Journal of Urban Management & Environmental Engineering

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.1, No.1; 2023.pp: 17-36

Research paper

(Received April 21, 2023 Accepted May 29, 2023)

# Selecting the most suitable method of converting waste into energy using Fuzzy Vikor-AHP models; Case study Kerman Municipality

Hossein Vahidi*[1], Reza ArabAbadi[2], Marziyeh SoltaniNejad[2]

[1] *Department of Environment, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran*
[2] *Institute of Energy, Department of Renewable Energy and Energy conversion, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran*

**Abstract**

Using waste as a source of energy production is one of the appropriate solutions for the sustainable development of urban waste management. Biomass sources are superior to other renewable sources because they are easily converted into solid fuels, liquids and useful gases. One of these resources, which has caused a great deal of concern in large cities today, is municipal waste, which is one of the main policies of the relevant organizations in determining the best solution for its management. One of the most important solutions that can be introduced in this direction is the use of technologies that can convert a large part of waste into very valuable biofuels that are a good alternative to fossil fuels. There are various types of these technologies, including incinerators, anaerobic digestion, SRF fuels, and pyrolysis. In this project, the main purpose is to study the use of municipal waste according to the concept of zero waste (Zero Waste) and to know the exact types of technologies for the conversion of municipal waste into biofuels. The analysis method used in this research is AHP method. The result of hierarchical analysis shows that the SRF fuel technology method and use in the cement plant furnace for organic waste management is the first priority in Kerman. The result of hierarchical method analysis using Expert Choice software was also confirmed.

**Keywords**: Kerman Municipality, Waste to Energy, AHP, Vikor model, Fuzzy Theory.

**Corresponding Author: Hossein Vahidi*
*Email: h.vahidi@kgut.ac.ir*
*Phone:+989133434393*

Doi: 10.48306/jumee.2023.394192.1002

نشریه علمی مدیریت شهری و مهندسی محیط زیست

آدرس نشریه:https://jumee.kgut.ac.ir

سال اول/شماره اول/بهار ۱۴۰۲/صفحه ۱۷-۳۶

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۲/۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/٤/۱٤

# انتخاب مناسب‌ترین روش تبدیل پسماند به انرژی با استفاده از مدل‌های در فضای فازی، مطالعه موردی شهرداری کرمان VIKOR-AHP

حسین وحیدی*[۱]، رضا عرب‌آبادی[۲]، مرضیه سلطانی نژاد[۳]

*۱-گروه پژوهشی محیط‌زیست، پژوهشکده محیط‌زیست، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران*

*۲- گروه انرژی‌های تجدید پذیر و تبدیل انرژی پژوهشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران*

*۳- گروه انرژی‌های تجدید پذیر و تبدیل انرژی پژوهشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران*

## چکیده

استفاده از پسماند به‌عنوان منبع تولید انرژی یکی از راهکارهای مناسب برای توسعه پایدار مدیریت پسماند شهری است. فرآیندهای بازیابی انرژی حرارتی که به‌منظور تبدیل پسماندهای جامد شهری به انرژی مورداستفاده قرار می‌گیرند، یک روش تقریباً جدید و مناسب در مدیریت پسماند به‌حساب می‌آید. طی فرآیندهای تبدیل پسماند به انرژی، حرارت و گازهایی به وجود می‌آید که این گازها را می‌توان برای تولید انرژی استفاده کرد. روش تجزیه‌وتحلیل مورداستفاده در این تحقیق، مدل ترکیبی تحلیل سلسله مراتبی و ویکور در فضای فازی جهت انتخاب بهترین سیستم ترموشیمیایی بر اساس چهار معیار اقتصادی، فنی و تکنیکال، محیط‌زیست و اجتماعی و فرهنگی جهت به‌کارگیری آن در شرایط شهر کرمان باهدف استراتژی «بدون پسماند» مطرح‌شده است. در این مطالعه سیستم‌های گازی کردن، سوخت‌های SRF، پیرولیز و هضم بی‌هوازی مورد ارزیابی قرار گرفتند. جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز از طریق بررسی ادبیات موضوع، منابع معتبر و تهیه و تکمیل پرسش‌نامه به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده آن است که در بین سیستم‌های مورد ارزیابی، سیستم سوخت‌های SRF با مقدار Q برابر با ۰.۰۱۷ بهترین گزینه جهت تبدیل پسماند به انرژی در شهر کرمان بوده و سپس به ترتیب سیستم‌های پیرولیز، گازی کردن و هضم بی‌هوازی در اولویت بعدی قرار می‌گیرند.

**کلمات کلیدی:** تبدیل پسماند به انرژی، شهرداری کرمان، تحلیل سلسله مراتبی، مدل ویکور، تئوری فازی.

* نویسنده مسئول: حسین وحیدی

ایمیل: h.vahidi@kgut.ac.ir

شماره تماس: 09133434393

Doi: 10.48306/jumee.2023.394192.1002

## ۱- مقدمه

پسماندهای جامد شهری یکی از منابع بالقوه و در دسترس زیست‌توده برای تولید انرژی تجدید پذیر است که در سال‌های اخیر موردتوجه بسیاری از جوامع قرارگرفته است [۱]. فرایندهای تبدیل پسماند به انرژی برای تولید انرژی از پسماندهای غیرقابل بازیافت به کار می‌روند که این فرایندها بخشی از سلسله‌مراتب مدیریت پسماند هستند. این فرایندها قادر به تولید محصولات انرژی ازجمله گرما، الکتریسیته، سوخت‌های مایع و جامد می‌باشند. فنّاوری‌های مختلفی برای استحصال انرژی از زباله وجود دارد. ازآنجایی‌که مدیریت، احداث و بهره‌برداری از نیروگاه انرژی زیستی فرایندی پیچیده بوده [۲] و گستره وسیعی از عوامل و معیارها بر این تصمیمات تأثیرگذار هستند، به‌کارگیری و استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در این زمینه منطقی و ضروری می‌باشد. یکی از تصمیمات مهم در این راستا، انتخاب تکنولوژی مورداستفاده برای استحصال انرژی از پسماند می‌باشد که در این مقاله انواع این فنّاوری‌ها موردبررسی قرار خواهد گرفت و از ترکیبی از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب یک تکنولوژی مناسب با توجه به معیارهای اساسی اقتصادی، فنی و تکنیکال، محیط‌زیست، اجتماعی و فرهنگی و همچنین زیر معیارهای موجود برای هرکدام از این معیارها، استفاده خواهد شد.

مهم‌ترین روش‌هایی که در جهت بازیابی انرژی از این منابع وجود دارد، فناوری‌هایی هستند که قادرند بخش عظیمی از پسماند را به سوخت‌های زیستی بسیار ارزشمند که جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی‌اند، تبدیل نمایند. در انتخاب مناسب‌ترین فناوری از میان انواع گوناگون از فناوری‌های تبدیل پسماند به سوخت زیستی، نکاتی که دقت شده است وجود سابقه و تجربه در زمینه ساخت این فناوری‌ها مانند هضم بی‌هوازی و تولید الکل در کشور و همچنین توسعه و اهمیت فناوری‌ها در کشورهای توسعه‌یافته بوده است که منجر به انتخاب چهار فناوری هضم بی‌هوازی، سوخت‌های SRF، گازی کردن و پیرولیز شده است.

یکی از روش‌هایی که برای انتخاب بین گزینه‌های مختلف بر اساس معیارهای مختلف مناسب است مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیارهاست. مدل‌های مختلفی برای این منظور تاکنون توسعه‌یافته‌اند که هر یک دارای مزایا و معایبی هستند. ولی به‌طورکلی ایراد اصلی مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره خطاهایی است که تبدیل نظرات کیفی خبرگان به مقادیر کمی به وجود می‌آید. ازاین‌رو استفاده از تئوری فازی و انجام محاسبات مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در فضای فازی توانسته تا حدودی عدم اطمینان از نتایج مدل‌ها را بر اساس خطای مذکور بهبود دهد [۳]. مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP[1]) توانسته هم مشکلات مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و هم خطاهای ناشی از تبدیل مقادیر کیفی به کمی را مدیریت کند. به‌علاوه، این توانایی را دارد که قضاوت‌های مبهم و غیردقیق تصمیم‌گیرندگان را با استفاده از تکنیک‌های محاسباتی نرم در فضای فازی برای شفاف‌سازی محاسبات بهبود ببخشد. مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی عمدتاً برای مقایسه زوجی مسائل گروهی چند معیاره استفاده می‌شود. مقایسه زوجی از داده‌های ورودی به‌دست‌آمده از نظرات خبرگان استفاده می‌کند تا حداکثر آگاهی را برای ارزیابی سازگاری قضاوت‌های ارائه دهد. این پیشینه FAHP را به یک رویکرد ایده آل برای بررسی سیستم‌های استحصال انرژی از پسماند تبدیل می‌کند. به‌طور مشابه مدل VIKOR[2] یک تکنیک محاسباتی متوسط برای حل مسائل تصمیم‌گیری گروهی چند معیارهاست که هم‌زمان با نزدیکی به گزینه‌های ایده آل و ضد ایده آل از جنبه‌های متضاد عمل می‌کند. مقایسه دقیق VIKOR فازی با مدل‌های مشابهی و پرکاربرد در تصمیم‌گیری‌های چند معیاره مانند PROMETHEE، ELECTRE و TOPSIS در بسیاری از مقالات ارائه‌شده است [۴-۷].

راهمن و همکاران (۲۰۱۷) به انتخاب تکنولوژی مناسب برای تبدیل پسماند به انرژی در شهر داکا پرداختند [۸]. در داکا دفع مواد زائد چالش قابل‌توجهی است، به‌عنوان‌مثال اگر روی زمین انباشته گردد منجر به آلودگی زمین و درجاهایی که زمین کم است منجر به آلودگی آب‌شده و اگر سوزانده شود منجر به آلودگی هوا می‌شود. علاوه بر این، کمبود زمین و افزایش قیمت آن به‌ویژه در داکا، پایتخت بنگلادش، مشکلات جدیدی برای توسعه محل‌های لندفیل به وجود آورده است. با درک مسائل مربوط به دفع پسماند در زمان حال و آینده، از مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP برای انتخاب مناسب‌ترین روش برای تبدیل پسماند خانگی به انرژی در منطقه اردوگاهی میرپور داکا استفاده شد.

[1] Fuzzy Analytical Hierarchy Process
[2] Vlse Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje

سه گزینه شامل هضم بی‌هوازی، پیرولیز و گازی سازی پلاسما و نه معیار از سه جنبه فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی برای مقایسه انتخاب شدند. نتایج نشان داد که تکنولوژی گازی سازی پلاسما مناسب‌ترین تکنولوژی تبدیل زباله به انرژی در منطقه موردمطالعه است.

شکورفاو (۲۰۱۶) به مطالعه‌ای در مورد روش‌های زباله‌سوزی، احتراق، پیرولیز و گازیفیکاسیون از بیومس پرداخت [۹]. برای تولید حرارت و الکتریسیته با حفظ محیط‌زیست، به‌طورکلی تمام روش‌های زباله‌سوزی، پیرولیز، احتراق و گازیفیکاسیون از زیست‌توده مورد آزمون قرار گرفتند. مشخص شد که فرایند گازیفیکاسیون در مقایسه با فرایندهای زباله‌سوزی، پیرولیز و احتراق عملی‌تر و اقتصادی‌تر برای تولید هیدروژن و حفاظت از محیط‌زیست از اهداف اصلی آن است.

باسری و همکاران (۲۰۱۵) بر اساس ۴ معیار فنی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی و با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP و به انتخاب بهترین روش تولید کمپوست در دانشگاه کبانگسانگ مالزی پرداختند [۱۰]. در این پژوهش از دو روش تولید کمپوست شامل روش پشته‌ای و روش راکتوری استفاده کردند. ضایعات آلی روزانه از فعالیت کافه‌تریا و فضای سبز در داخل محوطه دانشگاه تولید می‌شد. نتیجه نشان داد که عامل فنی با وزن (۰.۵) و به دنبال آن عامل زیست‌محیطی (۰.۲۵۱۷)، عامل اقتصادی (۰.۱۹۴۱) و عامل اجتماعی (۰.۰۵۴۲) به ترتیب در اولویت‌های اول تا چهارم می‌باشند. همچنین مطابق چهار معیار تعیین‌شده روش ویندرو بهترین روش تولید کمپوست با وزن (۰.۶۲۳۶) شناخته شد.

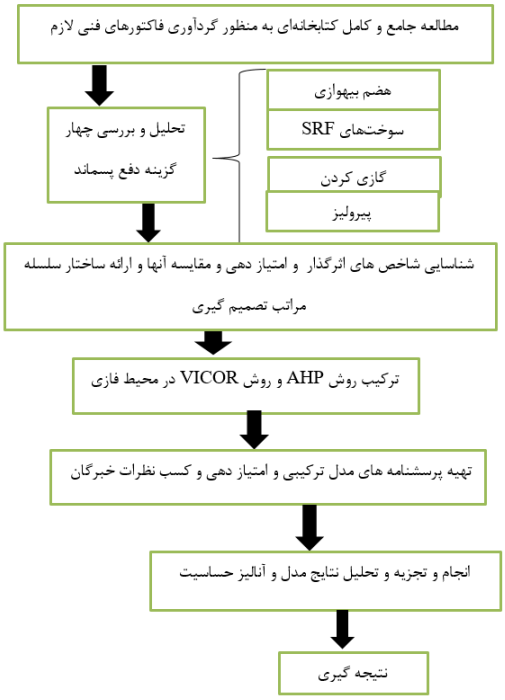
تایلان و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی رویکرد سیستم‌های انرژی با استفاده از مدل ترکیبی AHP فازی توسعه‌یافته، فازی VIKOR و TOPSIS باهدف شناسایی مناسب‌ترین سیستم‌های انرژی در عربستان سعودی برای سرمایه‌گذاری انجام دادند [۱۱]. ایشان هشت سیستم انرژی جایگزین بر اساس ۹ معیار مورد ارزیابی قراردادند: ظرفیت تولید برق، کارایی، قابلیت ذخیره‌سازی، ایمنی، آلودگی هوا، تخلیه شدنی بودن، ارزش فعلی خالص، توسعه اقتصادی محلی افزایش‌یافته و حمایت دولت. روش AHP فازی برای تعیین وزن معیارها و مدل فازی VIKOR و TOPSIS برای ارجحیت بندی سیستم‌های انرژی جایگزین با توجه به اولویت سرمایه‌گذاری آن‌ها استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی بر اساس هر دو رویکرد VIKOR فازی و فازی TOPSIS، گزینه مناسبی برای سرمایه‌گذاری است.

سدیا و همکاران (۲۰۲۲) از تکنیک‌های مشابهی از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌منظور انتخاب روش‌های تبدیل پسماند به انرژی به‌صورت کلی و بدون شرایط محلی و منطقه‌ای استفاده کردند [۱۲]. ایشان تکنیک‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره برای رتبه‌بندی فناوری‌های پسماند به انرژی به همراه تجزیه‌وتحلیل حساسیت روی وزن معیارهای تصمیم‌گیری را با یکدیگر مقایسه کردند. چهار روش AHP، PROMETHEE، VIKOR و TOPSIS برای رتبه‌بندی پنج گزینه جایگزین فناوری پسماند به انرژی، یعنی هضم بی‌هوازی، سوزاندن، تجزیه در اثر حرارت، تبدیل به گاز و دفن پسماند با بازیابی گازبر اساس شش معیار پتانسیل گرمایش جهانی، هزینه سرمایه، هزینه بهره‌برداری و نگهداری، بازگشت درآمد، میزان رطوبت و نیاز به تفکیک مقایسه شدند. طبق نتایج این مطالعه، هر ۴ روش نتایج یکسانی را به دست آوردند.

همان‌طور که از بررسی مطالعات مشابه می‌توان نتیجه گرفت،استفاده از تکنیک‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره در فضای فازی روش مناسب برای انتخاب گزینه‌ها و راهکارهای تبدیل پسماند به انرژی است. با توجه به شرایط شهرداری کرمان و نیاز این شهرداری به تعیین نقشه راه و سیاست گذاری پایدار در برنامه مدیریت پسماند شهری کرمان، در این مقاله مقایسه و اولویت‌بندی چهار فناوری تبدیل پسماند شهری به انرژی (پیرولیز، گازی کردن، هضم بی‌هوازی و سوخت‌های SRF) از دیدگاه فنی و معرفی بهترین گزینه به‌منظور تولید انرژی از پسماند به‌منظور تولید برق یا گرما و کنترل آلودگی ناشی از حجم عظیم پسماندهای شهر کرمان انجام خواهد شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، هدف اولویت‌بندی فناوری‌های متفاوت برای معرفی بهترین گزینه جهت تبدیل پسماند شهری به سوخت زیستی در شهر کرمان می‌باشد؛ بنابراین برای رسیدن به این هدف بایستی بررسی دقیقی بر روی فناوری‌ها از دیدگاه فنی انجام گیرد تا بر اساس آن معیارهای اصلی برای مقایسه و ارزیابی فنی حاصل گردد. شکل (۱) مراحل و گام‌های انجام تحقیق را نشان داده است.




شکل ۱- الگوریتم روش تحقیق

## ۲-۱- تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP[۳])

روش AHP فازی این پژوهش برگرفته از روش میانگین هندسی باکلی می‌باشد [۱۳]. این روش به AHP فازی بهبودیافته (بسط یافته) معروف است. گام‌های این روش در زیر آورده شده است.

فرض کنید $\tilde{P}_{ij}$ مجموعه‌ای از ترجیحات تصمیم گیران در مورد یک شاخص نسبت به دیگر شاخص‌ها باشد. ماتریس مقایسات زوجی به‌صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$\tilde{A} = \begin{vmatrix} & \tilde{P}_{12} & \cdots & \tilde{P}_{1n} \\ \tilde{P}_{21} & \mathbf{1} & & \\ \vdots & & & \\ \tilde{P}_{2n} & & & \end{vmatrix} \quad (۱)$$

که n تعداد عناصر مرتبط در هر سطر است. اوزان فازی هر شاخص ماتریس مقایسات زوجی به‌وسیله روش میانگین هندسی باکلی به دست می‌آید. میانگین هندسی ارزش مقایسات فازی شاخص i به هر شاخص از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\tilde{r}_i = \left( \prod \tilde{P}_{ij} \right) \qquad i = 1,2,3,\dots,n \quad (۲)$$

سپس وزن فازی اُمین شاخص به‌وسیله یک عدد فازی مثلثی نشان داده می‌شود.

$$w_i = r_i \otimes (r_1 \oplus r_2 \oplus \dots \oplus r_m)^{-1} \quad (۳)$$

بعد از محاسبه فاکتورهای وزن فازی، به‌وسیله فرمول زیر وزن‌ها را دیفازی کرده و سپس نرمال می‌کنیم.

$$w_{crisp} = \frac{l + 2m + u}{4} \quad (۴)$$

در این پژوهش جهت محاسبه وزن در مقایسات زوجی، از عبارات کلامی و اعداد فازی مثلثی مندرج در جدول (۱) استفاده‌شده است.

[3] Fuzzy Analytical Hierarchy Process

جدول۱- عبارات کلامی و اعداد فازی جهت وزن دهی به معیارها

| کد | اولویت‌ها | معادل فازی اولویت‌ها | | |
|---|---|---|---|---|
| | | حد پایین (l) | حد متوسط (m) | حد بالا (u) |
| ۱ | اهمیت یکسان | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۲ | یکسان تا نسبتاً مهم‌تر | ۱ | ۲ | ۳ |
| ۳ | نسبتاً مهم‌تر | ۲ | ۳ | ۴ |
| ۴ | نسبتاً مهم‌تر تا اهمیت زیاد | ۳ | ۴ | ۵ |
| ۵ | اهمیت زیاد | ۴ | ۵ | ۶ |
| ۶ | اهمیت زیاد تا بسیار زیاد | ۵ | ۶ | ۷ |
| ۷ | اهمیت بسیار زیاد | ۶ | ۷ | ۸ |
| ۸ | بسیار زیاد تا کاملاً مهم‌تر | ۷ | ۸ | ۹ |
| ۹ | کاملاً مهم‌تر | ۸ | ۹ | ۱۰ |

## ۲-۲- روش ویکور فازی

اپریکوویک در مقاله‌ای گام‌های ویکور فازی را به‌صورت زیر بیان نمود [۱۴].

✓ *تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری ارزیابی گزینه‌ها*

فرض کنید ماتریس تصمیم‌گیری نظرات افراد به شرح زیر باشد.

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \cdots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \cdots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad i = 1,2,\dots,m;\ \ j = 1,2,\dots,n \qquad (۵)$$

هر ستون نشان‌دهنده یک شاخص سنجش و هر سطر نماینده یک گزینه است. $X_{ij}$ بیانگر کمیت گزینه i ام در زیرمعیار j ام است. همچنین زیرمعیارها برحسب اثرگذاری روی گزینه‌ها ممکن است منفی یا مثبت باشند. در این پژوهش جهت ارزیابی گزینه‌ها نسبت به هر معیار از عبارات کلامی و اعداد فازی جدول (۲) استفاده‌شده است.

جدول ۲۲- عبارات کلامی و اعداد فازی متناظر جهت رتبه‌بندی گزینه‌ها [۱۵]

| کد | اولویت‌ها | معادل فازی اولویت‌ها | | |
|---|---|---|---|---|
| | | حد پایین (l) | حد متوسط (m) | حد بالا (u) |
| ۱ | خیلی ضعیف | ۱ | ۱ | ۳ |
| ۲ | ضعیف | ۱ | ۳ | ۵ |
| ۳ | متوسط | ۳ | ۵ | ۷ |
| ۴ | خوب | ۵ | ۷ | ۹ |
| ۵ | خیلی خوب | ۷ | ۹ | ۱۱ |

✓ *بی مقیاس نمودن ماتریس تصمیم‌گیری*

در این گام بایستی تصمیم‌گیری فازی را به یک ماتریس بی مقیاس شده فازی تبدیل نماییم. برای به دست آوردن ماتریس، بایستی مراحل زیر طی شود:

*۱-تعیین ایده آل مثبت و ایده آل منفی برای هر معیار*

بهترین و بدترین هر یک از مقادیر در هر معیار شناسایی‌شده به ترتیب $\tilde{f}_j^*$ و $\tilde{f}_j^o$ نامیده می‌شود. درصورتی‌که معیار j ام، معرف سود باشد $\tilde{f}_j^*$ و $\tilde{f}_j^o$ از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\tilde{f}_j^* = \max \tilde{f}_{ij} \qquad i = 1,2,\dots,n \tag{۶}$$

$$\tilde{f}_j^* = \min \tilde{f}_{ij} \qquad i = 1,2,\dots,n \tag{۷}$$

ولی درصورتی‌که معیار j ام، معرف هزینه باشد $\tilde{f}_j^*$ و $\tilde{f}_j^o$ از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\tilde{f}_j^* = \min \tilde{f}_{ij} \qquad 1,2,\dots,n \tag{۸}$$

$$\tilde{f}_j^* = \max \tilde{f}_{ij} \qquad i = 1,2,\dots,n \tag{۹}$$

*۲- به دست آوردن مقادیر نرمالیزه شده*

اگر $\tilde{f}_j^* = (l_j^*, m_j^*, u_j^*)$ و $\tilde{f}_j^o = (l_j^o, m_j^o, u_j^o)$ باشد، مقادیر نرمالیزه شده بدین صورت بدست می‌آید:

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{J_j \ominus J_{ij}}{J_j^* \ominus J_j^o} \qquad for\ benefit\ Criteria \tag{۸}$$

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{J_{ij} \ominus J_j^*}{J_j^o \ominus J_j^*} \qquad for\ Cost\ Criteria \tag{۹}$$

✓ *محاسبه سودمندی* $(\tilde{S}_i)$ *و تأسف* $(\tilde{R}_i)$ *گزینه‌ها*

با استفاده از روابط زیر مقدار سودمندی و تأسف گزینه‌ها محاسبه می‌شود.

$$\tilde{S}_i = \sum_{i=1}^{n} (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij}) \tag{۱۰}$$

$$\tilde{R}_i = \max (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij}) \tag{۱۱}$$

✓ *محاسبه شاخص ویکور* $(\tilde{Q}_i)$

شاخص ویکور از رابطه زیر محاسبه می‌شود در این رابطه V، وزنی برای بیشینه مطلوبیت گروهی است که مقدار آن می‌تواند بین ۰ و ۱ باشد که در این تحقیق ۰.۵ در نظر گرفته‌شده است.

$$\tilde{Q}_i = v \frac{(\tilde{S}_j \ominus \tilde{S}^*)}{S^{or} \ominus S^{*l}} \oplus (1-v) \frac{(\tilde{R}_j \ominus \tilde{R}^*)}{R^{or} \ominus R^{*l}} \tag{۱۲}$$

که در این رابطه:

$$\tilde{S}^* = \min \tilde{S}_i \tag{۱۳}$$

$$S^{or} = \max S_i^r \tag{۱۴}$$

$$\tilde{R}^* = \min \tilde{R}_i \tag{۱۵}$$

$$R^{or} = \max R_i^r \tag{۱۶}$$

مقادیر R، S و Q با توجه به فرمول زیر قطعی تبدیل به عدد قطعی می‌شوند.

$$Crisp = \frac{l + 4m + u}{6} \tag{۱۷}$$

✓ *رتبه‌بندی گزینه‌ها*

گزینه‌ای به‌عنوان گزینه برتر است که دارای کمترین مقدار Q باشد به شرطی که:

اگر $A_1$، $A_2$ و $A_n$ به ترتیب اولین، دومین و آخرین گزینه بر اساس مقدار Q باشد و n بیانگر تعداد گزینه‌ها باشد، رابطه برقرار باشد:

$$\frac{[Q(A^2) - Q(A^1)]}{[Q(A^n) - Q(A^1)]} \geq \frac{1}{n-1} \tag{۱۸}$$

اگر این شرط برقرار نباشد مجموعه‌ای از گزینه‌ها به‌صورت زیر به‌عنوان گزینه‌های برتر انتخاب می‌شوند

$$(\text{best alternative}=A_1,A_2,\ldots,A_m)$$

بیشترین مقدار m با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q(A_m)-Q(A_1)<1/(n-1) \rightarrow Q(A_m)<(1/n-1)+Q(A_1) \quad (۱۹)$$

اگر شرط ۱ برقرار باشد شرط شماره ۲ نیز باید چک شود.

شرط ۲: گزینه $A_1$ باید حداقل در یکی از گروه‌های R و S رتبه اول باشد.

زمانی که شرط دوم برقرار نباشد دو گزینه $A_1$ و $A_2$ به‌عنوان گزینه‌های برتر شناخته می‌شوند.

اگر هر دو شرط برقرار بود رتبه‌بندی بر اساس q خواهد بود. (به‌صورت کاهشی: هر چه q کمتر باشد آن گزینه بهتر است).

## ۲-۳- جامعه آماری مورداستفاده

یک جامعه آماری عبارت است از مجموعه‌ای از افراد یا واحدها که دارای حداقل یک صفت مشترک باشند. صفت مشترک صفتی است که بین همه عناصر جامعه آماری مشترک و متمایزکننده جامعه آماری از سایر جوامع باشد. بر این اساس جامعه آماری پژوهش حاضر افراد دارای سابقه کاری در زمینه انرژی می باشد که با استفاده از روش نمونه گیری هدفمند تعداد ۱۰ خبره که به موضوع پژوهش مسلط هستند انتخاب می‌شوند.

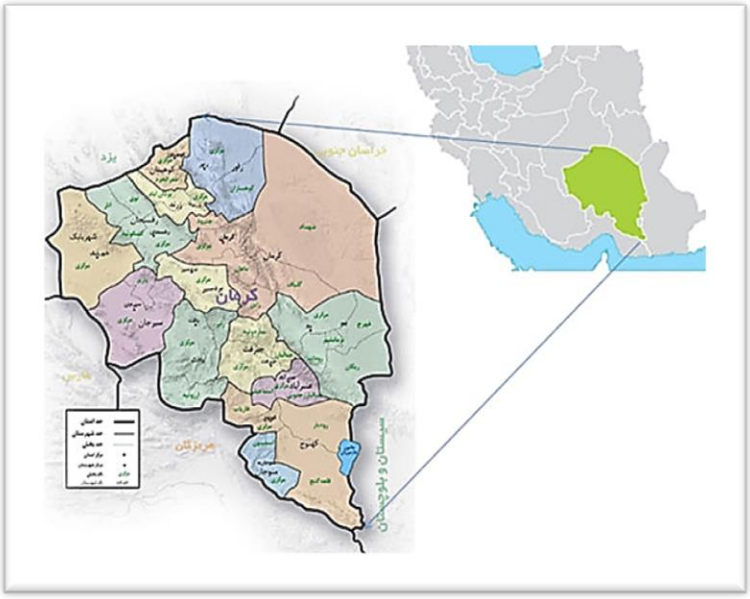
## ۲-٤- ابزارهای جمع‌آوری داده‌های پژوهش

یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل پژوهش، گردآوری اطلاعات است. روش گردآوری اطلاعات متأثر از ماهیت موضوع و متغیرهای موردمطالعه است. مطالعه کتابخانه‌ای یکی از روش‌های معمول برای دستیابی به یافته‌ها و یکی از اساسی‌ترین مراحل در جمع‌آوری اطلاعات برای پژوهش است اصلی‌ترین روش‌ها و ابزارهای جمع‌آوری داده‌ها را اسناد و مدارک، مشاهدات، مصاحبه و پرسشنامه‌ها تشکیل می‌دهند در این پژوهش از ۳ نوع پرسشنامه استفاده می‌شود که در زیر آورده شده است:

۱. پرسشنامه بر اساس طیف ۱ تا ۵ لیکرت جهت تایید و غربالگری عوامل پژوهش
۲. پرسشنامه مقایسه زوجی بر اساس طیف ۱ تا ۹ ساعتی برای بررسی اهمیت معیارها
۳. پرسشنامه ارزیابی گزینه‌ها و معیارها بر اساس طیف ۱ تا ۵

## ۲-۵- معرفی محدوده موردمطالعه

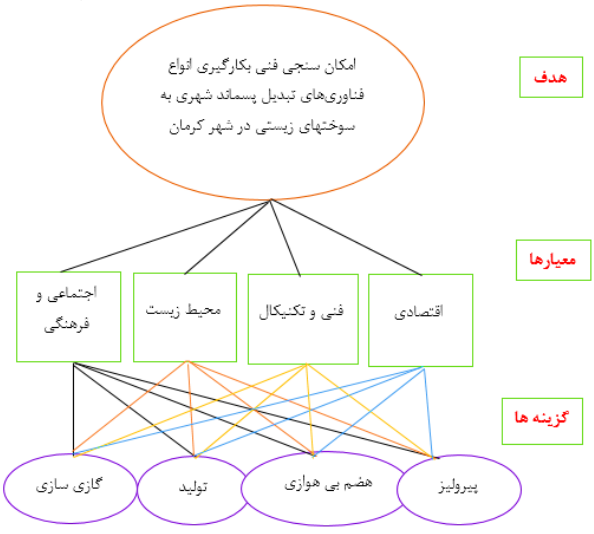
کرمان از شهرهای بزرگ ایران و مرکز استان کرمان در جنوب شرقی ایران است. جمعیت آن طبق سرشماری سال ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران برابر با ۵۳۷۷۱۸ نفر بوده است (شکل ۲). طبق بازدیدها و اطلاعات اخذشده از شهرداری کرمان، میانگین تولید روزانه زباله به ازای هر نفر در شهر کرمان ۷۵۰ گرم به دست آمد. طبق آمارهای رسمی روزانه ۳۵۰ تا ۴۰۰ تن زباله جمع‌آوری می‌شود که این میزان در روزهای پایانی سال تا سه برابر افزایش پیدا می‌کند. در سازمان مدیریت پسماند کرمان، ۷۴ دستگاه خودروی حمل زباله و ۲۲۸ کارگر در بخش جمع‌آوری زباله خدمت‌رسانی می‌کنند. شرح خدمات سازمان مدیریت پسماند عمدتا بر جمع آوری کیسه های پسماند خانگی از درب منازل و انتقال آنها به سایت پردازش مکانیکی خارج شهر و در نهایت دفن عمده پسماندها در ترانشه های حفر شده است. سیستم مدیریت پسماند کنونی شهرداری کرمان، یک سیستم سنتی و قدیمی است که بار هزینه بسیاری را بر دوش شهرداری کرمان تحمیل کرده است. درآمدزایی بسیار اندکی از محل بازیافت و غرفه‌های تفکیک از مبدأ مستقر از شهر به دست می‌آید که در مقابل هزینه‌های انجام‌شده در حوزه پسماند بسیار اندک است.




شکل ۲۲- موقعیت جغرافیایی استان کرمان

## ۳- نتایج و بحث

درروش AHP، اولین قدم تشکیل درخت سلسله‌مراتب که بیان‌کننده مسئله است می‌باشد. درخت سلسله‌مراتب که با توجه به مسئله تحت بررسی دارای سطوح متعدد است، شامل سه سطح بوده که سطح اول هر درخت بیان‌کننده هدف تصمیم‌گیری، سطح آخر نیز بیان‌کننده گزینه‌هایی است که با همدیگر مقایسه می‌شوند و برای انتخاب در رقابت با همدیگر هستند و سطح میانی نشان‌دهنده فاکتورهایی است که ملاک مقایسه گزینه‌ها می‌باشد. هدف این تحقیق تعیین فناوری منتخب برای تبدیل پسماند شهری به سوخت زیستی در کشور می‌باشد. گزینه‌ها شامل چهار فناوری متداول در جهان که برای تبدیل پسماند به سوخت زیستی می‌باشد قابل‌اجرا است و معیارها را نیز شامل می‌شوند چهار گزینه از طریق این معیارها قابل‌مقایسه هستند. شکل (۳) قالب درخت سلسله مراتبی یا تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.




شکل ۳۳- درخت تصمیم‌گیری

در سنجش معیارها روش‌هایی بکار گرفته که بتوان به‌واسطه آن‌ها در انتخاب معیارهای تأثیرگذار دقت نمود و در درستی و میزان کشف موضوعات مبهم با تکیه‌بر اطلاعات و یافته‌ها پرداخت.

بر اساس مرور ادبیات و پیشینه پژوهش معیارهای تأثیرگذار بر تبدیل پسماند به انرژی شناسایی و استخراج شد که شامل ۲۰ معیار در ۴ بعد اصلی است که جهت بومی‌سازی این موانع طی پرسشنامه‌ای از ۱۰ نفر از خبرگان خواسته شد که بر اساس طیف ۱ تا ۵ لیکرت (۱= اهمیت خیلی کم، ۲= اهمیت کم، ۳= اهمیت متوسط، ۴= اهمیت زیاد، ۵= اهمیت خیلی زیاد) به هر شاخص امتیاز دهند. سپس میانگین امتیازات هر شاخص محاسبه شد چنانچه میانگین امتیاز شاخصی از عدد ۳ کمتر باشد حذف می‌گردد. میانگین شاخص‌ها محاسبه‌شده و شاخص‌هایی که میانگین کمتر از ۳ کسب کرده باشند حذف می‌شوند که در جدول (۳) نتایج آورده شده است که نتایج نشان از تائید تمامی موانع دارد.

جدول ۳- میانگین امتیازات پرسشنامه‌ها

| نام معیار | نام زیرمعیار | کد معیار | میانگین | وضعیت |
|---|---|---|---|---|
| اقتصادی ($C_1$) | هزینه‌های سرمایه‌گذاری | $C_{11}$ | ۴.۵ | تأیید |
| | هزینه‌های بهره‌برداری | $C_{12}$ | ۴.۳ | تأیید |
| | هزینه دفع پسماند | $C_{13}$ | ۴.۱ | تأیید |
| | هزینه نیروی انسانی | $C_{14}$ | ۳.۸ | تأیید |
| | مساحت احداث | $C_{15}$ | ۳.۴ | تأیید |
| فنی و تکنیکال ($C_2$) | راندمان و میزان محصول خروجی تولیدشده | $C_{21}$ | ۳.۶ | تأیید |
| | دمای انجام فرآیند | $C_{22}$ | ۳.۹ | تأیید |
| | میزان رطوبت مجاز | $C_{23}$ | ۳.۶ | تأیید |
| | میزان سازگاری روش با پسماند شهری منطقه موردمطالعه | $C_{24}$ | ۳.۷ | تأیید |
| | میزان پوشش دادن پسماند | $C_{25}$ | ۳.۳ | تأیید |
| | نوع انرژی تولیدی | $C_{26}$ | ۳.۳ | تأیید |
| محیط‌زیست ($C_3$) | تأثیر بر چشم‌اندازهای طبیعی و مناظر | $C_{31}$ | ۳.۳ | تأیید |
| | ایجاد بو | $C_{32}$ | ۳.۴ | تأیید |
| | انتشار گازهای آلاینده | $C_{33}$ | ۳.۵ | تأیید |
| | انتشار تولید پساب آلاینده صنعتی | $C_{34}$ | ۳.۶ | تأیید |
| | دفع پسماندهای صنعتی و ویژه | $C_{35}$ | ۳.۳ | تأیید |
| اجتماعی و فرهنگی ($C_4$) | تأثیرات فرهنگی آیتم بر جامعه شهری | $C_{41}$ | ۳.۸ | تأیید |
| | فرصت‌های شغلی مستقیم | $C_{42}$ | ۳.۶ | تأیید |
| | فرصت‌های شغلی غیرمستقیم | $C_{43}$ | ۳.۴ | تأیید |
| | میزان سازگاری با مشارکت شهروندان | $C_{44}$ | ۳.۴ | تأیید |

در این بخش مقایسات زوجی معیارهای اصلی و سپس زیرمعیارها تشکیل می‌شود این مقایسات زوجی بر اساس طیف ۱ تا ۹ فازی انجام می‌گیرد. جداول (۴) مقایسات زوجی معیارها و زیر معیارها را نمایش داده است.

جدول ۴- مقایسات زوجی معیارها و گزینه‌ها در فضای فازی

| مقایسات زوجی معیارها (نرخ ناسازگاری: ۰.۰۳) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | |
| $C_1$ | (۱،۱،۱) | (۰.۲۶۱،۰.۳۵۵،۰.۵۶۸) | (۰.۲۳۴،۰.۳۰۶،۰.۴۴۳) | (۱.۷۴۱،۲.۷۶۶،۳.۷۷۶) | |
| $C_2$ | (۱.۷۶۲،۲.۸۱۴،۳.۸۳۷) | (۱،۱،۱) | (۱.۲۳۱،۱.۸۵۶،۲.۵۶۴) | (۳،۴،۵) | |
| $C_3$ | (۲.۲۵۹،۳.۲۷،۴.۲۷۷) | (۰.۳۹،۰.۵۳۹،۰.۸۱۲) | (۱،۱،۱) | (۲.۸۸۱،۳.۸۸۷،۴.۸۹) | |
| $C_4$ | (۰.۲۶۵،۰.۳۶۱،۰.۵۷۴) | (۰.۲،۰.۲۵،۰.۳۳۳) | (۰.۲۰۵،۰.۲۵۷،۰.۳۴۷) | (۱،۱،۱) | |
| مقایسات زوجی زیرمعیارهای اقتصادی (نرخ ناسازگاری: ۰.۰۲) | | | | | |
| | $C_{11}$ | $C_{12}$ | $C_{13}$ | $C_{14}$ | $C_{15}$ |
| $C_{11}$ | (۱،۱،۱) | (۰.۳۲۴،۰.۴۸،۰.۹۳۳) | (۱.۱۴۹،۲.۱۶۹،۳.۱۷۸) | (۱.۲۳۱،۲.۲۵۹،۳.۲۷) | (۲،۳،۴) |
| $C_{12}$ | (۱.۰۷۲،۲.۰۸۳،۳.۰۸۸) | (۱،۱،۱) | (۲،۳،۴) | (۲،۳،۴) | (۲.۸۸۱،۳.۸۸۷،۴.۸۹) |
| $C_{13}$ | (۰.۳۱۵،۰.۴۶۱،۰.۸۷۱) | (۰.۲۵،۰.۳۳۳،۰.۵) | (۱،۱،۱) | (۱،۲،۳) | (۱.۰۷۲،۲.۰۸۳،۳.۰۸۸) |
| $C_{14}$ | (۰.۳۰۶،۰.۴۴۳،۰.۸۱۲) | (۰.۲۵،۰.۳۳۳،۰.۵) | (۰.۳۳۳،۰.۵،۱) | (۱،۱،۱) | (۰.۳۲۴،۰.۴۸،۰.۹۳۳) |
| $C_{15}$ | (۰.۲۵،۰.۳۳۳،۰.۵) | (۰.۲۰۵،۰.۲۵۷،۰.۳۴۷) | (۰.۳۲۴،۰.۴۸،۰.۹۳۳) | (۱.۰۷۲،۲.۰۸۳،۳.۰۸۸) | (۱،۱،۱) |
| مقایسات زوجی زیرمعیارهای فنی و تکنیکال (نرخ ناسازگاری: ۰.۰۲) | | | | | |
| | $C_{21}$ | $C_{22}$ | $C_{23}$ | $C_{24}$ | $C_{25}$ | $C_{26}$ |
| $C_{21}$ | (۱،۱،۱) | (۱.۸۶۶،۲.۸۸۱،۳.۸۸۷) | (۳،۴،۵) | (۱.۸۶۶،۲.۸۸۱،۳.۸۸۷) | (۲.۱۶۹،۳.۱۷۸،۴.۱۸۳) | (۲.۸۴۷،۳.۸۶۲،۴.۸۷) |
| $C_{22}$ | (۰.۲۵۷،۰.۳۴۷،۰.۵۳۶) | (۱،۱،۱) | (۰.۲۵۲،۰.۳۳۷،۰.۵۱۵) | (۰.۳۲۴،۰.۴۸،۰.۹۳۳) | (۰.۲۵،۰.۳۳۳،۰.۵) | (۰.۳۶۲،۰.۴۸۸،۰.۶۹۹) |
| $C_{23}$ | (۰.۲،۰.۲۵،۰.۳۳۳) | (۱.۹۴۳،۲.۹۶۵،۳.۹۷۴) | (۱،۱،۱) | (۰.۴۰۴،۰.۵۳۹،۰.۷۸۳) | (۰.۳۲۴،۰.۴۲۳،۰.۵۷۱) | (۰.۲۳۹،۰.۳۱۵،۰.۴۶۱) |
| $C_{24}$ | (۰.۲۵۷،۰.۳۴۷،۰.۵۳۶) | (۱.۰۷۲،۲.۰۸۳،۳.۰۸۸) | (۱.۲۷۷،۱.۸۵۶،۲.۴۷۲) | (۱،۱،۱) | (۰.۳۹۳،۰.۵۴۵،۰.۸۳۶) | (۰.۳۱۵،۰.۴۶۱،۰.۸۷۱) |
| $C_{25}$ | (۰.۲۳۹،۰.۳۱۵،۰.۴۶۱) | (۲،۳،۴) | (۱.۷۵۳،۲.۳۶۴،۳.۰۸۵) | (۱.۱۹۶،۱.۸۳۵،۲.۵۴۸) | (۱،۱،۱) | (۰.۴۱۱،۰.۵۴۸،۰.۷۹۲) |
| $C_{26}$ | (۰.۲۰۵،۰.۲۵۹،۰.۳۵۱) | (۱.۴۳۱،۲.۰۴۸،۲.۷۵۹) | (۲.۱۶۹،۳.۱۷۸،۴.۱۸۳) | (۱.۱۴۹،۲.۱۶۹،۳.۱۷۸) | (۱.۲۶۲،۱.۸۲۵،۲.۴۳۳) | (۱،۱،۱) |
| مقایسات زوجی زیرمعیارهای محیط‌زیست (نرخ ناسازگاری: ۰.۰۱) | | | | | |
| | $C_{31}$ | $C_{32}$ | $C_{33}$ | $C_{34}$ | $C_{35}$ | |
| $C_{31}$ | (۱،۱،۱) | (۰.۳۱۵،۰.۴۶۱،۰.۸۷۱) | (۰.۳۲۴،۰.۴۸،۰.۹۳۳) | (۰.۳۳۳،۰.۵،۱) | (۰.۲۹۹،۰.۴۳،۰.۷۸) | |
| $C_{32}$ | (۱.۱۴۹،۲.۱۶۹،۳.۱۷۸) | (۱،۱،۱) | (۰.۳۴۹،۰.۵۱۷،۰.۸۲۲) | (۰.۲۵۹،۰.۳۵۱،۰.۵۵۲) | (۰.۳۷۹،۰.۵۱۷،۰.۷۵۸) | |
| $C_{33}$ | (۱.۰۷۲،۲.۰۸۳،۳.۰۸۸) | (۱.۲۱۷،۱.۹۳۳،۲.۸۶۲) | (۱،۱،۱) | (۰.۲۵۷،۰.۳۴۷،۰.۵۳۶) | (۱،۱.۸۶۶،۲.۶۸۸) | |
| $C_{34}$ | (۱،۲،۳) | (۱.۸۱۳،۲.۸۴۷،۳.۸۶۲) | (۱.۸۶۶،۲.۸۸۱،۳.۸۸۷) | (۱،۱،۱) | (۱،۱.۷۴۱،۲.۴۰۸) | |
| $C_{35}$ | (۱.۲۸۲،۲.۳۲۵،۳.۳۴۴) | (۱.۳۲،۱.۹۳۳،۲.۶۳۹) | (۰.۳۷۲،۰.۵۳۶،۱) | (۰.۴۱۵،۰.۵۷۴،۱) | (۱،۱،۱) | |

## ۳-۱- محاسبه اوزان فازی و نرمال

در این گام بر اساس رابطه پایه ضرب و جمع دو عدد فازی مثلثی [۱۶] ابتدا میانگین هندسی اعداد فازی هر سطر جدول (۴) را محاسبه می‌کنیم و سپس هر میانگین هندسی حاصل را بر مجموع میانگین‌های هندسی تقسیم می‌کنیم تا وزن فازی حاصل شود سپس هر وزن فازی را با استفاده از رابطه $\frac{l+2m+u}{4}$ غیر فازی می‌کنیم و برای نرمال‌سازی هر وزن غیر فازی کافی است آن وزن را بر مجموع وزن‌های غیر فازی تقسیم کنیم. به‌عنوان‌مثال برای معیار $C_1$ در جدول (۴) محاسبات به‌صورت زیر است:

ابتدا میانگین هندسی درایه‌های سطرهای جدول (۴) را محاسبه می‌کنیم که به‌صورت زیر می‌شود.

$$\text{میانگین هندسی سطر اول} = [(1,1,1) \times (0.261,0.355,0.568) \times (0.234,0.306,0.443) \times (1.741,2.766,3.776)]^{\frac{1}{4}} = (0.571,0.74,0.987)$$

به طریق مشابه برای سطرهای دیگر نیز این محاسبات صورت می‌گیرد که نتایج در ستون دوم جدول ۵ برای کلیه سطرهای آورده شده است. سپس مجموع تمامی این میانگین‌های هندسی را به دست می‌آوریم که برابر با (۳.۷۵۳،۴.۸۸۷،۶.۱۷۳) می‌شود سپس وزن فازی هر معیار برابر با میانگین هندسی سطر آن معیار تقسیم‌بر مجموع میانگین‌های هندسی. به‌عنوان‌مثال برای معیار $C_1$ وزن فازی به‌صورت زیر می‌شود:

$$\text{وزن فازی C1} = \frac{(0.571,0.74,0.987)}{(3.753,4.887,6.173)} = (0.092,0.152,0.263)$$

برای کلیه معیارهای نیز عملیات مشابه صورت می‌گیرد که وزن‌های فازی در ستون سوم جدول (۵) آورده شده است. سپس برای غیر فازی کردن هر وزن فازی به طریق زیر انجام می‌شود.

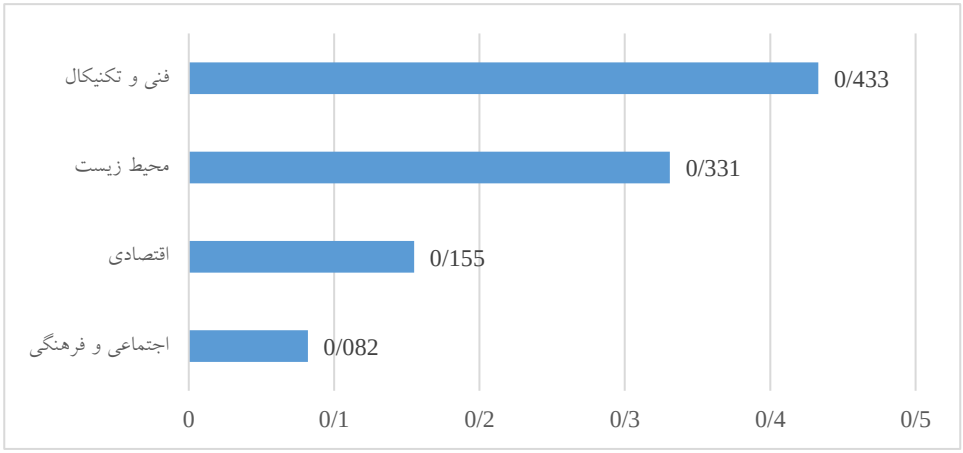
$$\text{وزن فازي } C1 = (0.092,0.152,0.263) \Rightarrow C1 \text{ وزن غير فازي} = \frac{0.092 + 2 \times 0.152 + 0.263}{4} = 0.165$$

برای کلیه معیارها نیز این فرایند صورت می‌گیرد که نتایج در ستون چهارم جدول (۵) آورده شده است سپس برای نرمال‌سازی هر وزن غیر فازی به طریق زیر عمل می‌کنیم.

$$\text{وزن غير فازي } C1 = 0.165 \Rightarrow C1 \text{ وزن نرمال} = \frac{0.165}{0.165 + 0.460 + 0.352 + 0.087} = 0.15$$

جدول ۳۵- وزن فازی و غیر فازی معیارهای اصلی

| نام معیار | میانگین هندسی $(\prod_{j=1}^{n} \tilde{P}_{ij})^{1/n}$ | وزن فازی $(\tilde{W})$ | وزن غیر فازی | وزن نرمال |
|---|---|---|---|---|
| $C_1$ | (۰.۵۷۱،۰.۷۴،۰.۹۸۷) | (۰.۰۹۲،۰.۱۵۲،۰.۲۶۳) | ۰.۱۶۵ | ۰.۱۵۵ |
| $C_2$ | (۱.۵۹۷،۲.۱۳۸،۲.۶۴۸) | (۰.۲۵۹،۰.۴۳۸،۰.۷۰۶) | ۰.۴۶۰ | ۰.۴۳۳ |
| $C_3$ | (۱.۲۶۲،۱.۶۱۸،۲.۰۳) | (۰.۲۰۴،۰.۳۳۱،۰.۵۴۱) | ۰.۳۵۲ | ۰.۳۳۱ |
| $C_4$ | (۰.۳۲۳،۰.۳۹،۰.۵۰۸) | (۰.۰۵۲،۰.۰۸،۰.۱۳۵) | ۰.۰۸۷ | ۰.۰۸۲ |
| $\sum\left(\prod_{j=1}^{n} \tilde{P}_{ij}\right)^{1/n}$ | (۳.۷۵۳،۴.۸۸۷،۶.۱۷۳) | | | |

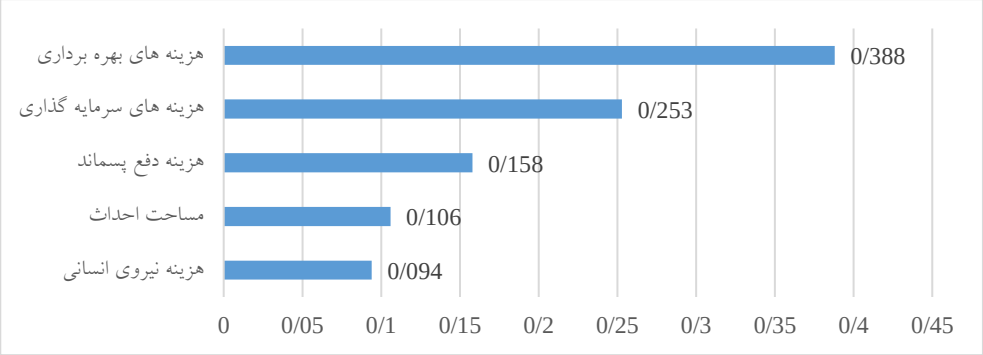



شکل ۴- اوزان معیارهای اصلی

با توجه به شکل (۴)، فنی و تکنیکال با وزن ۰.۴۳۳ رتبه اول را کسب کرده است. محیط‌زیست با وزن ۰.۴۳۳ رتبه دوم، اقتصادی با وزن ۰.۱۵۵ رتبه سوم و اجتماعی و فرهنگی با وزن ۰.۰۸۲ رتبه چهارم را کسب کرده است. به طریق مشابه برای دیگر مقایسات زوجی (زیرمعیارها) این محاسبات صورت می‌گیرد که در ادامه در جدول (۶) آورده شده است.

جدول ۳۶- وزن فازی و غیر فازی زیرمعیارهای اقتصادی

| نام معیار | میانگین هندسی $(\prod_{j=1}^{n}\tilde{P}_{ij})^{1/n}$ | وزن فازی $(\widetilde{W})$ | وزن غیر فازی | وزن نرمال |
|---|---|---|---|---|
| $C_{11}$ | (۰.۹۸۳،۱.۴۷۸،۲.۰۷۸) | (۰.۱۲۱،۰.۲۵۲،۰.۵۱) | ۰.۲۸۴ | ۰.۲۵۳ |
| $C_{12}$ | (۱.۶۵۳،۲.۳۵۸،۲.۹۹۶) | (۰.۲۰۴،۰.۴۰۱،۰.۷۳۵) | ۰.۴۳۶ | ۰.۳۸۸ |
| $C_{13}$ | (۰.۶۱،۰.۹۱۵،۱.۳۲۲) | (۰.۰۷۵،۰.۱۵۶،۰.۳۲۴) | ۰.۱۷۸ | ۰.۱۵۸ |
| $C_{14}$ | (۰.۳۸۳،۰.۵۱۳،۰.۸۲۴) | (۰.۰۴۷،۰.۰۸۷،۰.۲۰۲) | ۰.۱۰۶ | ۰.۰۹۴ |
| $C_{15}$ | (۰.۴۴۷،۰.۶۱۲،۰.۸۷۱) | (۰.۰۵۵،۰.۱۰۴،۰.۲۱۴) | ۰.۱۱۹ | ۰.۱۰۶ |
| $\sum\left(\prod_{j=1}^{n}\tilde{P}_{ij}\right)^{1/n}$ | (۴.۰۷۵،۵.۸۷۵،۸.۰۹۱) | | | |

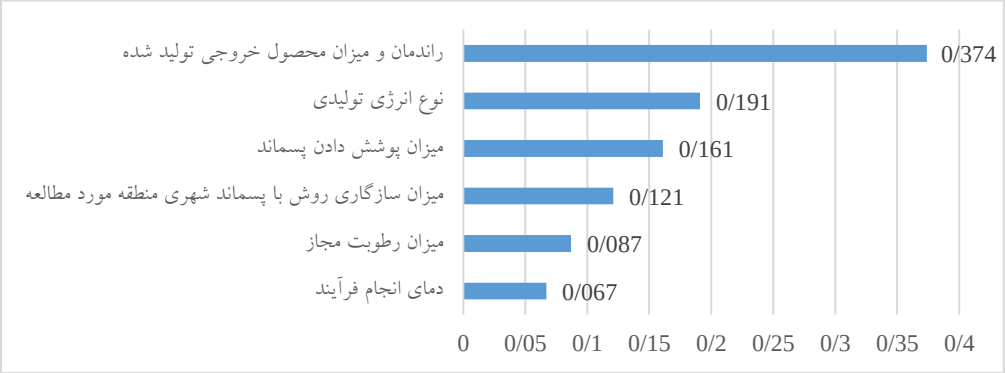



شکل ۵- اوزان زیرمعیارهای زیرمعیارهای اقتصادی

با توجه به شکل (۵)، در بین زیرمعیارهای اقتصادی، هزینه‌های بهره‌برداری با وزن ۰.۳۸۸ رتبه اول را کسب کرده است. هزینه‌های سرمایه-گذاری با وزن ۰.۲۵۳ رتبه دوم و هزینه دفع پسماند با وزن ۰.۱۵۸ رتبه سوم را کسب کرده است.

جدول ۳۷- وزن فازی و غیر فازی زیرمعیارهای محیط‌زیست

| نام معیار | میانگین هندسی $(\prod_{j=1}^{n}\tilde{P}_{ij})^{1/n}$ | وزن فازی $(\widetilde{W})$ | وزن غیر فازی | وزن نرمال |
|---|---|---|---|---|
| $C_{21}$ | (۲.۰۰۳،۲.۷۲۳،۳.۳۹۸) | (۰.۲۱۴،۰.۳۸۱،۰.۶۴۴) | ۰.۴۰۵ | ۰.۳۷۴ |
| $C_{22}$ | (۰.۳۵۲،۰.۴۵۷،۰.۶۶۹) | (۰.۰۳۸،۰.۰۶۴،۰.۱۲۷) | ۰.۰۷۳ | ۰.۰۶۷ |
| $C_{23}$ | (۰.۴۸،۰.۶۱۳،۰.۸۰۵) | (۰.۰۵۱،۰.۰۸۶،۰.۱۵۳) | ۰.۰۹۴ | ۰.۰۸۷ |
| $C_{24}$ | (۰.۵۹۳،۰.۸۳۴،۱.۱۹۹) | (۰.۰۶۳،۰.۱۱۷،۰.۲۲۷) | ۰.۱۳۱ | ۰.۱۲۱ |
| $C_{25}$ | (۰.۸۶۳،۱.۱۴۴،۱.۵۰۲) | (۰.۰۹۲،۰.۱۶،۰.۲۸۵) | ۰.۱۷۴ | ۰.۱۶۱ |
| $C_{26}$ | (۰.۹۸۷،۱.۳۷۲،۱.۷۷۶) | (۰.۱۰۶،۰.۱۹۲،۰.۳۳۷) | ۰.۲۰۷ | ۰.۱۹۱ |
| $\sum\left(\prod_{j=1}^{n}\tilde{P}_{ij}\right)^{1/n}$ | (۵.۲۷۷،۷.۱۴۴،۹.۳۵) | | | |

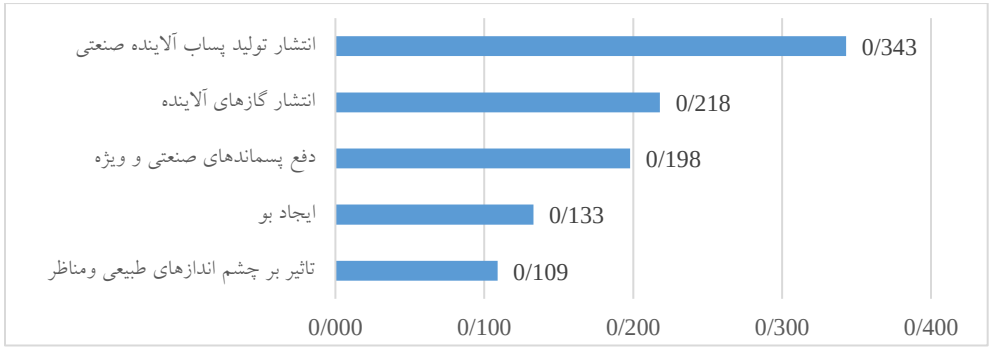



شکل ۶- اوزان زیرمعیارهای محیط زیست

با توجه به شکل (۶) و جدول (۷)، در بین زیرمعیارهای محیط‌زیست، راندمان و میزان محصول خروجی تولیدشده با وزن ۰.۳۷۴ رتبه اول را کسب کرده است. نوع انرژی تولیدی با وزن ۰.۱۹۱ رتبه دوم و میزان پوشش دادن پسماند با وزن ۰.۱۶۱ رتبه سوم را کسب کرده است.

جدول ۳۸- وزن فازی و غیر فازی زیرمعیارهای محیط‌زیست

| نام معیار | میانگین هندسی $(\prod_{j=1}^{n}\tilde{P}_{ij})^{1/n}$ | وزن فازی $(\widetilde{W})$ | وزن غیر فازی | وزن نرمال |
|---|---|---|---|---|
| $C_{31}$ | (۰.۳۹۹،۰.۵۴۴،۰.۹۱۳) | (۰.۰۵۲،۰.۰۹۹،۰.۲۴۲) | ۰.۱۲۳ | ۰.۱۰۹ |
| $C_{32}$ | (۰.۵۲۴،۰.۷۲۸،۱.۰۱۸) | (۰.۰۶۸،۰.۱۳۲،۰.۲۷) | ۰.۱۵۱ | ۰.۱۳۳ |
| $C_{33}$ | (۰.۸۰۴،۱.۲۱۱،۱.۶۶۳) | (۰.۱۰۴،۰.۲۲،۰.۴۴۱) | ۰.۲۴۷ | ۰.۲۱۸ |
| $C_{34}$ | (۱.۲۷۶،۱.۹۵۵،۲.۵۵۳) | (۰.۱۶۶،۰.۳۵۵،۰.۶۷۸) | ۰.۳۸۸ | ۰.۳۴۳ |
| $C_{35}$ | (۰.۷۶۵،۱.۰۶۷،۱.۵۴۶) | (۰.۰۹۹،۰.۱۹۴،۰.۴۱) | ۰.۲۲۴ | ۰.۱۹۸ |
| $\sum\left(\prod_{j=1}^{n}\tilde{P}_{ij}\right)^{1/n}$ | (۳.۷۶۸،۵.۵۰۵،۷.۶۹۲) | | | |

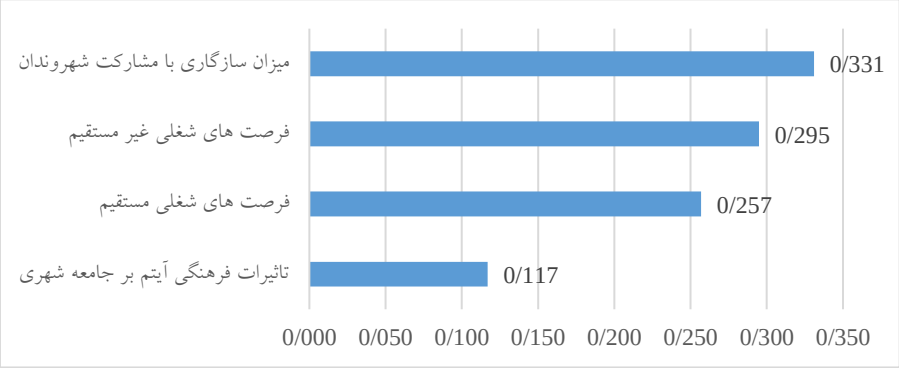



شکل ۷- اوزان زیرمعیارهای محیط زیست

با توجه به شکل (۷) و جدول (۹)، در بین زیرمعیارهای محیط زیست، انتشار تولید پساب آلاینده صنعتی با وزن ۰.۳۴۳ رتبه اول را کسب کرده است. انتشار گازهای آلاینده با وزن ۰.۲۱۸ رتبه دوم و دفع پسماندهای صنعتی و ویژه با وزن ۰.۱۹۸ رتبه سوم را کسب کرده است.

جدول ۳۹- وزن فازی و غیرفازی زیرمعیارهای اجتماعی و فرهنگی

| نام معیار | میانگین هندسی $(\prod_{j=1}^{n}\tilde{P}_{ij})^{1/n}$ | وزن فازی $(\widetilde{W})$ | وزن غیرفازی | وزن نرمال |
|---|---|---|---|---|
| C41 | (۰.۳۹،۰.۴۹۴،۰.۷۰۷) | (۰.۰۶۵،۰.۱۱۵،۰.۲۳۴) | ۰.۱۳۲ | ۰.۱۱۷ |
| C42 | (۰.۷۷۶،۱.۰۹۶،۱.۵۶۷) | (۰.۱۲۹،۰.۲۵۴،۰.۵۱۹) | ۰.۲۸۹ | ۰.۲۵۷ |
| C43 | (۰.۸۴،۱.۲۷۸،۱.۷۸۸) | (۰.۱۳۹،۰.۲۹۶،۰.۵۹۳) | ۰.۳۳۱ | ۰.۲۹۵ |
| C44 | (۱.۰۱۲،۱.۴۴۶،۱.۹۶۳) | (۰.۱۶۸،۰.۳۳۵،۰.۶۵) | ۰.۳۷۲ | ۰.۳۳۱ |
| $\sum\left(\prod_{j=1}^{n}\tilde{P}_{ij}\right)^{1/n}$ | (۳.۰۱۷،۴.۳۱۳،۶.۰۲۵) | | | |




شکل ۸- اوزان زیرمعیارهای اجتماعی و فرهنگی

با توجه به شکل (۸)، در بین زیرمعیارهای اجتماعی و فرهنگی، میزان سازگاری با مشارکت شهروندان با وزن ۰.۳۳۱ رتبه اول، فرصت‌های شغلی غیرمستقیم با وزن ۰.۲۹۵ رتبه دوم و فرصت‌های شغلی مستقیم با وزن ۰.۲۵۷ رتبه سوم را کسب کرده است. اوزان نهایی زیرمعیارها از ضرب وزن معیارهای اصلی در وزن نسبی زیرمعیارها حاصل شده است که در جدول (۱۰) نتایج آن ارائه شده است. همان طور که در جدول (۱۰) نشان داده شده است، عدم وجود سیاست زیست‌محیطی برای GSCM رتبه اول را در بین تمامی شاخص‌های کسب نموده است.

جدول ۱۰- وزن نهایی زیرمعیارها

| نام معیار | وزن معیار | نام زیرمعیار | وزن نسبی زیرمعیار | وزن نهایی زیرمعیار | رتبه نهایی |
|---|---|---|---|---|---|
| اقتصادی (C1) | ۰.۱۵۵ | هزینه‌های سرمایه‌گذاری | ۰.۲۵۳ | ۰.۰۳۹۱ | ۱۰ |
| | | هزینه‌های بهره‌برداری | ۰.۳۸۸ | ۰.۰۶۰۱ | ۷ |
| | | هزینه دفع پسماند | ۰.۱۵۸ | ۰.۰۲۴۵ | ۱۵ |
| | | هزینه نیروی انسانی | ۰.۰۹۴ | ۰.۰۱۴۶ | ۱۹ |
| | | مساحت احداث | ۰.۱۰۶ | ۰.۰۱۶۵ | ۱۸ |
| فنی و تکنیکال (C2) | ۰.۴۳۳ | راندمان و میزان محصول خروجی تولید شده | ۰.۳۷۴ | ۰.۱۶۱۶ | ۱ |
| | | دمای انجام فرآیند | ۰.۰۶۷ | ۰.۰۲۹۲ | ۱۳ |
| | | میزان رطوبت مجاز | ۰.۰۸۷ | ۰.۰۳۷۵ | ۱۱ |
| | | میزان سازگاری روش با پسماند شهری منطقه مورد مطالعه | ۰.۱۲۱ | ۰.۰۵۲۳ | ۸ |

| نام معیار | وزن معیار | نام زیرمعیار | وزن نسبی زیرمعیار | وزن نهایی زیرمعیار | رتبه نهایی |
|---|---|---|---|---|---|
| | | میزان پوشش دادن پسماند | ۰.۱۶۱ | ۰.۰۶۹۵ | ۵ |
| | | نوع انرژی تولیدی | ۰.۱۹۱ | ۰.۰۸۲۴ | ۳ |
| محیط زیست (C3) | ۰.۳۳۱ | تاثیر بر چشم اندازهای طبیعی ومناظر | ۰.۱۰۹ | ۰.۰۳۵۹ | ۱۲ |
| | | ایجاد بو | ۰.۱۳۳ | ۰.۰۴۴۰ | ۹ |
| | | انتشار گازهای آلاینده | ۰.۲۱۸ | ۰.۰۷۲۰ | ۴ |
| | | انتشار تولید پساب آلاینده صنعتی | ۰.۳۴۳ | ۰.۱۱۳۵ | ۲ |
| | | دفع پسماندهای صنعتی و ویژه | ۰.۱۹۸ | ۰.۰۶۵۵ | ۶ |
| اجتماعی و فرهنگی (C4) | ۰.۰۸۲ | تاثیرات فرهنگی آیتم بر جامعه شهری | ۰.۱۱۷ | ۰.۰۰۹۶ | ۲۰ |
| | | فرصت های شغلی مستقیم | ۰.۲۵۷ | ۰.۰۲۱۰ | ۱۷ |
| | | فرصت های شغلی غیر مستقیم | ۰.۲۹۵ | ۰.۰۲۴۱ | ۱۶ |
| | | میزان سازگاری با مشارکت شهروندان | ۰.۳۳۱ | ۰.۰۲۷۰ | ۱۴ |

در این بخش با استفاده از روش ویکور فازی برای رتبه‌بندی ۴ روش تبدیل پسماند به انرژی، استفاده می‌گردد که این ۴ روش در زیر معرفی‌شده‌اند:

۱. پیرولیز ($A_1$)
۲. هضم بی‌هوازی ($A_2$)
۳. زباله سوزها ($A_3$)
٤. تولید سوخت‌های SRF و استفاده در کوره کارخانه سیمان ($A_4$)

*گام ۱- تشکیل ماتریس تصمیم*

در این گام ماتریس تصمیم نظرات تشکیل داده شده است. ماتریس تصمیم روش ویکور ماتریسی متشکل معیارها (زیرمعیارها) و گزینه‌های پژوهش است که هر گزینه نسبت به هر معیار بر اساس طیف ۱ تا ۵ فازی ارزیابی می‌شود. این ماتریس تصمیم توسط ۱۰ خبره تکمیل‌شده و سپس توسط روش میانگین حسابی ادغام می‌شود. ماتریس تصمیم ویکور فازی در جدول (۱۱) آورده شده است. در این ماتریس تعداد ۲۰ زیرمعیار در ستون و ۴ گزینه در سطر قرار دارند.

جدول ۱۱- ماتریس تصمیم ویکور فازی

| | $C_{11}$ | $C_{12}$ | $C_{13}$ | … | $C_{42}$ | $C_{43}$ | $C_{44}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $A_1$ | (۱.۲،۳.۲،۵.۲) | (۲.۶،۴.۶،۶.۶) | (۷،۹،۱۱) | … | (۵،۷،۹) | (۷،۹،۱۱) | (۱.۴،۳.۲،۵.۲) |
| $A_2$ | (۳،۵،۷) | (۱.۲،۳،۵) | (۱،۱،۳) | … | (۴.۸،۶.۸،۸.۸) | (۵،۷،۹) | (۱،۳،۵) |
| $A_3$ | (۱،۱.۲،۳.۲) | (۱،۱،۳) | (۳،۵،۷) | … | (۵،۷،۹) | (۵،۷،۹) | (۳،۵،۷) |
| $A_4$ | (۷،۹،۱۱) | (۷،۹،۱۱) | (۷،۹،۱۱) | … | (۱،۲.۸،۴.۸) | (۱.۲،۳.۲،۵.۲) | (۵،۷،۹) |

*گام ۲- نرمال سازی ماتریس تصمیم*

جهت نرمال سازی از روابط ۴ و ۶ برای معیارهای مثبت و منفی استفاده می‌شود. نتایج در جدول (۱۲) آورده شده است.

جدول ۱۲- ماتریس تصمیم نرمال ویکور فازی

| | $C_{11}$ | $C_{12}$ | $C_{13}$ | ... | $C_{42}$ | $C_{43}$ | $C_{44}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $A_1$ | (۰.۱۸،۰.۵۸،۰.۹۸) | (۰.۰۴،۰.۴۴،۰.۸۴) | (۰.۴،۰،۰.۴) | ... | (۰.۵،۰،۰.۵) | (۰.۴۰۸،۰،۰.۴۰۸) | (۰.۰۲۵،۰.۴۷۵،۰.۹۵) |
| $A_2$ | (۰،۰.۴،۰.۸) | (۰.۲،۰.۶،۰.۹۸) | (۰.۴،۰.۸،۱) | ... | (۰.۴۷۵،۰.۰۲۵،۰.۵۲۵) | (۰.۲۰۴،۰.۲۰۴،۰.۶۱۲) | (۰،۰.۵،۱) |
| $A_3$ | (۰.۳۸،۰.۷۸،۱) | (۰.۴،۰.۸،۱) | (۰،۰.۴،۰.۸) | ... | (۰.۵،۰،۰.۵) | (۰.۲۰۴،۰.۲۰۴،۰.۶۱۲) | (۰.۲۵،۰.۲۵،۰.۷۵) |
| $A_4$ | (۰.۴،۰،۰.۴) | (۰.۴،۰،۰.۴) | (۰.۴،۰،۰.۴) | ... | (۰.۰۲۵،۰.۵۲۵،۱) | (۰.۱۸۴،۰.۵۹۲،۱) | (۰.۵،۰،۰.۵) |

گام ۳ - محاسبه سودمندی، تاسف و شاخص ویکور گزینه‌ها

با استفاده از روابط ۱۴ و ۱۶ سودمندی و تاسف گزینه‌ها محاسبه می‌شود و سپس توسط رابطه ۱۸ شاخص ویکور بدست می‌آید. نتایج در جدول (۱۳) آورده شده است.

جدول ۱۳- سودمندی، تاسف و شاخص ویکور گزینه‌ها

| **گزینه** | S | R | Q | S(Crisp) | R(Crisp) | Q(Crisp) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $A_1$ | (۰.۲۱۴،۰.۲۳۵،۰.۶۸۳) | (۰.۰۱۲،۰.۰۳۹،۰.۰۷۶) | (۰.۵۳۴،۰.۰۶۱،۰.۶۳۹) | ۰.۲۳۵ | ۰.۰۴۱ | ۰.۰۵۷ |
| $A_2$ | (۰.۰۴۱،۰.۴۹،۰.۸۹۵) | (۰.۰۳۳،۰.۰۹۷،۰.۱۶۲) | (۰.۳۶۲،۰.۳۵۲،۱) | ۰.۴۷۹ | ۰.۰۹۷ | ۰.۳۳۵ |
| $A_3$ | (۰.۰۹۹،۰.۳۵،۰.۷۷۸) | (۰.۰۲۴،۰.۰۴۸،۰.۰۹۷) | (۰.۴۴۸،۰.۱۳۸،۰.۷۴۶) | ۰.۳۴۵ | ۰.۰۵۴ | ۰.۱۴۴ |
| $A_4$ | (۰.۳۱۲،۰.۱۳۷،۰.۵۸۶) | (۰.۰۰۴،۰.۰۳۲،۰.۰۹۷) | (۰.۵۹۹،۰،۰.۶۶۶) | ۰.۱۳۷ | ۰.۰۴۲ | ۰.۰۱۷ |

گام ۴ - رتبه‌بندی گزینه‌ها

رتبه بندی نهایی گزینه‌ها بر اساس مقدار Q خواهد بود که در جدول (۱۴) آورده شده است. هر چه مقدار Q یک گزینه کمتر باشد آن گزینه بهتر است.

جدول ۳۱۴- رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها روش ویکور فازی

| گزینه | کد | مقدار Q | رتبه نهایی |
|---|---|---|---|
| پیرولیز ($A_1$) | $A_1$ | ۰.۰۵۷ | ۲ |
| هضم بیهوازی ($A_2$) | $A_2$ | ۰.۳۳۵ | ۴ |
| زباله سوزها ($A_3$) | $A_3$ | ۰.۱۴۴ | ۳ |
| تولید سوختهای SRF و استفاده در کوره کارخانه سیمان ($A_4$) | $A_4$ | ۰.۰۱۷ | ۱ |

با توجه به نتایج روش ویکور فازی، تولید سوخت‌های SRF و استفاده در کوره کارخانه سیمان ($A_4$) رتبه اول را کسب کرده است. پیرولیز ($A_1$) و زباله سوزها ($A_3$) به ترتیب رتبه‌های دوم و سوم را کسب کرده‌اند.

توسعه سوخت‌های SRF و استفاده آن‌ها در کارخانه سیمان می‌تواند یک راهکار پایدار برای مدیریت پسماندهای شهری باشد. برخی از مزایای آن عبارت است از:

۱. کاهش مصرف سوخت فسیلی: استفاده از سوخت‌های SRF به‌جای سوخت‌های فسیلی مانند مازوت و گاز طبیعی، باعث کاهش مصرف این سوخت‌ها و درنتیجه کاهش آلودگی هوا و گرمایش جهانی می‌شود. صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از این جایگزینی نیز قابل‌توجه است [۱۷].

۲. کاهش مقدار پسماند: استفاده از SRF به‌عنوان سوخت، به کاهش مقدار پسماند دفن شده و درنتیجه کاهش هزینه‌های مرتبط با جمع‌آوری و دفن پسماند منجر می‌شود [۱۸].

۳. افزایش بازدهی انرژی: ترکیب سوخت‌های SRF با سوخت‌های فسیلی دارای بازدهی بالاتری نسبت به استفاده سوخت‌های فسیلی به‌تنهایی است، بنابراین استفاده از آن‌ها در تولید برق و حرارت، باعث افزایش بازدهی انرژی و کاهش هزینه‌های مربوط به تولید انرژی می‌شود [۱۹].
٤. کاهش آلودگی هوا: سوخت‌های SRF دارای میزان آلودگی کمتری نسبت به سوخت‌های فسیلی هستند، بنابراین استفاده از آن‌ها در تولید انرژی و حرارت، باعث کاهش آلودگی هوا و بهبود کیفیت هوای منطقه می‌شود [۱۷].
٥. استفاده از پسماندهای صنعتی: غیر از پسماندهای شهری پسماندهای صنعتی متنوعی نیز می‌توانند در تهیه سوخت‌های SRF استفاده شوند که باعث بهبود و افزایش کارآمدی سیستم مدیریت پسماند محلی می‌شود [۱۷].

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه از مدل تصمیم‌گیری MCDM و از تکنیک تحلیل سلسله مراتبی AHP جهت انتخاب بهترین سیستم استحصال انرژی از پسماند بر اساس چهار معیار اقتصادی، فنی و تکنیکال، محیط‌زیست و اجتماعی و فرهنگی جهت به‌کارگیری آن در شرایط شهر کرمان باهدف استراتژی «بدون پسماند» مطرح‌شده است. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده آن است که در بین سیستم‌های مورد ارزیابی، سیستم سوخت‌های SRF با مقدار Q برابر با ۰.۰۱۷ بهترین گزینه جهت تبدیل پسماند به انرژی در شهر کرمان با توجه به نظر خبرگان و شرایط محلی و زیرساخت‌های موجود بوده است. طبق نتایج، به ترتیب سیستم‌های پیرولیز، گازی کردن و هضم بی‌هوازی در اولویت بعدی قرار می‌گیرند. قابل‌ذکر است، نتایج این مطالعه برای شهرهایی که در مجاورت آن‌ها کارخانه سیمان است قابل‌تأمل است. شرایط آب و هوایی و میزان نرخ تولید روزانه پسماند نیز در توجیه اقتصادی توسعه سوخت‌های SRF نقش مهمی دارد. همچنین بایستی اشاره داشت، استفاده از سوخت‌های SRF مشتق شده از پسماند شهری جهت استفاده در کارخانه سیمان تاکنون در ایران انجام‌نشده و چالش‌های فنی و اجرایی فراوانی در توسعه اولین واحد وجود خواهد داشت، لذا انتخاب این گزینه به‌منظور تکمیل چرخه مدیریت پسماند شهری بایستی با دقت زیاد و حساسیت بر روند برنامه‌ریزی اجرایی آن انجام شود.

## ۵- منابع و مراجع


1. Afrane, S., et al., Integrated AHP-TOPSIS under a fuzzy environment for the selection of waste-to-energy technologies in Ghana: a performance analysis and socio-enviro-economic feasibility study. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022. 19(14): p. 8428. https://doi.org/10.3390/ijerph19148428
2. Scott, J.A., W. Ho, and P.K. Dey, A review of multi-criteria decision-making methods for bioenergy systems. Energy, 2012. 42(1): p. 146-156. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.074
3. Cabrerizo, F.J., et al., Fuzzy decision making and consensus: challenges .Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2015. 29(3): p. 1109-1118. DOI: 10.3233/IFS-151719
4. Opricovic, S. and G.-H. Tzeng, Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. European journal of operational research, 2004. 156(2): p. 445-455. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1

5. Abu-Taha, R., Multi-criteria applications in renewable energy analysis: A literature review. 2011 Proceedings of PICMET'11: Technology Management in the Energy Smart World (PICMET), 2011: p. 1-8.
6. Mousavi-Nasab, S.H. and A. Sotoudeh-Anvari, A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems. Materials & Design, 2017. 121: p. 237-253. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.041
7. Madhavi, S., et al., Pythagorean Fuzzy Sets-based VIKOR and TOPSIS-based multi-criteria decision-making model for mitigating resource deletion attacks in WSNs. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2023(Preprint): p. 1-19. DOI: 10.3233/JIFS-224141
8. Rahman, S.S., A. Azeem, and F. Ahammed, Selection of an appropriate waste-to-energy conversion technology for Dhaka City, Bangladesh. International Journal of Sustainable Engineering, 2017. 10(2): p. 99-104. https://doi.org/10.1080/19397038.2016.1270368
9. Shakorfow, A.M., Gasification of a solid dry waste (biomass). International Journal of Engineering Research, 2016. 5(8): p. 704-708. DOI: 10.17950/ijer/v5s8/813
10. Zaini, N.S.M., et al., Selecting the best composting technology using analytical hierarchy process (AHP). Jurnal Teknologi, 2015. 77(1).
11. Taylan, O., et al., Assessment of energy systems using extended fuzzy AHP, fuzzy VIKOR, and TOPSIS approaches to manage non-cooperative opinions. Sustainability, 2020. 12(7): p. 2745. https://doi.org/10.3390/su12072745
12. Sadhya, H., M. Mansoor Ahammed, and I.N. Shaikh, Use of multi-criteria decision-making techniques for selecting waste-to-energy technologies, in Advances in Chemical, Bio and Environmental Engineering. 2022, Springer. p .505-527. DOI: 10.1007/978-3-030-96554-9_34
13. Hsieh, T.-Y., S.-T. Lu, and G.-H. Tzeng, Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings. International journal of project management, 2004. 22(7): p. 573-584. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.01.002
14. Opricovic, S., Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. Expert Systems with Applications, 2011. 38(10): p. 12983-12990. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.097
15. Patil, S.K. and R. Kant, A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of Knowledge Management adoption in Supply Chain to overcome its barriers. Expert systems with applications, 2014. 41(2): p. 679-693. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.093
16. Parchami, A., Calculator for fuzzy numbers. Complex & Intelligent Systems, 2019. 5: p. 331-342. https://doi.org/10.1007/s40747-019-0093-4
17. Vahidi, H., N. Moradi, and H. Abbaslou, Developing of Alternative SRFs in Kerman's Cement Industry by Energy Optimization and Economical Feasibility Approaches. Environmental Energy and Economic Research, 2017. 1(3): p. 259-268. DOI: 10.22097/EEER.2017.86463.1000

18. Parlikar, U., et al. Evaluation of Use of SRF as AFR in Cement Kiln. in Waste Management and Resource Efficiency: Proceedings of 6th IconSWM 2016. 2019. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7290-1_61
19. Żygadło, M. and P. Purgał, The benefits of partial substitution of fossil fuel by alternative fuel in cement plants. Case study. Environment Protection Engineering, 2020. 46(1). DOI: 10.37190/epe200101