نقشه‌گذاری بحران‌های محیط‌زیستی در تصفیه‌خانه شرق اهواز با یک چارچوب ترکیبی

مرتضی ملک زنگنه [۱]
اصلان اگدرنژاد [۲*]
رضا جلیل زاده ینگجه [۳]

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
۲. گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
۳. گروه مهندسی محیط‌زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول مکاتبات
a_eigder@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱//۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۸

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد است.

چکیده

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌عنوان زیرساخت‌های حیاتی، نقش تعیین‌کننده‌ای در حفاظت از منابع آبی، جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی و ارتقای بهداشت عمومی ایفا می‌کنند. این پژوهش با تمرکز بر تصفیه‌خانه شرق اهواز (ظرفیت ۱۱۲,۰۰۰ مترمکعب در روز) و با هدف شناسایی ریسک‌های محیط‌زیستی و بهداشتی، در سال ۱۴۰۳، از روش ترکیبی نوین EFMEA-TOPSIS بهره گرفته است. در گام نخست، پارامترهای شدت (S)، احتمال وقوع (O) و گستره آلودگی (E) برای ۱۸ ریسک عملیاتی از طریق بازدید میدانی و نظرات ۱۰ خبره کمّی سازی شد و شاخص RPN محاسبه گردید. سپس با تبدیل این سه پارامتر به معیارهای وزندار در TOPSIS (با وزن مساوی ۰/۳۳۳) و تعیین راه‌حل‌های ایده‌آل مبتنی بر داده‌های تجربی، رتبه‌بندی جامعی انجام پذیرفت. نتایج عددی نشان داد دو ریسک اختلال در فعالیت بیولوژیکی (RPN=۱۷۵) و وجود ترکیبات سمی در لجن (RPN=۱۴۴)، در سطح غیرقابل پذیرش (H) قرار دارند. ریسک اول ناشی از نقص در تأمین مواد مغذی و تنظیم هوادهی و ریسک دوم مرتبط با ورود پساب‌های صنعتی و نشت آلاینده‌ها به خاک و آب‌های زیرزمینی بود. همچنین رتبه‌بندی TOPSIS تأیید کرد که مصرف انرژی الکتریکی (RPN=۸۰) با وجود مقدار RPN متوسط، به دلیل گستردگی تأثیرات، جایگاه سوم ریسک‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. نصب سیستم پایش آنلاین پارامترهای کیفی پساب و تنظیم هوشمند نسبت غذایی همراه با راه‌اندازی واحد تصفیه لجن با قابلیت جداسازی فلزات سنگین و دفن ایمن پسماندهای سمّی به عنوان راهکار پیشنهاد شدند.

واژگان کلیدی: ارزیابی ریسک محیط‌زیستی، تصفیه‌خانه اهواز، روش ترکیبی EFMEA-TOPSIS، تصمیم‌گیری چند معیاره، مدیریت پسماند خطرناک.

مقدمه

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌عنوان یکی از مهمترین زیرساخت‌های شهری، وظیفه بازیافت آب و مواد مغذی از فاضلاب جمع‌آوری شده از منازل و واحدهای صنعتی را بر عهده دارد. حفاظت از محیط‌زیست، جلوگیری از آلودگی منابع زیرزمینی آب و ارتقاء سطح بهداشت عمومی از جمله دلایلی هستند که سامانه‌های تصفیه‌خانه فاضلاب را به یکی از مهمترین زیرساخت‌های جوامع متّمدن امروزی تبدیل نموده و لزوم عملکرد پایدار و مستمر این سامانه‌ها، حتی در شرایط وقوع بحران یک امر حیاتی تلقی می‌شود. امروزه تحلیل و آنالیز ریسک یکی از مهم‌ترین فرآیندها در صنایع به‌شمار می‌رود. سازمان‌ها در تلاش هستند تا ریسک فرآیندهای مختلف را شناسایی نموده و با طبقه‌بندی و رتبه‌بندی آنها، در پی احصاء مهمترین ریسک‌ها برآیند. یکی از صنایعی که به این طبقه‌بندی نیاز زیادی دارد تصفیه‌خانه‌ها هستند (۲۰۰۶، Lambin and Geist). در یک مطالعه پژوهشی، ابراهیمیان دهاقانی و خادمی مال امیری (۱۳۹۰) به ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های واحدهای صنعتی مصرف‌کننده آب در تصفیه‌خانه اهواز پرداختند. در این تحقیق، از روش HAZOP برای شناسایی مخاطرات و از تکنیک TOPSIS (به‌عنوان یک روش تصمیم‌گیری چند شاخصه) برای رتبه‌بندی ریسک‌ها استفاده شد. تابش و همکاران (۱۳۹۳) الگوریتمی برای ارزیابی ریسک تصفیه‌خانه‌های فاضلاب (احتمال، شدت، تشخیص) ارائه کردند. با مطالعه موردی تهران جنوب، کارایی آن به‌عنوان ابزار مدیریتی اثبات شد. جوزی و سلیمی (۱۳۹۵) ریسک محیط‌زیستی معدن سنگ آهن ماد کانسار فارس را با روش‌های EFMEA و ویلیام فاین ارزیابی کردند. نتایج نشان داد فعالیت تولید محصول در EFMEA با عدد ریسک ۹۶ و در ویلیام فاین با ریسک ۳۶۰ (بسیار بالا)، پرریسک‌ترین بود. راهکارهای مدیریت ریسک شامل ایجاد واحد HSE، کنترل گرد و غبار، پایش صوت و هوا و مدیریت پسماند پیشنهاد

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

شد. جوری و همکاران (۱۳۹۷) ریسک محیطزیستی مجتمع تولید شکر شهدای خلیج فارس را با روش ترکیبی TOPEFMEA ارزیابی کردند. اصلی‌ترین ریسک (عدد ۱۶)، ورود آلاینده‌ها به محیط آبی بود و احداث تصفیه‌خانه صنعتی پیشنهاد شد. نیکو و همکاران (۱۳۹۷) با روش فازی AHP، ریسک پدافند غیرعامل در تصفیه‌خانه سلمان فارسی را تحلیل کردند. اصلی‌ترین تهدید زلزله و پرریسک‌ترین واحد مخازن گاز کلر بودند. جهانبخش و همکاران (۱۳۹۷) ریسک‌های محیطزیستی پالایشگاه گچساران را با ترکیب روش‌های EFMEA، AHP و TOPSIS ارزیابی کردند. مهم‌ترین ریسک‌ها، آلاینده‌های خروجی دودکش‌ها و بار اضافی مشعل بودند. درویشی و همکاران (۱۳۹۸) با روش‌های ترکیبی EFMEA-VIKOR، ریسک‌های محیطزیستی ساخت سد را ارزیابی نمودند. اصلی‌ترین ریسک، آلودگی آب رودخانه بالارود (عدد ۱۲۵) بود و احداث تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی پیشنهاد شد. ستوده مرام (۱۳۹۸) با روش FMEA، ۲۹ خطر ایمنی/بهداشتی/محیطزیستی تصفیه‌خانه ارومیه را ارزیابی کرد. ۱۵ ریسک بالا شناسایی شد که مهم‌ترین‌ها آلودگی ناشی از کانال روباز پساب و نشت گاز کلر بودند و اقدامات کنترلی پیشنهاد شد. محسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۹) ریسک واحدهای کلرزنی چهار تصفیه‌خانه مشهد را با روش FMEA بررسی کردند. نتایج نشان داد خطرات سیستم‌های الکتریکی و حمل و نقل بالاترین اولویت ریسک را دارند. استفاده از تجهیزات استاندارد و وسایل نقلیه مناسب برای کاهش ریسک پیشنهاد شد. پارساجو و نصرآبادی (۱۴۰۰) اثرات محیطزیستی تصفیه‌خانه فاضلاب سرعین را با LCA و مخاطرات بهداشتی را با RAIS بررسی نمودند. کلر مخرب‌ترین عامل محیطی و نیتریت بالاترین خطر بهداشتی را داشت. در LCA، سرطان‌زایی (بر حسب g C6H6-eq) بیشترین تاثیر را داشت، اما در RAIS (بر پایه پساب) مشاهده نشد. استفاده از پساب برای آبیاری مخاطره‌آمیز بود. نوحانی و چهارلنگ بدیل (۱۴۰۰) ریسک‌های محیطزیستی پروژه ساختمانی را با روش EFMEA (با تأکید بر آلودگی آب) ارزیابی کردند. بالاترین ریسک مربوط به حوادث ثانویه (عدد ۲۵۰) و کمترین به حمل دستی بار (عدد ۸) بود. پس از اقدامات کنترلی، ریسک‌ها به‌ویژه در آلودگی آب کاهش یافت. رادسا و همکاران (۱۴۰۳) ریسک محیطزیستی دکل‌های حفاری پارس جنوبی را با روش EFMEA ارزیابی کردند. توزیع اولیه ریسک: پایین ۳٪، متوسط ۳٪، بالا ۱۳٪ و خیلی بالا ۸۰٪. پس از اقدامات کنترلی، خیلی بالا به ۴۴٪ کاهش یافت. فوران چاه و نشت مواد شیمیایی بالاترین ریسک را داشتند که به‌طور چشمگیری کاهش یافت. هادیان و همکاران (۱۴۰۴) با روش‌های ترکیبی TOPSIS، ANP و AHP، مکانیابی تصفیه‌خانه فاضلاب در مازندران (با تأکید بر استفاده مجدد) را انجام دادند. نتایج در نرم‌افزار ArcGIS نشان دهنده تفاوت‌های قابل توجه در پهنه‌بندی روش‌ها بود. Wu and Zhang (۲۰۱۴) و Haller (۲۰۰۶) بیان می‌کنند ارزیابی ریسک محیطزیستی فرآیندی جامع‌تر از تحلیل معمول ریسک است که در آن، علاوه بر بررسی ابعاد گوناگون خطرات احتمالی، درک عمیقی از شرایط زیست‌بوم منطقه مورد مطالعه به‌دست می‌آید. این روش نه تنها حساسیت محیطزیست آسیب‌پذیر را می‌سنجد، بلکه ارزش‌های ویژه محیطزیستی آن ناحیه را نیز در ارزیابی‌ها و نتیجه‌گیری‌های نهایی دخیل می‌کند. Carneiro و همکاران (۲۰۱۵) بیان داشتند در سال ۲۰۰۷، شرکت EPAL پرتغال، اجرای برنامه ایمنی آب را از منبع تا مصرف آغاز کرد. این برنامه بر پایه روش‌های بین‌المللی مدیریت ریسک کیفیت آب طراحی شد. با ادغام ابزارهای چند معیاره، ماتریس‌های ارزیابی ریسک بهبود یافتند تا اهمیت استراتژیک دارایی‌های عملیاتی نیز در نظر گرفته شود. این روش‌های جدید به تصمیم‌گیری دقیق‌تر و شناسایی نقاط بحرانی کمک کردند. Liu (۲۰۲۴) اعلام کرد پسماندهای پزشکی توسعه پایدار محیطزیست را شدیداً متأثر می‌کنند. با رشد سریع حجم و تنوع این پسماندها، انتخاب روش‌های دفع آنها به دغدغه‌ای مهم برای سلامت و ایمنی عمومی تبدیل شده است. ارزیابی ریسک آنها به‌عنوان بخشی کلیدی از ارزیابی ریسک محیطزیست، نقش حیاتی در تدوین راهبردهای پایداری دارد. روش تحلیل FMEA دهه‌ها در ارزیابی ریسک استفاده شده است. در این مقاله با هدف رفع محدودیت‌های FMEA سنتی و تلفیق مزایای روش‌های مختلف FMEA، از روش نوین FMEA مبتنی بر یادگیری ترکیبی برای ارزیابی ریسک پسماندهای پزشکی استفاده شده است.

در راستای پوشش محدودیت‌های روش‌های مرسوم ارزیابی ریسک در مطالعات پیشین که عمدتاً بر محاسبه RPN در EFMEA متمرکز بوده و از خطای جبران‌پذیری پارامترها (تعامل غیرخطی شدت، احتمال و گستره) غافل می‌مانند، این پژوهش با ارائه چهارچوب ترکیبی بدیع EFMEA-TOPSIS، نخستین کاربرد نظام‌مند تصمیم‌گیری چندمعیاره در حوزه ارزیابی ریسک تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ایران را معرفی می‌کند. برخلاف پژوهش‌های تک روشی گذشته، نوآوری کلیدی این تحقیق در استخراج خودکار داده‌های EFMEA

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

به‌عنوان ورودی‌های عینی TOPSIS و تعیین وزن‌های مساوی برای تمام معیارها است که با حذف سوگیری‌های انسانی، امکان مدلسازی هم‌زمان، تعامل پارامترها و رتبه‌بندی ریسک‌ها در فضای نرمال‌شده را فراهم می‌سازد. این ادغام متدولوژیک، نه تنها شکاف موجود در مطالعات پیشین درباره نادیده گرفتن تأثیر ترکیبی پارامترهای ریسک را پُر می‌کند، بلکه با طراحی سیستمی که راه‌حل‌های ایده‌آل را بر اساس مقادیر تجربی تعریف می‌نماید، پایه‌ای قابل تعمیم برای ارزیابی محیط‌زیستی زیرساخت‌های حیاتی دیگر ایجاد می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

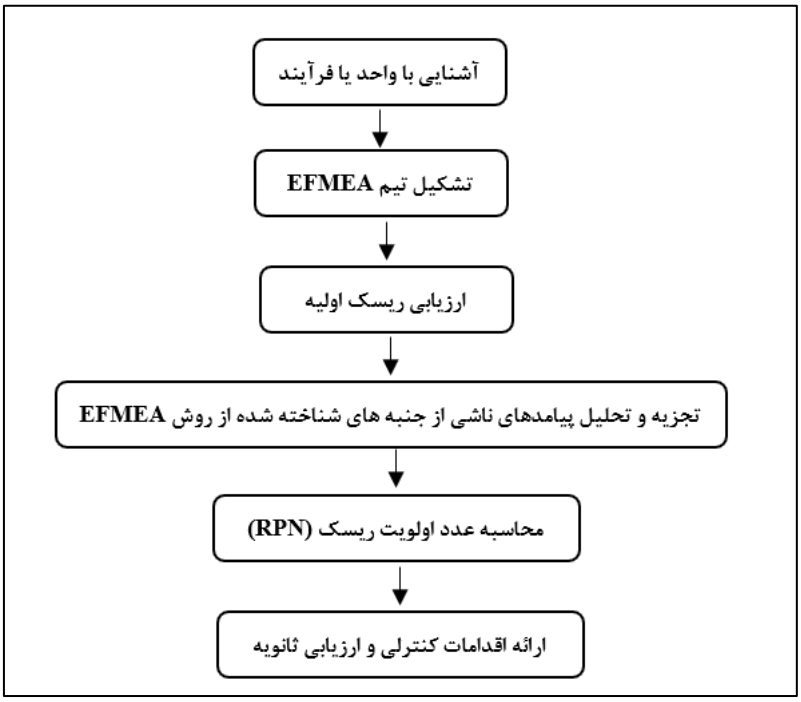
این مطالعه از نوع توصیفی مقطعی و در تصفیه خانه شرق اهواز انجام شده است (**شکل ۱**). ظرفیت نهایی تصفیه خانه شرق اهواز با فرایند SBR (راکتور نامتوالی پیوسته) برابر با ۱۱۲ هزار مترمکعب در شبانه‌روز است که برای منطقه‌ای با جمعیت ۵۲۲۰۰۰ نفر طراحی و اجرا شده است. جامعه آماری در این مطالعه شامل کلیه فعالیت‌ها، فرایندها، تجهیزات و نیروی انسانی می‌باشد. داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز پژوهش مورد نیاز این مطالعه بر اساس (۱) بازدید میدانی، (۲) تنظیم چک لیست و جداول مربوط به شناسایی فعالیت و فرایندهای موجود شناسایی و تعیین مخاطرات ایمنی و بهداشت و محیط‌زیست از طریق بازدید و مصاحبه با کارشناسان حاضر در تصفیه خانه و (۳) تعیین احتمال، شدت و پیامد مخاطرات بهداشتی و محیط‌زیستی و محاسبه ریسک با استفاده از روش‌های EFMEA و TOPSIS و با استفاده از ۱۰ نفر از نخبگان گردآوری و تهیه شده است.

شکل ۱: نمایی از تصفیه‌خانه شرق اهواز

روش پژوهش

در این پژوهش که سال ۱۴۰۳ انجام شده، از چارچوب EFMEA به‌عنوان ابزاری برای سنجش مخاطرات محیط‌زیستی استفاده شده است. این روش که زیر مجموعه‌ای از تحلیل حالت و اثرات شکست محسوب می‌شود، با اتکا بر همکاری گروهی، رویه‌ای ساختار یافته برای تعریف، کشف، سنجش، پیشگیری یا مدیریت شرایط، ریشه‌ها و پیامدهای خطاهای محتمل در سیستم‌ها، فرآیندها، طراحی‌ها یا خدمات ارائه می‌دهد. EFMEA ضمن امتیازدهی به تهدیدهای بالقوه، علل و نتایج آن‌ها در محدوده ارزیابی مخاطرات، به‌عنوان الگویی کارآمد در پیش‌بینی نقص‌ها عمل می‌کند. هدف نهایی آن، تشخیص به‌موقع مؤثرترین جنبه‌های محیط‌زیستی تأثیرگذار بر اکوسیستم در محدوده فعالیت‌ها و فرآیندهای جاری است. **شکل ۲** گام‌های روش EFMEA را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]



شکل ۲ : گام‌بندی روش EFMEA

در این روش، هر خطای بالقوه و پیامدهای آن بر اساس شاخص‌های تعریف شده (شدت، احتمال وقوع، و محدوده تأثیر محیطی یا قابلیت بازیابی) با استفاده از یک مقیاس کمی ۵ درجه‌ای (۱: ناچیز تا ۵: بحرانی) ارزش‌گذاری می‌شود. سپس با ضرب امتیازات اختصاص یافته به هر یک از این عوامل، شاخص اولویت‌دهی ریسک (RPN) برای هر حالت خطای محتمل محاسبه می‌گردد. مقدار RPN به‌عنوان معیاری برای تعیین ضرورت اجرای اقدامات اصلاحی به‌منظور حذف یا کاهش ریسک‌های شناسایی شده عمل می‌کند. خطاهای دارای بالاترین مقدار RPN در اولویت مداخلات اصلاحی قرار می‌گیرند. پس از اعمال اقدامات اصلاحی، پارامترهای شدت، احتمال وقوع و محدوده تأثیر محیطی مجدداً ارزیابی شده و RPN بازمحاسبه می‌شود. این فرآیند تکراری تا حصول مقادیر RPN قابل قبول برای کلیه حالات خطای بالقوه ادامه می‌یابد. عدد اولویت ریسک (یا تخریب محیطزیستی) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

RPN=شدت × احتمال وقوع ×(گستره آلودگی) میزان مواجهه

پارامترهای شدت، احتمال وقوع و میزان مواجهه (گستره آلودگی) طبق جدول ۱ تا جدول ۳ تعیین می‌شود.

جدول ۱: امتیازدهی شدت ریسک

درجه تاثیر	اثر	ملاحظات
۱	هیچ	اثر جنبه ناچیز بوده والودگی محدود به محل فعالیت می‌شود.
۲	جزئی	موجب اتلاف منابع و انرژی شده وآلودگی ایجاد شده با هزینه کم قابل جبران است.
۳	کم	اثر جنبه کم بوده و در محدوده بلافصل مشاهده شده و غیرقابل جبران است.
۴	زیاد	اثرجنبه زیاد و درمحدوده‌های بلافصل و تحت تاثیرمستقیم قابل مشاهده بوده، شکایت همسایگان را در پی دارد و باید برای برطرف نمودن آن هزینه‌های زیادی کرد.
۵	جدی	تاثیرات بسیار خطرناک وسوء برمحیطزیست داشته، کارکرد آن را دگرگون نموده، قابل کنترل نیست واطلاعات کافی برای کنترل آن در دسترس نیست.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

جدول ۲: رتبه‌بندی احتمال وقوع ریسک

درجه تاثیر	اثر	شرایط بهره‌برداری
۱	غیرممکن/بسیار بعید	بالای ۱۰ سال
۳	رخداد با شانس ناچیز	هر پنج سال یک‌بار
۵	گاه و بیگاه رخ می‌دهد	هر سال یک‌بار
۷	اغلب رخ می‌دهد	هر سه ماه یک‌بار
۹	بسیار زیاد رخ می‌دهد	هر هفته یک‌بار

جدول ۳ : رتبه‌بندی گستره آلودگی ریسک‌ها

رتبه	توضیح
۱	قابل اغماض و چشم‌پوشی/در سطح همان نقطه (ایستگاه کاری)
۲	جنبه محیط‌زیستی در محدوده داخل پروژه بوده وانتشار آلودگی در محل و منبع تولید آلودگی
۳	جنبه محیط‌زیستی در محدوده داخل پروژه در سطح وسیعی منتشر گردیده و یا در نقاط کوچک به‌صورت پراکنده گسترده شده است/ در سطح پروژه
۴	جنبه محیط‌زیستی در محدوده فراتر از پروژه در منطقه کوچکی منتشرشده است / در سطح مناطق تحت تاثیر پروژه
۵	جنبه محیط‌زیستی درمحدوده فراتر از پروژه در سطح وسیعی منتشر شده است

تعیین حد اطمینان یا شاخص ریسک برای RPN بستگی به منطق، تجربه گذشته و شرایط سیستم دارد. به‌منظور تعیین حد اطمینان (حد بالا و پایین ریسک)، ابتدا میانگین ($\overline{RPN}$) و سپس انحراف معیار (σ_{RPN}) محاسبه می‌شود. مقدار حد بالا و پایین ریسک به ترتیب از معادله‌های زیر تعیین می‌گردد:

$$\text{High Risk} = \overline{RPN} + \sigma_{RPN}$$
$$\text{Low Risk} = \overline{RPN} - \sigma_{RPN}$$

ریسک‌های بین حد بالا و حد پایین ،سطح ریسک متوسط (Medium Risk) می‌باشند. سطوح بالا، متوسط و پایین محدوده ریسک به ترتیب در سطح غیرقابل پذیرش، سطح قابل تحمل و سطح قابل پذیرش قرار می‌گیرند.

پس از مرحله شناسایی ریسک‌ها در فرآیند مدیریت ریسک، به‌منظور تجزیه و تحلیل نظام‌مند این ریسک‌ها، از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده می‌شود. ماهیت این روش‌ها ناشی از نیاز به ارزیابی هم‌زمان چندین معیار متعارض یا مکمل توسط تصمیم گیرنده، برای دستیابی به یک هدف مشخص و گزینش بهینه‌ترین گزینه از میان مجموعه‌ای از گزینه‌های ممکن است. روش TOPSIS به دلیل ساختار ریاضی مستحکم و الگوریتم شفاف، کمترین میزان خطا و نقص را در فرآیند رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها از خود نشان می‌دهد (۲۰۲۰، Zulqarnain *et al.*). در این مدل که توسط Hwang and Yoon (۱۹۸۱) توسعه داده شده است تعداد m گزینه ($A_1, A_2, \ldots, A_m$) با تعداد n شاخص ($C_1, C_2, \ldots, C_n$) ارزیابی می‌شوند. اساس این تکنیک بر این مفهوم استوار است که گزینه بهینه، باید کمترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را با راه‌حل منفی داشته باشد. مراحل انجام مدل‌سازی مشتمل بر گام‌های زیر است:

- گام اول: نخستین مرحله، انجام فرآیند بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم است که با تقسیم هر مقدار از مولفه‌های ماتریس بر اندازه بردار مربوطه همان شاخص حاصل می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}}$$

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

- گام دوم: در این مرحله فرآیند وزن‌دهی به ماتریس بی‌مقیاس شده (نرمالیزه شده) انجام می‌شود به‌طوری که مجموع وزن‌های لحاظ شده برای هر شاخص باید برابر با یک باشد. بعد از این کار، ماتریس وزن‌دهی به ماتریس بی‌مقیاس‌سازی شده ضرب می‌شود.
- گام سوم: تعیین راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی در این گام انجام می‌شود. به عبارتی دیگر در این گام بسته به نوع شاخص و میزان اثرگذاری آن، راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی انتخاب می‌گردد. برای معیارهای سودمندی که دارای اثرگذاری مثبت روی هدف مسئله هستند (ایده‌آل مثبت) بیشینه‌ی داده‌های آن ستون و برای معیارهای غیرسودمند (ایده‌آل منفی) کمینه مقادیر مربوطه در نظر گرفته می‌شود.
- گام چهارم: در این گام، فاصله اقلیدسی هر یک از گزینه‌ها از ایده‌آل مثبت و منفی از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_i - v_j^+)^2}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_i - v_j^-)^2}$$

که در این روابط v نشان دهنده مولفه‌های ماتریس حاصل از ضریب ماتریس وزن‌دهی و ماتریس بی‌مقیاس‌سازی شده است.

- گام پنجم: تعیین نزدیکی نسبی هر گزینه به راه‌حل ایده‌آل در این گام انجام می‌گردد. بعد از تعیین فاصله‌های مثبت و منفی هر یک از گزینه‌ها، فاصله نسبی گزینه‌های تصمیم‌گیری از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$c_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}$$

گام ششم: این مرحله شامل رتبه‌بندی گزینه‌ها است. فاصله نسبی هر گزینه از بیشترین تا کمترین مقدار مرتب می‌شود و گزینه‌ای که دارای بیشترین فاصله نسبی نسبت به دیگر گزینه‌ها را داشته باشد، بالاترین رتبه را به خود اختصاص خواهد داد.

نتایج

جدول ۴ چارچوبی برای طبقه‌بندی سطوح ریسک بر اساس شاخص RPN ارائه می‌دهد. ریسک‌ها در سه سطح قابل پذیرش (کمتر از ۲)، قابل تحمل (بین ۲ تا ۹۵) و غیرقابل پذیرش (بیش از ۹۵) دسته‌بندی شده‌اند. این طبقه‌بندی مبتنی بر محاسبات آماری است و اولویت‌های مدیریتی را تعیین می‌کند. ریسک‌های سطح L نیاز به پایش دوره‌ای دارند. ریسک‌های M مستلزم اقدامات اصلاحی در بازه زمانی مشخص (مانند آموزش پرسنل یا نگهداری تجهیزات) هستند و ریسک‌های H بحرانی تلقی شده و مستلزم توقف فرآیند و مداخله فوری (مانند کنترل آلودگی‌های گسترده) می‌باشند. این سیستم اولویت‌بندی، تخصیص منابع را بهینه کرده و تمرکز را بر ریسک‌های حیاتی معطوف می‌کند.

جدول ۴: رتبه بندی سطوح ریسک جهت اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی و کنترلی

سطح ریسک	محدوده RPN	نمایش سطح ریسک
سطح قابل پذیرش (جزیی/پایین)	<۱	L
سطح قابل تحمل (متوسط/قابل مدیریت)	۲-۹۵	M
سطح غیرقابل پذیرش (بالا/بحرانی)	>۹۵	H

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

جدول ۵ شش ریسک اصلی در بخش‌های آشغال‌گیری، دانه‌گیری و پمپاژ را نشان می‌دهد که همگی در سطح متوسط (M) طبقه‌بندی شده‌اند (RPN بین ۶ تا ۴۲). بالاترین ریسک مربوط به ایجاد سر و صدا توسط الکتروموتورها (RPN=۴۲) است که ناشی از سرویس نامناسب و عدم کنترل دوره‌ای است و راهکار آن تعمیر پایه‌ها و نگهداری پیشگیرانه می‌باشد. ریسک‌های پخش فاضلاب (RPN=۱۰) و نشت از والوها (RPN=۲۰) عمدتاً از نظارت ناکافی و فرسودگی تجهیزات نشأت می‌گیرند که با نظارت مستمر و تعویض قطعات قابل مدیریت هستند. کم‌خطرترین مورد، تولید مواد جامد در دانه‌گیری (RPN=۶) است و با آموزش پرسنل و تخلیه بهینه کنترل می‌شود. الگوی مشترک در ۸۳ ٪ موارد، عدم کنترل روزانه/دوره‌ای است که نشان دهنده نیاز فوری به استقرار سیستم پایش مستمر و ارتقای نگهداری پیشگیرانه در این بخش است. تمامی راهکارهای پیشنهادی (مانند آموزش، نظارت و تعویض قطعات) کم‌هزینه بوده و از تشدید آلودگی خاک/آب یا افزایش مصرف انرژی جلوگیری می‌کنند.

جدول ۵ : ارزیابی ریسک های محیط‌زیستی و بهداشتی تصفیه خانه فاضلاب اهواز (یگان اول)

ردیف	فعالیت	جنبه محیط‌زیستی	عامل به‌وجود آورنده جنبه محیط‌زیستی	شدت	احتمال	گستره آلودگی	RPN	سطح ریسک	اقدام کنترلی
۱	آشغال‌گیری	تولید و پخش و تلنبار مواد زائد جامد	عدم کنترل روزانه	۱	۷	۲	۱۴	M	آموزش کارکنان و تخلیه مواد زائد بر حسب میزان تولیدی
۲	آشغال‌گیری	پخش فاضلاب به محیط پیرامون	عدم کنترل روزانه	۱	۵	۲	۱۰	M	نظارت بر عملکرد واحد
۳	دانه‌گیری	تولید و تلنبار مواد جامد	عدم کنترل روزانه	۱	۳	۲	۶	M	آموزش کارکنان و تخلیه مواد زائد بر حسب میزان تولیدی
۴	فعالیت الکتروموتورها	ایجاد سر و صدا	عدم کنترل دوره‌ای و سرویس نامناسب	۳	۷	۲	۴۲	M	سرویس مناسب و فیکس کردن پایه
۵	روغن‌کاری و گریس‌گاری	ریزش روغن در محیط	عدم کنترل دوره‌ای و سرویس نامناسب	۱	۷	۲	۱۴	M	بازرسی و تعمیر و برطرف کردن نشتی، تعویض واشر ها
۶	پمپاژ	نشت از والوها	عدم کارکرد صحیح ولوها و استفاده زیاد	۲	۵	۲	۲۰	M	تعویض ولوها و اورینگ

جدول ۶ ، هفت ریسک در فرآیند هوادهی بیولوژیکی تصفیه‌خانه اهواز را ارزیابی کرده که پنج مورد سطح متوسط (M) (RPN برابر با ۲۰ تا ۸۱) و یک مورد سطح بالا (H) (RPN=۱۷۵) دارند. ریسک بحرانی نخست ناشی از عدم فعالیت بیولوژیکی مناسب به دلیل نقص در تأمین مواد مغذی و شرایط رشد میکروارگانیسم‌هاست که پیامد آن تخلیه پساب غیراستاندارد به محیط‌زیست و راهکار آن کنترل دقیق

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

نسبت غذایی و هوادهی است. سایر ریسک‌های شاخص شامل ایجاد سر و صدای پمپ‌ها (RPN=۸۱) و انتشار ذرات بیولوژیکی (RPN=۴۲) هستند که هر دو ناشی از نگهداری نامناسب تجهیزات بوده و با بازرسی دوره‌ای فنی کاهش می‌یابند. الگوی غالب ریسک‌ها (۷۱٪) خرابی تجهیزات مکانیکی یا تنظیم نادرست پارامترهای عملیاتی است که ضرورت پایش مستمر کیفی پساب و بهینه‌سازی مصرف انرژی را آشکار می‌سازد.

جدول ۶ : ارزیابی ریسک‌های محیط‌زیستی و بهداشتی تصفیه خانه فاضلاب اهواز (مرحله تصفیه بیولوژیکی)

ردیف	فعالیت	جنبه محیط‌زیستی	عامل به‌وجود آورنده جنبه محیط‌زیستی	شدت	احتمال	گستره آلودگی	RPN	سطح ریسک	اقدام کنترلی
۷	پمپ های مربوط به هوادهی (تصفیه بیولوژیکی)	ایجاد سر و صدا	عدم کنترل دوره‌ای و سرویس نامناسب	۳	۹	۳	۸۱	M	بازرسی و تعمیر و برطرف کردن نشتی
۸	هوادهی (تصفیه بیولوژیکی)	نشت لجن از خطوط انتقال	نبود نظارت مستمر	۲	۷	۲	۲۸	M	بهینه کردن میزان و هوادهی
۹	هوادهی (تصفیه بیولوژیکی)	پخش ذرات بیولوژیکی در هوا	عدم تنظیم میزان هوادهی	۳	۷	۲	۴۲	M	بازرسی و تعمیر یا جایگزینی
۱۰	هوادهی (تصفیه بیولوژیکی)	عدم فعالیت بیولوژیکی مناسب	خرابی میکسرها به دلیل اتصالات و فرسودگی	۲	۵	۲	۲۰	M	کنترل میزان مواد غذایی و میزان هوادهی
۱۱	هوادهی (تصفیه بیولوژیکی)	عدم فعالیت بیولوژیکی مناسب	کارائی پایین میکروارگانیسم‌ها به دلیل عدم تامین نسبت غذایی و شرایط رشد	۵	۷	۵	۱۷۵	H	کنترل میزان مواد غذایی و میزان هوادهی
۱۲	هوادهی (تصفیه بیولوژیکی)	تولید گاز	فعالیت بیولوژیکی	۳	۷	۲	۴۲	M	کنترل میزان مواد غذایی و میزان هوادهی
۱۳	هوادهی (تصفیه بیولوژیکی)	مصرف انرژی الکتریکی	عدم کنترل دوره‌ای و سرویس نامناسب	۴	۵	۴	۸۰	M	بهینه کردن میزان هوادهی

جدول ۷ ، پنج ریسک در بخش‌های هوادهی بیولوژیکی، تصفیه لجن، گندزدایی و فعالیت اداری را نشان می‌دهد که چهار مورد سطح متوسط (M) (RPN بین ۲۰ تا ۶۳) و یک مورد سطح بالا (H) (RPN=۱۴۴) دارد. ریسک بحرانی مربوط به وجود ترکیبات سمی در لجن (ردیف ۱۶) است که ناشی از ورود پساب‌های صنعتی به تصفیه‌خانه بوده و پیامد آن آلودگی خاک و منابع آب زیرزمینی می‌باشد. راهکار فوری آن راه‌اندازی سیستم تصفیه لجن و جلوگیری از انتشار آن به محیط است. ریسک‌های شاخص دیگر شامل تولید بو در هوادهی (RPN=۶۳) به دلیل تنظیم نادرست اکسیژن و مواد مغذی، و روغن تعویضی تجهیزات (RPN=۴۲) تاشی از نبود سیستم جمع‌آوری است که به‌ترتیب با بهینه‌سازی عملیات هوادهی و بازیافت گریس کنترل می‌شوند. ریسک پسماندهای اداری (RPN=۲۰) اگرچه کم‌خطرترین

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

است، اما غفلت از آن می‌تواند به تجمع زباله‌های غیربهداشتی منجر شود. الگوی غالب (۸۰٪ ریسک‌ها) نقص در مدیریت عملیاتی (تنظیم پارامترها، نگهداری تجهیزات و نظارت لجن) را آشکار می‌کند که نیازمند پایش مستمر کیفی خروجی‌ها و استقرار سیستم جمع‌آوری پسماندهای ویژه است.

جدول ۷ : ارزیابی ریسک‌های محیط‌زیستی و بهداشتی تصفیه خانه فاضلاب اهواز (سایر فعالیت‌ها)

ردیف	فعالیت	جنبه محیط‌زیستی	عامل به‌وجود آورنده جنبه محیط‌زیستی	شدت	احتمال	گستره آلودگی	RPN	سطح ریسک	اقدام کنترلی
۱۴	هوادهی (تصفیه بیولوژیکی)	تولید بو	فعالیت بیولوژیکی نامناسب	۳	۷	۳	۶۳	M	بهینه کردن میزان هوادهی و مواد غذایی
۱۵	فعالیت الکتروموتورها و گیربکس‌ها در تصفیه بیولوژیکی	روغن و گریس تعویضی	ماهیت دستگاه و نبود وسیله جمع‌آوری	۳	۷	۲	۴۲	M	جمع آوری روغن و استفاده مجدد از گریش در سایر بخشها
۱۶	تصفیه و دفع لجن	وجود ترکیبات سمی و مواد آلی و معدنی درلجن	ماهیت لجن و دارا بودن ترکیبات سمی در پساب ورودی	۴	۹	۴	۱۴۴	H	راه اندازی سیستم تصفیه لجن موجود و جلوگیری از ورود هرگونه لجن به محیط
۱۷	گندزدایی پساب خروجی	ورود عوامل بیولوژیکی به محیط	عدم کارکرد صحیح	۱	۵	۴	۲۰	M	نظارت و بازرسی و کنترل مرتب پساب خروجی
۱۸	فعالیت در بخش اداری	تولید پسماند خانگی	عدم کنترل روزانه	۲	۵	۲	۲۰	M	صرفه جویی و استفاده از خدمات الکترونیک

جدول ۸ سه معیار برای ارزیابی ریسک‌ها در روش TOPSIS را نشان می‌دهد که همگی از نوع سودمندی (+) بوده و وزن یکسان ۰/۳۳۳دارند. این وزن‌دهی مساوی نشان‌دهنده اهمیت برابر معیارها در فرآیند تصمیم‌گیری است و به‌طور ضمنی بیانگر آن است که هیچ یک از پارامترهای شدت، احتمال وقوع یا گستره آلودگی بر دیگری ارجحیت ندارد. این رویکرد، بی‌طرفی در محاسبات را تضمین می‌کند و تضمین می‌کند که رتبه‌بندی نهایی ریسک‌ها صرفاً بر اساس مقادیر خام RPN و بدون اعمال سوگیری وزنی انجام شده است. چنین طراحی‌ای برای روش TOPSIS، قابلیت اطمینان نتایج را افزایش داده و امکان مقایسه‌پذیری مستقیم ریسک‌ها را فراهم می‌سازد، هرچند در شرایط واقعی ممکن است وزن معیارها بسته به سیاست‌های محیط‌زیستی خاص متفاوت باشد.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

جدول ۸ : مشخصات معیارهای روش TOPSIS

ردیف	نام معیار	نوع معیار	وزن معیار
۱	معیار ۱	+	۰/۳۳۳
۲	معیار ۲	+	۰/۳۳۳
۳	معیار ۳	+	۰/۳۳۳

جدول ۹ مراحل تبدیل داده‌های خام به ماتریس وزین را برای ۱۸ ریسک شناسایی‌شده در تصفیه‌خانه اهواز نمایش می‌دهد که شامل سه گام کلیدی است: ابتدا داده‌های خام (شدت، احتمال، گستره آلودگی) در ماتریس تصمیم‌گیری ثبت شده‌اند. سپس با استفاده از فرمول نرمال‌سازی اقلیدسی، مقادیر هر ستون به بازهٔ ۱–۰ تبدیل شده‌اند. در نهایت ماتریس نرمال‌شده با ضرب وزن‌های معیارها (هر کدام ۰/۳۳۳) به ماتریس وزین تبدیل گردیده است. الگوی قابل توجه در داده‌ها، تطابق کامل رتبه‌بندی ریسک‌ها قبل و بعد از نرمال‌سازی است. برای نمونه ریسک بحرانی ردیف ۱۱ (RPN=۱۷۵) همچنان با بالاترین مقادیر وزین (شدت: ۰/۱۴۵، گستره ۰/۱۴۱) به‌عنوان پرخطرترین مورد تایید می‌شود، درحالی‌که ریسک‌های کم‌اهمیت مانند ردیف ۳ (RPN=۶) با مقادیر وزین پایین (شدت: ۰/۰۲۹، گستره ۰/۰۵۶) در جایگاه آخر قرار می‌گیرند. این جدول به‌وضوح نشان می‌دهد که فرآیند نرمال‌سازی تغییری در اولویت ذاتی ریسک‌ها ایجاد نکرده است، بلکه صرفاً مقایسه‌پذیری آنها را از طریق یک مقیاس واحد ممکن ساخته است. همچنین تأثیر متضاد وزن‌های مساوی در کاهش اختلاف مقادیر وزین (اختلاف بیشینه کمینه از ۱۲۵ در داده‌های خام به ۰/۱۱۶ در داده‌های وزین رسیده) به وضوح قابل ردیابی است، که پیامدی مستقیم در فشردگی نتایج نهایی TOPSIS دارد.

جدول ۹ : مقادیر مولفه‌های ماتریس روش TOPSIS

گزینه	ماتریس تصمیم‌گیری TOPSIS			ماتریس نرمالیزه شده TOPSIS			ماتریس نرمالیزه شده وزین TOPSIS		
	معیار			معیار			معیار		
۱	۱	۷	۲	۰/۰۸۷	۰/۲۵۴	۰/۱۷	۰/۰۲۹	۰/۰۸۴	۰/۰۵۶
۲	۱	۵	۲	۰/۰۸۷	۰/۱۸۱	۰/۱۷	۰/۰۲۹	۰/۰۶	۰/۰۵۶
۳	۱	۳	۲	۰/۰۸۷	۰/۱۰۹	۰/۱۷	۰/۰۲۹	۰/۰۳۶	۰/۰۵۶
۴	۳	۷	۲	۰/۲۶۱	۰/۲۵۴	۰/۱۷	۰/۰۸۷	۰/۰۸۴	۰/۰۵۶
۵	۱	۷	۲	۰/۰۸۷	۰/۲۵۴	۰/۱۷	۰/۰۲۹	۰/۰۸۴	۰/۰۵۶
۶	۲	۵	۲	۰/۱۷۴	۰/۱۸۱	۰/۱۷	۰/۰۵۸	۰/۰۶	۰/۰۵۶
۷	۳	۹	۳	۰/۲۶۱	۰/۳۲۶	۰/۲۵۴	۰/۰۸۷	۰/۱۰۹	۰/۰۸۵
۸	۲	۷	۲	۰/۱۷۴	۰/۲۵۴	۰/۱۷	۰/۰۵۸	۰/۰۸۴	۰/۰۵۶
۹	۳	۷	۲	۰/۲۶۱	۰/۲۵۴	۰/۱۷	۰/۰۸۷	۰/۰۸۴	۰/۰۵۶
۱۰	۲	۵	۲	۰/۱۷۴	۰/۱۸۱	۰/۱۷	۰/۰۵۸	۰/۰۶	۰/۰۵۶
۱۱	۵	۷	۵	۰/۴۳۵	۰/۲۵۴	۰/۴۲۴	۰/۱۴۵	۰/۰۸۴	۰/۱۴۱
۱۲	۳	۷	۲	۰/۲۶۱	۰/۲۵۴	۰/۱۷	۰/۰۸۷	۰/۰۸۴	۰/۰۵۶
۱۳	۴	۵	۴	۰/۳۴۸	۰/۱۸۱	۰/۳۳۹	۰/۱۱۶	۰/۰۶	۰/۱۱۳
۱۴	۳	۷	۳	۰/۲۶۱	۰/۲۵۴	۰/۲۵۴	۰/۰۸۷	۰/۰۸۴	۰/۰۸۵
۱۵	۳	۷	۲	۰/۲۶۱	۰/۲۵۴	۰/۱۷	۰/۰۸۷	۰/۰۸۴	۰/۰۵۶
۱۶	۴	۹	۴	۰/۳۴۸	۰/۳۲۶	۰/۳۳۹	۰/۱۱۶	۰/۱۰۹	۰/۱۱۳
۱۷	۱	۵	۴	۰/۰۸۷	۰/۱۸۱	۰/۳۳۹	۰/۰۲۹	۰/۰۶۰	۰/۱۱۳
۱۸	۲	۵	۲	۰/۱۷۴	۰/۱۸۱	۰/۱۷	۰/۰۵۸	۰/۰۶	۰/۰۵۶

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

جدول ۱۰، نقاط مرجع ایده‌آل مثبت (A^+) و ایده‌آل منفی (A^-) را برای سه معیار شدت، احتمال وقوع و گستره آلودگی تعیین می‌کند که از ماتریس وزین **جدول ۹** استخراج شده‌اند. ایده‌آل مثبت (۰/۱۴۵ برای شدت، ۰/۱۰۹ برای احتمال، ۰/۱۴۱ برای گستره) نشان دهنده بالاترین مقادیر وزینِ هر معیار در میان ریسک‌ها است که متناظر با بدترین حالت ممکن از نظر تأثیر محیطزیستی می‌باشد (مثلاً شدت ۵ در ریسک ردیف ۱۱). در مقابل، ایده‌آل منفی (۰/۰۲۹ برای شدت، ۰/۰۳۶ برای احتمال، ۰/۰۵۶ برای گستره) پایین‌ترین مقادیر وزین را نشان می‌دهد که بیانگر کم‌خطرترین شرایط است (مانند ریسک ردیف ۳). این مقادیر دو نکته کلیدی را آشکار می‌سازد: (۱) شاخص شدت بیشترین اختلاف بین ایده‌آل مثبت و منفی (۰/۱۱۶) را دارد که نشان دهنده تنوع گسترده پیامدهای ریسک‌ها از نظر شدت تخریب محیطزیستی است. (۲) شاخص احتمال وقوع کم‌ترین اختلاف (۰/۰۷۳) را نمایش می‌دهد که حاکی از تمرکز بیشتر ریسک‌ها در سطوح میانی احتمال رخداد (امتیاز ۵ تا ۷) می‌باشد. این نقاط مرجع، مبنای محاسبه فاصله اقلیدسی هر ریسک از بهترین و بدترین حالت در جدول ۱۱ هستند و به‌طور مستقیم تعیین‌کننده رتبه نهایی ریسک‌ها خواهند بود.

جدول ۱۰: مقادیر ایده‌آل مثبت و منفی روش TOPSIS

نام معیار	ایده‌آل مثبت	ایده‌آل منفی
معیار ۱	۰/۱۴۵	۰/۰۲۹
معیار ۲	۰/۱۰۹	۰/۰۳۶
معیار ۳	۰/۱۴۱	۰/۰۵۶

جدول ۱۱ فاصله اقلیدسی هر یک از ۱۸ گزینه (ریسک) را از راه‌حل ایده‌آل مثبت d_i^+ و منفی d_i^- محاسبه کرده که مبنای تعیین شاخص نزدیکی نسبی C_i در

جدول ۱۲ با محاسبه شاخص C_i رتبه‌بندی نهایی ۱۸ ریسک را تعیین می‌کند که گزینه ۱۱ (عدم فعالیت بیولوژیکی مناسب) با C_i=۰/۸۶۳ رتبه نخست پرخطری را به خود اختصاص داده است، که با RPN بالای آن (۱۷۵) در **جدول ۶** و موقعیت بسیار نزدیک به ایده‌آل مثبت (d_i^+=۰/۰۲۴) در **جدول ۱۱** همسو می‌باشد و نشان دهنده ریسک فاجعه‌بار محیطزیستی ناشی از تخلیه پساب غیراستاندارد است. گزینه ۱۶ (ترکیبات سمی در لجن) با C_i=۰/۷۵۸ در رتبه دوم قرار گرفته که تأییدی بر خطرات نشت فلزات سنگین و آلاینده‌های پایدار به خاک و آب‌های زیرزمینی است، هرچند RPN آن (۱۴۴) از گزینه ۱۱ کمتر بود، اما حساسیت روش TOPSIS به پارامتر گستره آلودگی (امتیاز ۴) موجب ارتقای رتبه آن شده است. گزینه ۱۳ (مصرف انرژی الکتریکی در هوادهی) با C_i=۰/۶۲۸ رتبه سوم را کسب کرده که بیانگر اهمیت پیامدهای غیرمستقیم ریسک‌ها مانند اتلاف منابع در کنار آلودگی مستقیم است. یک ناهنجاری قابل توجه، سقوط رتبه گزینه ۷ (سروصدای پمپ‌ها) از RPN=۸۱ به رتبه چهارم (C_i=۰/۵۴۵) است که علت آن وزن کمتر پارامتر شدت (۳) نسبت به ریسک‌های آلاینده‌های آبی است و نشان می‌دهد TOPSIS برخلاف EFMEA، ریسک‌های با پیامدهای گسترده‌تر محیطزیستی را حتی با RPN متوسط، در اولویت بالاتر قرار می‌دهد. گزینه‌های کم‌خطر مانند ردیف ۳ (تولید مواد جامد) با C_i=۰ و ردیف ۲ (پخش فاضلاب) با C_i=۰/۱۳۷ در انتهای جدول جای گرفته‌اند که با مقادیر RPN پایین (۶ و ۱۰) سازگار است. اختلاف فاحش بین C_i ریسک اول و آخر (۰/۸۶۳ در مقابل ۰) تأیید می‌کند که روش ترکیبی EFMEA-TOPSIS تمایز دقیق‌تری بین سطوح ریسک ایجاد کرده و از محدودیت‌های RPN (که ممکن است ریسک‌های با پارامترهای متضاد را یکسان جلوه دهد) عبور نموده است. این رتبه‌بندی به مدیران تصفیه‌خانه اجازه می‌دهد تا منابع محدود را ابتدا به دو ریسک نخست (فعالیت بیولوژیکی و لجن سمی) اختصاص دهند، سپس به بهینه‌سازی مصرف انرژی (گزینه ۱۳) و سرانجام به ریسک‌های عملیاتی مانند سر و صدا بپردازند.

جدول ۱۲ است. گزینه ۱۱ (عدم فعالیت بیولوژیکی مناسب) با کمترین فاصله از ایده‌آل مثبت (d_i^+=۰/۰۲۴) و بیشترین فاصله از ایده‌آل منفی (d_i^-=۰/۱۵۱) به وضوح به‌عنوان پرریسک‌ترین حالت شناسایی می‌شود، چرا که مقادیر شدت (۵)، احتمال (۷) و گستره آلودگی (۵) آن

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

همگی نزدیک به بدترین سناریوی ممکن هستند. در مقابل، گزینه ۳ (تولید مواد جامد در دانه‌گیری) با (d_i^-=۰/۰) (یعنی منطبق بر ایده‌آل منفی) و (d_i^+=۰/۱۶۱) کم‌خطرترین ریسک است که با RPN پایین (۶) در جدول ۵ همخوانی دارد. گزینه ۱۶ (ترکیبات سمی در لجن) با (d_i^+=۰/۰۴) و (d_i^-=۰/۱۲۶) جایگاه دوم پرخطری را تأیید می‌کند که ناشی از گستره آلودگی بالا (۴) و احتمال وقوع بحرانی (۹) است. یک نکته متضاد در گزینه ۷ (سر و صدای پمپ‌ها) دیده می‌شود. با وجود RPN بالا (۸۱)، فاصله آن از ایده‌آل مثبت (d_i^+=۰/۰۸۱) به مراتب کمتر از گزینه ۱۱ نیست، زیرا پارامتر شدت (۳) تأثیر کمتری نسبت به ریسک‌های محیط‌زیستی مستقیم دارد. الگوی کلی نشان می‌دهد ریسک‌های با پیامدهای گسترده محیط‌زیستی (مانند آلودگی آب/خاک) حتی با RPN متوسط (مثل گزینه ۱۶ با RPN=۱۴۴ (در **جدول ۷**) در روش TOPSIS رتبه بالاتری کسب می‌کنند، که بر حساسیت این روش به توزیع غیریکنواخت پارامترها تأکید دارد. همچنین اختلاف کم بین d_i^+ و d_i^- در گزینه‌هایی مانند ۱۴ نشان دهنده موقعیت‌های خطر خاکستری است که نیازمند تحلیل دقیق‌تر می‌باشند.

جدول ۱۱: فاصله تا ایده‌آل مثبت و منفی روش TOPSIS

گزینه	فاصله ایده‌آل مثبت	فاصله ایده‌آل منفی
۱	۰/۱۴۶	۰/۰۴۸
۲	۰/۱۵۱	۰/۰۲۴
۳	۰/۱۶۱	۰/۰۲۰
۴	۰/۱۰۵	۰/۰۷۵
۵	۰/۱۴۶	۰/۰۴۸
۶	۰/۱۳۱	۰/۰۳۸
۷	۰/۰۸۱	۰/۰۹۷
۸	۰/۱۲۴	۰/۰۵۶
۹	۰/۱۰۵	۰/۰۷۵
۱۰	۰/۱۳۱	۰/۰۳۸
۱۱	۰/۰۲۴	۰/۱۵۱
۱۲	۰/۱۰۵	۰/۰۷۵
۱۳	۰/۰۶۳	۰/۱۰۶
۱۴	۰/۰۸۴	۰/۰۸۱
۱۵	۰/۱۰۵	۰/۰۷۵
۱۶	۰/۰۴	۰/۱۲۶
۱۷	۰/۱۲۹	۰/۰۶۱
۱۸	۰/۱۳۱	۰/۰۳۸

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

جدول ۱۲ با محاسبه شاخص C_i رتبه‌بندی نهایی ۱۸ ریسک را تعیین می‌کند که گزینه ۱۱ (عدم فعالیت بیولوژیکی مناسب) با C_i=۰/۸۶۳ رتبه نخست پرخطری را به خود اختصاص داده است، که با RPN بالای آن (۱۷۵) در **جدول ۶** و موقعیت بسیار نزدیک به ایده‌آل مثبت (d_i^+=۰/۰۲۴) در **جدول ۱۱** همسو می‌باشد و نشان دهنده ریسک فاجعه‌بار محیطزیستی ناشی از تخلیه پساب غیراستاندارد است. گزینه ۱۶ (ترکیبات سمی در لجن) با C_i=۰/۷۵۸ در رتبه دوم قرار گرفته که تأییدی بر خطرات نشت فلزات سنگین و آلاینده‌های پایدار به خاک و آب‌های زیرزمینی است، هرچند RPN آن (۱۴۴) از گزینه ۱۱ کمتر بود، اما حساسیت روش TOPSIS به پارامتر گستره آلودگی (امتیاز ۴) موجب ارتقای رتبه آن شده است. گزینه ۱۳ (مصرف انرژی الکتریکی در هوادهی) با C_i=۰/۶۲۸ رتبه سوم را کسب کرده که بیانگر اهمیت پیامدهای غیرمستقیم ریسک‌ها مانند اتلاف منابع در کنار آلودگی مستقیم است. یک ناهنجاری قابل توجه، سقوط رتبه گزینه ۷ (سروصدای پمپ‌ها) از RPN=۸۱ به رتبه چهارم (C_i=۰/۵۴۵) است که علت آن وزن کمتر پارامتر شدت (۳) نسبت به ریسک‌های آلاینده‌های آبی است و نشان می‌دهد TOPSIS برخلاف EFMEA، ریسک‌های با پیامدهای گسترده‌تر محیطزیستی را حتی با RPN متوسط، در اولویت بالاتر قرار می‌دهد. گزینه‌های کم‌خطر مانند ردیف ۳ (تولید مواد جامد) با C_i=۰ و ردیف ۲ (پخش فاضلاب) با C_i=۰/۱۳۷ در انتهای جدول جای گرفته‌اند که با مقادیر RPN پایین (۶ و ۱۰) سازگار است. اختلاف فاحش بین C_i ریسک اول و آخر (۰/۸۶۳ در مقابل ۰) تأیید می‌کند که روش ترکیبی EFMEA-TOPSIS تمایز دقیق‌تری بین سطوح ریسک ایجاد کرده و از محدودیت‌های RPN (که ممکن است ریسک‌های با پارامترهای متضاد را یکسان جلوه دهد) عبور نموده است. این رتبه‌بندی به مدیران تصفیه‌خانه اجازه می‌دهد تا منابع محدود را ابتدا به دو ریسک نخست (فعالیت بیولوژیکی و لجن سمی) اختصاص دهند، سپس به بهینه‌سازی مصرف انرژی (گزینه ۱۳) و سرانجام به ریسک‌های عملیاتی مانند سر و صدا بپردازند.

جدول ۱۲: مقادیر C_I و رتبه‌بندی گزینه‌ها

گزینه	C_I	رتبه‌بندی
۱	۰/۲۴۹	۹
۲	۰/۱۳۷	۱۱
۳	۰/۱۱۲	۱۲
۴	۰/۴۱۷	۶
۵	۰/۲۴۹	۹
۶	۰/۲۲۴	۱۰
۷	۰/۵۴۵	۴
۸	۰/۳۱۳	۸
۹	۰/۴۱۷	۶
۱۰	۰/۲۲۴	۱۰
۱۱	۰/۸۶۳	۱
۱۲	۰/۴۱۷	۶
۱۳	۰/۶۲۸	۳
۱۴	۰/۴۸۸	۵
۱۵	۰/۴۱۷	۶
۱۶	۰/۷۵۸	۲
۱۷	۰/۳۲۳	۷
۱۸	۰/۲۲۴	۱۰

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه با بهره‌گیری از چارچوب ترکیبی نوآورانه EFMEA-TOPSIS، به ارزیابی جامع ریسک‌های محیط‌زیستی و بهداشتی تصفیه‌خانه فاضلاب شرق اهواز پرداخت. یافته‌های ما نشان داد که دو ریسک عدم فعالیت بیولوژیکی مناسب (RPN = ۱۷۵) و وجود ترکیبات سمی در لجن (RPN = ۱۴۴) در بالاترین سطح ریسک (غیرقابل پذیرش) قرار دارند. این نتیجه با مطالعات پیشین در سایر تصفیه‌خانه‌ها که بر ریسک‌های مرتبط با اختلال در فرآیندهای بیولوژیکی و مدیریت لجن تأکید داشته‌اند (مانند مطالعه جوزی و سلیمی، ۱۳۹۵؛ و جوری و همکاران، ۱۳۹۷) هم‌سو است. با این حال، نوآوری اصلی این تحقیق در شناسایی دقیق‌تر اولویت‌های ریسک با ادغام روش TOPSIS در کنار EFMEA متجلی شد. کاربرد روش TOPSIS شکاف‌های تحلیلی روش سنتی محاسبه RPN را پوشش داد و منجر به یک رتبه‌بندی کیفی‌تر شد. به‌طور مشخص، اگرچه ریسک مصرف انرژی الکتریکی (RPN = ۸۰) در روش EFMEA در رده متوسط (M) طبقه‌بندی شده بود، اما در رتبه‌بندی TOPSIS به دلیل شدت تأثیر بالا (امتیاز ۴) و گستره آلودگی وسیع (امتیاز ۴)، به جایگاه سوم صعود کرد. این یافته نشان دهنده حساسیت روش ترکیبی ما به پارامترهای کیفی و اثرات سیستمی است، در حالی‌که EFMEA صرفاً بر حاصل‌ضرب کمی پارامترها متمرکز می‌شود و ممکن است از اثرات غیرخطی غافل بماند. از سوی دیگر، ریسک ایجاد سر و صدا توسط پمپ‌ها (RPN = ۸۱) با وجود مقدار RPN بالا، به دلیل شدت تأثیر پایین‌تر (امتیاز ۳) که عمدتاً بر محیط کارگری موضعی تأثیر می‌گذارد و نه کل اکوسیستم، در رتبه چهارم قرار گرفت. این نتیجه به وضوح برتری چارچوب پیشنهادی را در اولویت‌بندی ریسک‌هایی با پیامدهای محیط‌زیستی گسترده‌تر و فرامرزی نشان می‌دهد و یافته‌های مطالعاتی مانند درویشی و همکاران (۱۳۹۸) که بر تلفیق روش‌های چندمعیاره تأکید داشتند را تأیید می‌کند. از منظر مدیریتی، یافته‌های این تحقیق پیامدهای عملی مهمی دارد. پیشنهادهای اجرایی این مطالعه شامل موارد زیر است:

- ✓ اقدامات فوری: تمرکز بلافصل منابع بر کنترل دو ریسک بحرانی نخست (اختلال در فعالیت بیولوژیکی و لجن سمی) از طریق نصب سیستم پایش آنلاین پارامترهای کیفی پساب (مانند COD, BOD, DO) و نسبت غذایی و همچنین راه‌اندازی واحد پیشرفته تصفیه لجن با قابلیت جداسازی فلزات سنگین و دفن ایمن پسماندهای سمّی.
- ✓ بهینه‌سازی فرآیند: اجرای برنامه‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی (رتبه سوم) با استفاده از هواده‌های با راندمان بالا و استقرار سیستم‌های کنترل هوشمند (مانند PLC) برای تنظیم خودکار هوادهی متناسب با بار ورودی.
- ✓ نگهداری پیشگیرانه: استقرار برنامه منظم نگهداری و بازرسی پیشگیرانه (Preventive Maintenance) برای کاهش ریسک‌های عملیاتی با RPN متوسط ولی پرتکرار، نظیر سر و صدا و نشت روغن.
- ✓ آموزش و توانمندسازی: برگزاری دوره‌های آموزشی مداوم برای پرسنل در زمینه مدیریت پسماندهای ویژه، نظارت بر پارامترهای فرآیندی و پاسخ به شرایط اضطراری.

به‌عنوان محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به تمرکز بر یک تصفیه‌خانه خاص و عدم بررسی ریسک‌های خارج از محدوده عملیاتی (مانند تأثیر تغییرات اقلیمی یا حوادث طبیعی) اشاره کرد. پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی با به‌کارگیری روش‌های دینامیک (مانند شبیه‌سازی مونت‌کارلو) عدم قطعیت در ارزیابی پارامترهای ریسک را کاهش دهند و همچنین قابلیت تعمیم چارچوب EFMEA-TOPSIS ارائه شده را در سایر تصفیه‌خانه‌ها و زیرساخت‌های حیاتی مورد آزمون قرار دهند. در نتیجه، این پژوهش نه تنها دو ریسک بحرانی در تصفیه‌خانه شرق اهواز را شناسایی کرد، بلکه اثربخشی یک رویکرد ترکیبی نظام‌مند را به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای اولویت‌بندی ریسک‌های پیچیده محیط‌زیستی تأیید نمود. این چارچوب می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری برای مدیران و برنامه‌ریزان در جهت تخصیص بهینه منابع و ارتقای پایداری عملیات قرار گیرد.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

منابع

ابراهیمیان دهاقانی، م. و خادمی‌مال‌امیری، م.ا. ۱۳۹۰. ارزیابی و الویت‌بندی ریسک واحد مصارف صنعتی تصفیه‌خانه آب اهواز با استفاده از روش تطبیقی تصمیم‌گیری چند معیاره و TOPSIS با مدل HAZOP و ارائه راهکارهای کنترل و بهبود. پنجمین همایش ملی بحران‌های زیست‌محیطی ایران و راهکارهای بهبود آنها، اهواز، ایران.

بالیست، ج.، ملک‌محمدی، ب.، چهرآذر، ف. و معرب، ی. ۱۳۹۷. ارزیابی ریسک‌های محیطزیستی واحد بهره‌برداری پالایشگاه نفت خام گچساران با تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تجزیه و تحلیل حالات خرابی و شکست محیطزیستی. نشریه علوم و تکنولوژی محیطزیست، جلد ۲۰(۱)، صفحات ۱۷۸-۱۶۵.

بیژن‌زاده، پ.، ورشوساز، ک. و اگدرنژاد، ا. ۱۴۰۲. ارزیابی ریسک‌های زیست‌محیطی و فنی در پروژه احداث تصفیه‌خانه فاضلاب غرب اهواز با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره. نشریه پایداری، توسعه و محیطزیست، جلد ۴(۱۵)، صفحات ۹۵-۷۵.

پارساجو، ح.، نصرآبادی، ت.، ۱۴۰۰. ارزیابی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و مخاطرات بهداشتی ناشی از راهبری تصفیه‌خانه فاضلاب شهر سرعین. فصلنامه محیط شناسی، جلد ۴۷(۱)، صفحات ۶۴-۴۵.

تابش، م.، بدلی‌باوانی، ا.، عسگریان، م. و روزبهانی، ع. ۱۳۹۳. تدوین الگوریتمی برای تحلیل و مدیریت ریسک تصفیه‌خانه‌های فاضلاب. مجله تحقیقات منابع آب ایران، جلد ۱۰(۳)، صفحه ۵۳.

جوزی، س.ع. و میرسلیمی، س.م. ۱۳۹۵. مدیریت ریسک زیست‌محیطی معدن سنگ آهن ماد کانسار، شهرستان خرمبید با استفاده از روش‌های تلفیقی EFMEAو ویلیام فاین. نشریه مهندسی منابع معدنی، جلد ۱(۱)، صفحات ۲۷-۱۹.

جوزی، س.ع.، عطایی، ص. و رضایان، س. ۱۳۹۷. ارزیابی ریسک محیطزیستی مجتمع کشت و صنعت شهدای خلیج فارس با استفاده از روش TOPEFMEA. نشریه انسان و محیط زیست، جلد ۱۶(۴)، صفحات ۷۵-۵۷.

درویشی، س.، جوزی، س.ع.، ملماسی، س. و رضایان، س. ۱۳۹۸. ارائه مدل نوین ارزیابی ریسک محیط زیستی سدها در مرحله ساختمانی با استفاده از روش های تلفیقی EFMEA & VIKOR (مطالعه موردی سد بالارود خوزستان). نشریه آمایش فضا و ژئوماتیک، جلد ۳۳(۴)، صفحات ۶۱-۳۷.

رادسا، م.، نوروزی، م. و رستمی، ا. ۱۴۰۳. ارزیابی و مدیریت ریسک محیطزیستی در دکل‌های حفاری دریایی در حوزه خلیج فارس با روش EFMEA . نشریه محیطزیست طبیعی، جلد ۷۷(۱)، صفحات ۴۱-۲۹.

ستوده‌مرام، ک. ۱۳۹۸. ارزیابی و مدیریت ریسک ایمنی، بهداشت و زیست‌محیطی تصفیه‌خانه فاضلاب ارومیه با استفاده از روشFMEA . نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب، جلد ۴(۱)، صفحات ۳۳-۲۳.

محسن‌زاده هدشی، ح.، رزم ارا، ح.، دشتی، ع.، روستا، ه.، نخعی، ه.، توکلی امینیان، ث.، روحبخش، م. و فضایلی ترابی، ع. ۱۴۰۰. ارزیابی ریسک در واحدهای کلرزنی تصفیه آب و فاضلاب به روش FMEA . نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب، جلد ۵(۴)، صفحات ۴۰-۳۱.

نوحانی، ا. و چهارلنگ بدیل، ا. ۱۴۰۰. ارزیابی ریسک‌های محیطزیستی پروژه ساختمانی با استفاده از روش EFMEA با تاکید بر ریسک‌های موثر بر آلودگی آب. نشریه مهندسی آب، جلد ۹ (۱)، صفحات ۷۲-۵۸.

نیکو، م.ر.، کراچیان، ر. و خرمشکوه، ن. ۱۳۹۷. یک مدل تحلیل ریسک به منظور مدیریت ایمنی در تصفیه‌خانه‌های آب (مطالعه موردی: تصفیه خانه آب سلمان فارسی). مجله تحقیقات منابع آب ایران، جلد ۱۴(۲)، صفحات ۲۰۶-۱۹۵.

هادیان، س.م.، مهردادی، ن. و نبی بیدهندی، غ.ر. ۱۴۰۴. ارائه مدل مناسب جهت مکان‌یابی احداث تصفیه‌خانه فاضلاب در استان مازندران با استفاده از روش‌هایTOPSIS ، ANP و AHP . نشریه محیط زیست و توسعه، جلد ۴(۲۸)، صفحات ۳۴-۱۷۷.

Carneiro, R. N., Damiao, S. and Benoliel, M. J. 2015. Water safety plans at EPAL's water supply system-tool to prioritize investments and mitigation actions. Water Science and Technology: Water Supply, 15(5): 1106-1114.

Heller, S. 2006. Managing Industrial Risk-having a Tasted and Proven System to Prevent and Assess Risk. Hazardous Material. 130(17): 58-63

Hwang, C. L. and Yoon, K. 1981. Methods for Multiple Attribute Decision Making. In: Multiple Attribute Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 58-191

Lambin, E.F. and Geist, H. 2006. Land-use and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts. Springer. Germany.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

Liu, K. 2024. Environment Risk Assessment of Healthcare Waste Using Ensemble Learning Technique-Based EFMEA. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 31(6): 2450022.

Severi, C. A., Pérez, V., Pascual, C., Muñoz, R. and Lebrero, R. 2022. Identification of critical operational hazards in a biogas upgrading pilot plant through a multi-criteria decision-making and FTOPSIS-HAZOP approach. Chemosphere, 307: 135845.

Wu, K. and Zhang, L. 2014. Progress in the development of environmental risk assessment as a tool for the decision-making process. Service Science and Management, 7: 131-143.

Zulqarnain, R. M., Saeed, M., Ahmad, N., Dayan, F. and Ahmad, B. 2020. Application of TOPSIS method for decision making. Int. J. Sci. Res. in Mathematical and Statistical Sciences 7(2): 76-81.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

Mapping Environmental Crises in the Eastern Treatment Plant of Ahvaz Using a Hybrid Framework

Morteza Malek Zangeneh [1]
Aslan Egdernezhad [2*]
Reza Jalilzadeh Yengejeh [3]

1. Department of Civil Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
2. Department of Water Sciences and Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
3. Department of Environmental Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

***Corresponding author:**
a_eigder@iau.ac.ir

Received date: **February/11/2025**
Accepted date: **May/08/2025**

Abstract

Wastewater treatment plants (WWTPs), as critical infrastructure, play a vital role in protecting water resources, preventing groundwater contamination, and promoting public health. This study focuses on the East Ahvaz WWTP (with a capacity of 112,000 m^3/day) and aims to identify environmental and health risks in the year 2024 (1403 SH) using a novel hybrid EFMEA-TOPSIS framework. In the first phase, the parameters of Severity (S), Occurrence (O), and Exposure/Extent of Contamination (E) were quantified for 18 operational risks through field surveys and the consensus of 10 experts, followed by the calculation of the Risk Priority Number (RPN). Subsequently, a comprehensive ranking was conducted by converting these three parameters into weighted criteria within the TOPSIS model (assigning equal weights of 0.333) and determining ideal solutions based on empirical data. Numerical results indicated that two risks—disruption of biological activity (RPN = 175) and the presence of toxic compounds in sludge (RPN = 144)—are classified at an unacceptable (High) level. The first risk stems from deficiencies in nutrient supply and aeration adjustment, while the second is associated with the influx of industrial effluents and the subsequent leaching of pollutants into soil and groundwater. Furthermore, the TOPSIS ranking confirmed that electrical energy consumption (RPN = 80), despite its moderate RPN value, ranks third due to the breadth of its impact. Proposed mitigation strategies include the installation of online monitoring systems for effluent quality parameters, smart adjustment of the food-to-microorganism (F/M) ratio, and the commissioning of a sludge treatment unit capable of heavy metal separation and secure disposal of hazardous waste.

Keywords: Environmental Crises Assessment; Ahvaz Wastewater Treatment Plant; EFMEA-TOPSIS Hybrid Approach; Multi-Criteria Decision Making; Hazardous Waste Management

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]