



Location Optimization of Wastewater Treatment Plant Based on the Approach of Data Envelopment Analysis and Decision-making Based on Gray Theory

Navid Rafiei^{1*}, Mohammad Sohani²

¹Industrial Engineering Department, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran.

²Department of Industrial Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 2024.09.25

Revised: 2025.01.01

Accepted: 2025.02.05

Keyword:

TOPSIS

DEA

Wastewater Treatment Plant

Location

Gray Theory

AHP

*Corresponding Author:

Navid Rafiei

Email:

N.rafiei@iau-tnb.ac.ir

ABSTRACT

Wastewater treatment plants are one of the main infrastructures of every city. Apart from considering the topography, society and type of wastewater, it is essential to establish them in an appropriate site considering the main criteria. This study aimed to find the optimal location of the wastewater treatment plant for a case study in Kermanshah Province, and for this purpose, a two-step decision-making approach was proposed. Using this approach, effective quantitative and qualitative criteria were considered for the evaluation of locations. In the first stage, DEA was used to select high-efficiency locations based on various measurable criteria. In the second stage, these potential places were evaluated in terms of qualitative criteria, including technical, economic, environmental and social factors. For this evaluation, gray AHP were used for criteria weighting, and gray TOPSIS ranked the locations. The results showed that in the process of selecting the optimal potential location for the establishment of a wastewater treatment plant, the factors of support mechanisms with a weight of 0.179, transmission grid accessibility with a weight of 0.168, proximity to residential areas with a weight of 0.129, and government policies and laws with a weight of 0.101 were the most important criteria. The final ranking identified three cities of Sarmast, Kermanshah, and Tazehabad as the most suitable locations for establishing wastewater treatment plants. Their degree of possibility values were 0.697, 0.820, and 0.913, respectively, indicating their strong potential for this purpose.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Urban wastewater systems are one of the most important infrastructures that have a direct relationship with people's health and the prevention of environmental pollution. In other words, the correct management of water and wastewater resources in any country or region is one of the indicators and factors that lead to improving the health of society. Diseases such as infectious hepatitis, diarrhoea, intestinal parasites, and other diseases caused by environmental pollution are caused by improper wastewater disposal. Therefore, it is necessary to improve the environment in various areas by creating the required facilities for collecting and treating urban and industrial wastewater, as part of health and environmental protection strategies, as well as the economic use of existing resources. However, different facilities and processes are needed to treat all types of wastewaters. One of the basic requirements of recycling is to determine the desirable place to build a wastewater treatment plant. As a result, the first step in establishing a wastewater treatment plant is to find suitable locations to build on, which reveals the necessity of conducting the present study. Considering the unusual increase in water consumption, limitations of regional complications, territorial restrictions, and the law on the necessity of using industries from wastewater treatment plants, the necessity of implementing a suitable and economic plan, as well as the optimal locating of wastewater treatment plants in Kermanshah Province has become very important.

Methodology

One of the innovations of this study was to conduct a comprehensive and systematic investigation on the problem of locating the wastewater treatment plant in Kermanshah Province, which has never been reported in the existing literature. In addition, the indicators selected for this issue were measurable and non-measurable, complete and comprehensive in examining the various aspects of determining suitable fields for sustainable development. Another innovation included the first combination of DEA, AHP, TOPSIS, and Gray Theory, which has been identified as a suitable and effective approach for location. This study used a two-stage framework for the optimal location of the wastewater treatment plant. In this regard, in the first stage, the DEA method filtered the locations of wastewater treatment plants based on the best performance in four measurable dimensions. In the second step, the remaining potential locations were further analyzed and ranked using the gray AHP and gray TOPSIS methods, according to the intangible indicators that require qualitative evaluation.

Results and discussion

In the first stage of the research process with the additive DEA model, a total of 12 cities in Kermanshah Province were considered as decision-making units or potential locations for the establishment of wastewater treatment plants. The data sets of input and output factors in each of the 12 cities were collected by interviewing experts and referring to the 2022 Statistical Yearbook of water and sewage companies, as presented in Table 1.

Table 1. Input and output data used in the additive model of DEA.

Location	Inputs		Outputs		Efficiency Score
	Input ₁	Input ₂	Output ₁	Output ₂	
Kermanshah	67000	225	60000	703225	1.000
Islamabad	14000	194	17300	88989	1.000
Ravansar	5600	221	4471	19748	0.339
Tezehabad	1820	128	2727	16990	1.000
Srmast	711	109	267	2914	1.000
Sahneh	6400	175	5898	20251	0.345
Sonqor	7400	152	7407	44443	0.607
Kerend	2200	148	1270	7211	0.327
Gilan	3400	351	3400	19908	0.474
Paveh	1728	247	3000	27344	1.000
Qasreshirin	2250	218	2200	16975	0.574
Sarpol	7400	174	7200	42109	0.566

After using the additive DEA model, the obtained efficiency scores of each of the potential locations of 12 wastewater treatment plants were determined. From the results, it was observed that a total of five potential locations obtained a full efficiency score equal to one: Kermanshah, Islamabad, Tazehabad, Sarmast, and Paveh. These five potential locations were considered for the establishment of the sewage treatment plant and were further evaluated in the second stage of the research method by applying the decision-making approach based on gray theory.

The gray AHP method was used to measure the gray weight of the relative priority of each index. In general, in this section, four main criteria, including technical, economic, environmental and social factors, were considered, each of which was divided into three sub-criteria. In this way, technical, economic, environmental, and social criteria were given weights of 0.123, 0.383, 0.420, and 0.073, respectively, and the environmental criteria were recognized as the most important. The gray TOPSIS method was used to describe the performance ranking of five potential locations for the establishment of a sewage treatment plant including Kermanshah, Islamabad, Tazehabad, Sarmast, and Paveh. To rank the potential locations, the options were ranked in ascending order based on the gray possibility degree, and the option with the lowest degree was selected as the top option. As a result, the potential locations of Sarmast, Kermanshah, Tazehabad, Islamabad, and Paveh wastewater treatment plants were ranked first to fifth, in the order mentioned.

Conclusion

The most important results and achievements of this study are as follows:

- 1- The potential for establishing wastewater treatment plants in ten cities of Kermanshah province was investigated. This was based on various quantitative and qualitative factors. The optimal locations for the establishment of wastewater treatment plants were successfully determined using a combined approach of DEA, gray AHP, and gray TOPSIS models.
- 2- In the process of selecting the potentially optimal location for the establishment of a wastewater treatment plant, the factors of "support mechanisms", "access to the

transmission network", "proximity to residential areas" and "rules and policies of the government" were recognized as the most important indicators.

- 3- In the final ranking, it was found that the three cities of "Sarmest", "Kermanshah" and "Tazehabad" are the most optimal potential locations for the establishment of wastewater treatment plants.
- 4- This study provided a decision support tool useful for policymakers and decision-makers regarding the planning strategies of wastewater treatment plants or any other renewable energy project.



مکان‌یابی بهینه تصفیه‌خانه فاضلاب براساس رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها و تصمیم‌گیری مبتنی بر نظریه خاکستری

نوید رفیعی^{۱*}، محمد سوهانی^۲

۱- گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

۲- گروه مهندسی صنایع، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

کلید واژگان:

اولویت‌بندی براساس شباهت به راه‌حل

ایده‌آل

تحلیل پوششی داده‌ها

تصفیه‌خانه فاضلاب

مکان‌یابی

نظریه خاکستری

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی

*نویسنده مسئول: نوید رفیعی

پست الکترونیکی:

N.rafiei@iau-tnb.ac.ir

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یکی از زیرساخت‌های اصلی هر شهر هستند که جدای از در نظر گرفتن عارضه‌نگاری، جامعه و نوع فاضلاب، بسیار ضروری است که براساس شاخص‌های اصلی در مکانی مناسب تأسیس گردند. هدف این مطالعه مکان‌یابی بهینه تصفیه‌خانه فاضلاب برای یک مطالعه موردی در استان کرمانشاه بود و برای این منظور یک رویکرد دو مرحله‌ای تصمیم‌گیری پیشنهاد شد. با استفاده از این رویکرد، شاخص‌های کمی و کیفی مؤثر برای ارزیابی مکان‌ها در نظر گرفته شدند. در مرحله اول از تحلیل پوششی داده‌ها برای انتخاب مکان‌هایی با کارایی بالا براساس شاخص‌های قابل‌اندازه‌گیری، استفاده گشت. در مرحله دوم، این مکان‌های بالقوه به لحاظ شاخص‌های کیفی شامل عوامل فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی بیشتر مورد ارزیابی قرار گرفت که برای وزن‌دهی به شاخص‌ها و رتبه‌بندی مکان‌ها، به‌ترتیب فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و اولویت‌بندی براساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل خاکستری بکار گرفته شد. نتایج نشان داد که در فرآیند انتخاب مکان بالقوه بهینه به‌منظور تأسیس تصفیه‌خانه فاضلاب عوامل سازوکارهای حمایتی با وزن ۰/۱۷۹، دسترسی به شبکه انتقال با وزن ۰/۱۶۸، نزدیکی به مناطق مسکونی با وزن ۰/۱۲۹ و قوانین و سیاست‌های دولت با وزن ۰/۱۰۱ پراهمیت‌ترین شاخص‌ها می‌باشند. همچنین، در رتبه‌بندی نهایی مشخص شد که سه شهر سرمست، کرمانشاه و تازه‌آباد به‌ترتیب با ارزش درجه امکان‌پذیری ۰/۶۹۷، ۰/۸۲۰ و ۰/۹۱۳، بهینه‌ترین مکان‌های بالقوه برای تأسیس تصفیه‌خانه‌های فاضلاب هستند.



مقدمه

موقعیت جغرافیایی ایران در ناحیه‌ای گرم و خشک باعث شده تا بهره‌وری از آب آشامیدنی و سالم، با در نظر گرفتن محدودیت منابع آب، با هدف تأمین نیازهای حیاتی جوامع انسانی به موضوعی مهم تبدیل شود. این موضوع بخصوص در سال‌های اخیر با شکل‌گیری خشکسالی‌ها و افزایش غیرعادی مصرف آب در بخش‌های کشاورزی، صنعتی و خانگی اهمیت مضاعفی پیدا کرده است. امروزه یکی از رایج‌ترین مشکلات در جوامع، شهرنشینی و افزایش جمعیت شهری است [۱]. برا ساس گزارش سازمان ملل متحد، سه چهارم جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ در شهرها زندگی خواهند کرد، درحالی‌که بیشتر این رشد در کشورهای در حال توسعه رخ خواهد داد [۲]. رشد سریع شهرنشینی در نیم قرن اخیر همراه با تغییر الگو و افزایش غیرعادی مصرف آب باعث عدم تعادل ورودی و خروجی سیستم شهری شده است که منجر به افزایش بار ورودی به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب گشته و در نتیجه، مکان‌یابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب اهمیت ویژه‌ای را به خود جلب کرده است [۱].

در گذشته به علت نرخ پایین جمعیت، نفوذپذیری لایه‌های خاک در اکثر مناطق و وجود کانال‌ها و آبراهه‌های طبیعی، به موضوع جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب اهمیت چندانی داده نمی‌شد و فاضلاب‌ها از طریق چاه‌های جذبی دفع می‌گردید. همچنین، با هدف جلوگیری از آلودگی آب چاه‌ها، کانال‌ها و آبراهه‌ها اقداماتی صورت می‌گرفت تا چاه‌های فاضلاب از آنها دور نگهداری شوند و عدم وجود تصفیه‌خانه فاضلاب به شدت احساس نمی‌شد. اما امروزه عواملی مانند رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی، دسترسی به علم و فناوری، گسترش مراکز صنعتی و تجاری باعث افزایش مصرف منابع حیاتی و تولید مواد زائدی شده که در نتیجه آن محیط‌زیست با آلودگی و سلامت انسان‌ها با تهدید مواجه می‌شوند [۳]. بنابراین، نیاز است با ایجاد تأسیسات لازم برای جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی، به‌عنوان بخشی از راهبردهای سلامت و حفاظت از محیط‌زیست و همچنین، استفاده اقتصادی از منابع موجود، محیط‌زیست را در حوزه‌های مختلف بهبود بخشید. اما امکانات و فرآیندهای مختلفی برای تصفیه انواع فاضلاب مورد نیاز است، یکی از الزامات اساسی بازیافت، تعیین مکان مناسب برای احداث تصفیه‌خانه می‌باشد [۴]. در صورتیکه مکان احداث تصفیه‌خانه فاضلاب غیر صحیح و غیراصولی انتخاب شود، بسیاری از تصفیه‌خانه‌ها در مرحله بهره‌برداری با مشکلات جدی روبرو می‌شوند [۵]. در نتیجه، اولین گام در ایجاد تصفیه‌خانه، پیدا کردن مکان‌های مناسب برای ساخت آن است که ضرورت اجرای مطالعه حاضر را آشکار می‌سازد.

با در نظر گرفتن روند افزایش غیرعادی مصرف آب، محدودیت عارضه‌نگاری منطقه‌ای، محدودیت‌های سرزمینی و قانون ضرورت استفاده صنایع از پساب تصفیه‌خانه‌ها، لزوم اجرای طرحی مناسب و اقتصادی و همچنین، مکان‌یابی صحیح تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در استان کرمانشاه اهمیت به‌سزایی پیدا کرد. علاوه بر این، با توجه به شرایط اقلیمی، کاهش منابع آبی و کمبود بارندگی در استان کرمانشاه و ضرورت بکارگیری و توسعه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، اهمیت این امر دو چندان شده است.

به‌منظور مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب تاکنون مطالعات متعددی با روش‌ها و شاخص‌های مختلف انجام گرفته است. بالکیما و همکاران [۱] (۲۰۰۲) برای انتخاب سیستم‌های تصفیه فاضلاب یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه و مجموعه‌ای کامل از شاخص‌های پایداری را پیشنهاد کردند [۶]. هرناندز-سانچو و سالا-گاریدو [۲] (۲۰۰۹) برای انتخاب کاراترین تصفیه‌خانه فاضلاب در اسپانیا بر روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) ۳ تمرکز داشتند [۷]. ژائو و همکاران [۴] (۲۰۰۹) با هدف تعیین شاخص‌های مناسب جهت مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب ارزیابی حساسیت زیستی به روش

¹ Balkema et al

² Hernández-Sancho & Sala-Garrido

³ Data Envelopment Analysis

⁴ Zhao et al

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) ۱ را اجرا کردند [۸]. بوتیرو و همکاران ۲ (۲۰۱۱) به منظور انتخاب بهترین و پایدارترین تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از AHP و فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) ۳ استفاده کردند [۹]. فلاح و همکاران ۴ (۲۰۱۶) با بهره‌گیری از تکنیک‌های اولویت‌بندی براساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS) ۵ و سیستم اطلاعات جغرافیایی به مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب در جزیره قشم پرداختند [۴]. یک تکنیک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به منظور مکان‌یابی بهینه برای تأسیسات فاضلاب و سیستم تصفیه فاضلاب بهینه برای ایستگاه‌های مترو توسط قادری و همکاران ۶ (۲۰۱۹) بکار گرفته شد [۱۰]. رضاعلی و کریمی ۷ (۲۰۱۹) به منظور مکان‌یابی تصفیه‌خانه‌های غیرمتمرکز فاضلاب استان قم منطق فازی و AHP را ترکیب کردند [۱۱]. مکان‌یابی نقاط برداشت مناسب آب‌های زیرزمینی با استفاده از تلفیق رویکردهای دیمتل، سیستم اطلاعات جغرافیایی و ANP در حوضه آبریز دست اردبیل توسط راسی‌نظامی و همکاران ۸ (۲۰۲۰) مورد مطالعه قرار گرفت [۱۲]. آییلدیز و همکاران ۹ (۲۰۲۱) یک رویکرد تلفیقی را با استفاده از روش‌های Swara و DEA برای تجزیه و تحلیل عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در ترکیه و انتخاب کاراترین مکان آنها گسترش دادند [۱۳]. شاهمرادی و پورامرائی ۱۰ (۲۰۲۱) رویکرد استفاده از اراضی و تصمیم‌گیری مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی را به منظور مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب در شهر کوه‌دشت اتخاذ کردند [۱]. فو و همکاران ۱۱ (۲۰۲۲) عوامل مؤثر بر کلیشه‌ها نسبت به مکان‌های نه تصفیه‌خانه فاضلاب در چین را مورد مطالعه قرار دادند [۱۴]. چابانه و همکاران ۱۲ (۲۰۲۴) با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی و با بکارگیری AHP فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی به انتخاب مکان‌های بهینه تصفیه‌خانه فاضلاب در شمال تونس پرداختند. نتایج نشان داد مکان‌های بهینه با حداقل تأثیر بر محیط‌زیست و سلامت عمومی انتخاب شدند [۱۵].

با توجه به بررسی ادبیات براساس حوزه‌ها و رویکردهای تحقیقاتی مختلف، این نتیجه حاصل می‌شود که مطالعات مربوط به مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب از اهمیت بسیاری برخوردار است. با در نظر گرفتن این موضوع، در مطالعه حاضر برای نخستین بار تلاش‌هایی صورت گرفته است که برای شناسایی مکان بهینه تصفیه‌خانه فاضلاب در استان کرمانشاه از شایستگی‌های رویکردهای AHP، DEA، TOPSIS و نظریه خاکستری ۱۳ استفاده می‌شود. به‌عنوان یک روش ناپارامتریک مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی، DEA روشی قدرتمند است که تمرکز اصلی آن بر مقایسه مکان‌ها با توجه به کارایی آنها در تبدیل ورودی‌ها به خروجی‌ها قابل‌اندازه‌گیری می‌باشد [۱۶]. از طرف دیگر، AHP و TOPSIS به دلیل انعطاف‌پذیری و توانایی برای تجزیه یک مسئله تصمیم‌گیری که شاخص‌های غیرقابل‌اندازه‌گیری را در ارزیابی گزینه‌ها در نظر می‌گیرند، شناخته شده هستند. برای نمایش یک قضاوت یا امتیاز در رویکردهای کلاسیک AHP و TOPSIS از اعداد دقیق استفاده می‌شود که ثابت شده، این اعداد منجر به ایجاد اطلاعات نادقیق و کاهش دقت قضاوت‌ها در بسیاری از موارد دنیای واقعی می‌گردند. برای غلبه بر این مشکل، مطالعات متنوعی با بکارگیری اعداد فازی شکل گرفته است [۱۱]. اما یکی از انگیزه‌های مطالعه حاضر نمایش کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر

¹ Analytic hierarchy process

² Bottero et al

³ Analytic network process

⁴ Fallah et al

⁵ The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

⁶ Ghaderi et al

⁷ Rezaali & Karimi

⁸ Rasi Nezami et al

⁹ Ayyildiz et al

¹⁰ Shahmoradi & Pouremraeei

¹¹ Fu et al

¹² Chaabane et al

¹³ Grey Theory

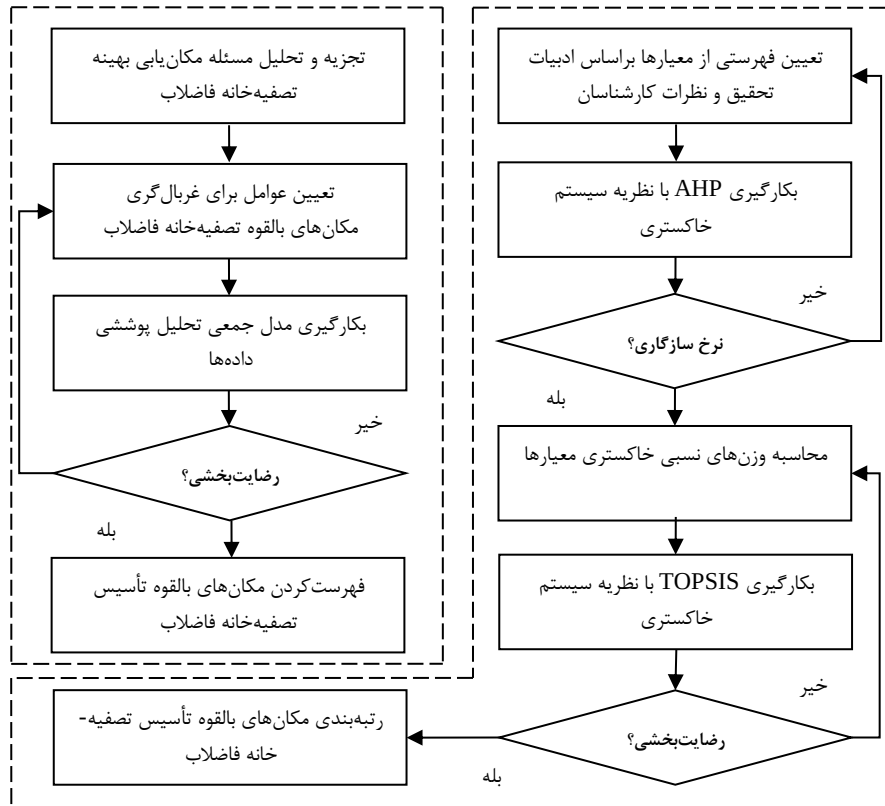
نظریه خاکستری به منظور انتخاب مکان تصفیه‌خانه فاضلاب، در مقایسه با نوع فازی می‌باشد. روش‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر نظریه خاکستری این مزیت را دارند تا ارزیابی‌های نامطمئن بیان شده به صورت اعداد خاکستری را، برای ایجاد یک رتبه‌بندی دقیق‌تر و استوارتر گزینه‌ها، پردازش کنند [۱۷].

یکی از نوآوری‌های این مطالعه، انجام یک بررسی جامع و سیستماتیک در مورد مسئله مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب در استان کرمانشاه است که به ندرت در ادبیات موجود گزارش شده است. همچنین، شاخص‌های انتخاب شده برای این مسئله هم قابل اندازه‌گیری، هم غیرقابل اندازه‌گیری، کامل و جامع بوده تا جنبه‌های مختلف تعیین زمینه‌های مناسب برای توسعه پایدار را بررسی کنند. نوآوری دیگر شامل اولین ترکیب AHP، DEA، TOPSIS و نظریه خاکستری است که به عنوان رویکردهای مناسب و مؤثر برای مکان‌یابی شناسایی شده‌اند. مطالعه حاضر با هدف ارائه یک ابزار پشتیبانی جامع برای تصمیم‌گیری در مورد راهبردهای برنامه‌ریزی مناسب و مؤثر به منظور مکان‌یابی بهینه تصفیه‌خانه فاضلاب ارائه شده است.

روش‌شناسی

چارچوب روش پیشنهادی

این مطالعه به منظور مکان‌یابی بهینه تصفیه‌خانه فاضلاب از یک چارچوب دو مرحله‌ای استفاده می‌کند. در همین راستا، در مرحله اول روش DEA بکار گرفته می‌شود تا براساس بهترین عملکرد در ابعاد قابل اندازه‌گیری شامل [۱۳] «ظرفیت تصفیه‌خانه فاضلاب»، «سرانه تولید فاضلاب به ازای هر نفر»، «مقدار فاضلاب تصفیه شده در تصفیه‌خانه فاضلاب» و «جمعیت تحت پوشش تأسیسات فاضلاب»، مکان‌های تصفیه‌خانه‌ها فیلتر شوند. با هدف گردآوری مجموعه داده‌های ابعاد قابل اندازه‌گیری در هر یک از مکان‌های تصفیه‌خانه‌ها، از سالنامه آماری ۱۴۰۱ شرکت آب و فاضلاب و مصاحبه با کارشناسان مربوط استفاده می‌گردد. در مرحله دوم، مکان‌های بالقوه باقیمانده با استفاده از روش‌های AHP خاکستری و TOPSIS خاکستری، با توجه به شاخص‌های ناملموس شامل ابعاد «فنی»، «اقتصادی»، «زیست‌محیطی» و «اجتماعی» که نیاز به ارزیابی کیفی داشته، بیشتر تجزیه و تحلیل شده و رتبه‌بندی می‌گردند. در این مرحله از نظرات پنج خبره و کارشناس بهره گرفته می‌شود تا پرسشنامه مقایسه زوجی شاخص‌ها با یکدیگر و همچنین، چک‌لیست ارزش گزینه‌ها براساس شاخص‌ها تکمیل گردند. چارچوب روش پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. چارچوب روش مکان‌یابی بهینه تصفیه‌خانه فاضلاب.

تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)

این مطالعه از DEA به‌عنوان یک رویکرد داده‌محور، برای فیلتر کردن فهرستی از مکان‌های تصفیه‌خانه فاضلاب استفاده می‌کند. در این روش هر مکان تصفیه‌خانه فاضلاب به‌عنوان یک واحد تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده و با کسب امتیاز کارایی برابر با یک، واحد موردنظر کارا نامیده می‌شود [۱۸]. برای اندازه‌گیری کارایی واحدهای تصمیم‌گیری نیاز است که وزن‌های تخصیصی به ورودی‌ها و خروجی‌ها بهینه گردند. برای رسیدن به این هدف، می‌توان از مدل جمعی ۱ DEA استفاده کرد. مدل جمعی از اولین و مهم‌ترین مدل‌های ارائه‌شده برای اندازه‌گیری کارایی در DEA است که پایه و منشأ تعریف بسیاری از مدل‌های دیگر می‌باشد. در نتیجه، در این مقاله برای اندازه‌گیری کارایی هر واحد تصمیم‌گیری به‌عنوان یک مکان تصفیه‌خانه فاضلاب، از حل مدل جمعی استفاده می‌گردد [۱۶]. در نظر بگیرید Z واحد تصمیم‌گیری با a ورودی و b خروجی وجود دارد. ارزش‌های ورودی و ارزش‌های خروجی برای واحد تصمیم‌گیری z ($z = 1, 2, \dots, Z$)، به ترتیب با pqz ($q = 1, 2, \dots, a$) و hrz ($r = 1, 2, \dots, b$) نمایش داده می‌شوند. فرم ریاضی مدل جمعی برای اندازه‌گیری کارایی واحد تصمیم‌گیری Z به‌صورت تعریف می‌شود:

¹ Additive Model

$$\begin{aligned}
 \text{Max } E_z &= \sum_{r=1}^b u_r h_{rz} - \sum_{q=1}^a e_q p_{qz} - T \\
 \text{s.t.} \\
 \sum_{r=1}^b u_r h_{rz} - \sum_{q=1}^a e_q p_{qz} - T &\leq 0, \\
 u_r, e_q &\geq 1 \text{ and } T \text{ is free.}
 \end{aligned} \tag{۱}$$

که E_z اندازه کارایی واحد تصمیم‌گیری z بوده، uq و vr به ترتیب اوزان ورودی‌ها و خروجی‌ها هستند و علامت T نوع بازده به مقیاس را نشان می‌دهد. مدل جمعی در فرمول (۱) باید برای هر واحد تصمیم‌گیری یا مکان تصفیه‌خانه فاضلاب فرموله شود تا مجموعه‌ای از اوزان برای حداکثر کردن کارایی واحد تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده، پیدا شود. اگر پس از حل مدل، E_z برابر با یک باشد واحد تصمیم‌گیری کارا نامیده شده و در غیر اینصورت، ناکارا می‌باشد.

نظریه خاکستری

نظریه سیستم خاکستری برای حل مسائل عدم قطعیت با داده‌های گسسته و تا حدودی شناخته شده پیشنهاد شده است. در سیستم خاکستری براساس درجه اطلاعات، می‌توان آنها را به سه دسته را طبقه‌بندی کرد. اگر اطلاعات به‌طور کامل شناخته شده باشند، «سیستم سفید» هستند. اگر اطلاعات نا شناخته باشند، «سیستم سیاه» هستند و اگر اطلاعات تا حدودی شناخته شده باشند، «سیستم خاکستری» می‌باشند. مزیت نظریه خاکستری اینست که قادر است به‌طور انعطاف‌پذیری با شرایط مبهم برخورد کند [۱۷]. یک عدد خاکستری ($\otimes x$) به صورت $\otimes x = [x_L, x_U]$ تعریف می‌شود که x_L و x_U به ترتیب، حد پایینی و حد بالایی تابع عضویت برای عدد خاکستری هستند. ارزش عدد خاکستری به‌طور قطعی مشخص نبوده، اما برای آن یک محدوده فاصله‌ای که مقدار در آن قرار دارد، مشخص است. در نظر بگیرید که $\otimes x_1 = [x_{L1}, x_{U1}]$ و نیز $\otimes x_2 = [x_{L2}, x_{U2}]$ دو عدد خاکستری هستند، k یک عدد واقعی مثبت و Len طول عدد خاکستری می‌باشند. عملیات حسابی پایه به‌صورت فرمول‌های (۲) تا (۷) بیان می‌شوند [۱۷].

$$\otimes x_1 + \otimes x_2 = [x_1^L + x_2^L, x_1^U + x_2^U] \tag{۲}$$

$$\otimes x_1 - \otimes x_2 = [x_1^L - x_2^L, x_1^U - x_2^U] \tag{۳}$$

$$\otimes x_1 * \otimes x_2 = [\min(x_1^L x_2^L, x_1^L x_2^U, x_1^U x_2^L, x_1^U x_2^U), \max(x_1^L x_2^L, x_1^L x_2^U, x_1^U x_2^L, x_1^U x_2^U)] \tag{۴}$$

$$\otimes x_1 / \otimes x_2 = [\min(x_1^L / x_2^L, x_1^L / x_2^U, x_1^U / x_2^L, x_1^U / x_2^U), \max(x_1^L / x_2^L, x_1^L / x_2^U, x_1^U / x_2^L, x_1^U / x_2^U)] \tag{۵}$$

$$k \otimes x_1 = k[x_1^L, x_1^U] = [kx_1^L, kx_1^U] \tag{۶}$$

$$Len(\otimes x_1) = [x_1^U - x_1^L] \tag{۷}$$

درجه امکان‌پذیری بین دو عدد خاکستری $\otimes x_1$ و $\otimes x_2$ $P\{\otimes x_1 \leq \otimes x_2\}$ ، بصورت فرمول (۸) ارائه می‌گردد [۱۷].

$$\begin{aligned}
 P\{\otimes x_1 \leq \otimes x_2\} &= \frac{\max(0, Len^* - \max(0, x_1^U - x_2^L))}{Len^*}, \\
 Len^* &= Len(\otimes x_1) + Len(\otimes x_2)
 \end{aligned} \tag{۸}$$

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) خاکستری

روش AHP به‌گسترده‌گی برای حل مسائل پیچیده تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) ۱ بکار گرفته می‌شود [۱۹]. رویکرد AHP خاکستری به‌منظور کاهش قضاوت‌های ذهنی در فرآیند تصمیم‌گیری، نظریه خاکستری و روش AHP را ترکیب می‌کند. عبارات کلامی و اعداد خاکستری مورد استفاده در AHP خاکستری در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. عبارت کلامی و عدد خاکستری استفاده‌شده در AHP خاکستری.

سطح	عبارات کلامی	اعداد خاکستری
۱	اهمیت برابر	[۱, ۲]
۳	اهمیت متوسط	[۳, ۴]
۵	اهمیت شدید	[۵, ۶]
۷	اهمیت بسیار شدید	[۷, ۸]
۹	اهمیت فوق‌العاده	[۹, ۱۰]

گام‌های اصلی رویکرد AHP خاکستری به شرح زیر است [۲۰]:

گام ۱: توسعه درخت تصمیم مسئله تصمیم‌گیری و ایجاد ماتریس مقایسات زوجی براساس قضاوت‌های کارشناسان. در نظر بگیرید که e کارشناس وجود دارد، ارزش شاخص i نسبت به شاخص j با بکارگیری میانگین هندسی به‌صورت فرمول (۹) قابل محاسبه است.

$$\otimes x_{ij} = \sqrt[e]{\otimes x_{ij}^1 \times \otimes x_{ij}^2 \times L \times \otimes x_{ij}^e} \quad (9)$$

که $\otimes x_{ij}$ یک مقایسه زوجی شاخص i نسبت به شاخص j با توجه به قضاوت‌های یک گروه از تصمیم‌گیرندگان است. سپس، ماتریس مقایسات زوجی خاکستری یکپارچه (D) می‌تواند به شکل فرمول (۱۰) فرمول‌بندی شود.

$$D = \begin{pmatrix} \otimes x_{11} & K & \otimes x_{1n} \\ M & O & M \\ \otimes x_{m1} & L & \otimes x_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [x_{11}^L, x_{11}^U] & K & [x_{1n}^L, x_{1n}^U] \\ M & O & M \\ [x_{m1}^L, x_{m1}^U] & L & [x_{mn}^L, x_{mn}^U] \end{pmatrix} \quad (10)$$

گام ۲: ماتریس مقایسات زوجی خاکستری بی‌مقیاس شده (D^*) با استفاده از فرمول‌های (۱۱) تا (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$D^* = \begin{pmatrix} [x_{11}^{L*}, x_{11}^{U*}] & K & [x_{1n}^{L*}, x_{1n}^{U*}] \\ M & O & M \\ [x_{m1}^{L*}, x_{m1}^{U*}] & L & [x_{mn}^{L*}, x_{mn}^{U*}] \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$x_{ij}^{L*} = \frac{2x_{ij}^L}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^L + \sum_{i=1}^m x_{ij}^U} \quad (12)$$

¹ Multiple-Criteria Decision-Making

$$x_{ij}^{U*} = \frac{2x_{ij}^U}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^L + \sum_{i=1}^m x_{ij}^U} \quad (13)$$

که $x_{ij}L^*$ و $x_{ij}U^*$ به ترتیب، حد پایینی و حد بالایی ارزش بی‌مقیاس شده مقایسه زوجی شاخص i نسبت به شاخص j برای عدد خاکستری می‌باشند.

گام ۳: وزن خاکستری هر شاخص $(\otimes \omega_j)$ با بکارگیری فرمول (۱۴) قابل محاسبه است که در این فرمول $n = \{1, 2, \dots, N\}$ مجموعه شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

$$\otimes \omega_i = \frac{\sum_{j=1}^n [x_{ij}^{L*}, x_{ij}^{U*}]}{n} \quad (14)$$

گام ۴: سفیدسازی وزن خاکستری با فرمول (۱۵) انجام می‌گردد. ارزش سفیدشده وزن خاکستری فاصله‌ای (Mi) ، یک عدد قطعی بوده که ارزش احتمالی آن بین حد بالایی $(\omega_i U)$ و پایینی $(\omega_i L)$ وزن خاکستری فاصله‌ای قرار دارد.

$$M_i = (1-\lambda)\omega_i^L + \lambda\omega_i^U \quad (15)$$

که λ با مقداری بین صفر و یک ضریب سفیدسازی را نمایش می‌دهد و در این مطالعه ارزش مقدار $\lambda = 0.5$ در نظر گرفته می‌شود.

ترتیب اولویت براساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS) خاکستری

روش TOPSIS توسط هوانگ و یون در سال ۱۹۸۱ پیشنهاد شد. مزیت روش TOPSIS اینست که گزینه بهینه با محاسبه فاصله بین راه‌حل ایده‌آل مثبت و راه‌حل ایده‌آل منفی تعریف می‌شود. رویکرد TOPSIS خاکستری نیز، به منظور کاهش قضاوت‌های ذهنی در فرآیند تصمیم‌گیری نظریه خاکستری و TOPSIS را ترکیب می‌کند [۲۱]. گام‌های اصلی رویکرد TOPSIS خاکستری به شرح زیر است [۲۲]:

گام ۱: فرض کنید که $S = \{S_1, S_2, \dots, S_s, \dots, S_m\}$ مجموعه‌ای گسسته از گزینه‌ها یا مکان‌های بالقوه تصفیه‌خانه فاضلاب بوده که توسط یک مجموعه‌ای از شاخص‌ها $C = \{C_1, C_2, \dots, C_g, \dots, C_n\}$ رتبه‌بندی می‌شوند. در اولین گام، وزن هر شاخص توسط عبارات کلامی خاکستری مشخص می‌گردد. در این مطالعه، همان‌گونه که در زیربخش قبل شرح داده شد وزن‌های خاکستری از رویکرد AHP خاکستری بدست می‌آیند.

گام ۲: ارزیابی ارجحیت‌های گزینه‌های تحقیق در هر یک از شاخص‌ها با استفاده از عبارات کلامی خاکستری و اعداد خاکستری که در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲. عبارات کلامی و عدد خاکستری استفاده‌شده در TOPSIS خاکستری.

عبارات کلامی	اعداد خاکستری
خیلی ضعیف	[۰, ۱]
ضعیف	[۱, ۳]
تقریباً ضعیف	[۳, ۴]
متوسط	[۴, ۵]
تقریباً خوب	[۵, ۶]
خوب	[۶, ۹]

گام ۳. تبدیل عبارات کلامی به اعداد خاکستری. در نظر بگیرید که $\otimes Gsg$ اهمیت گزینه s در شاخص g را نشان می‌دهد و e کارشناس وجود دارد، ارزش گزینه s در شاخص g به صورت فرمول (۱۶) قابل محاسبه است.

$$\otimes G_{sg} = \frac{1}{e} (\otimes G_{sg}^1 + \otimes G_{sg}^2 + L + \otimes G_{sg}^e) \quad (16)$$

سپس، ماتریس تصمیم خاکستری (E) به صورت فرمول (۱۷) شکل می‌گیرد.

$$E = \begin{pmatrix} \otimes G_{11} & K & \otimes G_{1n} \\ M & O & M \\ \otimes G_{1n} & L & \otimes G_{mn} \end{pmatrix} \quad (17)$$

گام ۴. ایجاد ماتریس تصمیم خاکستری بی‌مقیاس شده (E^*) با استفاده از معادله (۱۸)، که پس از فرآیند بی‌مقیاس‌سازی ارزش‌های آن بین صفر و یک خواهد بود.

$$E^* = \begin{pmatrix} \otimes G_{11}^* & K & \otimes G_{1n}^* \\ M & O & M \\ \otimes G_{m1}^* & L & \otimes G_{mn}^* \end{pmatrix} \quad (18)$$

اگر شاخص ماهیت مثبت داشته باشد برای بی‌مقیاس‌سازی از فرمول (۱۹) استفاده شده و اگر شاخص ماهیت منفی داشته باشد برای بی‌مقیاس‌سازی از فرمول (۲۰) استفاده می‌گردد.

$$\otimes G_{gs}^* = \left[\frac{G_{sg}^L}{G_g^{max}}, \frac{G_{sg}^U}{G_g^{max}} \right], G_g^{max} = \max_{1 \leq s \leq m} \{G_{sg}^U\} \quad (19)$$

$$\otimes G_{gs}^* = \left[\frac{G_g^{min}}{G_{sg}^U}, \frac{G_g^{min}}{G_{sg}^L} \right], G_g^{min} = \min_{1 \leq s \leq m} \{G_{sg}^L\} \quad (20)$$

که $GsgL$ و $GsgU$ به ترتیب، حد پایینی و حد بالایی اهمیت گزینه s در شاخص g و همچنین، $\otimes G^*sg$ ارزش بی‌مقیاس‌شده اهمیت گزینه s در شاخص g را برای عدد خاکستری نشان می‌دهند.

گام ۵. تشکیل ماتریس تصمیم خاکستری بی‌مقیاس‌شده وزین (Y) با بکارگیری فرمول (۲۱). ωg وزن‌های خاکستری هر شاخص نامیده می‌شود.

$$\otimes Y_{sg} = \otimes G_{sg}^* \times \omega_g, \quad Y = \begin{pmatrix} \otimes Y_{11} & K & \otimes Y_{1n} \\ M & O & M \\ \otimes Y_{m1} & L & \otimes Y_{mn} \end{pmatrix} \quad (21)$$

در این فرمول Y_{sg} بیانگر ارزش بی‌مقیاس‌شده وزین اهمیت گزینه S در شاخص g برای عدد خاکستری است. گام ۶. محاسبه ارزش‌های راه‌حل ایده‌آل مثبت (S_{max}) و راه‌حل ایده‌آل منفی (S_{min}) به‌ترتیب، با استفاده از فرمول‌های (۲۲) و (۲۳).

$$S^{max} = \{ [\max_{1 \leq s \leq m} Y_{s1}^L, \max_{1 \leq s \leq m} Y_{s1}^U], [\max_{1 \leq s \leq m} Y_{s2}^L, \max_{1 \leq s \leq m} Y_{s2}^U], \dots, [\max_{1 \leq s \leq m} Y_{sn}^L, \max_{1 \leq s \leq m} Y_{sn}^U] \} \quad (22)$$

$$S^{min} = \{ [\min_{1 \leq s \leq m} Y_{s1}^L, \min_{1 \leq s \leq m} Y_{s1}^U], [\min_{1 \leq s \leq m} Y_{s2}^L, \min_{1 \leq s \leq m} Y_{s2}^U], \dots, [\min_{1 \leq s \leq m} Y_{sn}^L, \min_{1 \leq s \leq m} Y_{sn}^U] \} \quad (23)$$

گام ۷. اندازه‌گیری درجه امکان‌پذیری خاکستری بین راه‌حل ایده‌آل S_{max} و مجموعه گزینه‌ها شامل موارد $SS = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ ، که در قالب فرمول (۲۴) قابل نمایش است.

$$P\{S_s \leq S^{max}\} = \frac{1}{n} \sum_{g=1}^n P\{ \otimes Y_{sg} \leq \otimes S_g^{max} \} \quad (24)$$

گام ۸. رتبه‌بندی مجموعه گزینه‌ها. ارزش‌های درجه امکان‌پذیری خاکستری به‌ترتیب صعودی مرتب می‌شوند. کمترین ارزش درجه خاکستری گزینه بهینه را نشان می‌دهد.

یافته‌ها و بحث

مرحله اول: غربال‌گری مکان‌های بالقوه تصفیه‌خانه فاضلاب با مدل جمعی DEA

در مرحله اول فرآیند تحقیق با مدل جمعی DEA، در مجموع ۱۲ شهر در استان کرمانشاه به‌عنوان واحدهای تصمیم‌گیری یا مکان‌های بالقوه تأسیس تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در نظر گرفته شدند. به‌منظور تعیین مکان تأسیس تصفیه‌خانه فاضلاب با امتیاز کارایی کامل (یعنی برابر با یک)، با بررسی ادبیات و مصاحبه با کارشناسان شرکت آب و فاضلاب، دو ورودی به نام‌های «ظرفیت تصفیه‌خانه فاضلاب» و «سرانه تولید فاضلاب به ازای هر نفر» و دو خروجی به نام‌های «مقدار فاضلاب تصفیه شده در تصفیه‌خانه فاضلاب» و «جمعیت تحت پوشش تأسیسات فاضلاب» تعریف گشت. علاوه بر این، مجموعه داده‌های عوامل ورودی و خروجی در هر یک از ۱۲ شهر، با مصاحبه با کارشناسان و مراجعه به سالنامه آماری ۱۴۰۱ شرکت آب و فاضلاب جمع‌آوری شد که در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳. داده‌های عوامل ورودی و خروجی استفاده‌شده در مدل جمعی DEA.

امتیاز کارایی	خروجی‌ها		ورودی‌ها		مکان تأسیس تصفیه‌خانه
	جمعیت تحت پوشش تأسیسات فاضلاب	مقدار فاضلاب تصفیه‌شده در تصفیه‌خانه فاضلاب	سرانه تولید فاضلاب به ازای هر نفر	ظرفیت تصفیه‌خانه فاضلاب	
۱/۰۰۰	۷۰۳۲۲۵	۶۰۰۰	۲۲۵	۶۷۰۰	کرمانشاه
۱/۰۰۰	۸۸۹۸۹	۱۷۳۰۰	۱۹۴	۱۴۰۰	اسلام‌آباد غرب
۰/۳۳۹	۱۹۷۴۸	۴۴۷۱	۲۲۱	۵۶۰۰	روانسر

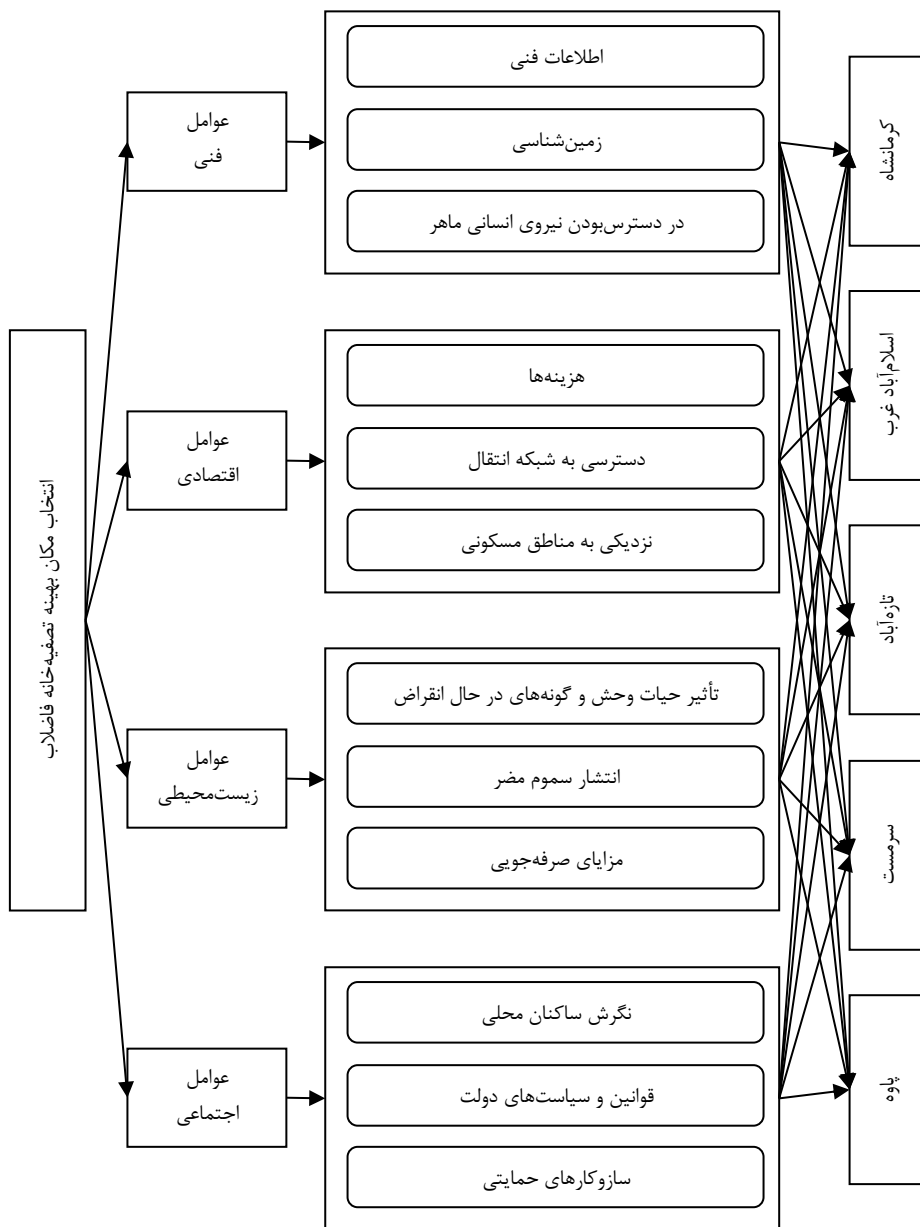
تازه‌آباد	۱۸۲۰	۱۲۸	۲۷۲۷	۱۶۹۹۰	۱/۰۰۰
سرمرست	۷۱۱	۱۰۹	۲۶۷	۲۹۱۴	۱/۰۰۰
صحنه	۶۴۰۰	۱۷۵	۵۸۹۸	۲۰۲۵۱	۰/۳۴۵
سنقر	۷۴۰۰	۱۵۲	۷۴۰۷	۴۴۴۴۳	۰/۶۰۷
کزند غرب	۲۲۰۰	۱۴۸	۱۲۷۰	۷۲۱۱	۰/۳۲۷
گیلان غرب	۳۴۰۰	۳۵۱	۳۴۰۰	۱۹۹۰۸	۰/۴۷۴
پاوه	۱۷۲۰	۲۴۷	۳۰۰۰	۲۷۳۴۴	۱/۰۰۰
قصر شیرین	۲۲۵۰	۲۱۸	۲۲۰۰	۱۶۹۷۵	۰/۵۷۴
سرپل ذهاب	۷۴۰۰	۱۷۴	۷۲۰۰	۴۲۱۰۹	۰/۵۶۶

داده‌های جمع‌آوری شده برای اجرای مدل جمعی DEA بکار گرفته می‌شوند. در واقع اجرای این مرحله، به‌منظور یافتن و جدا سازی مکان‌های بالقوه بهینه تصفیه‌خانه‌های فاضلابی می‌باشد که دارای امتیاز کارایی کامل یا برابر با یک هستند. سپس، مکان‌های بالقوه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب جداسازی‌شده و انتخاب‌شده، در مرحله دوم با رویکرد تصمیم‌گیری مبتنی بر نظریه خاکستری یعنی ترکیب روش‌های AHP خاکستری و TOPSIS خاکستری بیشتر مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.

پس از استفاده از مدل جمعی DEA، امتیازات کارایی بدست‌آمده هر یک از مکان‌های بالقوه ۱۲ تصفیه‌خانه فاضلاب در ستون آخر جدول ۳ فهرست شده است. لازم به ذکر است که تمامی محاسبات مربوط، تحت برنامه‌های کدشده در محیط MATLAB نسخه ۲۰۲۱ تسهیل شد. از نتایج ستون آخر جدول ۳ مشاهده می‌شود که در مجموع پنج مکان بالقوه امتیاز کارایی کامل و برابر با یک بدست آوردند که عبارتند از: کرمانشاه، اسلام‌آباد، تازه‌آباد، سرمرست و پاوه. این پنج مکان بالقوه برای تأسیس تصفیه‌خانه فاضلاب در نظر گرفته می‌شوند و در مرحله دوم روش تحقیق، با بکارگیری رویکرد تصمیم‌گیری مبتنی بر نظریه خاکستری بیشتر مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

مرحله دوم: رتبه‌بندی مکان‌های بالقوه باقیمانده با رویکرد تصمیم‌گیری مبتنی بر نظریه خاکستری

در مرحله دوم روش تحقیق با بهره‌گیری از رویکردهای تصمیم‌گیری مبتنی بر نظریه خاکستری، پنج مکان بالقوه تأسیس تصفیه‌خانه فاضلاب که در مرحله اول امتیاز کارایی کامل و یا یک را کسب کردند، با استفاده از روش‌های AHP خاکستری و TOPSIS خاکستری ارزیابی بیشتر شده و در نهایت رتبه‌بندی می‌گردند. شکل ۲ درخت سلسله‌مراتبی تصمیم‌گیری مکان‌یابی بهینه تصفیه‌خانه فاضلاب را به تصویر می‌کشد.



شکل ۲. درخت سلسله مراتبی تصمیم مکان‌یابی بهینه تصفیه خانه فاضلاب.

در این مرحله، از AHP خاکستری به منظور اندازه‌گیری اهمیت و وزن خاکستری نسبی هر شاخص استفاده شده و سپس، TOPSIS خاکستری با هدف رتبه‌بندی مکان‌های بالقوه تصفیه خانه فاضلاب بکار گرفته می‌شود. فهرست شاخص‌ها و رتبه‌بندی عملکرد آنها توسط قضاوت خبرگان و کارشناسان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف. برآورد وزن‌های خاکستری با استفاده از روش AHP خاکستری
روش AHP خاکستری برای اندازه‌گیری وزن خاکستری اولویت نسبی هر شاخص بکار گرفته می‌شود. بطور کلی، در این قسمت چهار شاخص اصلی شامل عوامل فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در نظر گرفته شده که هر یک به سه شاخص فرعی تجزیه می‌شوند که در جدول ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۴. فهرست شاخص‌های اصلی و شاخص‌های فرعی آنها.

شاخص اصلی	فنی	اقتصادی	زیست‌محیطی	اجتماعی
شاخص فرعی	- اطلاعات فنی	- هزینه‌ها	- تأثیر حیات وحش و گونه‌های در حال انقراض	- نگرش ساکنان محلی
	- زمین‌شناسی	- دسترسی به شبکه انتقال	- انتشار سموم مضر	- قوانین و سیاست‌های دولت
	- در دسترس بودن نیروی انسانی ماهر	- نزدیکی به مناطق مسکونی	- مزایای صرفه‌جویی	- سازوکارهای حمایتی

در ادامه به‌عنوان نمونه، رویه اندازه‌گیری وزن چهار شاخص اصلی شامل عوامل فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی نشان داده می‌شود. بر اساس گام ۱ AHP خاکستری و فرمول‌های (۹) و (۱۰)، با در نظر گرفتن نظرات پنج خبره، چهار شاخص اصلی با استفاده از عبارات کلامی جدول ۱ با یکدیگر مقایسه شدند. بر این اساس، ماتریس مقایسات زوجی خاکستری یکپارچه چهار عامل اصلی به‌صورت جدول ۵ تشکیل شد.

جدول ۵. ماتریس مقایسات زوجی خاکستری یکپارچه.

شاخص	فنی	اقتصادی	زیست‌محیطی	اجتماعی
فنی	[۱, ۱]	[۰/۱۷, ۰/۲]	[۵, ۶]	[۳, ۴]
اقتصادی	[۵, ۶]	[۱, ۱]	[۱, ۱]	[۳, ۴]
زیست‌محیطی	[۵, ۶]	[۱, ۱]	[۱, ۱]	[۵, ۶]
اجتماعی	[۰/۲۵, ۰/۳۳]	[۰/۲۵, ۰/۳۳]	[۰/۱۷, ۰/۲]	[۱, ۱]

سپس، ماتریس مقایسات زوجی خاکستری بی‌مقیاس شده با استفاده از فرمول‌های (۱۱) تا (۱۳) محاسبه گشت. علاوه بر این، وزن خاکستری هر شاخص با بکارگیری فرمول (۱۴) تعیین شد که این نتایج نیز در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. ماتریس مقایسات زوجی خاکستری بی‌مقیاس شده AHP خاکستری.

شاخص	فنی	اقتصادی	زیست‌محیطی	اجتماعی	وزن خاکستری
فنی	[۰/۰۸۱, ۰/۰۸۱]	[۰/۰۶۷, ۰/۰۸۱]	[۰/۰۷۰, ۰/۰۸۵]	[۰/۲۲۲, ۰/۲۹۶]	[۰/۱۱۰, ۰/۱۳۶]
اقتصادی	[۰/۴۰۷, ۰/۴۸۸]	[۰/۴۰۴, ۰/۴۰۴]	[۰/۴۲۳, ۰/۴۲۳]	[۰/۲۲۲, ۰/۲۹۶]	[۰/۳۶۴, ۰/۴۰۳]
زیست‌محیطی	[۰/۴۰۷, ۰/۴۸۸]	[۰/۴۰۴, ۰/۴۰۴]	[۰/۴۲۳, ۰/۴۲۳]	[۰/۳۷۰, ۰/۴۴۴]	[۰/۴۰۱, ۰/۴۴۰]
اجتماعی	[۰/۰۲۰, ۰/۰۲۷]	[۰/۰۱۰, ۰/۱۳۵]	[۰/۰۷۰, ۰/۰۸۵]	[۰/۰۷۴, ۰/۰۷۴]	[۰/۰۶۷, ۰/۰۸۰]

در نهایت در گام ۴ روش AHP خاکستری، سفیدسازی وزن خاکستری با فرمول (۱۵) صورت پذیرفت و ارزش قطعی وزن هر شاخص تعیین گشت. بدین ترتیب به شاخص فنی وزن ۰/۱۲۳، به شاخص اقتصادی وزن ۰/۳۸۳، به

شاخص زیست محیطی به عنوان پراهمیت‌ترین شاخص وزن ۰/۴۲۰ و به شاخص اجتماعی وزن ۰/۰۷۳ تعلق گرفت. تمامی مراحل بالا برای اندازه‌گیری وزن هر شاخص فرعی چهار شاخص اصلی، بطور مشابه تکرار شد که نتایج آنها در جدول ۷ قابل مشاهده می‌باشد. لازم به ذکر است سازگاری تمامی ماتریس‌های مقایسات زوجی در این مرحله با داشتن نرخ کوچکتر از ۰/۱، همه قابل قبول بوده و نرخ رضایت‌بخشی را نشان می‌دادند.

جدول ۷. وزن‌های خاکستری و قطعی نسبی شاخص‌های فرعی.

شاخص اصلی	شاخص فرعی	وزن خاکستری	وزن قطعی
فنی	اطلاعات فنی	[۰/۰۳۸, ۰/۰۶۶]	۰/۰۵۲
	زمین‌شناسی	[۰/۰۵۱, ۰/۰۸۸]	۰/۰۷۰
	در دسترس بودن نیروی انسانی ماهر	[۰/۰۲۸, ۰/۰۴۸]	۰/۰۳۸
اقتصادی	هزینه‌ها	[۰/۱۲۴, ۰/۳۱۱]	۰/۱۶۸
	دسترسی به شبکه انتقال	[۰/۰۶۴, ۰/۱۰۸]	۰/۰۸۶
	نزدیکی به مناطق مسکونی	[۰/۱۰۰, ۰/۱۵۷]	۰/۱۲۹
زیست محیطی	تأثیر حیات وحش و گونه‌های در حال انقراض	[۰/۰۲۹, ۰/۰۴۶]	۰/۰۳۸
	انتشار سموم مضر	[۰/۰۲۱, ۰/۰۳۲]	۰/۰۲۷
	مزایای صرفه‌جویی	[۰/۰۳۵, ۰/۰۵۵]	۰/۰۴۵
اجتماعی	نگرش ساکنان محلی	[۰/۰۴۹, ۰/۰۸۴]	۰/۰۶۷
	قوانین و سیاست‌های دولت	[۰/۰۸۱, ۰/۱۲۱]	۰/۱۰۱
	سازوکارهای حمایتی	[۰/۱۴۶, ۰/۳۱۲]	۰/۱۷۹
مجموع وزن‌ها			۱/۰۰۰

به عنوان مثال، وزن خاکستری اولین شاخص فرعی یعنی اطلاعات فنی، دارای مقدار بدینانه ۰/۰۳۸ و مقدار خوشبینانه ۰/۰۶۶ می‌باشد. توضیحات دیگر شاخص‌های فرعی بدین صورت ارائه می‌شود. این وزن‌های خاکستری در ادامه با استفاده از رابطه سفیدسازی به مقداری قطعی تبدیل شدند که نتایج آن در ستون آخر جدول ۷ فهرست شده است. براساس نتایج این جدول، سازوکارهای حمایتی با وزن ۰/۱۷۹، دسترسی به شبکه انتقال با وزن ۰/۱۶۸، نزدیکی به مناطق مسکونی با وزن ۰/۱۲۹ و قوانین و سیاست‌های دولت با وزن ۰/۱۰۱ پراهمیت‌ترین شاخص‌های فرعی هستند. ب. رتبه‌بندی مکان‌های بالقوه تأسیس تصفیه‌خانه فاضلاب با استفاده از روش TOPSIS خاکستری

روش TOPSIS خاکستری با هدف توصیف رتبه‌بندی عملکرد پنج مکان بالقوه تأسیس تصفیه‌خانه فاضلاب شامل کرمانشاه، اسلام‌آباد، تازه‌آباد، سرمست و پاه بکار گرفته می‌شود. در این روش مکان بالقوه‌ای که کمترین درجه امکان-پذیری خاکستری را داشته باشد به عنوان رتبه بالاتر انتخاب می‌گردد. با دنبال کردن رویه TOPSIS خاکستری، ماتریس تصمیم خاکستری بی‌مقیاس شده بصورت جدول ۸ حاصل شد.

جدول ۸. ماتریس تصمیم خاکستری بی‌مقیاس شده TOPSIS خاکستری.

مکان	اطلاعات فنی	زمین‌شناسی	در دسترس بودن نیروی انسانی ماهر	هزینه‌ها
کرمانشاه	[۰/۷۱۰, ۰/۹۱۰]	[۰/۷۱۰, ۰/۹۱۰]	[۰/۳۵۰, ۰/۴۷۰]	[۰/۲۳۵, ۰/۴۰۰]
اسلام-آباد	[۰/۲۳۰, ۰/۳۷۰]	[۰/۲۰۰, ۰/۳۲۰]	[۰/۱۸۰, ۰/۳۰۰]	[۰/۷۹۵, ۱/۰۰۰]
تازه‌آباد	[۰/۲۷۰, ۰/۴۱۰]	[۰/۳۲۰, ۰/۴۲۰]	[۰/۱۲۰, ۰/۲۶۰]	[۰/۳۲۰, ۰/۵۰۵]
سرمست	[۰/۸۴۰, ۱/۰۰۰]	[۰/۸۴۰, ۱/۰۰۰]	[۰/۷۹۰, ۱/۰۰۰]	[۰/۱۹۰, ۰/۳۴۰]
پاه	[۰/۳۱۰, ۰/۴۹۰]	[۰/۲۷۰, ۰/۴۵۰]	[۰/۳۱۰, ۰/۴۹۰]	[۰/۱۹۵, ۰/۲۶۰]

مکان	دسترسی به شبکه انتقال	نزدیکی به مناطق مسکونی	تأثیر حیات وحش و گونه‌های در حال انقراض	انتشار سموم مضر
کرمانشاه	[۰/۳۶۵, ۰/۵۰۰]	[۰/۲۵۰, ۰/۱۸۰]	[۰/۷۶۰, ۱/۰۰۰]	[۰/۷۶۰, ۱/۰۰۰]
اسلام-آباد	[۰/۲۱۵, ۰/۳۳۵]	[۰/۲۵۵, ۰/۳۶۵]	[۰/۳۵۰, ۰/۴۷۰]	[۰/۲۳۰, ۰/۳۷۰]
تازه‌آباد	[۰/۰۴۰, ۰/۱۸۵]	[۰/۷۶۰, ۱/۰۰۰]	[۰/۳۳۰, ۰/۴۵۰]	[۰/۳۲۰, ۰/۴۲۰]
سرمدست	[۰/۷۲۰, ۱/۰۰۰]	[۰/۱۹۰, ۰/۲۸۵]	[۰/۵۳۰, ۰/۶۸۰]	[۰/۶۲۰, ۰/۷۴۰]
پاوه	[۰/۴۵۵, ۰/۶۱۵]	[۰/۱۹۵, ۰/۳۵۰]	[۰/۴۸۰, ۰/۶۲۰]	[۰/۳۵۰, ۰/۴۹۰]
مکان	مزایای صرفه‌جویی	نگرش ساکنان محلی	قوانین و سیاست‌های دولت	سازوکارهای حمایتی
کرمانشاه	[۰/۴۹۰, ۰/۶۷۰]	[۰/۰۴۵, ۰/۰۶۰]	[۰/۲۳۵, ۰/۴۰۰]	[۰/۲۸۵, ۰/۴۳۰]
اسلام-آباد	[۰/۱۷۰, ۰/۳۱۰]	[۰/۰۸۰, ۰/۱۱۰]	[۰/۵۳۵, ۱/۰۰۰]	[۰/۲۵۵, ۰/۳۹۵]
تازه‌آباد	[۰/۳۲۰, ۰/۴۵۰]	[۰/۳۷۵, ۱/۰۰۰]	[۰/۱۶۰, ۰/۲۱۵]	[۰/۲۶۵, ۰/۳۳۵]
سرمدست	[۰/۸۴۰, ۱/۰۰۰]	[۰/۰۴۵, ۰/۰۵۵]	[۰/۱۶۰, ۰/۱۶۵]	[۰/۸۰۵, ۱/۰۰۰]
پاوه	[۰/۳۶۰, ۰/۵۴۰]	[۰/۰۸۵, ۰/۱۴۰]	[۰/۲۱۰, ۰/۳۷۵]	[۰/۴۰۵, ۰/۵۷۰]

در ادامه، براساس داده‌های جدول ۸ و با در نظر گرفتن وزن‌های خاکستری شاخص‌های فرعی اندازه‌گیری‌شده به روش AHP خاکستری، با استفاده از فرمول (۲۱) ماتریس تصمیم خاکستری بی‌مقیاس‌شده وزین تشکیل شد که بصورت جدول ۹ نشان داده می‌شود.

جدول ۹. ماتریس تصمیم خاکستری بی‌مقیاس‌شده وزین TOPSIS خاکستری.

مکان	اطلاعات فنی	زمین‌شناسی	در دسترس بودن نیروی انسانی ماهر	هزینه‌ها
کرمانشاه	[۰/۰۲۷, ۰/۰۶۰]	[۰/۰۳۶, ۰/۰۸۰]	[۰/۰۱۰, ۰/۰۲۳]	[۰/۰۲۹, ۰/۰۸۴]
اسلام-آباد	[۰/۰۰۹, ۰/۰۲۴]	[۰/۰۱۰, ۰/۰۲۸]	[۰/۰۰۵, ۰/۰۱۴]	[۰/۰۹۹, ۰/۲۱۱]
تازه‌آباد	[۰/۰۱۰, ۰/۰۲۷]	[۰/۰۱۶, ۰/۰۳۷]	[۰/۰۰۳, ۰/۰۱۲]	[۰/۰۴۰, ۰/۱۰۷]
سرمدست	[۰/۰۳۲, ۰/۰۶۶]	[۰/۰۴۳, ۰/۰۸۸]	[۰/۰۲۲, ۰/۰۴۸]	[۰/۰۲۴, ۰/۰۷۲]
پاوه	[۰/۰۱۲, ۰/۰۳۲]	[۰/۰۱۴, ۰/۰۴۰]	[۰/۰۰۹, ۰/۰۲۴]	[۰/۰۲۴, ۰/۰۵۵]
مکان	دسترسی به شبکه انتقال	نزدیکی به مناطق مسکونی	تأثیر حیات وحش و گونه‌های در حال انقراض	انتشار سموم مضر
کرمانشاه	[۰/۰۲۳, ۰/۰۵۴]	[۰/۰۱۵, ۰/۰۲۸]	[۰/۰۲۲, ۰/۰۴۶]	[۰/۰۱۶, ۰/۰۳۴]
اسلام-آباد	[۰/۰۱۴, ۰/۰۳۶]	[۰/۰۲۶, ۰/۰۵۷]	[۰/۰۱۰, ۰/۰۲۲]	[۰/۰۰۵, ۰/۰۰۸]
تازه‌آباد	[۰/۰۰۳, ۰/۰۲۰]	[۰/۰۷۶, ۰/۱۵۷]	[۰/۰۱۰, ۰/۰۲۱]	[۰/۰۰۷, ۰/۰۱۰]
سرمدست	[۰/۰۴۶, ۰/۱۰۸]	[۰/۰۱۹, ۰/۰۴۵]	[۰/۰۱۵, ۰/۰۳۱]	[۰/۰۱۳, ۰/۰۲۰]
پاوه	[۰/۰۲۹, ۰/۰۶۶]	[۰/۰۲۰, ۰/۰۵۵]	[۰/۰۱۴, ۰/۰۲۹]	[۰/۰۰۷, ۰/۰۱۱]
مکان	مزایای صرفه‌جویی	نگرش ساکنان محلی	قوانین و سیاست‌های دولت	سازوکارهای حمایتی
کرمانشاه	[۰/۰۱۷, ۰/۰۳۷]	[۰/۰۰۲, ۰/۰۰۵]	[۰/۰۱۹, ۰/۰۴۸]	[۰/۰۴۲, ۰/۰۹۱]

اسلام-آباد	[۰/۰۰۶, ۰/۰۱۷]	[۰/۰۰۴, ۰/۰۰۹]	[۰/۰۴۳, ۰/۱۲۱]	[۰/۰۳۷, ۰/۰۸۴]
تازه‌آباد	[۰/۰۱۱, ۰/۰۲۵]	[۰/۰۱۸, ۰/۰۸۴]	[۰/۰۱۳, ۰/۰۲۶]	[۰/۰۳۹, ۰/۰۷۱]
سرمست	[۰/۰۲۹, ۰/۰۵۵]	[۰/۰۰۲, ۰/۰۰۵]	[۰/۰۱۱, ۰/۰۲۰]	[۰/۱۱۸, ۰/۲۱۲]
پاوه	[۰/۰۱۳, ۰/۰۳۰]	[۰/۰۰۴, ۰/۰۱۲]	[۰/۰۱۷, ۰/۰۴۵]	[۰/۰۵۹, ۰/۱۲۱]

به دنبال روش TOPSIS خاکستری، مجموعه راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی خاکستری مورد محاسبه قرار گرفت که در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰. مجموعه ارزش ایده‌آل مثبت و منفی خاکستری TOPSIS خاکستری.

شاخص اصلی	شاخص فرعی	راه‌حل ایده‌آل مثبت	راه‌حل ایده‌آل منفی
فنی	اطلاعات فنی	[۰/۰۳۲, ۰/۰۶۶]	[۰/۰۰۹, ۰/۰۲۴]
	زمین‌شناسی	[۰/۰۴۳, ۰/۰۸۸]	[۰/۰۱۰, ۰/۰۲۸]
	در دسترس بودن نیروی انسانی ماهر	[۰/۰۲۲, ۰/۰۴۸]	[۰/۰۰۳, ۰/۰۱۲]
اقتصادی	هزینه‌ها	[۰/۰۹۹, ۰/۳۱۱]	[۰/۰۲۴, ۰/۰۵۵]
	دسترسی به شبکه انتقال	[۰/۰۴۶, ۰/۱۰۸]	[۰/۰۰۳, ۰/۰۲۰]
	نزدیکی به مناطق مسکونی	[۰/۰۷۶, ۰/۱۵۷]	[۰/۰۱۵, ۰/۰۲۸]
زیست‌محیطی	تأثیر حیات وحش و گونه‌های در حال انقراض	[۰/۰۲۲, ۰/۰۴۶]	[۰/۰۱۰, ۰/۰۲۱]
	انتشار سموم مضر	[۰/۰۱۶, ۰/۰۲۴]	[۰/۰۰۵, ۰/۰۰۸]
	مزایای صرفه‌جویی	[۰/۰۲۹, ۰/۰۵۵]	[۰/۰۰۶, ۰/۰۱۷]
اجتماعی	نگرش ساکنان محلی	[۰/۰۱۸, ۰/۰۸۴]	[۰/۰۰۲, ۰/۰۰۵]
	قوانین و سیاست‌های دولت	[۰/۰۴۳, ۰/۱۲۱]	[۰/۰۱۱, ۰/۰۲۰]
	سازوکارهای حمایتی	[۰/۱۱۸, ۰/۳۱۲]	[۰/۰۳۷, ۰/۰۷۱]

در نهایت، نتایج اندازه‌گیری درجه امکان‌پذیری خاکستری بین راه‌حل ایده‌آل مثبت (Smax) و پنج مکان بالقوه تأسیس تصفیه‌خانه فاضلاب با بهره‌گیری از فرمول (۲۴) بصورت زیر ارائه می‌گردد.

جدول ۱۱. ارزش درجه امکان‌پذیری.

مکان تأسیس تصفیه‌خانه فاضلاب	ارزش درجه امکان‌پذیری $P\{S_i \leq S^{\max}\}$
کرمانشاه	۰/۸۲۰
اسلام‌آباد غرب	۰/۹۱۷
تازه‌آباد	۰/۹۱۳
سرمست	۰/۶۹۷
پاوه	۰/۹۵۹

به‌منظور رتبه‌بندی مکان‌های بالقوه، گزینه‌ها براساس درجه امکان‌پذیری به‌ترتیب صعودی رتبه‌بندی می‌شوند و گزینه با کمترین درجه به‌عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شود. در نتیجه، مکان‌های بالقوه تأسیس تصفیه‌خانه فاضلاب سرمست، کرمانشاه، تازه‌آباد، اسلام‌آباد و پاوه به‌ترتیب با درجه‌های ۰/۶۹۷، ۰/۸۲۰، ۰/۹۱۳، ۰/۹۱۷ و ۰/۹۵۹ در رتبه‌های اول تا پنجم قرار گرفتند.

نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج و دستاوردهای این مطالعه به شرح زیر است:

- ۱ - پتانسیل استقرار تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در ده شهر استان کرمانشاه بر اساس عوامل مختلف کمی و کیفی مورد بررسی قرار گرفت و مکان‌های بهینه به‌منظور تأسیس تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با موفقیت توسط رویکرد ترکیبی مدل جمعی DEA، AHP، TOPSIS خاکستری تعیین شدند.
 - ۲ - در فرآیند انتخاب مکان بالقوه بهینه به‌منظور تأسیس تصفیه‌خانه فاضلاب عوامل «سازوکارهای حمایتی»، «دسترسی به شبکه انتقال»، «نزدیکی به مناطق مسکونی» و «قوانین و سیاست‌های دولت» به‌عنوان پراهمیت‌ترین شاخص‌ها شناخته شدند.
 - ۳ - در رتبه‌بندی نهایی مشخص شد که سه شهر «سرمدت»، «کرمانشاه» و «تازه‌آباد» بهینه‌ترین مکان‌های بالقوه برای تأسیس تصفیه‌خانه‌های فاضلاب هستند.
 - ۴ - این مطالعه یک ابزار پشتیبانی تصمیم را فراهم نمود که برای سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان در مورد راهبردهای برنامه‌ریزی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یا هر پروژه انرژی تجدیدپذیر دیگری، مفید می‌باشد. همچنین، مقایسه نتایج مطالعه حاضر با پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که اکثر زمینه‌های بدست‌آمده در این مطالعه، در سایر پژوهش‌ها از جمله بوتیرو و همکاران (۲۰۱۱) [۹]، فلاح و همکاران (۲۰۱۶) [۴]، قادری و همکاران (۲۰۱۹) [۱۰]، رضاعلی و کریمی (۲۰۱۹) [۱۱]، راسی‌نظامی و همکاران (۲۰۲۰) [۱۲]، آیلدیز و همکاران (۲۰۲۱) [۱۳]، شاهمرادی و پورامرائی (۲۰۲۱) [۱]، فو و همکاران (۲۰۲۲) [۱۴] و چابانه و همکاران (۲۰۲۴) [۱۵] نیز نتیجه‌گیری شده است و بطور کلی خروجی‌ها هم‌راستا می‌باشند. با این حال، بیشترین تفاوت ناشی از زمینه‌های پایه‌ای و تکنیک‌های روش‌شناسی مورد استفاده در این پژوهش بوده است.
- با هدف پیشنهاد برای ادامه کار، توصیه می‌شود که در فرآیند مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب سایر تکنیک‌های چندمعیاره از قبیل ELECTRE، VIKOR، ANP، WASPAS مورد استفاده قرار گیرند و یافته‌ها با یکدیگر مقایسه شوند. علاوه بر این، با گنجاندن شاخص‌های ارزیابی کمی و قابل‌اندازه‌گیری بیشتر، ضعف تجزیه و تحلیل این مطالعه می‌تواند تقویت گردد. به پژوهشگران پیشنهاد می‌شود که مطالعه حاضر را برای دیگر پروژه‌های منابع تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های خورشیدی و نیروگاه‌های بادی در نظر بگیرند.
- این مطالعه با محدودیت‌هایی روبه‌رو بود که نشان می‌داد فرآیند ارزیابی مکان‌یابی در مرحله دوم روش پیشنهادی، به مشارکت خبرگان و کارشناسان شرکت آب و فاضلاب بستگی دارد. بسیاری از خبرگان و کارشناسان زمان کافی و تخصص لازم در تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را نداشتند و به‌سختی هماهنگی با آنها فراهم شد. تمامی تلاش‌ها اعمال گشت تا پنج نفر خبره و کارشناس با نظرات و سلاقی مختلف و جامع در حوزه آب و فاضلاب مورد مصاحبه قرار گیرند تا حد امکان این محدودیت‌ها پوشش داده شوند.

فهرست منابع

- [1] Shahmoradi, B., & Pouramraei, R. (2021). Site Location of Municipal Wastewater Treatment Plant Using Land Suitability Model (Case Study: Kouhdasht City). *Environment and Water Engineering*, 7(2), 232-242. <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.271917.1507>. (In Persian)
- [2] Chen, Y., Liu, Z., & Zhou, B.B. (2022). Population-environment dynamics across world's top 100 urban agglomerations: With implications for transitioning toward global urban sustainability. *Journal of Environmental Management*, 319, 115630. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115630>.

- [3] Bej, S., Swain, S., Bishoyi, A. K., Mandhata, C. P., Sahoo, C.R., & Padhy, R.N. (2023). Wastewater-associated infections: a public health concern. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(7), 444. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06431-4>.
- [4] Fallah, M., Farajzadeh, M., Vagharfard, H., & Nikkheslat, A. (2013). Site selection of waste water treatment plant using GIS and TOPSIS (case study: Qeshm Island). *Territory journal*, 10(37), 109-126. <https://sanad.iau.ir/en/Article/823975?FullText=FullText>. (In Persian)
- [5] Mauricio-Iglesias, M., Longo, S., & Hospido, A. (2020). Designing a robust index for WWTP energy efficiency: The ENERWATER water treatment energy index. *Science of the Total Environment*, 713, 136642. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136642>.
- [6] Balkema, A. J., Preisig, H.A., Otterpohl, R., & Lambert, F.J.D. (2002). Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. *Urban Water*, 4(2), 153-161. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(02\)00014-6](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(02)00014-6).
- [7] Hernández-Sancho, F., & Sala-Garrido, R. (2009). Technical efficiency and cost analysis in wastewater treatment processes: a DEA approach. *Desalination*, 249(1), 230-234. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.01.029>.
- [8] Zhao, Y. W., Qin, Y., Chen, B., Zhao, X., Li, Y., Yin, X. A., & Chen, G. Q. (2009). GIS-based optimization for the locations of sewage treatment plants and sewage outfalls—A case study of Nansha District in Guangzhou City, China. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14(4), 1746-1757. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2007.12.016>.
- [9] Bottero, M., Comino, E., & Riggio, V. (2011). Application of the analytic hierarchy process and the analytic network process for the assessment of different wastewater treatment systems. *Environmental Modelling & Software*, 26(10), 1211-1224. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.04.002>.
- [10] Ghaderi, S., Javid, A., Ghaffarzadeh, H., & Lotf, F. H. (2019). Optimal selection of wastewater treatment and location for subway stations using mathematical techniques: Five stations at the eastern end of Tehran subway line 2. *The Kuwait Journal of Science*, 46(1), 99-106. <https://journalskuwait.org/kjs/index.php/KJS/article/view/4298>.
- [11] Rezaali, M., & Karimi, A. (2019). Decentralized Wastewater Treatment Plants Site Selection of Qom Province by Using Fuzzy Logic and AHP. *Iran-Water Resources Research*, 15(1), 76-91. (In Persian). <https://20.1001.1.17352347.1398.15.1.6.3>.
- [12] Rasi Nezami, S. S., Dalir, A., & Sharghi, E. (2020). Groundwater Extraction locating by GIS, DEMATEL and Analytical Network Process (ANP) (Case study: Ardabil Plain Basin). *Iran-Water Resources Research*, 16(1), 447-452. <https://20.1001.1.17352347.1399.16.1.30.4>. (In Persian)
- [13] Ayyildiz, E., Yildiz, A., Taskin Gumus, A., & Ozkan, C. (2021). An integrated methodology using extended swara and dea for the performance analysis of wastewater treatment plants: Turkey case. *Environmental Management*, 67(3), 449-467. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01381-7>.
- [14] Fu, H., Niu, J., Wu, Z., Xue, P., Sun, M., Zhu, H., & Cheng, B. (2022). Influencing factors of stereotypes on wastewater treatment plants - Case study of 9 wastewater treatment plants in Xi'an, China. *Environmental Management*, 70(3), 526-535. <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01663-2>.
- [15] Chaabane, S., Ghattassi, A., Mensi, K., M'hiri, F., De Ketelaere, D., Spiteri, A., & Plakas, K. (2024). Multi-criteria site selection for wastewater treatment plant in Bent

- Saidane, Tunisia. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 19(4), 262-272. <https://doi.org/10.1680/jenes.24.00009>.
- [16] Rafiei, N., Asadzadeh, S., & Niaki, S. T. A. (2023). Multi-objective design of risk-adjusted control chart in healthcare systems with economic and statistical considerations. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 52(7), 2967-2984. <https://doi.org/10.1080/03610918.2021.1923744>.
- [17] Darzi, M.A. (2024). Overcoming barriers to integrated management systems via developing guiding principles using G-AHP and F-TOPSIS. *Expert Systems with Applications*, 239, 122305. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122305>.
- [18] Soleymani, G., Abdi, R., Ghanbari, M., & Loghmanpour zarini, R. (2023). Evaluation and Optimization of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Sugar Beet Production with the Method of Data Envelopment Analysis. *Karafan Journal*, 20(1), 131-150. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.388258.2471>. (In Persian)
- [19] Rafiei, N., Amiri, F., & Mortazavi, H. (2023). An Integrated Model to Evaluate the Design Concept Using the Analytic Hierarchy Process and TOPSIS Technique Based on Rough Numbers. *Karafan Journal*, 20(1), 409-431. (In Persian) <https://doi.org/10.48301/KSSA.2023.375446.2367>.
- [20] Wang, C. N., Dang, T. T., & Wang, J. W. (2022). A combined Data Envelopment Analysis (DEA) and Grey Based Multiple Criteria Decision Making (G-MCDM) for solar PV power plants site selection: A case study in Vietnam. *Energy Report*, 8, 1124-1142. <https://doi.org/10.1016/j.egyvr.2021.12.045>.
- [21] Hasanzadeh, R., Mojaver, P., Azdast, T., Khalilarya, S., Chitsaz, A., & Rosen, M. A. (2023). Decision analysis for plastic waste gasification considering energy, exergy, and environmental criteria using TOPSIS and grey relational analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 174, 414-423. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.028>.
- [22] Wankhede, V. A., & Vinodh, S. (2023). Analysis of barriers of sustainable 4D printing using Grey TOPSIS approach. *International Journal of Sustainable Engineering*, 16(1), 184-196. <https://doi.org/10.1080/19397038.2023.2238216>.