

انتخاب فرایند بهینه‌ی تصفیه‌ی فاضلاب یک مجتمع تحقیقاتی صنعتی به روش (AHP)

پرویز جعفری فشارکی*: استادیار دانشگاه مالک اشتر Parvizjafari2006@yahoo.com

محسن فروغی زاده: استادیار دانشگاه مالک اشتر

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۹۸/۹/۲۶

چکیده

پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به منزله‌ی یک منبع آب غیرمتعارف می‌تواند در بسیاری از مصارف مورد استفاده قرار گیرد و برداشت بی‌رویه‌ی منابع آب با کیفیت را محدود نماید. پیش از طراحی و اجرای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب باید با استفاده از روش‌های مبتنی بر فرضیات علمی مستدل، فرایند تصفیه‌ی مناسب را تعیین نمود. هدف از این تحقیق انتخاب فرایند بهینه‌ی تصفیه‌ی فاضلاب برای طراحی در یک مجتمع تحقیقاتی - صنعتی با استفاده از روش‌های تحلیل چند معیاره است. در این پژوهش از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای انتخاب فرایند بهینه‌ی تصفیه‌ی فاضلاب انسانی این مجتمع استفاده شده است و فرایندهای سپتیک تانک، برکه‌ی تثبیت، لاگون هواده‌ی، لجن فعال، صافی چکنده و MBBR از نظر معیارهای فنی - اجرایی، اقتصادی و نیز محیط‌زیستی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که فرایندهای MBBR، لجن فعال، صافی چکنده، سپتیک تانک، لاگون هواده‌ی و برکه‌ی تثبیت نیز به ترتیب با وزن‌های نهایی ۰/۲۸۰، ۰/۱۹۷، ۰/۱۶۲، ۰/۱۳۳، ۰/۱۱۶ و ۰/۱۱۲ در رتبه‌های اول تا ششم قرار گرفتند. در تحلیل حساسیت تحلیل سلسله‌مراتبی مشخص شد که با تغییر در وزن معیارها تغییر چندانی در نتیجه‌ی نهایی ایجاد نمی‌گردد و تقریباً در تمامی حالت‌ها فرایند MBBR در رتبه‌ی نخست قرار گرفته است مگر در حالتی که وزن‌های نسبی معیارهای اقتصادی و محیط‌زیستی جابه‌جا شوند که در این حالت گزینه‌ی سپتیک تانک با اختلاف اندکی بالاتر از MBBR قرار می‌گیرد. در نهایت نتیجه‌گیری این پژوهش نشان داد که روش MBBR بالاترین اولویت را از آن خود کرده است.

واژه‌های کلیدی: تصفیه‌ی فاضلاب، انتخاب گزینه‌ی بهینه، روش‌های تحلیل چند معیاره، تحلیل سلسله‌مراتبی

Selecting the optimal wastewater treatment process in an industrial research complex using AHP method

parviz jafari fesharaki^{*1}, mohsen forughizadeh²

Abstract

Effluent of wastewater treatment plants as an alternative water source in many applications and restrict the uncontrolled exploitation of high-quality water resources. Before the design and implementation of wastewater treatment plants, you should use the methods based on scientific reasonable assumptions to determine an appropriate process of treatment. The aim of this study is to select the optimal wastewater treatment process in an industrial research complex using multi-criteria analysis. The present study used the Analytic Hierarchy Process (AHP) to select the optimal process of human's wastewater treatment plant and processes such as Septic tanks, stabilization ponds, aerated lagoons, activated sludge, trickling filter and MBBR were assessed technically, operationally, economically and environmentally. The results showed that the MBBR process, activated sludge, trickling filter, septic tanks, aerated lagoons and stabilization ponds with final weights of 0.280, 0.197, 0.162, 0.133, 0.116 and 0.112 were ranked first to sixth respectively. The sensitivity analysis also showed that the changes in weight of AHP criteria don't show significant changes in the final result and MBBR process has been in first place almost in all modes unless the relative weight of economic and environmental criteria are replaced. In this case, Septic tanks were slightly higher than MBBR. According to the results, the highest priority of treatment processes belonged to MBBR.

Keywords: Wastewater treatment; Selection of Optimum; Multi-criteria analysis methods; Analytic Hierarchy

1. Faculty of malek Ashtar University of technology, Parvizjafari2006@yahoo.com

2. Faculty of malek Ashtar University of technology

بی‌هوای پس از گزینه‌ی برتر به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند [۷].

روش تحقیق و ابزارها

همان‌طور که گفته شد، عوامل بسیار زیادی در تعیین مناسب‌ترین روش تصفیه‌ی فاضلاب دخیل هستند. این عوامل به نیازها و مشخصات خاص هر منطقه بستگی دارند و لذا اهمیت هر یک از آن‌ها از یک مکان به مکان دیگر دچار تغییر می‌شود [۸]. اگر چه هر یک از عوامل، از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است اما برخی از آن‌ها از وزن بالاتر و تأثیرگذار بیشتری برخوردار است [۱۰]. با توجه به اینکه اثرات زیست‌محیطی و مسائل فنی و اقتصادی با معیارها و ابعاد متفاوتی سنجیده می‌شوند لذا مقایسه‌ی این معیارها به همان صورت اولیه غیرممکن است. در نتیجه مدلی برای تصمیم‌گیری مناسب است که بتواند معیارهای مختلف را وزن دهی کند و سپس آن‌ها را هم بعد نماید تا از این طریق قابلیت مقایسه‌ی آن‌ها فراهم گردد. مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره^۱ (MCDM) از چنین قابلیتی برخوردارند و می‌توانند در مسائل اولویت‌بندی مورد استفاده قرار گیرند. این مدل‌ها در مسائل چند بعدی کاربرد دارند و با کمی کردن معیارهای کیفی، امکان مقایسه‌ی فرایندهای مختلف تصفیه‌ی فاضلاب را فراهم می‌کنند [۴]. تصمیم‌گیری چند معیاره با فراهم نمودن یک روش تحلیل سیستماتیک، مسائل فنی موجود را با اطلاعات اقتصادی ترکیب می‌کند و گزینه‌ها را رتبه‌بندی می‌نماید [۱۱]. بنابراین در حالت کلی روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب بهترین گزینه از بین گزینه‌های موجود با توجه به چندین شاخص تصمیم به کار می‌رود [۱۲]. در فرایند تصمیم‌گیری چند معیاره، اهداف، معیارها، گزینه‌ها، تبدیل مقیاس معیارها به واحدهای متناسب، تعیین وزن معیارها برای تعیین اهمیت نسبی آن‌ها، انتخاب و کاربرد الگوریتم ریاضی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها و انتخاب گزینه‌ی برتر تعریف می‌شوند [۱۳]. فرایند تصمیم‌گیری چند معیاره شامل چهار مرحله‌ی اساسی زیر است:

۱. شناسایی و ارزیابی: در این مرحله شناسایی تصمیم‌گیران، انتخاب معیارها و مشخص کردن گزینه‌ها انجام شده و ارزیابی گزینه‌ها در مقابل معیارها و زیرمعیارها توسط شرکت‌کنندگان صورت می‌گیرد.
۲. وزن‌دهی: یکی از مهم‌ترین و مشکل‌ترین مراحل تصمیم‌گیری چند معیاره، مرحله‌ی وزن‌دهی شاخص‌ها است. روش‌های مختلفی برای برآورد وزن نسبی شاخص‌ها وجود دارد.
۳. انتخاب گزینه‌ی برتر با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری چند شاخصه (MADM): برای انتخاب بهترین گزینه از بین یک مجموعه‌ی گزینه‌ها، روش‌های متعددی وجود دارد.
۴. تحلیل حساسیت و انتخاب گزینه‌ی نهایی: به‌طور کلی تحلیل حساسیت نشان‌دهنده‌ی میزان تغییر نتایج مدل نسبت به تغییر یا جابه‌جایی وزن معیارهای تصمیم‌گیری است. به دلیل وجود عدم قطعیت در مراحل مختلف

استفاده‌ی مجدد از پساب به‌خصوص در مناطقی که با کمبود کمی و کیفی آب مواجه هستند، به‌منزله‌ی یک رویکرد مهم در مدیریت منابع آب مورد توجه قرار گرفته است [۱]. لذا پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یک منبع آب غیرمتعارف است که می‌تواند در بسیاری از مصارف مورد استفاده قرار گیرد و برداشت بی‌رویه‌ی منابع آب با کیفیت را محدود نماید. اما تنوع فرایندهای تصفیه‌ی فاضلاب و ویژگی‌های منحصر به فرد هر یک از آن‌ها مسئله‌ی انتخاب روش تصفیه‌ی مناسب را به مسئله‌ای پیچیده و چالش‌برانگیز تبدیل کرده است. لذا پیش از طراحی و اجرای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب باید با استفاده از روش‌های مبتنی بر فرضیات علمی مستدل، فرایند تصفیه‌ی مناسب را تعیین نمود [۲]. کاربرد فرایند تصمیم‌گیری چند معیاره در مسائل مختلف از قبیل انتخاب فرایند بهینه‌ی تصفیه، توسط محققان مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. دباغیان و همکاران برای انتخاب بهترین روش تصفیه‌ی فاضلاب در صنایع آبکاری از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده کردند. این پژوهشگران سه معیار محیط‌زیستی و اجتماعی، اقتصادی و فنی را به‌منزله‌ی شاخص‌های اصلی مد نظر قرار دادند. در این تحقیق روش اسمز معکوس^۱ (RO) از میان چهار گزینه‌ی نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس، تبادل یونی و ترسیب شیمیایی^۲ به‌منزله‌ی گزینه‌ی بهینه برای تصفیه‌ی فاضلاب صنایع آبکاری انتخاب شد [۴]. فتایی و همکاران مدل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی را به منظور اولویت‌بندی فرایندها و انتخاب بهترین روش تصفیه‌ی فاضلاب شهرهای اردبیل، تبریز و ارومیه مورد استفاده قرار دادند. در این مطالعه سه فرایند لجن فعال، لاگون هواده‌ی و بیولاک^۳ بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی با یکدیگر مقایسه شدند. خروجی مدل تصمیم‌گیری نشان داد که فرایند بیولاک در مقایسه با سایر روش‌های مورد بررسی مناسب‌تر است [۵]. کریمی و همکاران با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و روش ترجیح بر اساس مشابهت به راه حل ایدئال فازی (TOPSIS Fuzzy)، اولویت‌بندی فرایندهای تصفیه‌ی بی‌هوای موجود در شهرک‌های صنعتی ایران را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه پنج فرایند تصفیه‌ی بی‌هوای شامل بستری هوای لجن با جریان رو به بالا^۴ (UASB)، رآکتور بافلدار بی‌هوای با جریان رو به بالا^۵ (UABR)، بستر بی‌هوای ثابت با جریان رو به بالا^۶ (UAFB)، تماس بی‌هوای^۷ و لاگون بی‌هوای بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی و مدیریتی مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به نتایج به دست آمده از مدل‌های تصمیم‌گیری مورد استفاده در تحقیق مذکور، فرایند بستر بی‌هوای ثابت با جریان رو به بالا به‌منزله‌ی روش تصفیه‌ی بهینه انتخاب گردید [۶]. طاهرزاده و گنجی‌دوست فرایندهای تصفیه‌ی رایج در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران و جهان را به کمک مدل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج این مطالعه، سیستم‌های ترکیبی بی‌هوای-هوای بهترین فرایند تصفیه‌ی فاضلاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به حساب می‌آید. علاوه بر این گزینه‌های تالاب و سیستم‌های

تصمیم‌گیری چند معیاره، لازم است که قبل از انتخاب گزینه‌ی نهایی، آنالیز حساسیت بر روی مسئله‌ی مورد نظر صورت گیرد [۱۴، ۱۵].

از ابتدای دهه‌ی ۱۹۵۰ میلادی تاکنون تعداد بی‌شماری از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه در زمینه‌های مختلف از قبیل مدیریت، اقتصاد، علوم اجتماعی و علوم محیط‌زیست توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶]. در این روش‌ها رتبه‌بندی^۹ گزینه‌ها^{۱۰} بر پایه‌ی چندین شاخص مختلف صورت می‌پذیرد. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی^{۱۱} (AHP) و روش ترجیح بر اساس مشابهت به راه حل ایدئال^{۱۲} (TOPSIS) متداول‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به حساب می‌آیند.

در پژوهش حاضر روش تحلیل سلسله‌مراتبی برای انتخاب فرایند بهینه‌ی تصفیه‌ی فاضلاب انسانی یک مجتمع تحقیقاتی-صنعتی، به کار برده شده است.

معیارهای تصمیم‌گیری

نداشتن نگاه همه‌جانبه و در نظر نگرفتن تمامی جنبه‌ها و پارامترهای مؤثر، اصلی‌ترین کاستی مطالعات انجام شده در ارتباط با انتخاب مناسب‌ترین فرایند تصفیه‌ی فاضلاب است. در تحقیق حاضر برای اجتناب از این نقیصه، با توجه به مطالعات گذشته، ضروری تشخیص داده شد که گزینه‌ها از نظر معیارهای فنی-اجرایی، اقتصادی و نیز محیط‌زیستی مورد ارزیابی قرار گیرند. در نتیجه‌ی این تصمیم، معیارهای اقتصادی در قالب ۲ زیرمعیار، معیارهای فنی-اجرایی در قالب ۶ زیرمعیار و معیارهای محیط‌زیستی در قالب ۲ زیرمعیار در فرایند ارزیابی لحاظ گردیدند. در تصویر ۱ ارتباط بین معیارها و زیرمعیارهای ارزیابی، در قالب سلسله‌مراتب فرایند انتخاب بهترین گزینه‌ی تصفیه‌ی فاضلاب نشان داده شده است.

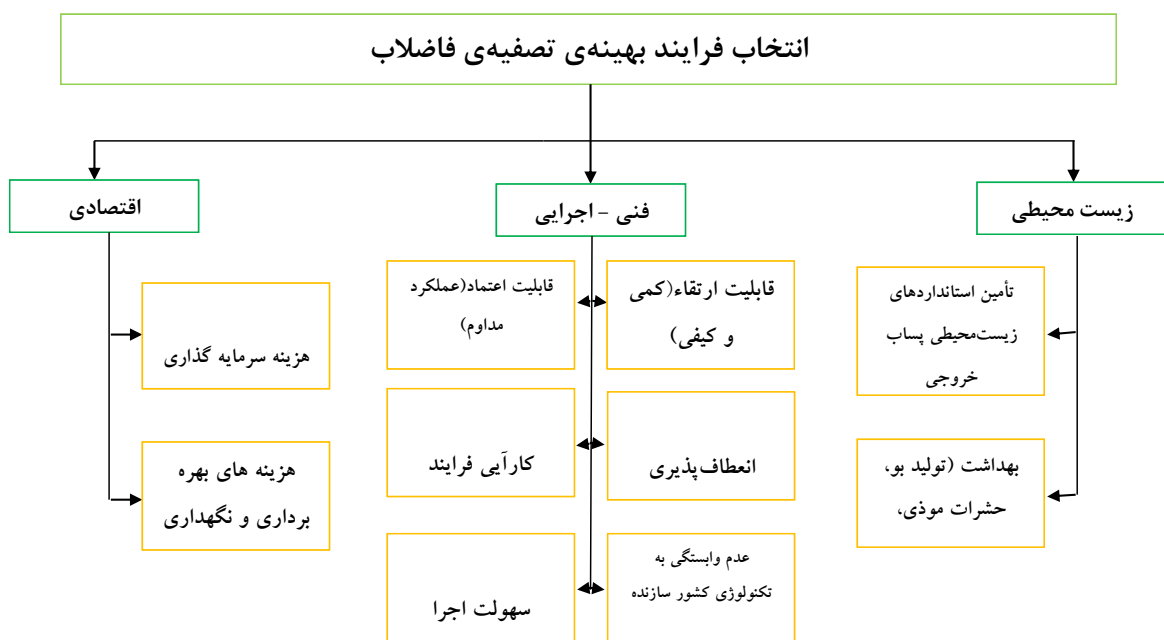
این پژوهش همچنین با نگاهی به مقوله‌ی مدیریت بحران کمترین هزینه (معیار اقتصادی)، کمترین خسارت (زیرمعیارهای کارآیی فرایند و تأمین استانداردهای زیست محیطی) و کمترین زمان ممکن (زیرمعیارهای سهولت اجرا و انعطاف پذیری) نقش این سه عامل را نیز در زیرمعیارهای خود گنجانده است.

نحوه‌ی ارزیابی

از آنجا که مطابق تصویر ۱، بسیاری از معیارها و زیرمعیارهای در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر، پارامترهایی کیفی هستند، انجام مقایسات زوجی بر مبنای آن‌ها با دشواری‌هایی همراه است. چنان‌که بیان گردید، در مواردی از این دست، بهترین و مطمئن‌ترین کار تدوین پرسش‌نامه‌هایی است که با استفاده از نظرات کارشناسان، تکمیل می‌گردند.

بر همین اساس، در تحقیق حاضر ابتدا پرسش‌نامه‌ای متناسب با معیارها و زیرمعیارهای مورد نظر تهیه و تدوین گردید و در نهایت برای ۶ نفر از اساتید و صاحب‌نظران مجموعه ارسال گردید.

قابلیت اعتماد (پایایی) و همچنین اعتبار (روایی) یک پرسش‌نامه یا ابزار اندازه‌گیری، از موضوعات بسیار مهم در امر جمع‌آوری اطلاعات و مشاهدات است. از جمله تعریف‌هایی که برای قابلیت اعتماد ارائه شده است می‌توان به تعریف ارائه شده توسط ایبل و فریسی اشاره کرد [۱۷]، طبق این تعریف همبستگی میان یک مجموعه از نمرات و مجموعه‌ی دیگری از نمرات در یک آزمون معادل که به صورت مستقل بر یک گروه آزمودنی به دست آمده است، وجود دارد. روش‌های ارزیابی پایایی پرسش‌نامه عبارتند از روش موازی با استفاده از آزمون‌های همتا، روش دو نیمه کردن، روش کودر ریچاردسون و روش آلفای کرونباخ. در تحقیق حاضر برای سنجش قابلیت اعتماد از سؤالات مشابه استفاده شد تا دقت پاسخ‌دهندگان ارزیابی شود زیرا سؤال‌های



تصویر ۱: درخت سلسله‌مراتبی تحقیق

مشابه از نظر محتوا و با سطح دشواری متوسط، قابلیت اعتماد آزمون را افزایش می‌دهد. مفهوم اعتبار (روایی) به این سؤال پاسخ می‌دهد که ابزار اندازه‌گیری تا چه حد خصیصه‌ی مورد نظر را می‌سنجد. در خصوص سنجش اعتبار پرسش‌نامه‌ی حاضر نیز باید گفت که در تهیه‌ی این پرسش‌نامه تمامی جهات رعایت شده و از پرسش‌نامه‌های استاندارد مشابه نیز کمک گرفته شده است [۱۷]. در نهایت با استفاده از روش میانگین‌گیری هندسی، برآیند نظرات مربوط به هر پرسش‌نامه محاسبه گردید و در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی مورد استفاده قرار گرفت. گفتنی است که برای تعیین ارزش نسبی گزینه‌ها در ارتباط با زیرمعیارهای کمی نیز از منابع علمی، دستورالعمل‌ها و نشریات ابلاغی از سوی نهادهای قانون‌گذار و اطلاعات میدانی استفاده شده است.

جدول ۱: تعیین ارزش پارامترهای کیفی توسط نظرات کارشناسی [۱۹، ۱۸]

ترجیحات	ارزش عددی
کاملاً مطلوب‌تر	۹
مطلوبیت خیلی قوی	۷
مطلوبیت قوی	۵
مطلوب‌تر	۳
مطلوبیت یکسان	۱
ترجیحات بین فواصل فوق	۲ و ۴ و ۶ و ۸

همچنین، به‌منظور تجزیه و تحلیل اطلاعات از نرم‌افزار Expert Choice استفاده شد. نحوه‌ی امتیازدهی به پارامترها در ماتریس مقایسه‌ی زوجی به این صورت است که پارامترها به صورت دو به دو با یکدیگر مقایسه و طبق جدول ۱ امتیازدهی می‌شوند. در ماتریس مقایسه‌ی زوجی جدول ۱ اگر در مقایسه‌ی دو معیار I و J اهمیت معیار موجود در سطر I بیشتر از اهمیت معیار موجود در ستون J باشد، میزان اهمیت با عدد صحیح و اگر اهمیت شاخص‌های موجود در ستون J بیشتر از شاخص‌های واقع در سطر I باشد، میزان اهمیت با عدد کسری نشان داده می‌شود (مقایسه‌ی هر معیار با خودش عدد یک یا اهمیت یکسان را می‌پذیرد). گفتنی است که ماتریس مقایسه‌ی زوجی در روش AHP معکوس است؛ یعنی اگر ترجیح معیار یک به دو، ۳ باشد، ترجیح معیار دو به یک، ۱/۳ است.

نتایج و بحث

ابتدا ماتریس‌های مقایسات زوجی مربوط به گزینه‌ها، زیرمعیارها و معیارها تشکیل شده و سپس با توجه به ارزش‌های نسبی به دست آمده، رتبه‌بندی گزینه‌ها در ارتباط با معیارها و همچنین هدف تحقیق مشخص می‌گردد. از همین رو در این قسمت نتایج محاسبات مربوط به ماتریس‌های مقایسات زوجی، تعیین ارزش‌های نسبی و رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی ارائه می‌گردد. پس از جمع‌آوری پاسخ‌های ارائه شده توسط کارشناسان در پرسش‌نامه و با میانگین‌گیری هندسی از آن‌ها، درایه‌های ماتریس مقایسات زوجی و وزن معیارها و شاخص‌ها برای انتخاب فرایند بهینه‌ی تصفیه‌ی فاضلاب به دست آمد (جدول ۲).

جدول ۲: وزن معیارها و شاخص‌ها برای انتخاب بهترین فرایند تصفیه‌ی فاضلاب

معیارها	گزینه‌ها	لجن فعال	صافی چکنده	MBBR	لاگون هوادهی	برکه تثبیت	سپتیک تانک
	اقتصادی (C _۱)	۰/۰۵۴	۰/۰۶۳	۰/۰۳۴	۰/۱۰۹	۰/۳۳۰	۰/۴۱۱
	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری (I _۱)	۰/۰۵۰	۰/۰۵۷	۰/۰۴۳	۰/۱۰۹	۰/۳۳۰	۰/۴۱۱
	هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری (I _۲)	۰/۰۴۳	۰/۰۶۷	۰/۰۳۲	۰/۱۰۶	۰/۳۳۹	۰/۴۱۲
	فنی - اجرایی (C _۲)	۰/۲۲۲	۰/۱۹۰	۰/۲۸۸	۰/۱۰۹	۰/۰۸۰	۰/۱۱۰
	کارایی فرایند (I _۳)	۰/۲۳۷	۰/۲۳۷	۰/۳۶۱	۰/۰۹۹	۰/۰۳۹	۰/۰۲۸
	قابلیت اعتماد (عملکرد مداوم) (I _۴)	۰/۲۴۵	۰/۲۱۶	۰/۳۶۳	۰/۱۰۲	۰/۰۲۹	۰/۰۴۴
	عدم وابستگی به تکنولوژی کشور سازنده (I _۵)	۰/۰۸۹	۰/۰۸۹	۰/۰۵۸	۰/۱۴۲	۰/۲۴۴	۰/۳۷۸
	انعطاف‌پذیری (I _۶)	۰/۲۷۶	۰/۱۸۲	۰/۳۶۲	۰/۱۰۸	۰/۰۴۰	۰/۰۳۳
	قابلیت ارتقای کمی و کیفی (I _۷)	۰/۳۲۶	۰/۱۷۸	۰/۲۹۲	۰/۱۰۹	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷
	سهولت در اجرا (I _۸)	۰/۱۱۸	۰/۱۱۸	۰/۰۶۲	۰/۱۱۸	۰/۲۱۵	۰/۳۷۱
	محیط زیستی (C _۳)	۰/۲۳۸	۰/۱۸۰	۰/۳۸۲	۰/۱۲۵	۰/۰۴۴	۰/۰۳۱
	تأمین استانداردهای محیط زیستی پس‌از خروجی (I _۹)	۰/۲۱۸	۰/۲۱۸	۰/۳۶۷	۰/۱۲۳	۰/۰۴۳	۰/۰۳۱
	مشکلات بهداشتی (I _{۱۰})	۰/۲۶۵	۰/۱۲۷	۰/۴۰۳	۰/۱۲۸	۰/۰۴۵	۰/۰۳۱

جدول ۳: وزن نسبی گزینه‌ها نسبت به معیارها

وزن شاخص‌ها	شاخص‌ها	وزن معیارها	معیارها
۰/۶۱۴	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری (۱ _۱)	۰/۲۰۷	اقتصادی (C _۱)
۰/۳۸۶	هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری (۱ _۲)		
۰/۳۵۲	کارایی فرایند (۱ _۳)		
۰/۲۱۸	قابلیت اعتماد (عملکرد مداوم) (۱ _۴)		
۰/۱۵۱	عدم وابستگی به تکنولوژی کشور سازنده (۱ _۵)		
۰/۱۰۹	انعطاف‌پذیری (۱ _۶)	۰/۳۵۸	فنی - اجرایی (C _۲)
۰/۰۹۴	قابلیت ارتقای کمی و کیفی (۱ _۷)		
۰/۰۷۶	سهولت در اجرا (۱ _۸)		
۰/۵۵۷	تأمین استانداردهای محیط‌زیستی پساب خروجی (۱ _۹)	۰/۴۳۶	محیط‌زیستی (C _۳)
۰/۴۴۳	مشکلات بهداشتی (۱ _{۱۰})		
وزن شاخص‌ها	شاخص‌ها	وزن معیارها	معیارها
۰/۶۱۴	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری (۱ _۱)	۰/۲۰۷	اقتصادی (C _۱)
۰/۳۸۶	هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری (۱ _۲)		
۰/۳۵۲	کارایی فرایند (۱ _۳)		
۰/۲۱۸	قابلیت اعتماد (عملکرد مداوم) (۱ _۴)		
۰/۱۵۱	عدم وابستگی به تکنولوژی کشور سازنده (۱ _۵)		
۰/۱۰۹	انعطاف‌پذیری (۱ _۶)	۰/۳۵۸	فنی - اجرایی (C _۲)
۰/۰۹۴	قابلیت ارتقای کمی و کیفی (۱ _۷)		
۰/۰۷۶	سهولت در اجرا (۱ _۸)		
۰/۵۵۷	تأمین استانداردهای محیط‌زیستی پساب خروجی (۱ _۹)	۰/۴۳۶	محیط‌زیستی (C _۳)
۰/۴۴۳	مشکلات بهداشتی (۱ _{۱۰})		

جدول ۴: شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی [۲۰]

۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	N
۱/۴۵	۱/۴۵	۱/۴۱	۱/۳۲	۱/۲۴	۵/۱۲	۰/۹	۰/۵۸	۰	۰	I.I.R

در غیر این صورت باید در قضاوت‌ها تجدید نظر شود [۱۸]. جدول ۴ شاخص ناسازگاری ماتریس‌های تصادفی را نشان می‌دهد. در این تحقیق نرخ ناسازگاری کمتر از ۱۰ درصد بود و لذا مقایسات زوجی از سازگاری قابل قبولی برخوردار بوده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، با توجه به نظرات موجود در پرسش‌نامه‌ها، معیار محیط‌زیستی در مقایسه با سایر معیارها از ارزش بالاتری برخوردار است. علاوه بر این بنا بر نظر متخصصان، وزن نسبی معیار اقتصادی نسبت به دو معیار دیگر کمتر است. مقادیر ارائه شده در جدول ۲ دلالت بر آن دارد که از میان زیرمعیارهای اقتصادی، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری در مقایسه با زیرمعیار دیگر از وزن بیشتری برخوردار است.

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، در میان زیرمعیارهای فنی - اجرایی، کارایی فرایند و سهولت در اجرا به ترتیب با وزن‌های نسبی ۰/۳۵۲ و ۰/۰۷۶ بیشترین و کمترین ارزش نسبی را به خود اختصاص داده‌اند.

بر اساس نتایج ارائه شده، زیرمعیار تأمین استانداردهای محیط‌زیستی پساب خروجی در بین زیرمعیارهای محیط‌زیستی از ارزش بالاتری برخوردار بوده است و زیرمعیار مشکلات بهداشتی در

به‌منظور ارزیابی گزینه‌ها یا به عبارتی ارزیابی فرایندهای تصفیه‌ی فاضلاب، ماتریس مقایسات زوجی مربوط به هر معیار و زیر معیار تشکیل شد و ضمن کنترل نرخ ناسازگاری و اطمینان از قابل قبول بودن هر مقایسه‌ی زوجی، وزن نسبی هر معیار برای گزینه‌های مختلف محاسبه گردید (جدول ۳).

بعد از تشکیل تمام ماتریس‌ها و انجام مقایسات زوجی، بردارهای ویژه یا وزن نسبی (درجه اهمیت نسبی عناصر)، وزن‌های نهایی و حداکثر مقدار ویژه (λ_{max}) برای هر ماتریس با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice محاسبه می‌گردد. شاخص ناسازگاری به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$I.I = \lambda_{max} - \frac{n}{n-1}$$

در این رابطه λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه‌ی ماتریس، n طول ماتریس و I.I شاخص ناسازگاری است. برای هر ماتریس حاصل تقسیم شاخص ناسازگاری (I.I) بر ماتریس تصادفی (I.I.R) هم‌بعدش، معیار مناسبی برای قضاوت در مورد ناسازگاری است که به این معیار نرخ ناسازگاری (IR) گفته می‌شود. چنانچه این عدد کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد، سازگاری سیستم قابل قبول است؛

مقایسه با زیر معیار دیگر، وزن نسبی کمتری را به خود اختصاص داده است.

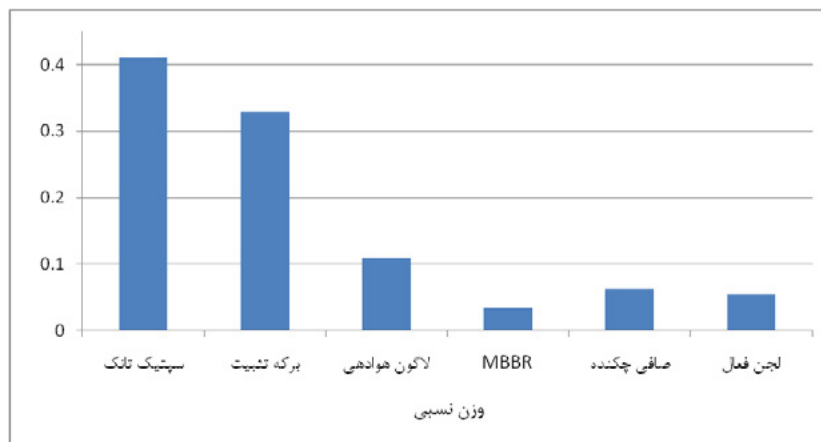
نتایج به دست آمده دلالت بر آن دارد که از نظر هزینه‌های سرمایه‌گذاری فرایندهای سپتیک تانک، برکه‌ی تثبیت، لاگون هواده‌ی، لجن فعال، صافی چکنده و MBBR به ترتیب در رتبه‌های اول تا ششم قرار می‌گیرند. همچنین در میان گزینه‌های موجود، فرایندهای MBBR و سپتیک تانک به ترتیب بیشترین و کمترین هزینه‌ی بهره‌برداری و نگهداری را به خود اختصاص داده‌اند.

نتایج نشان‌دهنده‌ی این واقعیت است که فرایندهای سپتیک تانک، برکه‌ی تثبیت، لاگون هواده‌ی، لجن فعال، صافی چکنده و MBBR از نقطه‌نظر سهولت اپراتوری به ترتیب در رتبه‌های اول تا ششم قرار می‌گیرند. علاوه بر این فرایندهای لجن فعال و MBBR در مقایسه با سایر گزینه‌های مورد بررسی از کارایی بالاتری برخوردار هستند. بررسی‌ها همچنین نشان داد که فرایندهای MBBR و برکه‌ی تثبیت به ترتیب با ارزش نسبی ۰/۳۶۳ و ۰/۰۲۹ از بالاترین و پایین‌ترین قابلیت اعتماد برخوردار هستند. علاوه بر این انعطاف‌پذیری فرایند MBBR در مقایسه با سایر گزینه‌های تصفیه، به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. مقایسات زوجی انجام شده دلالت بر آن دارد که فرایندهای لجن فعال و MBBR

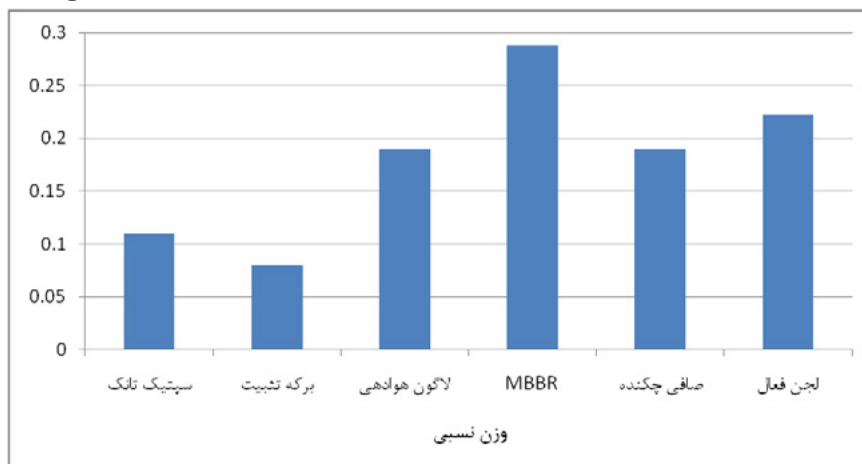
از قابلیت ارتقای کمی و کیفی بالاتری برخوردار هستند. همچنین سپتیک تانک و برکه‌ی تثبیت فاضلاب در ارتباط با زیرمعیار سهولت اجرا به ترتیب در رتبه‌های اول و دوم قرار دارند. از نظر عدم وابستگی به تکنولوژی کشور سازنده نیز، فرایندهای سپتیک تانک و برکه‌ی تثبیت در مقایسه با سایر گزینه‌ها از ارجحیت بالاتری برخوردار هستند.

در ارتباط با زیرمعیارهای محیط‌زیستی، فرایندهای MBBR و لجن فعال با وزن نسبی ۰/۴۰۳ و ۰/۲۶۵، از نظر مشکلات بهداشتی (انتشار بو، حشرات موزی و ناقلان) گزینه‌های تصفیه‌ی مناسب‌تری به حساب می‌آیند. همچنین در ارتباط با معیار تأمین استانداردهای محیط‌زیستی پساب خروجی، فرایندهای لجن فعال و MBBR نسبت به سایر روش‌های تصفیه، وزن بالاتری را به خود اختصاص داده‌اند.

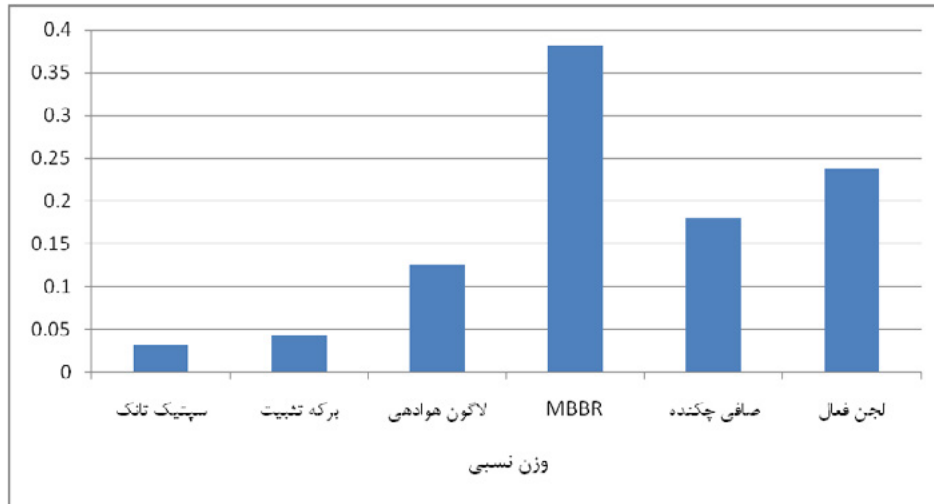
در ادامه با تلفیق ارزش نسبی به دست آمده برای گزینه‌ها و وزن نسبی زیرمعیارهای مختلف، ارزش نسبی هر گزینه نسبت به معیارهای سه‌گانه سنجیده می‌شود. در تحقیق حاضر از نرم‌افزار Expert Choice برای تعیین وزن نسبی گزینه‌ها نسبت به معیارها استفاده شده است که نتایج آن در تصاویر ۳ تا ۵ ملاحظه می‌گردد. همان‌طور که در تصاویر ۳ تا ۵ ملاحظه می‌گردد از نقطه‌نظر معیار اقتصادی فرایندهای سپتیک تانک، برکه‌ی تثبیت،



تصویر ۲: اولویت گزینه‌ها از نظر معیار اقتصادی با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی



تصویر ۳: اولویت گزینه‌ها از نظر معیار فنی - اجرایی با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی



تصویر ۴: اولویت گزینه‌ها از نظر معیار محیط‌زیستی با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی



تصویر ۵: اولویت گزینه‌ها بر اساس وزن نسبی نهایی با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی

تحلیل حساسیت در روش تحلیل سلسله‌مراتبی

گذشت زمان، دگرگونی شرایط و به وجود آمدن ضرورت‌های تازه، باعث تغییر اهمیت پارامترهای مختلف نزد کارشناسان می‌شود. اهمیت بالای مسائل محیط‌زیستی در کشورهای توسعه یافته و در مقابل، اولویت‌های اقتصادی - اجرایی در کشورهای در حال توسعه، نمونه‌ای از وابستگی ارزش‌ها به شرایط و فرهنگ هر منطقه هستند. از همین رو لازم است که با در نظر گرفتن شرایط مختلف در اولویت‌بندی معیارها، به بررسی نتایج حاصل پرداخته شود. به همین منظور در تصویر ۶ میزان حساسیت تصمیم و رتبه‌بندی گزینه‌ها به وزن نسبی معیارها، در شش حالت مختلف توسط نرم‌افزار Expert Choice سنجیده شده است. جدول ۵ جزئیات مربوط به هر کدام از این حالت‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به تصویر ۶ می‌توان گفت که با تغییر در وزن معیارها تغییر چندانی در نتیجه‌ی نهایی ایجاد نمی‌گردد. به عبارت دیگر تقریباً در تمامی حالت‌ها فرایند MBBR در رتبه‌ی نخست قرار گرفته است مگر در حالتی که وزن‌های نسبی معیارهای اقتصادی و محیط‌زیستی جابه‌جا شوند که در این حالت گزینه‌ی سپتیک تانک با اختلاف اندکی بالاتر از MBBR قرار می‌گیرد. ذکر این نکته ضروری است که به دلیل اینکه در حالت کلی وزن معیار اقتصادی کمتر از دو معیار دیگر است، با تغییر در وزن معیار اقتصادی (افزایش وزن معیار) جابه‌جایی در سایر گزینه‌ها اتفاق می‌افتد؛ به طور مثال در حالتی که وزن معیار اقتصادی با وزن معیار محیط‌زیستی برابر باشد، گزینه‌ی سپتیک تانک به گزینه‌ی دوم ارتقا پیدا می‌کند و گزینه‌ی برکه‌ی تثبیت به رده‌ی پنجم می‌رسد و یا در حالتی

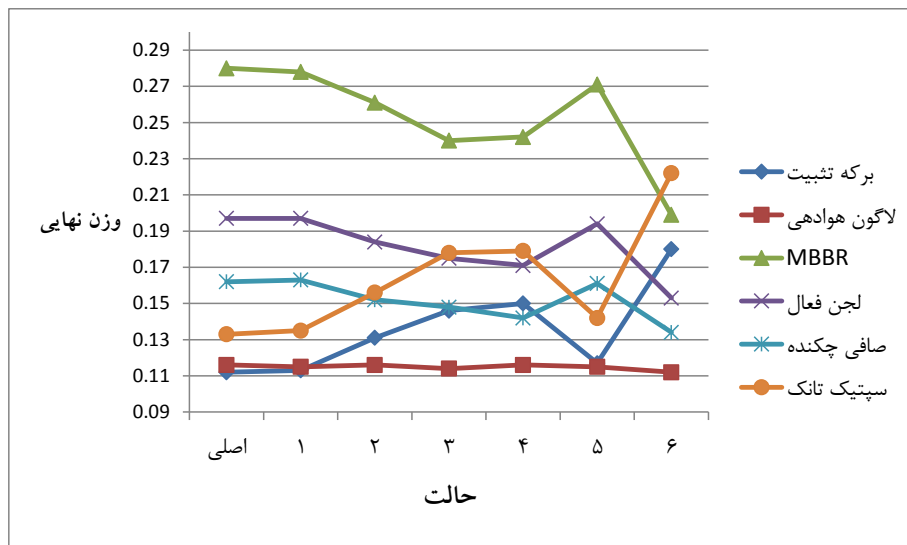
لاگون هوادھی، صافی چکنده، لجن فعال و MBBR به ترتیب با وزن‌های نسبی ۰/۴۱۱، ۰/۳۳۰، ۰/۱۰۹، ۰/۰۶۳ و ۰/۰۵۴ و ۰/۰۳۴ در رتبه‌های اول تا ششم قرار گرفته‌اند. همچنین از نظر معیار فنی - اجرایی گزینه‌های MBBR، لجن فعال، صافی چکنده، سپتیک تانک، لاگون هوادھی و برکه‌ی تثبیت به ترتیب با ارزش‌های نسبی ۰/۲۸۸، ۰/۲۲۲، ۰/۱۹۰، ۰/۱۱۰ و ۰/۱۰۹ و ۰/۰۸۰ در اولویت‌های مختلف قرار گرفته‌اند. در ارتباط با معیار محیط‌زیستی نیز فرایندهای MBBR، لجن فعال، صافی چکنده، لاگون هوادھی، برکه‌ی تثبیت و سپتیک تانک با وزن‌های نسبی ۰/۳۸۲، ۰/۲۳۸، ۰/۱۸۰، ۰/۱۲۵، ۰/۰۴۴ و ۰/۰۳۱ رتبه‌های اول تا ششم را به خود اختصاص داده‌اند.

در نهایت برای تعیین وزن نهایی گزینه‌ها، وزن نسبی فرایندهای تصفیه نسبت به هر معیار با ارزش نسبی معیارها نسبت به هدف تلفیق می‌گردد. تصویر ۶ وزن نهایی گزینه‌ها در فرایند تحلیلی سلسله‌مراتبی را نشان می‌دهد.

همانطور که در تصویر ۵ مشاهده می‌شود، روش MBBR با ارزش نهایی ۰/۲۸۰ بالاترین اولویت را از آن خود کرده است. فرایندهای لجن فعال، صافی چکنده، سپتیک تانک، لاگون هوادھی و برکه‌ی تثبیت نیز به ترتیب با وزن‌های نهایی ۰/۱۹۷، ۰/۱۶۲، ۰/۱۳۳ و ۰/۱۱۶ و ۰/۱۱۲ در رتبه‌های دوم تا ششم قرار گرفته‌اند.

جدول ۵: ارزش نسبی معیارها در تحلیل حساسیت مدل تصمیم‌گیری

حالت	شرح	ارزش نسبی معیارها در ارتباط با هدف		
		اقتصادی	فنی- اجرایی	محیط‌زیستی
حالت موجود	ارزش‌های نسبی مشابه جدول ۳-۱ هستند.	۰/۲۰۷	۰/۳۵۸	۰/۴۳۶
حالت ۱	ارزش‌های نسبی فنی- اجرایی و محیط‌زیستی برابرند.	۰/۲۰۷	۰/۳۹۷	۰/۳۹۷
حالت ۲	ارزش‌های نسبی معیارهای اقتصادی و فنی- اجرایی برابرند.	۰/۲۸۲	۰/۲۸۲	۰/۴۳۶
حالت ۳	ارزش‌های نسبی معیارهای اقتصادی و محیط‌زیستی برابرند.	۰/۳۲۱	۰/۳۵۸	۰/۳۲۱
حالت ۴	ارزش‌های نسبی معیارهای اقتصادی و فنی- اجرایی جابه‌جا شده‌اند.	۰/۳۵۸	۰/۲۰۷	۰/۴۳۶
حالت ۵	ارزش‌های نسبی معیارهای فنی- اجرایی و محیط‌زیستی جابه‌جا شده‌اند.	۰/۲۰۷	۰/۴۳۶	۰/۳۵۸
حالت ۶	ارزش‌های نسبی معیارهای اقتصادی و محیط‌زیستی جابه‌جا شده‌اند.	۰/۴۳۶	۰/۳۵۸	۰/۲۰۷



تصویر ۶: میزان حساسیت تصمیم به وزن نسبی معیارها در روش تحلیل سلسله مراتبی

- بر اساس مقایسات زوجی انجام شده توسط متخصصان و کارشناسان وزن معیارهای اقتصادی، محیط‌زیستی و فنی- اجرایی در روش تحلیل سلسله مراتبی به ترتیب معادل ۰/۲۰۷، ۰/۳۵۸ و ۰/۴۳۶ به دست آمده است.

- هزینه‌ی سرمایه‌گذاری در میان زیرمعیارهای اقتصادی بالاترین ارزش نسبی را به خود اختصاص داده است.

- از نظر کارشناسان تأمین استانداردهای محیط‌زیستی پساب خروجی در بین زیرمعیارهای محیط‌زیستی از بالاترین اولویت برخوردار است.

- در میان زیرمعیارهای فنی- اجرایی، کارایی و قابلیت اعتماد فرایند بیشترین نقش را در انتخاب بهترین گزینه‌ی تصفیه‌ی فاضلاب بر عهده داشته‌اند. در مقابل سهولت اجرا کمترین ارزش نسبی را از نظر فنی و اجرایی به خود اختصاص داده است.

- به طور کلی در بین ۱۰ زیرمعیار در نظر گرفته شده برای انتخاب بهترین فرایند تصفیه، زیرمعیارهای تأمین

که وزن معیار اقتصادی با وزن معیار محیط‌زیستی یا معیار فنی- اجرایی جابه‌جا می‌شود گزینه‌های سپتیک تانک و برکه‌ی تثبیت که در معیار اقتصادی دارای وزن بالاتری بودند به جایگاه‌های بالاتر می‌رسند تا جایی‌که حتی سپتیک تانک در حالت آخر به گزینه‌ی برتر تبدیل می‌شود. البته باید توجه داشت هیچگاه در موضوع تصفیه‌ی فاضلاب و به طور کلی محیط‌زیست وزن معیار اقتصادی بیشتر از وزن معیار محیط‌زیستی نخواهد شد (ارجحیت محیط‌زیست بر مسائل اقتصادی) و این حالت صرفاً برای آنالیز حالت‌های مختلف برای تصمیم‌گیری مدیران تحت بررسی قرار گرفت.

نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌های انجام شده در تحقیق حاضر، نتایجی به دست آمده است که از مهم‌ترین آن‌ها به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:



2. Karimi, a, Mehrdadi, N, Hashemian, S, (2011). Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 8 (2), 267-280.

۳. مؤمنی، م.؛ شریفی سلیم، ع. (۱۳۹۰). مدل‌ها و نرم‌افزارهای تصمیم‌گیری چند شاخصه. تهران.

۴. دباغیان، م. ر.؛ هاشمی، س. ح. (۱۳۸۸). ارزیابی فنی اقتصادی و زیست‌محیطی روش‌های تصفیه‌ی فاضلاب صنایع آبرکاری به روش AHP. *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۱۱ (۳).

۵. فتایی، الف.؛ ترابیان، ع.؛ حسین‌زاده کلخوران، م.؛ عالیقدری، م.؛ حسین‌زاده، ش. (۱۳۹۲). انتخاب فرایند بهینه‌ی تصفیه‌ی فاضلاب شهری با استفاده از روش AHP مطالعه‌ی موردی: شهرهای اردبیل، تبریز و ارومیه. *مجله‌ی سلامت و بهداشت*، ۴ (۳)، ۲۶۰ - ۲۷۲.

6. Karimi, a, Mehrdadi, N, Hashemian, J. (2010). Investigation of wastewater treatment plants of Iran's industrial estates and proposed a suitable model for optimum wastewater treatment process selection. PhD, Tehran University.

۷. طاهرزاده، م.؛ گنجی دوست، ح. (۱۳۸۹). تعیین سیستم بهینه‌ی تصفیه‌ی فاضلاب در مناطق گرم و خشک بر اساس مدل تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP). *چهارمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست*، تهران.

8. Curiel-Esparza, J, Canto-Perello, J. (2012). Understanding the major drivers for implementation of municipal sustainable policies in underground space. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 19(6), 506-514.

9. Singhirunnusorn, W, Stenstrom, M. (2009). Appropriate wastewater treatment systems for developing countries. Criteria and indicator assessment, Thailand.

10. George, T, Franklin, L, Stensel, H. D. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse*. Metcalf & Eddy, New York.

11. Huang, I. B, Keisler, J, Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: ten years of applications and trends. *Science of the total environment*, 409(19), 3578-3594.

12. Mianabadi, H, Afshar, A. (2008). Multi attribute decision making to rank urban water supply schemes. *Water and Wastewater*, 66, 34-45.

13. Karimi, a, Mehrdadi, N, Hashemian, S. J. (2010). Using AHP for selecting the best wastewater treatment process. *Water and Wastewater*, 76, 2-12.

۱۴. میرابی، م.؛ میان‌آبادی، ح.؛ شریفی، م. (۱۳۹۰). کاربرد تصمیم‌گیری چندشاخصه در انتخاب گزینه‌ی مناسب جهت جمع‌آوری فاضلاب شهر نیاسر. *ششمین کنگره ملی مهندسی عمران*، سمنان.

15. Ishizaka, A, Labib, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert systems with applications*, 38(11), 14336-14345.

استانداردهای محیط‌زیستی پساب خروجی و هزینه‌ی سرمایه‌گذاری مهم‌ترین و زیرمعیارهای سهولت اجرا و قابلیت ارتقا کمی و کیفی کم‌اهمیت‌ترین زیرمعیارهای مؤثر در انتخاب نهایی بوده‌اند.

- از میان شش گزینه‌ی مورد بررسی (برکه‌ی تثبیت، لاگون هواده‌ی، MBBR، صافی چکنده و لجن فعال و سپتیک تانک)، فرایندهای MBBR و سپتیک تانک به ترتیب بهترین و بدترین گزینه از نظر معیار محیط‌زیستی بوده‌اند.
- از نظر معیار اقتصادی، سپتیک تانک مقرون به صرفه‌ترین فرایند تصفیه‌ی فاضلاب انتخاب شده است. فرایندهای برکه‌ی تثبیت، لاگون هواده‌ی، صافی چکنده، لجن فعال، MBBR نیز به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند.
- وزن نسبی گزینه‌ها حاکی از آن است که فرایند MBBR از نظر فنی - اجرایی در مقایسه با سایر گزینه از مطلوبیت بیشتری برخوردار است. علاوه بر این فرایند برکه‌ی تثبیت از این نظر نامناسب‌ترین گزینه تشخیص داده شده است.
- با توجه به وزن نهایی گزینه‌ها، فرایند MBBR برای طراحی و اجرای تصفیه‌خانه فاضلاب انسانی این مجتمع تحقیقاتی - صنعتی باید در اولویت قرار بگیرد و فرایندهای لجن فعال، صافی چکنده، سپتیک تانک، لاگون هواده‌ی و برکه‌ی تثبیت به ترتیب اولویت‌های بعدی را به خود اختصاص داده‌اند.

پی‌نوشت

1. Reverse Osmosis
2. Chemical Precipitation
3. Biolac
4. Upflow Anaerobic Sludge Blanket
5. Upflow Anaerobic Baffled Reactor
6. Upflow Anaerobic Fixed-Bed
7. Contact Process
8. Multi Criteria Decision Making
9. Multi Attribute Decision Making
10. Ranking
11. Alternative
12. Analytical Hierarchy Process
13. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

منابع

1. Hunt, D. V, Rogers, C. D, (2014). A benchmarking system for domestic water use. *Sustainability*, 6 (5), 2993-3018.

16. Kalbar, P. P, Karmakar, S, Asolekar, S. R. (2012). Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *Journal of environmental management*, 113, 158-169.

۱۷. سرمد، ز؛ بازرگان، ع؛ حجازی، ا. (۱۳۷۶). روش‌های تحقیق در علوم رفتاری. انتشارات آگه، تهران.

۱۸. قدسی پور، س.ح. (۱۳۸۷). مباحثی در تصمیم‌گیری چندمعیاره: فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP). دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران.

19. Ramezani, M. r, Bahrkazemi, M. (2011). Selection the best external wall of buildings for energy saving by AHP technique, 14(3), 21-36.

20. Guangming, Z, Ru, J, Guohe, H, Min, X, Jianbing, L. (2007). Optimization of wastewater treatment alternative Selection by hierarchy grey relational analysis. *Journal of environmental Management*, 82, 250 -259.

۵۲

شماره هفدهم

بهار و تابستان
۱۳۹۹

دوفصلنامه
علمی و پژوهشی



انتخاب فرایند بهینه‌ی تصفیه‌ی فاضلاب یک مجتمع تحقیقاتی
صنعتی به روش (AHP)