود و اندک باشند، نمی‌توان از توزیع‌های آماری و مدل‌های احتمالاتی در تحلیل ریسک این داده‌ها بهره گرفت [۱۳]. در مقابل، پژوهشگران استفاده از روش‌های آماری را برای تحلیل ریسک‌های اقتصادی مصارف پساب، مناسب‌تر می‌دانند [۱۴]. بهره‌گیری از رویکرد احتمالاتی به تعداد بسیار زیادی داده با دورهٔ آماری گسترده و اطمینان بالا نیاز دارد که درصورت کمبود یا نبود داده‌های معتبر، استفاده از این رویکرد امکان‌پذیر نیست. رویکرد فازی توانایی زیادی در لحاظ‌کردن عدم‌قطعیت‌های طبیعی و غیرطبیعی (به‌ویژه در مواردی که اطلاعات کافی وجود ندارد) در زمینهٔ بازیافت پساب دارد که با استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی و به‌کاربردن توابع و اعداد فازی، ریسک و مؤلفه‌های آن ارزیابی می‌شوند [۱۲].

هدف اصلی تحقیق حاضر، توسعهٔ رویکردی مناسب برای تحلیل ریسک گزینه‌های بازیافت پساب شهری با درنظرگرفتن جنبه‌های مختلف ریسک این زیرساخت‌ها و با تکیه بر تعریف ریسک شامل مؤلفه‌های احتمال وقوع خطر، شدت خطر و آسیب‌پذیری سیستم است. در این زمینه، الگوریتمی به‌عنوان چارچوب تحلیل ریسک جامع توسعه داده شده است که قابلیت درنظرگرفتن پیچیدگی‌های حاکم بر مصرف مجدد پساب‌های بازیافتی، گزینه‌های مصرف و انواع معیارهای مرتبط با آن را داشته باشد. با استفاده از این رویکرد، با توجه به نظر تصمیم‌سازان و با تکیه بر اولویت‌ها و اهمیت جنبه‌های مختلف ریسک این سیستم‌ها، می‌توان برای تعیین گزینهٔ برتر تصمیم‌گیری کرد. در تحقیق حاضر، از رویکرد فازی به‌منظور لحاظ‌کردن عدم‌قطعیت‌ها و ابهامات موجود در تحلیل ریسک استفاده می‌شود که در تصمیم‌گیری‌های مرتبط اهمیت و ارزش بسیار زیادی دارد. همچنین، با استفاده از نتایج این رویکرد می توان ریسک گزینه‌ها را کنترل کرد و یا کاهش داد که یکی از اهداف بسیار مهم در مدیریت ریسک گزینه‌های بازیافت پساب است.

1. Goal programming
2. Compromise programming

۲. مواد و روش‌ها

استفاده از پساب بازیافتی برای مصارف مختلفی مانند مصارف صنعتی، شهری، تفریحی، کشاورزی، آبیاری و تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی امکان‌پذیر است. در این تحقیق، چگونگی بررسی و ارزیابی مخاطرات گزینه‌های بازیافت پساب در چارچوب تحلیل ریسک و در سه گام تشریح می‌شود. در گام اول، مخاطرات و زیرمخاطرات گزینه‌های بازیافت پساب مطالعه و شناسایی می‌شوند. گام دوم شامل ارزیابی ریسک مخاطرات شناسایی‌شده در گام قبل است. در گام سوم، براساس نتایج ارزیابی ریسک، گزینه‌ها اولویت‌بندی و گزینهٔ برتر بازیافت پساب انتخاب می‌شود. در ادامه، گام‌های نام‌برده با جزئیات تشریح می‌شود.

۱.۲. گام اول: شناسایی مخاطرات و زیرمخاطرات

شناخت صحیح مخاطرات در محل مورد مطالعه، به آگاهی از تمام مسائل مؤثر بر فرایند بازیافت پساب نیاز دارد. در این تحقیق، پس از مطالعه و بررسی‌های گستردهٔ پژوهش‌ها، گزارش‌ها، ادبیات فنی، جمع‌آوری تجربیات و نتایج سیستم‌های بازیافت پساب مختلف و همچنین مصاحبه با کارشناسان و خبرگان، مخاطرات و زیرمخاطرات سیستم‌های بازیافت پساب شهری در سه گروه زیست‌محیطی، اقتصادی و بهداشتی- اجتماعی طبقه‌بندی می‌شوند.

۲.۲. گام دوم: ارزیابی ریسک

در این گام، کمی‌سازی و ارزیابی ریسک‌های هرکدام از زیرمخاطرات و مخاطرات شناسایی‌شده در گام قبل صورت می‌گیرد. در تحلیل ریسک گزینه‌های بازیافت پساب، عدم قطعیت‌های طبیعی و غیرطبیعی فراوانی وجود دارد که در این تحقیق برای فراهم‌کردن امکان تحلیل ریسک با لحاظ کردن این عدم‌قطعیت‌ها، از رویکرد فازی استفاده می‌شود. در مراجع در راستای تحلیل ریسک فازی، از دو رویکرد استفاده از عملگرهای فازی و استفاده از قوانین فازی بهره گرفته می‌شود [۱۵]. در تحلیل ریسک فازی گزینه‌های بازیافت پساب، از یک‌سو ارتباط آماری مشخصی میان مخاطرات و زیرمخاطرات وجود ندارد و از سوی دیگر به‌علت تنوع و تفاوت زیرمخاطرات، امکان استفاده از توابع معلوم یا تعریف توابع جدید برای محاسبهٔ ریسک و استفاده از عملگرهای فازی تقریبا غیرممکن است. علاوه‌براین، ارزیابی بیشتر مخاطرات بر مبنای قضاوت و نظرهای کارشناسان رخ می‌دهد. از این‌رو، در این تحقیق به‌منظور تحلیل ریسک از رویکرد قوانین فازی براساس سیستم‌های استنتاج فازی استفاده می‌شود. افزون بر شرایط بالا، هرکدام از زیرمخاطرات در وضعیت مخاطرات اصلی مؤثرند؛ برای نمونه، مخاطرهٔ اقتصادی برآیند مجموعه‌ای از زیرمخاطرات اقتصادی است. همچنین، ریسک محاسباتی هر زیرمخاطره ترکیبی از احتمال وقوع، شدت و آسیب‌پذیری مستقلی است؛ بنابراین، اجزای مدل ارزیابی ریسک، سلسله‌وار به‌یکدیگر مرتبط هستند. از این‌رو، مدلی بر مبنای تحلیل سلسله‌مراتبی و استنتاج فازی برای ارزیابی ریسک گزینه‌های بازیافت پساب ارائه می‌شود.

۱.۲.۲. مدل ارزیابی ریسک گزینه‌های بازیافت پساب

در مدل ارزیابی ریسک ارائه‌شده در این تحقیق، برای انجام‌دادن محاسبات ریسک از دو سیستم استنتاج فازی استفاده می‌شود که در سیستم اول، ریسک تک‌تک زیرمخاطرات براساس مؤلفه‌های ریسک (احتمال، شدت و آسیب‌پذیری) محاسبه می‌شود. در سیستم دوم، با استفاده از مقادیر ریسک‌های محاسباتی در سیستم اول، ریسک مخاطرات سه‌گانه به‌دست می‌آید. در این مدل، سیستم استنتاج فازی اول، سیستم ۱ و سیستم استنتاج فازی دوم، سیستم ۲ نامگذاری می‌شود.

در ساخت سیستم‌های استنتاج فازی، به‌طورمعمول تدوین قواعد فازی براساس داده‌های موجود و پس از تعیین ارتباط آماری آن‌ها انجام می‌گیرد. درواقع، نقش مقدم و تالی هر قاعده براساس آمار و اطلاعات ثبت‌شده به‌دست می‌آید و در کنار قوانین منتج‌شده از نظرهای خبرگان استفاده می‌شود و درصورت لزوم و پس از صحت‌سنجی، قواعد فازی غیرمؤثر و اضافی حذف می‌شوند. همچنین، به‌دلیل تعیین توابع عضویت فازی برای متغیرهای ورودی و خروجی سیستم‌های استنتاج فازی نیز از قضاوت کارشناسی و بررسی ارتباط آماری مشاهده‌شده بین تغییرات این متغیرها در دورهٔ تاریخی مورد مطالعه و همچنین روش‌های مختلف خوشه‌بندی استفاده می‌شود، اما در ارزیابی ریسک گزینه‌های بازیافت پساب، برای تعیین توابع عضویت فازی ورودی و خروجی و همچنین تدوین قواعد فازی، شرایط متفاوت و پیچیده‌تری نسبت به دیگر مسائل وجود دارد. درواقع، با توجه به اینکه اولا قضاوت در زمینهٔ ورودی‌ها (مؤلفه‌های ریسک در سیستم ۱ یا ریسک زیرمخاطرات در سیستم ۲) و خروجی‌های مدل (ریسک زیرمخاطرات در سیستم ۱ یا ریسک مخاطرات اصلی در سیستم ۲) به‌راحتی امکان‌پذیر نیست و ثانیا آمار و ارقام

قابل‌استنادی برای بررسی آن‌ها وجود ندارد و تنها مرجع، قضاوت و تجربهٔ متخصصان و خبرگان است، قوانین فازی براساس ارزش‌های زبانی و تجارب انسانی تدوین می‌شوند. در زمینهٔ دستیابی به این‌گونه قوانین، ابتدا به هریک از ورودی‌های قواعد فازی یک ارزش زبانی اختصاص داده می‌شود و سپس با توجه به ترکیب ورودی‌ها، نتیجهٔ خروجی قاعده مشخص می‌شود. برای این‌کار در تحقیق حاضر، توابع عضویت فازی ورودی‌ها با استفاده از توابع پنج‌گانهٔ $\tilde{A}_{i_1}$، $\tilde{A}_{i_2}$، $\tilde{A}_{i_3}$، $\tilde{A}_{i_4}$ و $\tilde{A}_{i_5}$[1] که به‌صورت ارزش‌های زبانی «خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد» هستند- تعیین می‌شوند که در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده می‌شود. همچنین، در بحث تحلیل ریسک گزینه‌های بازیافت پساب، ارتباط دقیق ریاضی- آماری میان ورودی‌ها و خروجی‌های مدل وجود ندارد و نمی‌توان برای بخش تالی قواعد فازی، تابع ریاضی مشخصی از ورودی‌ها تعیین کرد؛ بنابراین، استفاده از سیستم‌های استنتاج فازی سوگنو میسر نیست. همچنین، با توجه به بهره‌گیری از ورودی‌هایی با ارزش زبانی معلوم، استفاده از توابعی بدون ارزش زبانی در قسمت تالی قاعده، فهم قاعدهٔ فازی و درک پیامد آن را پیچیده و دشوار می‌کند [۱۶]؛ بنابراین، نتیجهٔ قواعد فازی نیز مانند ورودی‌ها براساس توابع بیان‌کنندهٔ ارزش‌های زبانی جدول ۱ و شکل ۱ تعیین می‌شوند. از این‌رو، هر دو سیستم ۱ و ۲، از نوع استنتاج فازی «ممدانی» است که در آن‌ها، قواعد فازی براساس متغیرهای زبانی و تجارب انسانی بنا می‌شود.

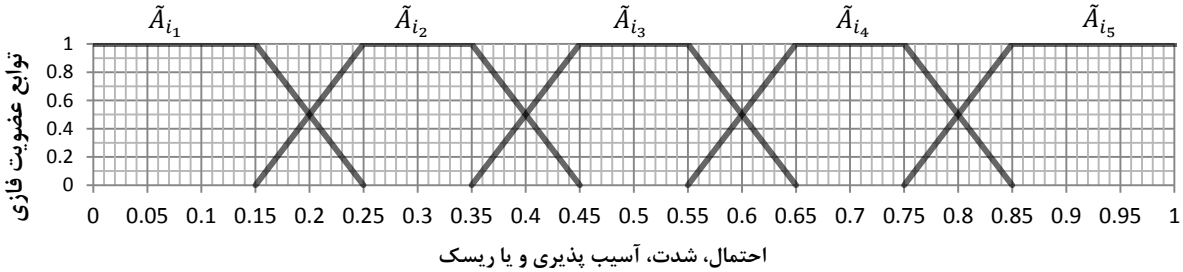
اگر برای ساخت قوانین فازی در تحقیق حاضر، قاعده‌ای فازی مانند زیر درنظر گرفته شود، تشخیص نتیجهٔ آن پیچیده یا غیرممکن است: «اگر احتمال آلودگی آب زیرزمینی در اثر مصرف پساب بازیافتی در یک منطقه زیاد، شدت خطر کم و آسیب‌پذیری سیستم بازیافت دربرابر این مخاطره متوسط باشد، ریسک آلودگی آب زیرزمینی چه خواهد بود؟» دانستن نتیجهٔ این قاعده به اطلاعات و گزارش‌های ثبت‌شده از آلودگی آب زیرزمینی در اثر مصرف پساب بازیافتی نیاز دارد که شاید تاکنون در منطقهٔ مورد نظر رخ نداده باشد. همچنین مقدار ریسک، داده‌ای نیست که ثبت و گزارش شده باشد و محققان بتوانند با مطالعهٔ آن، وضعیت را در شرایط توضیح‌داده‌شده تعیین کنند؛ بنابراین، برای توسعهٔ سیستم‌های استنتاج فازی ممدانی ۱ و ۲، به روشی نیاز است که در آن، دسترسی‌نداشتن به اطلاعات موردنیاز لحاظ شده باشد و توانایی درنظرگرفتن تمام حالات ترکیبی ممکن بین عوامل سازندهٔ ریسک و همچنین ریسک حاصل از خطر را داشته باشد. با توجه به مسائل بالا، در تحقیق حاضر برای تدوین قواعد فازی از شیوه‌ای مبتنی‌بر اصلاح روش فارس و زاید [۱۶] استفاده می‌شود که برای اولین‌بار در تحلیل ریسک شکست لوله‌های شبکهٔ آبرسانی ارائه دادند. در این روش، کارشناسان به‌طورغیرمستقیم صحت قواعد را کنترل می‌کنند. این رویکرد در بررسی‌هایی مانند پژوهش حاضر- که محققان از نتیجهٔ قسمت تالی قاعدهٔ فازی آگاهی و اطلاعاتی ندارند- کارآمد است. شایان ذکر است در روش فارس و زاید، توابع عضویت فازی مثلثی هستند که در این تحقیق به‌جای آن‌ها از توابع عضویت فازی ذوزنقه‌ای مطابق جدول ۱ و شکل ۱ استفاده می‌شود. بهره‌گیری از توابع ذوزنقه‌ای، توانایی کارشناسان را برای تصمیم‌گیری دربارهٔ عوامل مؤثر در مسئله افزایش می‌دهد و موجب انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به توابع مثلثی می‌شود [۱۷]. همچنین، توابع ذوزنقه‌ای برای بیان ارزش‌های زبانی مناسب‌ترند [۱۸]. در تحقیقات مشابه بحث حاضر- که قضاوت و تجارب خبرگان بر آن تأثیرگذار است- استفاده از توابع ذوزنقه‌ای موجب می‌شود عدم‌قطعیت‌های موجود بهتر از توابع مثلثی درنظر گرفته شود. در روش بالا، قاعدهٔ فازی شامل n ورودی با ارزش زبانی معلوم و یک خروجی با ارزش زبانی نامعلوم است؛ بنابراین، برای هریک از حالات ترکیبی ممکن ورودی‌ها، یک قاعدهٔ فازی تدوین می‌شود که با این شیوه همهٔ حالات و عدم‌قطعیت‌های مرتبط با تدوین قواعد سیستم استنتاج فازی لحاظ می‌شوند؛ برای نمونه، اگر سه ورودی وجود داشته باشد و برای هرکدام از آن‌ها پنج ارزش زبانی معلوم درنظر گرفته شود، آنگاه مطابق قانون احتمالات $۵^۳=۱۲۵$ حالت ترکیبی ممکن برای ورودی‌ها شکل می‌گیرد که به همین تعداد قاعدهٔ فازی تدوین می‌شود. این شیوه علی‌رغم حجم محاسباتی تقریبا زیاد، برای لحاظ‌کردن عدم‌قطعیت‌ها بسیار کاراست و جواب‌های خروجی مدل دارای عدم‌قطعیت بسیار کمی است [۱۹].

---

۱. i: اندیس ورودی‌های سیستم استنتاج فازی.

جدول ۱. توابع عضویت فازی بیان‌کنندهٔ ارزش‌های زبانی

تابع	ارزش زبانی	عدد فازی ذوزنقه‌ای
$\tilde{A}_{i_1}$	خیلی‌کم	(۰, ۰, ۰/۱۵, ۰/۲۵)
$\tilde{A}_{i_2}$	کم	(۰/۱۵, ۰/۲۵, ۰/۳۵, ۰/۴۵)
$\tilde{A}_{i_3}$	متوسط	(۰/۳۵, ۰/۴۵, ۰/۵۵, ۰/۶۵)
$\tilde{A}_{i_4}$	زیاد	(۰/۵۵, ۰/۶۵, ۰/۷۵, ۰/۸۵)
$\tilde{A}_{i_5}$	خیلی‌زیاد	(۰/۷۵, ۰/۸۵, ۱, ۱)



شکل ۱. توابع عضویت فازی بیان‌کنندهٔ ارزش‌های زبانی

در تحقیق حاضر برای تعیین بخش تالی (خروجی) هریک از قواعد فازی، از رابطهٔ ۱ استفاده می‌شود که درواقع ترکیب وزنی از ورودی‌های قاعدهٔ فازی است [۲۰].

$$\text{نتیجهٔ خروجی قاعدهٔ فازی} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \otimes A_{i_m}}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \quad (۱)$$

در رابطهٔ ۱، i شمارندهٔ ورودی‌ها، n تعداد ورودی‌ها، w_i وزن یا میزان تأثیر ورودی i ام در تعیین خروجی قاعدهٔ فازی و A_{i_m} نشان‌دهندهٔ m امین تابع عضویت فازی بیان‌کنندهٔ ارزش زبانی برای ورودی i ام است که به‌ازای هر ورودی (i)، M تابع ارزش زبانی وجود دارد $(m=1,2,\ldots,M)$ در تحقیق حاضر، M برابر ۵ تابع عضویت فازی بیان‌کنندهٔ ارزش زبانی مطابق جدول ۱ و شکل ۱ لحاظ می‌شود. در این تحقیق، تمام عناصر رابطهٔ ۱ اعم از w_i، A_{i_m} و نتیجهٔ خروجی قاعده، به‌صورت اعداد فازی ذوزنقه‌ای و همچنین سه عملگر جمع، ضرب و تقسیم، فازی هستند، درحالی‌که در روش فارس و زاید [۱۶] تمام عناصر رابطهٔ ۱ غیرفازی هستند و توابع عضویت فازی نیز از طریق مقیاس‌هایی تقریبی به اعداد غیرفازی تبدیل می‌شوند. این موضوع عدم‌قطعیت‌های متعددی را در محاسبات ایجاد می‌کند و دقت نتایج خروجی را کاهش می‌دهد. اگر دو عدد فازی ذوزنقه‌ای مثبت به‌صورت $\tilde{A}=(a_1,a_2,a_3,a_4)$ و $\tilde{B}=(b_1,b_2,b_3,b_4)$ وجود داشته باشد، عملگرهای فازی جمع، تفریق، ضرب و تقسیم به‌ترتیب مطابق رابطه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ [۲۱] و همچنین عملگرهای فازی ماکزیمم و مینیمم به‌ترتیب مطابق رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند [۲۲]:

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = [a_1 + b_1,\ a_2 + b_2, a_3 + b_3, a_4 + b_4] \quad (۲)$$

$$\tilde{A} \Theta \tilde{B} = [a_1 - b_4,\ a_2 - b_3, a_3 - b_2, a_4 - b_1] \quad (۳)$$

$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} \cong [a_1 b_1,\ a_2 b_2, a_3 b_3, a_4 b_4] \quad (۴)$$

$$\tilde{A} \oslash \tilde{B} \cong [a_1 / b_4,\ a_2 / b_3, a_3 / b_2, a_4 / b_1] \quad (۵)$$

$$\tilde{A} \vee \tilde{B} \cong [a_1 \vee b_1,\ a_2 \vee b_2, a_3 \vee b_3, a_4 \vee b_4] \quad (۶)$$

$$\tilde{A} \wedge \tilde{B} \cong [a_1 \wedge b_1,\ a_2 \wedge b_2, a_3 \wedge b_3, a_4 \wedge b_4] \quad (۷)$$

در رابطهٔ ۱، عامل وزن (w_i)، نقش کنترلی کارشناسان را در صحت قواعد فازی ایفا می‌کند که از ابتدای کار، به‌نحوی نظرهایشان را در تدوین قواعد دخیل می‌کند. در این تحقیق، به‌منظور دستیابی به وزن‌ها و اعمال نظرهای کارشناسان، از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی[1] استفاده می‌شود که بدین منظور ماتریس مقایسات زوجی ارجحیت‌ها (برتری‌ها) در قالب پرسشنامه‌ای تهیه می‌شود و سپس برای کارشناسان و خبرگان در زمینه‌های تخصصی مرتبط با بحث بازیافت پساب در سطوح مختلف علمی و کاربردی ارسال می‌شود. براین اساس، مقدار وزن فازی ورودی i ام با استفاده از فرایند دومرحله‌ای زیر به‌دست می‌آید:

در مرحلهٔ اول، شخص تصمیم‌گیرنده، ماتریس مقایسات زوجی $\tilde{X}$ را مطابق با رابطهٔ ۸ تکمیل می‌کند. این ماتریس دارای n سطر و n ستون است و عناصر آن اعداد فازی ذوزنقه‌ای هستند (n= تعداد ورودی‌ها). در ماتریس $\tilde{X}$، اگر ارجحیت ورودی i ام در سطر $(i=1,2,\ldots,n)$ بر ورودی jام در ستون $(j=1,2,\ldots,n)$ با عدد فازی $\tilde{a}_{ij}=(a_{ij},b_{ij},c_{ij},d_{ij})$ نشان داده شود، ارجحیت ورودی jام بر ورودی iام به‌صورت $\tilde{a}_{ji}=(\frac{1}{d_{ij}},\frac{1}{c_{ij}},\frac{1}{b_{ij}},\frac{1}{a_{ij}})$ است [۲۳]. برای تکمیل ماتریس $\tilde{X}$، از جدول ۲ استفاده می‌شود که در آن مقادیر عددی ارجحیت‌ها در مقایسات زوجی نشان داده شده است.

$$\tilde{X}=\begin{bmatrix}\tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \ldots & \tilde{a}_{1n}\\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \ldots & \tilde{a}_{2n}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \ldots & \tilde{a}_{nn}\end{bmatrix} \qquad (۸)$$

جدول ۲. مقادیر عددی ارجحیت‌ها در مقایسات زوجی [۲۴]

عبارت زبانی برتری‌ها	نسبت برتری	مقادیر فازی ذوزنقه‌ای	عبارت زبانی برتری‌ها	نسبت برتری	مقادیر فازی ذوزنقه‌ای
برتری کامل	۹	(۸, ۸/۵, ۹/۵, ۱۰)	برتری بین ۳ و ۵	۴	(۳, ۳/۵, ۴/۵, ۵)
برتری بین ۷ و ۹	۸	(۷, ۷/۵, ۸/۵, ۹)	برتری کم	۳	(۲, ۲/۵, ۳/۵, ۴)
برتری خیلی‌زیاد	۷	(۶, ۶/۵, ۷/۵, ۸)	برتری بین ۱ و ۳	۲	(۱, ۱/۵, ۲/۵, ۳)
برتری بین ۵ و ۷	۶	(۵, ۵/۵, ۶/۵, ۷)	برتری برابر	۱	(۱, ۱, ۱, ۱)
برتری زیاد	۵	(۴, ۴/۵, ۵/۵, ۶)			

پیش از محاسبهٔ مقادیر وزن فازی ورودی‌ها، باید میزان ناسازگاری ماتریس مقایسات زوجی $\tilde{X}$ بررسی شود. به‌این منظور، ابتدا اعداد فازی ذوزنقه‌ای ماتریس $\tilde{X}$ غیرفازی می‌شوند [۲۴] که این کار با استفاده از رابطهٔ ۹ انجام می‌گیرد [۲۵].

$$Z=\frac{\int_z \mu_A(z)\,z\,dz}{\int_z \mu_A(z)\,dz} \qquad (۹)$$

در رابطهٔ بالا، Z مقدار غیرفازی‌شدهٔ عدد $\tilde{A}$ و $\mu_A(z)$ درجهٔ عضویت فازی z است؛ بنابراین، ماتریس $\tilde{X}$ تبدیل به ماتریس غیرفازی X می‌شود. اگر ماتریس مقایسات زوجی غیرفازی X سازگار باشد، ماتریس مقایسات زوجی فازی $\tilde{X}$ نیز سازگار می‌شود [۲۴]. برای بررسی میزان ناسازگاری ماتریس غیرفازی (X)، از نرم‌افزار Expert Choice 11 استفاده می‌شود. در این فرایند، میزان ناسازگاری قابل‌قبول، کمتر از ۰/۱ درنظر گرفته می‌شود [۲۶]، در غیر این‌صورت باید کارشناس در پاسخ‌های خود تجدید نظر کند.

در مرحلهٔ دوم، مقادیر وزن فازی ($\tilde{w}_i$) ورودی i ام با استفاده از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود [۲۳]:

$$\tilde{w}_i=\left(\frac{\left(\prod_{j=1}^{n}a_{ij}\right)^{1/n}}{\sum_{i=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n}d_{ij}\right)^{1/n}},\frac{\left(\prod_{j=1}^{n}b_{ij}\right)^{1/n}}{\sum_{i=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n}c_{ij}\right)^{1/n}},\frac{\left(\prod_{j=1}^{n}c_{ij}\right)^{1/n}}{\sum_{i=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n}b_{ij}\right)^{1/n}},\frac{\left(\prod_{j=1}^{n}d_{ij}\right)^{1/n}}{\sum_{i=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n}a_{ij}\right)^{1/n}}\right) \qquad (۱۰)$$

1. Fuzzy Analytical Hierarchy Process

برای تعیین ارزش زبانی قسمت تالی قاعدهٔ فازی مطابق با روش فارس و زاید [۱۶]، باید نتیجهٔ رابطهٔ ۱ با یک مقیاس تقریبی- که براساس مراکز سطح نواحی هم‌پوشانی توابع ارزش زبانی فازی به‌دست آمده است- مقایسه شود و سپس ارزش زبانی قسمت تالی قاعدهٔ فازی مشخص شود. این شیوه علاوه‌بر ایجاد عدم‌قطعیت‌های متعدد در محاسبات، از دقت نتایج خروجی می‌کاهد، اما در تحقیق حاضر پس از محاسبهٔ نتیجهٔ رابطهٔ ۱، از روش دیگری برای تعیین ارزش زبانی قسمت تالی قاعدهٔ فازی از میان توابع فازی جدول ۱ و شکل ۱ استفاده می‌شود. درواقع نتیجهٔ رابطهٔ ۱، یک عدد فازی ذوزنقه‌ای است که روی چندین تابع عضویت فازی شکل ۱ قرار می‌گیرد؛ بنابراین، اگر جواب رابطهٔ ۱، $\tilde{G}$ نامیده شود، باید میزان شباهت عدد فازی ذوزنقه‌ای $\tilde{G}$ به هریک از توابع ارزش زبانی ذوزنقه‌ای شکل ۱ تعیین شود. درنتیجه، اگر میزان شباهت عدد فازی $\tilde{G}$ به هرکدام از آن توابع بیش‌تر باشد، ارزش زبانی آن تابع، بیان‌کنندهٔ ارزش زبانی قسمت تالی قاعدهٔ فازی است. در تحقیق حاضر، با استفاده از رابطهٔ ۱۱، درجهٔ شباهت عدد فازی ذوزنقه‌ای $\tilde{G}$ به توابع ارزش زبانی ذوزنقه‌ای شکل ۱ مشخص می‌شود [۲۱]. در این رابطه، درصورتی‌که A و B دو عدد فازی ذوزنقه‌ای به‌صورت $\tilde{A}=(a_1,b_1,c_1,d_1)$ و $\tilde{B}=(a_2,b_2,c_2,d_2)$ باشند، درجهٔ شباهت بین این دو عدد فازی ذوزنقه‌ای $\tilde{A}$ و $\tilde{B}$ در بازه $[0,1]$ و به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۲۱]:

(۱۱)

$$F(\tilde{A},\tilde{B})=1-\frac{|a_1-a_2|+|b_1-b_2|+|c_1-c_2|+|d_1-d_2|}{4}$$

در رابطهٔ بالا، $F(\tilde{A},\tilde{B})$ برابر صفر به‌معنای بی‌شباهت‌بودن و ۱ به‌معنای شباهت کامل بین دو عدد فازی ذوزنقه‌ای است. همچنین، اگر بیش از یک تابع دارای بیشترین میزان شباهت به عدد $\tilde{G}$ باشد، با توجه به ماهیت بحث ریسک و حفظ رویکردی محافظه‌کارانه برای افزایش اطمینان‌پذیری تحلیل، بزرگ‌ترین تابع ارزش زبانی به‌عنوان قسمت تالی قاعده انتخاب می‌شود؛ برای نمونه، اگر $\tilde{F}(\tilde{G},A_{i_3})=\tilde{F}(\tilde{G},A_{i_2})$ باشد و این مقادیر نسبت به درجهٔ شباهت عدد $\tilde{G}$ به سایر توابع ارزش زبانی، بزرگ‌تر باشد، ارزش زبانی قسمت تالی قاعدهٔ فازی، «متوسط» است. درادامه، سیستم‌های استنتاج فازی ممدانی ۱ و ۲ توسعه‌داده‌شده برای ارزیابی ریسک گزینه‌های بازیافت پساب بررسی می‌شود.

۲.۲.۲. سیستم استنتاج فازی ۱

در این سیستم، سه مؤلفهٔ احتمال وقوع خطر (L)، شدت خطر (S) و آسیب‌پذیری سیستم بازیافت (V) به‌عنوان ورودی‌ها و ریسک (R)، تنها خروجی سیستم فازی است. در این سیستم، احتمال وقوع خطر به صورت تواتر وقوع خطر در طول زمان تعریف می‌شود [۲۷]. همچنین، شدت خطر بیانگر مشخصات خطر است و میزان یا سطح دشواری مخاطره را توصیف می‌کند [۲۸]. آسیب‌پذیری سیستم نیز بیانگر میزان یا درجه‌ای از خسارت‌ها و آسیب‌هاست که تحت تأثیر مخاطره در سیستم یا جامعه به‌وجود می‌آید [۲۸، ۲۹]؛ درنتیجه، آسیب‌پذیری به مشخصات سیستم از جمله ویژگی‌های سازه‌ای، فیزیکی، فرایندی، مالی و طول عمر اجزا بستگی دارد. با استفاده از سیستم ۱، مقادیر ریسک هرکدام از زیرمخاطرات جداگانه محاسبه می‌شود. ممکن است برای تعیین احتمال وقوع، شدت و آسیب‌پذیری مرتبط با برخی از زیرمخاطرات، دستورالعمل‌های ویژه‌ای وجود داشته باشد که با توجه به گستردگی بحث در این موارد و پیچیدگی‌های بهره‌گیری از آن‌ها در شرایط مختلف، از حوصلهٔ این تحقیق خارج است و به مطالعات مجزا و گسترده‌ای نیاز دارد. همچنین، در برخی زیرمخاطرات، روابط یا روش‌های معتبر و مشخصی وجود ندارد؛ بنابراین، قضاوت و نظرهای کارشناسان و خبرگان ملاک کار قرار می‌گیرد. از این‌رو در تحقیق حاضر، برای کمی‌سازی و طبقه‌بندی احتمال وقوع، شدت و آسیب‌پذیری سیستم بازیافت در تمام زیرمخاطرات، از مقادیر موجود در جدول ۳ که براساس جدول ۱ و شکل ۱ هستند، استفاده می‌شود.

جدول ۳. مقادیر احتمال وقوع خطر، شدت خطر و آسیب‌پذیری سیستم

احتمال وقوع، شدت و آسیب‌پذیری	مقدار عددی
خیلی‌کم	۰ – ۰/۲۵
کم	۰/۱۵ – ۰/۴۵
متوسط	۰/۳۵ – ۰/۶۵
زیاد	۰/۵۵ – ۰/۸۵
خیلی‌زیاد	۰/۷۵ – ۱

در جدول ۳، مقادیر عددی در نواحی هم‌پوشانی، مطابق شکل ۱ دارای درجهٔ عضویت کوچک‌تر از ۱ است و مقادیر عددی موجود در جدول، حد پایین و بالای توابع عضویت فازی هستند؛ بنابراین، احتمال برابر صفر به‌معنی غیرممکن

بودن وقوع و احتمال برابر ۱ بیانگر قطعی‌بودن وقوع زیرمخاطره است. قوانین فازی سیستم ۱ مطابق بخش ۱.۲.۲ تدوین می‌شود. با توجه به نقش یکسان هر سه مؤلفهٔ احتمال، شدت و آسیب‌پذیری در تعریف ریسک (R=L×S×V)، وزن هر سه مؤلفه در رابطهٔ ۱ برابر درنظرگرفته می‌شود. رابطهٔ ۱۲ نمونه‌ای از قواعد سیستم استنتاجی شمارهٔ ۱ است: «اگر احتمال وقوع خطر خیلی‌کم، شدت خطر زیاد و آسیب‌پذیری سیستم کم باشد، ریسک کم خواهد بود».

(۱۲)

$$\text{If P is } A_{1_1} \text{ and C is } A_{2_4} \text{ and V is } A_{3_2} \text{ Then R is } A_{i_2}$$

۳.۲.۲. سیستم استنتاج فازی ۲

برای محاسبهٔ ریسک هرکدام از مخاطرات زیست‌محیطی، بهداشتی- اجتماعی و اقتصادی، سیستم‌های استنتاج فازی مجزایی درنظرگرفته می‌شود. قوانین فازی سیستم ۲ مطابق بخش ۱.۲.۲ تدوین می‌شود که در آن با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، وزن مخاطرات اصلی و وزن هریک از زیرمخاطرات محاسبه می‌شوند. اگر بیش از یک نفر در تعیین وزن‌های فازی زیرمخاطرات و مخاطرات نقش داشته باشند، ابتدا ماتریس مقایسات زوجی تجمیع‌شده براساس پاسخ‌های تمام پاسخ‌دهندگان تشکیل می‌شود که عناصر آن با بهره‌گیری از رابطهٔ ۱۳ محاسبه می‌شود [۳۰و ۳۱]. سپس با استفاده از این ماتریس، مقادیر وزن فازی مخاطرات سه‌گانه و مقادیر وزن فازی زیرمخاطرات به‌دست می‌آید.

$$\tilde{a}_{ij}^{[C]} = \left(\prod_{k=1}^{n} \tilde{a}_{ij}^{[k]} \right)^{\frac{1}{n}} \qquad (۱۳)$$

در رابطهٔ بالا، n تعداد تصمیم‌گیرندگان، k شمارندهٔ تصمیم‌گیرندگان، i و j به‌ترتیب بیانگر سطر و ستون ماتریس مقایسات زوجی، $\tilde{a}_{ij}^{[k]}$ عنصر سطر iام و ستون jام ماتریس مقایسهٔ زوجی تصمیم‌گیرندهٔ kام و $\tilde{a}_{ij}^{[C]}$ عنصر سطر iام و ستون jام ماتریس مقایسهٔ زوجی تجمیع‌شده است. رابطهٔ ۱۴ یک قانون برای محاسبهٔ ریسک مخاطرهٔ بهداشتی-اجتماعی درصورت وجود ۳ زیرمخاطره است که بیان می‌کند اگر ریسک زیرمخاطرهٔ ۱ متوسط، ریسک زیرمخاطرهٔ ۲ کم و ریسک زیرمخاطرهٔ ۳ زیاد باشد، ریسک بهداشتی- اجتماعی متوسط است.

(۱۴)

$$\text{If } R_1 \text{ is } A_{1_3} \text{ and } R_2 \text{ is } A_{2_2} \text{ and } R_3 \text{ is } A_{3_4} \text{ Then } R_b \text{ is } A_{i_3}$$

برای تدوین و کدنویسی قواعد فازی سیستم‌های ۱ و ۲ از نرم‌افزار متلب[1] استفاده می‌شود. در سیستم ۱، با دادن مقادیر عددی احتمال وقوع، شدت و آسیب‌پذیری برای هر زیرمخاطره به‌عنوان ورودی، خروجی نرم‌افزار نشان‌دهندهٔ ریسک محاسباتی هر زیرمخاطره خواهد بود که عددی غیرفازی است. در سیستم ۲ نیز، با دادن ریسک‌های زیرمخاطرات به‌عنوان ورودی، خروجی نرم‌افزار نشان‌دهندهٔ ریسک محاسباتی مخاطرهٔ اصلی خواهد بود که عددی غیرفازی است. برای غیرفازی‌سازی نتایج خروجی در مدل، از روش مرکز سطح که مرسوم‌ترین روش غیرفازی‌سازی است [۲۵]، طبق رابطهٔ ۹ استفاده می‌شود.

۳.۲. گام سوم: اولویت‌بندی گزینه‌های بازیافت پساب

در بخش ۲.۲ ریسک محاسباتی مخاطرات سه‌گانه برای گزینه‌های بازیافت پساب به‌دست می‌آیند؛ بنابراین، با اولویت‌بندی گزینه‌ها براساس ریسک‌های بالا، گزینهٔ برتر انتخاب می‌شود. در این تحقیق، برای اولویت‌بندی گزینه‌های بازیافت پساب، با توجه به وجود سه ریسک اصلی که اهداف و ملاحظات متفاوت و متناقضی دارند، از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[2] استفاده می‌شود. با توجه به عدم‌قطعیت‌های مطرح شده در این تحقیق و همچنین برجسته‌بودن جایگاه قضاوت کارشناسان و خبرگان در تحلیل ریسک گزینه‌ها، از رویکرد فازی در تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. از این‌رو، به‌دلیل اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره، از روش ویکور فازی[3] استفاده می‌شود. درادامه، این روش بررسی می‌شود.

۱.۳.۲. اولویت‌بندی با استفاده از روش ویکور فازی

روش ویکور فازی، به‌علت درنظرگرفتن اختلاف میان ریسک محاسباتی با مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین ریسک از یک‌سو و استفاده از برنامه‌ریزی توافقی[4] برای حل تضاد و نبود تناسب میان معیارها (ریسک‌ها) از سوی دیگر، تطابق مناسبی با بحث تحلیل ریسک گزینه‌های بازیافت پساب دارد؛ به‌ویژه با افزایش تعداد گزینه‌ها و پیچیدگی‌های تحلیل آن‌ها، استفاده از روش ویکور فازی اهمیت بسیار زیادی دارد. در این تحقیق، از الگوریتم ویکور فازی استفاده می‌شود که اپریکویچ [۳۲] ارائه داده است، با این تفاوت که در این تحقیق از اعداد فازی

1. MATLAB
2. Multi Criteria Decision Making (MCDM)
3. Fuzzy Vikor
4. Compromise Programming

ذوزنقه‌ای به‌جای اعداد فازی مثلثی استفاده می‌شود و این موضوع سبب تغییراتی در روش پیشنهادی اپریکویچ و به‌کارگیری روش‌های کمکی دیگر می‌شود. درواقع، بهره‌گیری از توابع ذوزنقه‌ای‌شکل، توانایی کارشناسان را برای تصمیم‌گیری درمورد عوامل مؤثر بر مسئله افزایش می‌دهد و انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به توابع مثلثی فراهم می‌کند [۱۷]. مراحل اصلی این الگوریتم عبارت‌اند از:

۱. ماتریس ریسک‌های محاسباتی زیست‌محیطی، بهداشتی- اجتماعی و اقتصادی و بردار وزن آن‌ها به‌صورت رابطهٔ ۱۵ تشکیل می‌شوند [۳۲] که در آن A_j نشان‌دهندهٔ گزینهٔ j، $j=1,\ldots,J$ ؛ J تعداد گزینه‌ها، C_i نشان‌دهندهٔ ریسک i ام، $i=1,2,3$ ؛ $\tilde{f}_{ij}$ بیانگر عدد فازی ریسک i ام مربوط به گزینهٔ A_j و $\tilde{w}_i$ بیانگر وزن فازی برای ریسک i ام هستند. وزن ریسک‌های ورودی با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مطابق بخش ۱.۲.۲ به‌دست می‌آید. در این تحقیق، برای بیان $\tilde{f}_{ij}$ و $\tilde{w}_i$، به‌ترتیب از اعداد فازی ذوزنقه‌ای به‌صورت $(l_{ij}, m_{ij}, r_{ij}, t_{ij})$ و (w_1, w_2, w_3, w_4) استفاده می‌شود. با توجه به اینکه مقادیر ریسک‌های سه‌گانه (خروجی سیستم استنتاج فازی ۲) اعدادی غیرفازی هستند، باید این اعداد به اعداد فازی تبدیل شوند؛ برای نمونه، عدد قطعی ۰/۵۵ به‌شکل عدد فازی ذوزنقه‌ای (۰/۵۵،۰/۵۵،۰/۵۵،۰/۵۵) ارائه می‌شود.

(۱۵)

$$D=\begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_J \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} C_1 & C_2 & C_3 \end{array} \\ \begin{bmatrix} \tilde{f}_{11} & \tilde{f}_{12} & \tilde{f}_{13} \\ \tilde{f}_{21} & \tilde{f}_{22} & \tilde{f}_{23} \\ & \vdots\ \vdots\ \vdots & \\ \tilde{f}_{J1} & \tilde{f}_{J2} & \tilde{f}_{J3} \end{bmatrix} \end{array} \quad , \quad W=\begin{bmatrix} \tilde{w}_1 & \tilde{w}_2 & \tilde{w}_3 \end{bmatrix}$$

۲. بهترین و بدترین مقادیر $\tilde{f}_{ij}$ برای هر ریسک در بین تمام گزینه‌ها به‌ترتیب به‌صورت مقادیر $\tilde{f}_i^* = (l_i^*, m_i^*, r_i^*, t_i^*)$ و $\tilde{f}_i^\circ = (l_i^\circ, m_i^\circ, r_i^\circ, t_i^\circ)$ $(j=1,2,\ldots,J, i=1,2,3)$ محاسبه می‌شوند [۳۲]:

$$\tilde{f}_i^* = \min_i \tilde{f}_{ij} \qquad (۱۶)$$

$$\tilde{f}_i^* = \max_i \tilde{f}_{ij} \qquad (۱۷)$$

۳. تفاضل فازی نرمال شدهٔ $\tilde{f}_{ij}$ و $\tilde{f}_i^*$ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید $(j=1,2,\ldots,J, i=1,2,3)$ [۳۲]:

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{\tilde{f}_{ij} \ominus \tilde{f}_i^*}{t_i^\circ - l_i^*} \qquad (۱۸)$$

۴. مقادیر $\tilde{S}_j = \left(S_j^l, S_j^m, S_j^r, S_j^t\right)$ و $\tilde{R}_j = \left(R_j^l, R_j^m, R_j^r, R_j^t\right)$، $j=1,2,..,J$ برای تمام گزینه‌ها به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۳۲]:

$$\tilde{S}_j = \sum_{i=1}^{3} \left(\tilde{w}_i \otimes \tilde{d}_{ij}\right) \qquad (۱۹)$$

$$\tilde{R}_j = \max_i \left(\tilde{w}_i \otimes \tilde{d}_{ij}\right) \qquad (۲۰)$$

۵. شاخص ویکور فازی با مقدار $\tilde{Q}_j = \left(Q_j^l, Q_j^m, Q_j^r, Q_j^t\right)$، $j=1,2,..,J$ برای تمام گزینه‌ها و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۲]:

$$\tilde{Q}_j = v \frac{\tilde{S}_j \ominus \tilde{S}^*}{S^{\circ t} - S^{*l}} \oplus (1-v) \frac{\tilde{R}_j \ominus \tilde{R}^*}{R^{\circ t} - R^{*l}} \qquad (۲۱)$$

که در آن $\tilde{S}^* = \min_j \tilde{S}_j$ ، $S^{\circ t} = \max_j S_j^t$ و $\tilde{R}^* = \min_j \tilde{R}_j$ ، $R^{\circ t} = \max_j R_j^t$ و v وزنی برای ایجاد ماکزیمم مطلوبیت گروهی است که معمولا برابر ۰/۵ درنظرگرفته می‌شود [۳۲].

۶. گزینه‌های بازیافت پساب براساس شاخص ویکور فازی و به‌صورت صعودی رتبه‌بندی می‌شوند. در این حالت گزینهٔ دارای کمترین $\tilde{Q}_j$، دارای کمترین ریسک (گزینهٔ برتر) خواهدبود [۲۲]. در تحقیق حاضر، به‌منظور رتبه‌بندی اعداد فازی ذوزنقه‌ای Q_j، با استفاده از روش کومار [۳۳]، گزینه‌ها دوبه‌دو با هم مقایسه می‌شوند. درصورتی‌که $\tilde{Q}_1 = (Q_1^l, Q_1^m, Q_1^r, Q_1^t)$ و $\tilde{Q}_2 = (Q_2^l, Q_2^m, Q_2^r, Q_2^t)$ مقادیر شاخص ویکور فازی دو گزینهٔ بازیافت پساب باشند، به‌منظور مقایسهٔ آن‌ها با روش کومار [۳۳]، مقادیر $K_1 = \frac{Q_1^l + Q_1^m + Q_1^r + Q_1^t}{4}$ و $K_2 = \frac{Q_2^l + Q_2^m + Q_2^r + Q}{4}$ محاسبه می‌شوند. اگر $K_1 > K_2$ باشد، آنگاه $Q_1 > Q_2$ و اگر $K_1 < K_2$ باشد، آنگاه $Q_1 < Q_2$ است. در اغلب شرایط با این مقایسه، وضعیت دو گزینه نسبت به یکدیگر مشخص می‌شود، ولی اگر $K_1 = K_2$ باشد، مراحل دیگری پیش‌بینی شده است که می‌توان درصورت‌لزوم به مرجع [۳۳] مراجعه کرد.

۳. نتایج و بحث

به‌منظور بررسی کاربرد الگوریتم تحلیل ریسک ارائه‌شده در این تحقیق، سیستم بازیافت پساب شهرک اکباتان در غرب تهران مطالعه می‌شود. این سیستم بازیافت پساب شهری به‌علت واقع شدن در شهرک مسکونی اکباتان، امکان بررسی و تحلیل انواع مخاطرات اجتماعی، بهداشتی، اقتصادی و زیست‌محیطی در وسعت کوچک را فراهم می‌آورد. دبی متوسط خروجی

تصفیه‌خانهٔ اکباتان ۵۵۰ مترمکعب در ساعت و دبی حداکثر خروجی به‌طور میانگین ۷۰۰ متر مکعب در ساعت است. فاضلاب ورودی پس از طی مراحل مختلفی شامل تصفیهٔ مقدماتی، تصفیهٔ بیولوژیکی (بی‌هوازی، انوکسیک، هوادهی، ته‌نشینی ثانویه و گندزدایی) از تصفیه‌خانه خارج می‌شود. در سیستم اکباتان، سه گزینهٔ «آبیاری فضای سبز محوطهٔ تصفیه‌خانهٔ اکباتان» G_1، «آبیاری فضای سبز شهرک اکباتان» G_2 و «تخلیهٔ پساب بازیافتی به نهر فیروزآباد» G_3 در حال بهره‌برداری هستند [۳۴]. به‌دلیل ارزیابی ریسک گزینه‌ها، در گام اول پس از مطالعهٔ مقالات، گزارش‌ها، ادبیات فنی و همچنین صحبت با کارشناسان و خبرگان و پس از چند مرحله غربالگری، مخاطرات و زیرمخاطرات گزینه‌های بازیافت پساب اکباتان مطابق جدول ۴ شناسایی و طبقه‌بندی شدند.

جدول ۴. مخاطرات و زیرمخاطرات سیستم بازیافت پساب اکباتان

۱. مخاطرات زیست‌محیطی	۲. مخاطرات بهداشتی- اجتماعی	۳. مخاطرات اقتصادی
۱.۱. آلودگی منابع خاک	۱.۲. شیوع بیماری در اثر استفادهٔ مستقیم یا غیرمستقیم از پساب	۱.۳. هزینه‌های قابل‌توجه بهره‌برداری و نگهداری سیستم و نبود امکان تأمین آن‌ها در زمان مناسب
۲.۱. آلودگی منابع آب سطحی	۲.۲. مقاومت‌های اجتماعی به‌صورت استفاده‌نکردن از پساب و استفاده‌نکردن از محصولات یا مکان‌هایی که در آن‌ها از پساب استفاده شده است	۲.۳. دسترسی‌نداشتن به مواد اولیه و فناوری مورد نیاز
۳.۱. آلودگی منابع آب زیرزمینی	۳.۲. اعتراضات اجتماعی در اثر کارکرد نامطلوب سیستم بازیافت پساب	۳.۳. درآمدزانبودن فروش پساب یا دیگر محصولات سیستم بازیافت پساب
۴.۱. آلودگی محصولات زراعی خوراکی	۴.۲. نامناسب‌شدن چشم‌انداز فضاهای شهری، گردشگری و تفریحی (در اثر تجمع حشرات، بو)	۴.۳. شکست فیزیکی و هیدرولیکی سیستم
۵.۱. آثار مخرب بر رشد و باروری گیاهان غیرخوراکی		
۶.۱. آثار مخرب بر جانوران		
۷.۱. برهم‌خوردن تعادل اکوسیستم (افزایش یا کاهش یک گونهٔ خاص)		

در گام دوم، ابتدا مدل محاسبه و ارزیابی ریسک مطابق بند ۱.۲.۲ تهیه و تنظیم می‌شود. به‌منظور دستیابی به وزن‌ها و نظرهای کارشناسان درمورد مخاطرات و زیرمخاطرات سیستم اکباتان، ماتریس مقایسات زوجی ارجحیت‌ها در قالب پرسشنامه‌ای تهیه شد، سپس برای ۲۵ نفر از کارشناسان و خبرگان در زمینه‌های تخصصی مرتبط با بحث بازیافت پساب در سطوح مختلف علمی و کاربردی و دارای سابقهٔ مدیریتی، اجرایی یا پژوهشی در این موضوع، به‌صورت الکترونیکی یا کتبی ارسال شد که از این بین یازده نفر به این پرسشنامه پاسخ دادند (سه نفر دکتری، شش نفر کارشناسی ارشد و دو نفر کارشناسی). میزان ناسازگاری برای تمام پاسخ‌دهندگان کمتر از ۰/۱ بود. پس از تشکیل ماتریس مقایسات تجمیع‌شده، وزن‌های فازی زیرمخاطرات و مخاطرات سه‌گانه با رابطهٔ ۱۰ محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۵ مشاهده می‌شود.

جدول ۵. وزن‌های فازی نهایی زیرمخاطرات و مخاطرات سه‌گانهٔ زیست‌محیطی، بهداشتی- اجتماعی و اقتصادی

مخاطره	زیرمخاطره	وزن فازی	مخاطره	زیرمخاطره	وزن فازی
	۱.۱	(۰/۰۹, ۰/۱۲, ۰/۲۰, ۰/۲۶)		۱.۲	(۰/۴۱, ۰/۵۰, ۰/۷۱, ۰/۸۴)
	۲.۱	(۰/۱۵, ۰/۱۹, ۰/۳۰, ۰/۳۹)	بهداشتی- اجتماعی	۲.۲	(۰/۰۸, ۰/۱۰, ۰/۱۵, ۰/۲۰)
زیست‌محیطی	۳.۱	(۰/۱۹, ۰/۲۵, ۰/۳۹, ۰/۴۹)	(۰/۳۹, ۰/۵۰, ۰/۷۷, ۰/۹۵)	۳.۲	(۰/۱۳, ۰/۱۶, ۰/۲۵, ۰/۳۱)
(۰/۱۵, ۰/۲۳, ۰/۳۰)	۴.۱	(۰/۰۶, ۰/۰۸, ۰/۱۳, ۰/۱۷)		۴.۲	(۰/۰۵, ۰/۰۷, ۰/۱۰, ۰/۱۲)
(۰/۱۲,	۵.۱	(۰/۰۴, ۰/۰۶, ۰/۰۹, ۰/۱۲)		۱.۳	(۰/۱۹, ۰/۲۵, ۰/۳۹, ۰/۵۰)
	۶.۱	(۰/۰۴, ۰/۰۵, ۰/۰۸, ۰/۱۰)	اقتصادی	۲.۳	(۰/۱۳, ۰/۱۶, ۰/۲۵, ۰/۳۳)
	۷.۱	(۰/۰۴, ۰/۰۵, ۰/۰۸, ۰/۱۱)	(۰/۱۲, ۰/۱۵, ۰/۲۴, ۰/۳۱)	۳.۳	(۰/۰۸, ۰/۱۰, ۰/۱۶, ۰/۲۰)
				۴.۳	(۰/۲۳, ۰/۲۹, ۰/۴۵, ۰/۵۶)

پس از ساخت مدل ارزیابی ریسک، مقادیر عددی مؤلفه‌های ریسک برای هریک از زیرمخاطرات گزینه‌های بازیافت پساب اکباتان، به‌عنوان ورودی مدل وارد می‌شود. برای تعیین احتمال وقوع، کارشناس تصفیه‌خانه با پرسشنامه‌ای احتمال وقوع زیرمخاطرات را براساس طبقه‌بندی پیشنهادی در جدول ۳ تعیین کرد که در جدول ۸ مشاهده می‌شود. همچنین، به‌منظور تعیین مقادیر شدت مخاطرات، از «میزان تجاوز از استاندارد پارامترهای تعیین کنندهٔ خطر» به‌عنوان عاملی برای طبقه‌بندی شدت زیرمخاطره و درنتیجه تعیین مقدار عددی شدت در محاسبهٔ ریسک استفاده می‌شود. درواقع، تا زمانی‌که عوامل تعیین‌کنندهٔ مخاطرات زیست‌محیطی، بهداشتی- اجتماعی و اقتصادی، از مقادیر استانداردشان عبور نکرده باشند، مخاطره‌ای رخ نمی‌دهد و با عبور از این مقادیر مجاز، مخاطره وقوع می‌یابد. هرچقدر این میزان عبور از استاندارد بیشتر باشد، شدت مخاطره نیز بیشتر است. میزان تجاوز از مقدار استاندارد پارامترهای تعیین‌کنندهٔ خطر و طبقه‌بندی شدت مخاطره، براساس پنج ارزش زبانی در جدول ۶ پیشنهاد می‌شود.

جدول ۶. طبقه‌بندی شدت وقوع مخاطره

میزان تجاوز از مقدار استاندارد پارامترهای تعیین‌کنندهٔ خطر (درصد)	شدت وقوع	مقدار عددی
۰– ۲۰	خیلی‌کم	۰– ۰/۲۵
۲۰– ۴۰	کم	۰/۱۵– ۰/۴۵
۴۰– ۶۰	متوسط	۰/۳۵– ۰/۶۵
۶۰– ۸۰	زیاد	۰/۵۵– ۰/۸۵
بیش از ۸۰	خیلی‌زیاد	۰/۷۵– ۱

در زیرمخاطراتی که نمی‌توان مقادیر عددی مشخصی برای حداکثر یا حداقل مقدار مجاز درنظر گرفت (مانند زیرمخاطرات اجتماعی و فرهنگی)، از تجربیات، گزارش‌ها، ادبیات فنی و نظرهای کارشناسان و خبرگان بهره گرفته می‌شود. شایان ذکر است مقدار درصدهای لحاظ‌شده برای عوامل تعیین‌کنندهٔ خطر در جدول ۶، فقط براساس برآوردی اولیه از گزارش‌ها و جمع‌آوری نظرهای کارشناسان است و به‌دلیل تسهیل در تصمیم‌گیری و نظام‌مندشدن آن ارائه شده است که بی‌تردید به مطالعات گسترده‌تری در زمینهٔ تحقیق حاضر نیاز دارد. در نشریه‌های ۴۶۲ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور [۳۵] و ۳۴۵- الف معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور [۳۶]، شاخص‌ها و پارامترهای زیست‌محیطی و بهداشتی لازم برای پایش کیفی و بررسی وضعیت مخاطرات استفاده از پساب بازیافتی به‌همراه استانداردهای مرتبط با هریک از مصارف پساب بازیافتی به‌طورتفصیلی بیان شده است که در تحقیق حاضر می‌توان با استفاده از این پارامترها مقادیر شدت زیرمخاطرات بازیافت پساب را تعیین کرد؛ برای نمونه در این نشریات، برای بررسی وضعیت «منابع آب سطحی» در اثر آبیاری فضاهای سبز با استفاده از پساب بازیافتی، پارامترهایی از جمله پی هاش[1]، ذرات جامد معلق کل، اکسیژن مورد نیاز واکنش شیمیایی، اکسیژن مورد نیاز واکنش بیوشیمیایی، ذرات جامد محلول کل، هدایت الکتریکی، نیتروژن، فسفر، فلزات سنگین، کلی‌فرم گوارشی، تخم انگل و سولفات پیشنهاد شده است. مطابق نتایجی که مدیریت امور تصفیه‌خانه‌های شهر تهران [۳۴] از بین پارامترهای اشاره‌شده ارائه داده است، فقط دو پارامتر ذرات جامد محلول کل (۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و هدایت الکتریکی (۸۳۰ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر)، اندکی بیشتر از مقادیر استانداردهای مرتبط است و مابقی پارامترها در محدودهٔ مجاز هستند. همچنین، در بررسی زیرمخاطرات اقتصادی، مقدار هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری و درآمد حاصل از فروش پساب با مقادیر متعارف در سیستم‌های بازیافت پساب مشابه، مقایسه شدند که با توجه به دسترسی‌نداشتن به اطلاعات دقیق هزینه‌ها و درآمدها، شدت زیرمخاطرات مرتبط با کسب نظرهای کارشناسی تعیین شدند. برای تعیین مقادیر آسیب‌پذیری سیستم در مواجهه با هریک از زیرمخاطرات بازیافت پساب، باید میزان یا درجه‌ای از خسارت‌ها و آسیب‌ها مشخص شود که تحت تأثیر آن زیرمخاطره در سیستم یا

1. pH

جامعه به‌وجود می‌آید. در تحقیق حاضر، با بررسی مجموعه‌ای از مقالات و گزارش‌های مرتبط با آسیب‌ها و خسارت‌های زیست‌محیطی، بهداشتی- اجتماعی و اقتصادی وقوع‌یافته در سیستم‌های بازیافت پساب، آسیب‌پذیری سیستم‌ها در پنج گروه طبقه‌بندی می‌شود که در جدول ۷ مشاهده می‌شود. جدول ۷ خلاصه‌ای از مهم‌ترین آسیب‌های سیستم بازیافت پساب را در هریک از گروه‌های پنج‌گانه نشان می‌دهد و بی‌شک در مسائل بزرگ‌تر از تحقیق حاضر، توسعه می‌یابد. به‌منظور تعیین این مقادیر بر مبنای جدول ۷، پس از جمع‌بندی نظرهای خبرگان آب و فاضلاب، کارشناسان تصفیه‌خانه و همچنین مطالعهٔ گزارش‌ها و تحقیقات قبلی مرتبط با این سیستم بازیافت، مقادیر عددی آسیب‌پذیری تعیین شد. در جدول ۷ براساس مرجع [۳۷]، درصدی از هزینه‌های متوسط یک سیستم بازیافت پساب به‌عنوان میزان آسیب اقتصادی برای هریک از حالات پنج‌گانه درنظر گرفته می‌شود. درنهایت، پس از تعیین مقادیر مؤلفه‌های احتمال وقوع، شدت و آسیب‌پذیری، ریسک محاسباتی هریک از زیرمخاطرات و مخاطرات سه‌گانهٔ گزینه‌های بازیافت پساب اکباتان محاسبه می‌شود که در جدول ۸ مشاهده می‌شود. اولویت‌بندی گزینه‌ها با روش ویکور فازی طبق قسمت ۱.۳.۲ صورت می‌گیرد که نتایج آن به‌صورت جدول ۹ است.

شایان ذکر است برابری مقادیر ریسک در برخی از مخاطره‌ها علی‌رغم متفاوت‌بودن مقادیر ورودی، به‌علت یکسان‌شدن تابع عضویت خروجی نهایی در آن مخاطره در فرایند استنتاج ممدانی (ماکزیمم- مینیمم) و غیرفازی‌سازی آن تابع است.

جدول ۷. طبقه‌بندی آسیب‌پذیری سیستم بازیافت پساب

آسیب‌پذیری	مقدار عددی	توضیحات		
		زیست‌محیطی [۳۸، ۳۹ و ۴۰]	بهداشتی- اجتماعی [۴۱]	اقتصادی
خیلی‌کم	۰ – ۰/۲۵	تغییرات بسیار جزئی در محیط‌زیست که ظرفیت خودپالایی طبیعت قادر به رفع کامل آن است.	بیماری‌های بدون نیاز به درمان ویژه و بستری مانند عوارض پوستی یا ریوی بسیار خفیف	تا ۱ میلیارد ریال خسارت و زیان اقتصادی در پی دارد.
کم	۰/۱۵ – ۰/۴۵	آلودگی‌های تقریبا جزئی منابع خاک و آب که به سمی‌شدن گستردهٔ نواحی مختلف منجر نمی‌شود.	بیماری‌هایی با عوارض کوتاه‌مدت مانند آثار خفیف گوارشی (تهوع و اسهال)، عوارض کوتاه‌مدت پوستی و ریوی	۱ تا ۳ میلیارد ریال خسارت و زیان اقتصادی در پی دارد.
متوسط	۰/۳۵ – ۰/۶۵	سبب آلودگی گیاهان غیرخوراکی و همچنین سمی‌شدن بخش بزرگی از منابع آب و خاک می‌شود.	بیماری‌های تقریبا شدید گوارشی (وبا، تیفوئید و...)، عفونی، ریوی و پوستی	۳ تا ۶ میلیارد ریال خسارت و زیان اقتصادی در پی دارد.
زیاد	۰/۵۵ – ۰/۸۵	نابودی بخش تقریبا بزرگی از اکوسیستم و دگرگونی شدید منابع آب و خاک را در پی دارد.	بیماری‌های صعب‌العلاج از جمله هپاتیت و فلج اطفال و انواع سرطان‌ها	۶ تا ۱۰ میلیارد ریال خسارت و زیان اقتصادی در پی دارد.
خیلی‌زیاد	۰/۷۵ – ۱	آلودگی‌های جبران‌ناپذیر زیست‌محیطی، تغییر کامل ساختار خاک و غیرقابل‌استفاده شدن منابع آب را در پی دارد.	مرگ‌ومیر انسان‌ها	بیشتر از ۱۰ میلیارد ریال خسارت و زیان اقتصادی در پی دارد.

جدول ۸. احتمال وقوع، شدت، آسیب‌پذیری و ریسک محاسباتی هریک از زیرمخاطرات بازیافت پساب اکباتان

زیرمخاطره	گزینه‌های بازیافت پساب											
	G_1				G_2				G_3			
	احتمال	شدت	آسیب‌پذیری	ریسک	احتمال	شدت	آسیب‌پذیری	ریسک	احتمال	شدت	آسیب‌پذیری	ریسک
۱-۱	۰/۱۹	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۱۰۸۱	۰/۲۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۱۰۸۱	۰/۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۱۱۰۴
۲-۱	۰/۲۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۱۰۸۱	۰/۲۴	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۱۰۱۶	۰/۲۶	۰/۰۳	۰/۱۲	۰/۰۹۹۵
۳-۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۹۹۵	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۹۹۵	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۹۹۵
۴-۱	۰/۱	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۰۹۹۵	۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۲۵	۰/۰۹۹۵	۰/۳۸	۰/۰۳	۰/۲	۰/۲۱۰۲
۵-۱	۰/۳۶	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۱۲۴۹	۰/۴۴	۰/۰۳	۰/۲	۰/۲۷۴۵	۰/۳۴	۰/۰۳	۰/۱	۰/۰۹۹۵
۶-۱	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۹۹۵	۰/۱۷	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۱۰۳۷	۰/۳۵	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۰۹۹۵
۷-۱	۰/۳۷	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱۴۸۳	۰/۳۸	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱۷۰۱	۰/۴۵	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۳۰۰۰
۱-۲	۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۹۹۵	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۹۹۵	۰/۱۶	۰/۰۱	۰/۱۴	۰/۱۰۱۶
۲-۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۹۹۵	۰/۳	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۹۹۵	۰/۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۱۰۴
۳-۲	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۰۴	۰/۰۹۹۵	۰/۳۵	۰/۱۷	۰/۱	۰/۱۴۸۳	۰/۳۶	۰/۲	۰/۱۵	۰/۲۱۰۲
۴-۲	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۱	۰/۰۹۹۵	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱۰۳۷	۰/۲	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۱۰۴
۱-۳	۰/۲۸	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۹۹۵	۰/۳۷	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۴۸۳	۰/۲۵	۰/۰۳	۰/۱	۰/۰۹۹۵
۲-۳	۰/۱۸	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۱۰۵۹	۰/۲	۰/۰۴	۰/۱	۰/۱۱۰۴	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۱	۰/۰۹۹۵
۳-۳	۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۹۹۵	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۲۱۰۲	۰/۸	۰/۹	۰/۰۳	۰/۶۰۰۰
۴-۲	۰/۱۸	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۱۰۵۹	۰/۲۸	۰/۱	۰/۱۶	۰/۱۲۴۹	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲	۰/۲۱۰۲
ریسک زیست‌محیطی				۰/۰۹۹۵				۰/۱۰۳۷				۰/۱۰۸۱
ریسک بهداشتی- اجتماعی				۰/۰۹۹۵				۰/۰۹۹۵				۰/۱۰۸۱
ریسک اقتصادی				۰/۰۹۹۵				۰/۱۰۸۱				۰/۳۰۰۰

جدول ۹. خلاصهٔ نتایج روش ویکور فازی برای اولویت‌بندی گزینه‌های بازیافت پساب اکباتان

گزینه	$\tilde{S}_j$	$\tilde{R}_j$	$\tilde{Q}_j$	K_j
G_1	(۰,۰ ,۰,۰)	(۰,۰ ,۰,۰)	(۰, ۰, ۰, ۰)	۰
G_2	(۰/۱۶۲۰, ۰/۱۲۵۱, ۰/۰۸۱۰, ۰/۰۶۵۱)	(۰/۱۴۸۷, ۰/۱۱۵۰, ۰/۰۷۴۴, ۰/۰۵۹۸)	(۰/۱۲۹۷, ۰/۱۰۰۳, ۰/۰۶۴۹, ۰/۰۵۲۲)	۰/۰۸۶۸
G_3	(۱/۵۶۴۱, ۱/۲۳۸۳, ۰/۸۰۷۵, ۰/۶۳۹۴)	(۰/۹۵۳۶, ۰/۷۶۸۳, ۰/۵۰۳۱, ۰/۳۹۳۸)	(۱, ۰/۷۹۸۷, ۰/۵۲۱۹, ۰/۴۱۰۹)	۰/۶۸۲۹

مطابق نتایج موجود در جدول ۹، گزینهٔ «آبیاری فضای سبز محوطهٔ تصفیه‌خانهٔ اکباتان» دارای کمترین ریسک و گزینهٔ برتر است. همچنین، گزینهٔ «آبیاری فضای سبز شهرک اکباتان» نیز با توجه به مقدار شاخص ویکور فازی و به‌ویژه مقادیر ریسک‌های سه‌گانه به‌عنوان گزینهٔ برتر انتخاب می‌شود. در گزینهٔ G_2، زیرمخاطرهٔ ۱-۵ که به‌طورویژه شامل فضاهای سبز و درختان شهرک اکباتان می‌شود، به نظارت و مراقبت به‌منظور کنترل سطح ریسک فعلی و کاهش آن درصورت افزایش‌نیافتن ریسک‌های سایر زیرمخاطرات (به‌ویژه ریسک‌های اقتصادی) نیاز دارد، اما گزینهٔ «تخلیهٔ پساب بازیافتی به نهر فیروزآباد» با توجه به اولویت‌بندی گزینه‌ها و وضعیت ریسک‌های محاسباتی مخاطرات و زیرمخاطرات این گزینه، شرایط قابل‌قبولی ندارد و حذف می‌شود. در این گزینه، ریسک‌های مرتبط با زیرمخاطرات بهداشتی-اجتماعی و اقتصادی (به‌ویژه زیرمخاطرهٔ ۳-۳ که بیانگر درآمدزانبودن فروش پساب یا سایر محصولات سیستم بازیافت پساب در این گزینه است) مقادیر بزرگ‌تر و قابل‌توجهی نسبت به دو گزینهٔ دیگر دارند. با توجه به اینکه گزینهٔ G_3، مازاد پساب بازیافتی تصفیه‌خانهٔ اکباتان را به نهرفیروزآباد منتقل می‌کند، به‌دلیل جایگزینی این گزینه و مدیریت مازاد پساب بازیافتی، می‌توان از سایر گزینه‌های بالقوهٔ سیستم اکباتان استفاده کرد. با احتساب متوسط دبی پساب خروجی تصفیه‌خانهٔ اکباتان برابر با ۵۵۰ مترمکعب در ساعت [۳۴]، حجم پساب بازیافتی روزانه به‌طورمتوسط

۱۳۲۰۰ مترمکعب است (۲۴ (ساعت)× ۵۵۰ (متر مکعب در ساعت)). شهرک اکباتان ۴۰ هکتار فضای سبز دارد که نیاز آبی آن روزانه ۲۰۰۰ مترمکعب است [۴۲]. با احتساب آبیاری ۷ هکتار فضای سبز محوطهٔ تصفیه‌خانهٔ اکباتان [۳۴]، روزانه حدود ۲۰ درصد از پساب بازیافتی در دو گزینهٔ G_1 و G_2 مصرف می‌شود و ۸۰ درصد مازاد است؛ یعنی روزانه به‌طورمتوسط حدود ۱۰۵۶۰ مترمکعب پساب مازاد وجود دارد ((۲۴ (ساعت)× ۵۵۰ (مترمکعب در ساعت))× ۰/۸). از این‌رو، می‌توان استفاده از گزینه‌های بالقوهٔ سیستم اکباتان را توجیه کرد که در این زمینه گزینه‌هایی مانند «مصارف تفریحی» (آبنما، حوضچه‌های مصنوعی و دریاچهٔ مصنوعی در شهرک اکباتان و در محل‌هایی مانند پارک ارم سبز که در نزدیکی این سیستم بازیافت قرار دارند) و «آبیاری پارک جنگلی چیتگر» قابل‌بررسی هستند.

۴. جمع‌بندی

در این تحقیق، ارزیابی گزینه‌های بازیافت پساب با استفاده از الگوریتم تحلیل ریسک صورت گرفته است. استفاده از رویکرد تحلیل ریسک مبتنی‌بر تعریف ریسک شامل سه مؤلفهٔ احتمال وقوع، شدت خطر و آسیب‌پذیری سیستم، ارزیابی کامل‌تری از وضعیت هریک گزینه‌های بازیافت پساب ارائه کرد، اما در تحقیقات گذشته اغلب به‌علت غفلت از یک تا دو مورد از این مؤلفه‌ها (به‌ویژه آسیب‌پذیری و شدت)، اطمینان کمتری از نتایج خروجی وجود دارد. بهره‌گیری از استنتاج فازی برای محاسبه و ارزیابی ریسک گزینه‌ها در تحقیق حاضر، از منظر تئوریک دارای توجیه فنی است، چراکه با ساخت قوانین فازی متعدد، عدم‌قطعیت‌های مطرح‌شده از جمله ناآگاهی تحلیلگر از برخی مقادیر مؤلفه‌های احتمال، شدت و آسیب‌پذیری به حداقل می‌رسد و همچنین امکان ارزیابی هم‌زمان زیرمخاطرات مختلف سیستم بازیافت پساب را سهولت می‌بخشد. با توجه به نقش قضاوت و تجارب کارشناسان، نبود ارتباط آماری بین اجزای مدل و همچنین قابل‌ثبت‌نبودن ریسک در بحث حاضر، استفاده از توابع فازی بیان‌کنندهٔ ارزش زبانی در ساخت مدل و ارزیابی گزینه‌های بازیافت پساب علاوه‌بر افزایش اعتبار تحلیل ریسک، درک ساده و بهره‌گیری آسان‌تری را برای کاربران به‌وجود می‌آورد. ازاین منظر، در تمام مراحل ساخت مدل و ارزیابی ریسک، از روش‌های متناسب با توابع ارزش زبانی و رویکرد فازی استفاده شد. در این تحقیق، سیستم بازیافت پساب شهرک اکباتان با سه گزینهٔ فعال، تحلیل و بررسی شد. پس از ارزیابی ریسک و اولویت‌بندی گزینه‌ها با روش ویکور فازی، «آبیاری فضای سبز تصفیه‌خانه» گزینهٔ برتر انتخاب شد. علاوه‌براین، گزینهٔ «آبیاری فضای سبز شهرک اکباتان» نیز با توجه به مقدار شاخص ویکور فازی و ریسک‌های محاسباتی حداقلی، انتخاب و حفظ شد. می‌توان گزینهٔ «تخلیهٔ پساب بازیافتی به نهر فیروزآباد» را به‌دلیل ریسک بیشتر حذف کرد و به‌جای آن، دیگر گزینه‌های بالقوهٔ سیستم اکباتان از جمله «مصارف تفریحی» یا «آبیاری پارک چیتگر» را جایگزین کرد. استفاده از روش ویکور فازی در سیستم اکباتان، به‌علت درنظرگرفتن اختلاف میان ریسک محاسباتی با مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین ریسک از یک‌سو و حل تضاد و نبود تناسب میان ریسک‌ها از سوی دیگر، ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از گزینه‌های سیستم بازیافت پساب و درنهایت انتخاب با اولویت بالاتر و ریسک کمتر ارائه کرد. نتایج الگوریتم توسعه‌داده‌شده، اهمیت بسیار بالایی در مدیریت ریسک گزینه‌های بازیافت پساب دارد که به‌منظور کنترل و کاهش ریسک این گزینه‌ها استفاده می‌شود.

۵. تشکر و قدردانی

از استادان، پژوهشگران و کارشناسانی که در جمع‌آوری داده‌ها و تکمیل پرسشنامه‌ها مساعدت کردند و به‌ویژه از حمایت‌ها و کمک‌های ارزشمند آقای مهندس علیرضا حاج‌عبداللهی مدیر محترم امور تصفیه‌خانه‌های شهر تهران، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

[1]. Fawell, J., Fewtrell, L., Hydes, O., Wyn-Jones, P. and Watkins, J. (2004). "Framework for Developing Water Reuse Criteria with Reference to Drinking Water Supplies", UK Water Industry Research Limited, London.

[2]. Jiménez, B., and Asano,T. (2008). "Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs", IWA Publishing, London.

[3]. Ganoulis, J. (2005). "Integrated Risk Analysis for Sustainable Water Resources Management", Comparative Risk Assessment and Environmental Decision Making, Springer, 275-286.

[4]. Bayramov, A. (2007). "Risk Assessment on Population Health". Wastewater Reuse–Risk Assessment, Decision-Making and Environmental Security, Chapter 9, Springer, Dordrecht, 339-346.

[5]. Jiménez, B. (2013). "Improving the air quality in Mexico City through reusing wastewater for environmental restoration", In: Lazarova V, Asano T, Bahri A, Anderson J (eds Milestones in water reuse: the best success stories), IWA Publishing, London, 283-291.

[6]. Drechsel, P., Mahjoub, O., Keraita, B. (2015). "Social and Cultural Dimensions in Wastewater Use", Wastewater, Springer, 75-92.

[7]. Ganoulis, J. (2012). "Risk analysis of wastewater reuse in agriculture", International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 1(1), 1-9.

[8]. Torres, J., Brumbelow, K., and Guikema, S. (2009). "Risk classification and uncertainty propagation for virtual water distribution systems", Journal of Reliability Engineering and System Safety, 94, 1259-1273.

[9]. ASME. (2006). "RAMCAP: Risk analysis and management for critical asset protection-version 2.0", Innovative Technologies Institute, LLC, Washington DC, USA.

[10]. Federal Emergency Management America (FEMA). (2003). "Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks", Risk Management Series, USA.

[11]. Tchórzewska-Cieślak, B. (2011). "Fuzzy failure risk analysis in drinking water technical system", Reliability: Theory and Applications, 2, 138-148.

[12]. Ganoulis, J. (2009). "Risk Analysis of Water Pollution", 2th. Ed., Chapter 4, John Wiley & Sons, Weinheim, 113–150.

[13]. Chowdhury, S. (2012). "Decision making with uncertainty: an example of water treatment approach selection", Water Quality Research Journal of Canada, 47(2), 153-165.

[14]. Chu, J., Chen, J., Wang, C., Fu, P. (2004). "Wastewater reuse potential analysis: implications for China's water resources management", Water Research, 38(11)**,** 2746-2756.

[15]. Fares, H., Zayed, T. (2009). "Risk assessment for water mains using fuzzy approach", Building a sustainable future proceedings of the 2009 construction research congress, ASCE, Washington, USA, 1125-1134.

[16]. Fares, H., and Zayed, T. (2010). "Hierarchical fuzzy expert system for risk of failure of water mains", Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 1(1), 53-62.

[17]. Miao, S., Hammell II, R. J., Hanratty, T., Tang, Z. (2014). "Comparison of Fuzzy Membership Functions for Value of Information Determination", Proceedings of the 25th Modern Artificial Intelligence and Cognitive Science Conference, Washington, USA.

[18]. Liang, G.-S. (1999). "Fuzzy MCDM based on ideal and anti-ideal concepts", European Journal of Operational Research, 112(3), 682-691.

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

[20]. Nozaki, K., Ishibuchi, H., Tanaka, H. (1997). "A simple but powerful heuristic method for generating fuzzy rules from numerical data", Fuzzy sets and systems, 86(3)**,** 251-270.

[21]. Chen, S.-M. (1996). "New methods for subjective mental workload assessment and fuzzy risk analysis", Cybernetics & Systems, 27(5), 449-472.

[22]. Liu, H.-C., Liu, L., Liu, N., Mao, L.-X. (2012). "Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment", Expert Systems with Applications, 39(17), 12926-12934.

[23]. Buckley, J. J. (1985). "Fuzzy hierarchical analysis", Fuzzy sets and systems, 17(3)**,** 233-247.

[24]. Zheng, G., Zhu, N., Tian, Z., Chen, Y., Sun, B. (2012). "Application of a trapezoidal fuzzy AHP method for work safety evaluation and early warning rating of hot and humid environments", Safety Science, 50(2)**,** 228-239.

[25]. Lee, H.-M. (1996). "Applying fuzzy set theory to evaluate the rate of aggregative risk in software development", Fuzzy sets and Systems, 79(3), 323-336.

[26]. Saaty, T. L. (1990). "How to make a decision: the analytic hierarchy process", European journal of operational research, 48(1), 9-26.

[27]. Vermont. (2012). "Guide to Risk Assessment & Response", Enterprise Risk Management, University of vermont. Burlington, United States, Available: http://www.uvm.edu/~erm/RiskAssessmentGuide.pdf, Accessed Date: 4/4/2015.

[28]. Li, H. (2007). "Hierarchical risk assessment of water supply systems", Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, Loughborough University, Loughborough, UK.

[29]. Willis, H. H., Morral, A. R ,Kelly, T. K., Medby, J. J. (2005). "Estimating Terrorism Risk", Center for Terrorism Risk Management Policy, RAND, Santa Monica, USA, Retrieved April 10, 2006.Available at http://www.rand.org/multi/ctrmp/.

[30]. Proper, E., Ssebuggwawo, D., Hoppenbrouwers, S. (2009). "Group decision making in collaborative modeling: Aggregating individual preferences with AHP", Proceedings of the 4th SIKS conference in Enterprise Information Systems (EIS 2009), Ravenstein, Netherlands.

[31]. Dong, Y., Zhang, G., Hong, W.-C., Xu, Y. (2010). "Consensus models for AHP group decision making under row geometric mean prioritization method", Decision Support Systems, 49(3), 281-289.

[32]. Opricovic, S. (2011). "Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning", Expert Systems with Applications, 38(10), 12983-12990.

[33]. Kumar, A., Singh, P., Kaur, A., Kaur, P. (2010). "Ranking of generalized trapezoidal fuzzy numbers based on rank, mode, divergence and spread", Turkish Journal of Fuzzy Systems, 1(2), 141-152.

[۳۴]. مدیریت امور تصفیه‌خانه‌های شهر تهران. (۱۳۹۳). "مشخصات عمومی تصفیه‌خانه شهرک اکباتان".

[۳۵]. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور. (۱۳۸۷). "راهنمای طبقه‌بندی کیفیت آب خام، پساب‌ها و آب‌های برگشتی برای مصارف صنعتی و تفرجی"، دفتر نظام فنی اجرایی، وزارت نیرو. دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، نشریه شماره ۴۶۲.

[۳۶]. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور. (۱۳۸۹). "ضوابط زیست محیطی استفاده مجدد از آب‌های برگشتی و پساب ها"، وزارت نیرو-معاونت امور آب و آبفا، نشریه شماره ۳۴۵ – الف.

[37]. ERM Application Guide. (2011). "Standards of sound business and financial practices", Enterprise risk managemnt, Application Guide, toronto, Ontario, Canada.

[38]. Metcalf, Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D. (2003). "Wastewater Engineering: Treatment and Reuse", 4th. Ed., Chapter 1-13, McGraw-Hill Education, New York, USA.

[39]. EPA. (2009). "Guidelines for risk assessment of wastewater discharges to waterways", EPA publication, 1287, 1-16.

[40]. Ivarsson, O., Olander, A. (2011). "Risk Assessment for South Africa's first direct wastewater reclamation system for drinking water production", Master of Science Thesis, Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden.

[41]. Peavy, H. S., Rowe, D. R., Tchobanoglous, G. (1985). "Environmental engineering", Chapter 1, McGraw Hill International Editions, New York.

[۴۲]. بابایی، ل. (۱۳۹۱). "استفاده از میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون برای استفاده مجدد پساب تصفیه‌شده شهر تهران مطالعه موردی تصفیه‌خانه اکباتان"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران-محیط‌زیست، دانشگاه تهران. تهران.