پژوهش و فناوری محیط زیست، ۱۳۹۹ ۵(۷)، ۶۷-۷۶

پژوهش و فناوری محیط زیست

وبگاه نشریه: www.journal.eri.acecr.ir

پژوهشکده محیط زیست

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۳۰۶۰

اولویت‌بندی فناوری‌های بازیابی انرژی از زباله جامد شهری (مطالعه موردی شهر مشهد)

آرمان شاهنظری [*1]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیزاسیون – بازیافت و مدیریت پسماند، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

چکیده

فناوری‌های بازیابی انرژی حرارتی که به منظور سوزاندن پسماند جامد شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد، یکی از روش‌های نسبتاً جدید و مناسب در مدیریت پسماند محسوب می‌شود. در اثر سوختن پسماند، حرارت و گازهایی بوجود می‌آید که این گازها را می‌توان برای تولید انرژی استفاده نمود. در این تحقیق مدل تصمیم‌گیری مبتنی بر روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) جهت انتخاب بهترین سیستم ترموشیمیایی بر اساس سه معیار فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی ارائه شده است. در این مطالعه سیستم‌های زباله‌سوز (توده‌سوز)، گازی‌سازی، پیرولیز و پلاسما مورد ارزیابی قرار گرفتند. جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز از طریق بررسی منابع معتبر و تهیه و تکمیل پرسشنامه به‌دست آمد. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، شهر مشهد می‌باشد. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که در بین سیستم‌های مورد بررسی، سیستم (فناوری) پلاسما بهترین گزینه جهت بازیابی انرژی از پسماندهای جامد شهر مشهد بوده و پس از آن نیز به ترتیب سیستم‌های زباله‌سوز، گازی‌سازی و پیرولیز در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند.

کلید واژه‌ها: فناوری بازیابی انرژی، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، مدیریت پسماند

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Ashahnazari992@gmail.com

Journal of Environmental Research and Technology, 5(7)2020. 67-76

Journal of Environmental Research and Technology

journal homepage: www.journal.eri.acecr.ir

Environmental Research institute

Online ISSN: 3060-2676

Prioritization of energy recovery technologies from municipal solid waste (Case study of Mashhad)

Arman shahnazari[*1]

1- MSc Graduate in mechanization- wsaste recycling and management, Faculty of agriculture, University of Ferdowsi, Mashhad

Abstract

Thermal energy recovery technologies which used to burn solid urban waste are one of the relatively new and appropriate methods in waste management. Heat and gases are generated by burning waste that can be used to generate energy. In this research, a decision model based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) method is Provided to select the best thermochemical system based on three technical, economic and environmental criteria. In this study, waste incineration, gasification, pyrolysis and plasma systems were evaluated. Collection of required information was obtained by reviewing reliable sources and preparing and completing questionnaires. The study area in this study is Mashhad city. The results of this study indicate that among the studied systems, plasma system (technology) is the best option for energy recovery from solid wastes in Mashhad, after that, waste incineration, gasification and pyrolysis systems are in the next categories, respectively.

Keywords: Energy recovery technology, Analytical Hierarchy Process, waste management

* Corresponding author E-mail address: Ashahnazari992@gmail.com

مقدمه

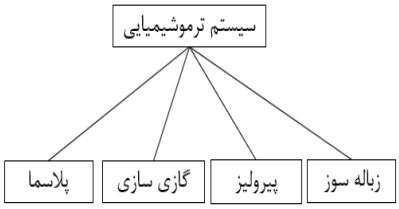
امروزه یکی از معضلات اساسی در زندگی شهری مدرن تولید پسماندهای متنوع و در حجم زیاد و نحوه دفع و پردازش این پسماندها است. از طرفی مهمترین منبع برای تهیه و تامین انرژی مورد نیاز در دنیا، منابع سوخت‌های فسیلی بوده و پس از آن نیز زغال‌سنگ و گاز طبیعی به ترتیب گزینه‌های بعدی هستند. استفاده از این منابع نفتی علاوه‌بر محدود بودن، دارای مشکلات متعدد و آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز می‌باشند. بنابراین توجه کشورهای مختلف دنیا به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و پایدار معطوف شده است (نائیجی و همکاران، ۱۳۹۷).

هرچند در بحث مدیریت پسماند کاهش تولید زباله و بازیافت بهترین گزینه می‌باشد، اما این روش‌ها با توجه به افزایش جمعیت و تغییر سبک زندگی که منجر به تولید پسماندهای متنوع می‌شود، به تنهایی قادر به حل مسأله نمی‌باشند.

از آنجایی بخش قابل توجهی از پسماندهای تولید شده در شهرها از نوع پسماند خشک می‌باشند بنابراین تبدیل پسماند شهری به مواد با ارزش‌تر و همچنین انرژی می‌تواند به عنوان یک گزینه مطلوب برای حفظ محیط‌زیست تلقی گردد. سیستم‌هایی که به منظور تبدیل پسماند به مواد با ارزش مورد استفاده قرار می‌گیرند به شکل فرآیندهای بیوشیمیایی و ترموشیمیایی می‌باشند (شارما و همکاران، ۲۰۱۵).

فرآیندهای بیوشیمیایی شامل کمپوست، بیوگاز و هضم بی‌هوازی و دفن پسماند بوده و فرآیندهای ترموشیمیایی عبارتند از احتراق مستقیم (زباله‌سوز)، پیرولیز، گازیفیکاسیون و پلاسما می‌باشد (عبدالله‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹).

سیستم‌های بازیابی انرژی به سیستم‌هایی گفته می‌شود که در آن به کمک گرما و حرارت پیوندهای شیمیایی درون مواد شکسته شده و ماهیت شیمیایی مواد دگرگون گردد (عبدلی و پازکی، ۱۳۹۲). سیستم‌های متداولی که در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در شکل زیر نشان داده شده است.



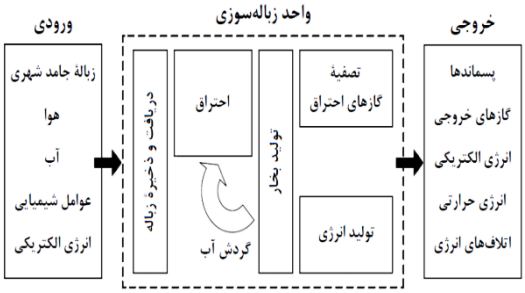
شکل ۱- سیستم‌های ترموشیمیایی مورد مطالعه

سیستم زباله‌سوزی که به آن روش احتراق مستقیم[1] نیز گفته می‌شود، فرایندی خاص است که برای سوزاندن پسماندهای جامد شهری و تبدیل آنها به خاکستر و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این گازهای تولید شده که بیشترین مقدار آن گاز متان بوده، می‌توان هم به شکل مستقیم استفاده کرد و هم برای تولید برق از آن بهره برد (شاهنظری، ۱۳۹۹).

سیستم پیرولیز[2] در واقع تجزیه مواد آلی بر اثر گرما بدون حضور هوا می‌باشد. اساس این روش از طریق فرآیند کراکینگ حرارتی[3] است (عبدلی و پازکی، ۱۳۹۲). درجه حرارت در این روش بین ۸۵۰-۳۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. محصولات تولید شده در این روش به شکل جامد (زغال)، مایع (نفت زیستی) و گاز مصنوعی که عمدتاً شامل گاز اکسیژن، کربن منواکسید، کربن دی اکسید، متان و هیدروکربن‌های پیچیده می‌باشد. گاز مصنوعی را می‌توان برای تولید انرژی استفاده کرد (Rahman et al., 2017).

فرآیند گازیفیکاسیون[4] بسیار شبیه به فرآیند پیرولیز است با این تفاوت که در روش گازی‌سازی در دماهای بالاتر از پیرولیز و در حضور مقداری اکسیژن انجام می‌شود و به همین علت بیشتر مواد جامد را به گاز تبدیل می‌کند (شفیعی ده‌آبادی، ۱۳۹۴). پلاسما[5] حالتی است که در آن گاز به کمک قوس الکتریکی یونیزه شده که در نتیجه این عمل دمای زیادی تولید می‌شود. دما در این فرآیند به ۱۰۰۰۰-۵۰۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد (عبدلی و پازکی، ۱۳۹۲). مهمترین جز پلاسما، گازساز آن است که می‌تواند یک یا چند مشعل قوسی پلاسما را در خود جای دهد. گازساز پلاسما محیطی با اکسیژن کم می‌باشد بنابراین هیچ احتراقی صورت نمی‌گیرد و از این‌رو گازساز پلاسما یک سیستم احتراقی نیست (عبدلله‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹). در شکل ۲ شماتیک کلی سیستم‌های زباله‌سوزی نشان داده شده است.

1-Direct combustion
2-Pyrolysis
3-Thermal cracking
4-Gasification
5-Plasma



شکل ۲- فرآیندها، ورودی و خروجی برای یک واحد زباله‌سوز (شفیعی، ۱۳۹۴)

- **پیشینه تحقیق**

در دنیا تحقیقات زیادی در خصوص انتخاب سیستم‌های مطلوب در بحث مدیریت پسماند انجام شده که در این بخش به بررسی تعدادی از تحقیقات مشابه پرداخته شده است.

راهمن و همکاران (۲۰۱۷) به انتخاب تکنولوژی مناسب برای تبدیل پسماند به انرژی در شهر داکا پرداختند. از مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای انتخاب مناسب‌ترین روش برای تبدیل پسماند خانگی به انرژی در منطقه اردوگاهی میرپور – داکا استفاده شد. سه گزینه شامل هضم بی‌هوازی، پیرولیز و گازی‌سازی پلاسما (PG[1]) و نه معیار از سه جنبه فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی برای مقایسه انتخاب شدند. نتایج نشان داد که تکنولوژی گازی‌سازی پلاسما (PG) مناسب‌ترین تکنولوژی تبدیل زباله به انرژی در منطقه مورد مطالعه است (Rahman et al., 2017).

عبدالمالک (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای به روش‌های زباله‌سوزی، احتراق، پیرولیز و گازیفیکاسیون از بیومس پرداخت. برای تولید انرژی با حفظ محیط‌زیست، به طور کلی کلیه روش‌های زباله‌سوزی، پیرولیز، احتراق و گازیفیکاسیون از بیومس مورد بررسی قرار گرفتند. هدف این مطالعه، بحث در باره این فرایندها با تأکید بر روی گازیفیکاسیون که فرایندی موثر و اقتصادی برای تولید هیدروژن است، می‌باشد. مشخص شد که بیومس گزینه مناسبی برای فرایند گازی‌سازی است هرچند که به اندازه کافی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. فرایند گازیفیکاسیون در مقایسه با فرایندهای زباله‌سوزی، پیرولیز و احتراق عملی‌تر و اقتصادی‌تر برای تولید هیدروژن و حفاظت از محیط زیست از اهداف اصلی آن است (Abdelmalik, 2015).

خدابخشی و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی تولید بیوگاز از کلش برنج در استان گیلان پرداختند. آنها در این تحقیق از ترکیب کلش برنج و فضولات دامی با چهار نسبت مختلف استفاده کردند. این آزمایش با سه تکرار و در دمای مزوفیلیک انجام گردید. نتایج این آزمایش حاکی از آن است که نسبت ۱۰٪ کلش بیشترین راندمان تولید بیوگاز را دارا بوده و از منشر شدن ۳۲۸/۱۴ کیلوگرم گاز کربن دی‌اکسید به جو جلوگیری خواهد کرد (خدابخشی‌پور و همکاران، ۱۳۹۸).

فلاح‌زاده (۱۳۹۴) روش‌های نوین ترموشیمیایی برای تولید انرژی از پسماند را مورد بررسی قرار داد. امروزه فرایند تولید انرژی از پسماند مورد توجه بسیار قرار گرفته است. مهمترین روش‌های حرارتی عبارتند از گازیفیکاسیون، پیرولیز، قوس پلاسما، تولید سوخت از زباله و زباله‌سوز می‌باشند. در این بین فرایند قوس پلاسما به‌عنوان جدیدترین و پاک‌ترین فناوری در تولید انرژی از پسماند مشخص شد (فلاح‌زاده، ۱۳۹۴)

داوودی نژاد و همکاران (۱۳۹۴) برای فناوری‌های تولید انرژی از فرایند تصفیه فاضلاب به روش تحلیل سلسله مراتبی یک اولویت‌بندی را انجام دادند. در این پژوهش، اولویت‌بندی و انتخاب بهترین گزینه برای تولید انرژی از فرایندهای تصفیه فاضلاب بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی، مدیریتی و زیست‌محیطی به روش تحلیل سلسله مراتبی انجام شد. در نهایت، روش تصفیه بی‌هوازی با وزن ۰/۵۴۰ به عنوان گزینه مناسب مشخص شد و روش تصفیه ریز جلبکی با وزن ۰/۳۳۰ و پیل سوخت میکروبی با وزن ۰/۱۳۰ در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند (داوودی‌نژاد و بی‌پروا، ۱۳۹۴).

نائیجی و همکاران (۱۳۹۷) به پتانسیل‌سنجی مقدار انرژی تولید شده در سیستم‌های مختلف مدیریت پسماند در شهر آمل پرداختند. در این مطالعه پس از آنالیز زباله‌های شهر آمل، به بررسی تولید بیوگاز از بخش آلی زباله‌های شهر آمل پرداخته شد. نتایج آنها نشان می‌دهد که می‌توان پتانسیل تولید بیوگاز و یک نیروگاه ۱۳/۵ مگاواتی بیوگازسوز در محل دفن بیوراکتوری را انتظار داشت (نائیجی و همکاران، ۱۳۹۷).

1-Plasma Gasification

فرج‌پور و همکاران (۱۳۹۸) در یک بررسی کلی به امکان‌سنجی تولید انرژی از زباله‌های خانگی شهر تهران پرداختند. بر اساس آمار کسب شده روزانه حدود ۳۰۰ تن از مخلوط زباله‌های تهران پردازش می‌گردد و بیوگاز تولید شده پس از خالص‌سازی سوزانده می‌شود که توانایی تولید ۲ مگاوات ساعت برق را دارد (فرج‌پور و همکاران، ۱۳۹۸).

بر اساس مطالعات انجام شده مشخص گردید که برای شهر مشهد با توجه به جمعیت و موقعیت جغرافیایی و همچنین کمیت و کیفیت پسماندهای تولیدی در این شهر، برای انتخاب یک فناوری حرارتی به منظور سوزاندن پسماندهای این شهر هیچ رابطه و مدلی منطقی وجود ندارد. بنابراین وجود یک روش مدل‌سازی می‌تواند در تصمیم‌گیری بهتر با در نظر گرفتن ابعاد گوناگون در این مورد، موثر باشد.

به طور کلی هدف از انجام این تحقیق تعیین شاخص‌های مؤثر در انتخاب مناسب‌ترین فناوری ترموشیمیایی در مدیریت پسماند شهری مشهد بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشد؛ زیرا طبق بررسی‌های صورت گرفته این معیارها از مهمترین معیارها برای انتخاب فناوری‌های مناسب می‌باشد. هدف اساسی و اصلی این مطالعه بررسی این نیروگاه‌ها از تمام جوانب با رعایت حفظ فاکتورهای اصلی و مهم در انتخاب و به منظور کمک هرچه بیشتر به مدیران اجرایی در تصمیم‌گیری بهتر، قبل از بهره‌برداری می‌باشد.

برای انجام این کار شاخص‌های مهم در انتخاب بهترین فناوری را بعد از بررسی منابع مشخص نمودیم. پس از آن پرسشنامه مخصوص فرآیند تحلیل سلسله مراتبی تهیه و توسط ۷ نفر از کارشناسان موجود در شهر مشهد که از متخصصان حوزه مدیریت پسماند شهری هستند تکمیل گردید. در این تحقیق از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، برای ارزیابی شاخص‌ها استفاده شد. فناوری‌های ترموشیمیایی مد نظر در این تحقیق عبارتند از: فناوری‌های زباله‌سوز (توده‌سوز[1])، پیرولیز، گازی‌سازی (گازیفیکاسیون) و پلاسما.

مواد و روش‌ها

به طور کلی تصمیم‌گیری به دو روش «آزمون و خطا» و «مدل‌سازی» انجام می‌شود. در شکل آزمون و خطا فرد تصمیم‌گیرنده با واقعیت برخورد مستقیم خواهد داشت. به این شکل که گزینه‌ای را از بین سایر گزینه‌ها انتخاب نموده و نتیجه این انتخاب خود را خواهد دید. در صورتی که در روش مدل‌سازی مدیر ابتدا مسئله موردنظر را مدل‌سازی کرده عوامل مؤثر بر آن‌ها را بررسی نموده و به تجزیه و تحلیل مدل می‌پردازد. اگر پارامترهای مؤثر در تصمیم‌گیری زیاد باشد، در این صورت روش آزمون و خطا روش مطمئن و مناسبی نخواهد بود. (قدسی‌پور، ۱۳۸۷؛ مددی قله‌زو، ۱۳۹۳). در این تحقیق به منظور انتخاب گزینه مناسب برای تولید انرژی از پسماند شهر مشهد شاخص‌های مختلفی را مدنظر قرار داده و پس از آن برای مدل‌سازی از یکی از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM[2])؛ یعنی روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP[3]) استفاده گردیده است.

- **منطقه مورد مطالعه**

مشهد مهمترین شهر زیارتی و دومین شهر بزرگ در ایران می‌باشد. جمعیت این شهر حدود دو میلیون و هفتصد هزار نفر بوده و دارای ۱۳ منطقه و ۴۳ ناحیه است. آنالیز کمی و کیفی پسماندها در طی یک سال در مشهد به تفکیک هرفصل نشان می‌دهد که در فصل تابستان ۲۱۹۰ تن در روز، در فصل ۲۰۶۱ تن در روز، پاییز ۲۰۱۷ تن در روز و زمستان ۱۸۹۰ تن در روز و در مجموع ۸۱۵۸ تن در روز می‌باشد (رضایی و همکاران، ۱۳۹۸).

- **شاخص‌های انتخاب گزینه**

در این مطالعه جهت انتخاب گزینه ایده‌آل فناوری ترموشیمیایی با توجه به بررسی منابع صورت گرفته، سه معیار اصلی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است. اما به علت گسترده بودن ابعاد هر کدام از معیارهای انتخاب شده، برای هر یک از این معیارها جهت دستیابی به نتایج بهتر و دقیق‌تر، زیرمعیارهایی نیز در نظر گرفته شد که عبارتند از:

۱. فنی
   - ✓ سطح تکنولوژی
   - ✓ سهولت استفاده از فناوری
   - ✓ سهولت دسترسی به تجهیزات
   - ✓ ایمنی در محیط کار

1-Mass burn
2-Muti criteria decision making
3-Analytial hierarchy process

۲. اقتصادی
   - هزینه عملیاتی
   - سرریز دانشی
   - اشتغال‌زایی

۳. زیست‌محیطی
   - انتشار گاز آلاینده
   - خاکستر
   - وسعت زمین

در این تحقیق منظور از سرریز دانشی[1] تأثیر استفاده از نیروگاه بر رشد صنایع جانبی است، میزان اشتغال‌زایی مجموع تعداد نیروی متخصص و کارگر مورد استفاده در نظر گرفته شد. هزینه عملیاتی در تحقیق حاضر شامل هزینه نیروی انسانی (حقوق، بیمه و ....)، آموزش پرسنل، هزینه حمل و نقل، انرژی (آب، برق، سوخت مورد نیاز)، هزینه استهلاک و هزینه نگهداری و تعمیرات می‌باشد. وسعت زمین مقدار زمینی است که برای احداث نیروگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. خاکستر موادی است که پس از سوزانده شدن زباله بر جای می‌ماند و از کوره خارج می‌شوند.

- **فرآیند تحلیل سلسله مراتبی**

روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی توسط ساعتی، در دهه ۷۰ میلادی پیشنهاد شد. این روش یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چند گانه می‌باشد؛ زیرا این تکنیک امکان فرموله کردن مسأله را به صورت سلسله مراتبی فراهم می‌کند و همچنین امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی را در مسأله دارد (داوودی‌نژاد و بی‌پروا، ۱۳۹۴). این فرآیند گزینه‌های مختلف را در تصمیم‌گیری دخالت داده و امکان تحلیل حساسیت روی معیارها و زیرمعیارها را دارد. علاوه‌بر این، برمبنای مقایسه زوجی بنا نهاده شده که قضاوت و محاسبات را تسهیل نموده و میزان سازگاری و ناسازگاری تصمیم را نشان می‌دهد که از مزایای ممتاز این تکنیک در تصمیم‌گیری چند معیاره است (Bamdad et al., 2007). این روش می‌تواند دوکار را انجام دهد: ۱- پیدا کردن وزن شاخص‌ها ۲- رتبه‌بندی گزینه‌ها. این روش، مانند آنچه در مغز انسان انجام می‌شود به تحلیل مسائل می‌پردازد (مومنی و شریفی سلیم، ۱۳۹۱).
به طور کلی، فرآیند تصمیم‌گیری از لحاظ فضای تصمیم به دو دسته پیوسته و گسسته تقسیم می‌شود و تصمیم‌گیری در فضای گسسته به دو دسته تک معیاره و چند معیاره تقسیم می‌شود. همچنین خود معیارها به سه دسته معیارهای کیفی، کمی و ترکیبی (کیفی و کمی) تقسیم می‌شوند (داوودی‌نژاد و بی‌پروا، ۱۳۹۴).

جدول ۱: ماتریس تصمیم‌گیری تحقیق حاضر

	معیارها		
گزینه ها	فنی	اقتصادی	زیست‌محیطی
زباله‌سوز	r_{11}	r_{12}	r_{13}
پیرولیز	r_{21}	r_{22}	r_{23}
گازی‌سازی	r_{31}	r_{32}	r_{33}
پلاسما	r_{41}	r_{42}	r_{43}

مقایسات بین گزینه‌های مختلف تصمیم، بر اساس هر معیار و قضاوت در مورد اهمیت معیارها با انجام مقایسات زوجی، به صورت عددی انجام می‌پذیرد. این کار با انجام مقایسات دو به دو بین عناصر تصمیم و ازطریق تخصیص امتیازات عددی که نشان دهنده میزان ارجحیت بین دو عنصر تصمیم است، صورت می‌گیرد. در نتیجه اعداد بدست آمده از مقایسات زوجی تفاوت‌های بین هر معیار را نشان داده و مشکل عدم توانایی مقایسه معیارهای کمی و کیفی را حل می‌کند. مقایسه زوجی با استفاده از مقیاسی که از ارجحیت یکسان تا ارجحیت یکی از گزینه‌ها بر دیگری در حداکثر مقدار ممکن طراحی شده است انجام می‌گیرد.
نحوه جمع‌آوری داده‌ها از طریق بررسی منابع معتبر و همچنین روش پرسشنامه‌ای و پرسش از ۷ نفر از کارشناسان موجود در این حوزه در

1-Accessories industry growth

شهر مشهد صورت پذیرفت. مرحله بعد انجام محاسبات لازم برای تعیین اولویت هر یک از عناصر تصمیم با استفاده از اطلاعات ماتریس‌های مقایسات زوجی خواهد بود. هر پرسشنامه یک ماتریس مقایسات زوجی است که با توجه به نظرات متفاوت برای هر یک از گزینه‌ها نیاز به میانگین‌گیری از تمام پرسشنامه‌ها و تبدیل آنها به یک ماتریس مقایسات زوجی واحد، جهت انجام محاسبات وزنی است. به منظور انجام محاسبات از نرم‌افزار Expert Choice استفاده گردید. در روش AHP چون داده‌ها یک سری اعداد نسبی هستند از میانگین‌گیری هندسی استفاده می‌شود (Saaty., 1980). جهت محاسبه وزن‌های نسبی از روش آنتروپی استفاده شد. آنتروپی در تئوری اطلاعات معیاری است برای مقدار عدم اطمینان بیان شده توسط یک توزیع احتمال گسسته (P_i). یک ماتریس تصمیم گیری در مدل AHP حاوی اطلاعاتی است که آنتروپی می‌تواند به عنوان معیاری برای ارزیابی آن به کار رود(Shahnazari et al., 2020). اطلاعات یک ماتریس تصمیم گیری تحقیق حاضر در جدول ۱ نمایش داده می‌شود.

برای به‌دست آوردن وزن هر شاخص ابتدا باید کلیه عناصر ماتریس تصمیم‌گیری بی‌مقیاس (نرمال) شوند. برای بی‌مقیاس‌سازی از رابطه (۱) استفاده می‌شود (میرغفور و همکاران، ۱۳۹۳):

$$P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} r_{ij}} \quad \forall j \qquad (۱)$$

سپس جهت محاسبه آنتروپی E_j از مجموعه P_{ij}ها به ازای هر مشخصه به صورت زیر محاسبه می‌شود. به گونه‌ای که $k = \frac{1}{L\,nm}$ است.

$$E_j = -K \sum_{i=1}^{n} [P_{ij} . \mathrm{Ln} P_{ij}] \quad \forall j \qquad (۲)$$

بعد از Ej نیاز به محاسبه عدم اطمینان یا درجه انحراف است، درجه انحراف هر یک از شاخص‌ها از فرمول زیر محاسبه می‌گردد.

$$d_j = 1 - E_j \quad \forall j \qquad (۳)$$

سرانجام وزن هر یک از شاخص‌ها W_j از فرمول زیر استفاده می‌کنیم.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j} \forall \mathrm{j} \qquad (۴)$$

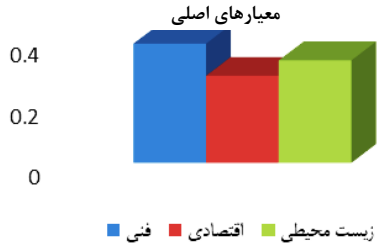
پس از به‌دست آمدن وزن‌های نسبی هر یک از شاخصه‌ها نیاز به ادغام وزن‌های نسبی و به‌دست آوردن وزن نهایی گزینه‌ها می‌باشد، رتبه‌بندی هریک از گزینه‌ها از تلفیق رتبه‌های آن‌ها نسبت به معیارها بدست می‌آید. بدین صورت که با ضرب وزن نسبی گزینه‌ها نسبت به هریک از معیارها در وزن نهایی معیار و جمع بستن بر روی تمامی معیارها، وزن نهایی گزینه‌ها بدست می‌آید.

$$R_k = \sum w_i \times r_{ik} \qquad (۵)$$

که در این فرمول R_k وزن نهایی گزینه k ام، W_i وزن نهایی معیار i ام، r_{ik} وزن نسبی گزینه k ام نسبت به معیار i ام می‌باشند.

یافته های پژوهش

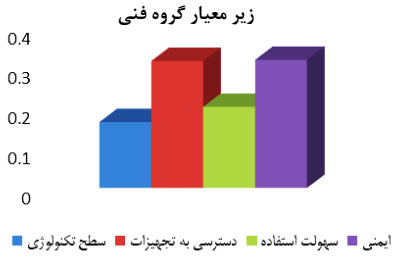
نتایج محاسبات نشان داد که در بین معیارهای اصلی، به ترتیب معیارهای فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی جهت انتخاب بهترین روش حرارتی دارای بیشترین امتیاز بوده و به این معنا می‌باشد که در انتخاب این روش‌ها معیار فنی از ارجحیت بیشتری نسبت به دو معیار زیست‌محیطی و اقتصادی دارد. نتیجه محاسبه زوجی معیارهای اصلی تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است.



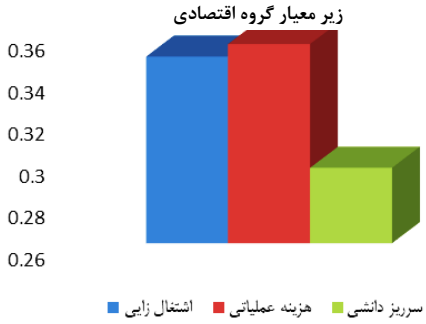
شکل ۳- رتبه‌بندی معیارهای اصلی تحقیق

در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ به ترتیب نشان‌دهنده زیر معیارهای هر کدام از معیارها (گروه‌های اصلی) فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشند. همان‌گونه که در شکل ۴ مشخص است در بین زیر معیارهای گروه فنی ایمنی در محیط کار بیشترین امتیاز را به‌دست آورده است. در

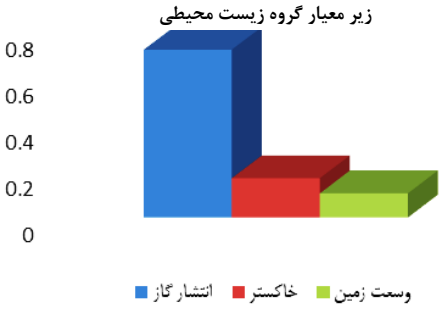
شکل ۵، مهم‌ترین فاکتور اقتصادی که در انتخاب گزینه مناسب اهمیت بیشتری دارد، گزینه هزینه عملیاتی می‌باشد. در بین فاکتورهای زیست‌محیطی هم انتشار گاز آلاینده رتبه نخست را در بین سایر فاکتورها به‌دست آورده است (شکل ۶).



شکل ۴- رتبه‌بندی زیرمعیارهای گروه فنی

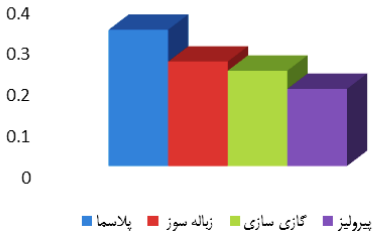


شکل ۵- رتبه‌بندی زیر معیارهای گروه اقتصادی



شکل ۶- رتبه‌بندی زیرمعیارهای گروه زیست‌محیطی

شکل ۷ رتبه‌بندی نهایی فناوری‌های حرارتی این تحقیق را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است فناوری پلاسما رتبه اول با امتیاز (۰/۳۳۰) را کسب کرده و به‌عنوان بهترین روش ترموشیمیایی جهت مدیریت و تولید انرژی از پسماند جامد شهر مشهد انتخاب گردید و پس از آن فناوری‌های زباله‌سوز با امتیاز (۰/۲۵۳)، گازیفیکاسیون (۰/۲۳۱) و پیرولیز (۰/۱۸۷) در رده‌های بعدی قرار گرفتند.



شکل ۷- رتبه‌بندی نهایی سیستم‌های ترموشیمیایی

در جدول ۲ امتیاز نهایی هر کدام از معیارها، زیر معیار و گزینه‌های موجود در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. همچنین نرخ ناسازگاری در

این روش ۰/۰۸ شد که بیانگر قابل اعتماد بودن اولویت‌های حاصل از مقایسات است. امتیاز گزینه‌ها در نرم‌افزار Expert Choice محاسبه شده و نشان از برتری معیار زیست‌محیطی در انتخاب فناوری ترموشیمیایی استحصال انرژی از پسماند می‌باشد. به عبارت دیگر نتایج این تحقیق نشان داد که به منظور انتخاب مناسب‌ترین فناوری، معیار زیست‌محیطی بیشترین اهمیت را در بین سایر معیارهای مورد نظر دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

در بین سیستم‌های مدیریت پسماند، روش‌های زباله‌سوزی و بازیابی انرژی یک سیستم بسیار مهم، مطلوب و در عین حال پرهزینه می‌باشد. در دنیا برای سوزاندن پسماند فناوری‌های مختلفی وجود دارد که این فناوری‌ها در ایران تقریباً شناخته شده نیستند. در این تحقیق سعی گردید تا با یک بررسی کامل و جامع و در نظر گرفتن شاخص‌هایی که که قبل از احداث این نوع فناوری‌ها باید مد نظر قرار گیرد، هم به معرفی این قبیل نیروگاه‌ها بپردازد و هم مناسب‌ترین نیروگاه را در بین سایر نیروگاه‌ها انتخاب کند که در نهایت مشخص شد که نیروگاه پلاسما بهترین فناوری استحصال انرژی از پسماندهای جامد شهری مشهد می‌باشد. در انتها بر اساس نتایج و تجربه حاصل از این پژوهش می‌توان پیشنهاد کرد که برای حصول اطمینان بیشتر از سایر روش‌های تصمیم‌گیری مانند برنامه‌های Fazzy, ANP, TOPSIS,.... نیز استفاده گردد. همچنین مقایسه‌ای بین فناوری‌های ترموشیمیایی و بیوشیمیایی استحصال انرژی از پسماند برای شهرهای مختلف نیز مطالعاتی انجام پذیرد.

جدول ۲- امتیاز نهایی معیارها، زیر معیارها و گزینه‌ها

امتیاز نهایی فناوری‌های بازیابی انرژی				امتیازات			
پلاسما	گازیفیکاسیون	پیرولیز	زباله‌سوز	امتیاز زیرمعیار	امتیاز معیار	زیرمعیارها	معیارها
۰/۲۴۵	۰/۲۲۴	۰/۱۹۷	۰/۳۳۴		۰/۳۸۶		فنی
۰/۶۹۹	۰/۱۰۷	۰/۰۹۲	۰/۱۰۲	۰/۱۶۴		سطح‌تکنولوژی	
۰/۰۷۷	۰/۱۹۴	۰/۲۴۲	۰/۴۸۷	۰/۲۰۲		سهولت استفاده	
۰/۰۴۳	۰/۲۱۳	۰/۲۲۵	۰/۵۱۹	۰/۳۱۶		سهولت دسترسی	
۰/۳۳۵	۰/۲۷۳	۰/۱۸۵	۰/۲۰۷	۰/۳۱۹		ایمنی	
۰/۲۹۸	۰/۱۹۹	۰/۲۵۵	۰/۲۷۸		۰/۲۸۲		اقتصادی
۰/۲۰۳	۰/۲۰۳	۰/۱۹۰	۰/۴۰۴	۰/۳۵۵		هزینه عملیاتی	
۰/۵۸۶	۰/۱۲۱	۰/۱۱۵	۰/۱۷۹	۰/۲۹۶		سرریزدانشی	
۰/۲۴۴	۰/۲۳۰	۰/۳۰۱	۰/۲۲۵	۰/۳۴۹		اشتغال زایی	
۰/۴۶۲	۰/۲۷۰	۰/۱۳۷	۰/۱۳۱		۰/۳۳۲		زیست‌محیطی
۰/۴۵۱	۰/۲۹۲	۰/۱۳۴	۰/۱۲۴	۰/۷۲۵		انتشار گاز	
۰/۵۴۹	۰/۱۹۳	۰/۱۳۵	۰/۱۲۳	۰/۱۷۰		خاکستر	
۰/۴۲۶	۰/۲۲۶	۰/۱۶۳	۰/۱۸۶	۰/۱۰۵		وسعت زمین	

منابع

باغوند، ا، زنجانیان، ح، رمضانی، م، اندیک، ب. ۲۰۱۵. بررسی روش‌های مختلف زباله‌سوزی و پارامترهای موثر بر انتخاب آن با رویکرد تولید انرژی. کنفرانس بین المللی علوم، مهندسی و فناوری‌های محیط‌زیست پایدار.

رضوی، س، ح، هاشمی، س، عموزاد مهدیرجی، ح. ۱۳۹۳. تصمیم‌گیری چند شاخصه در شرایط اطمینان و عدم اطمینان. تهران: انتشارات ترمه

شفیعی ده‌آبادی، ع، ۱۳۹۴. زباله‌سوزی و استحصال انرژی از زباله جامد شهری. مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران. گزارش ۳۳۲.

شاهنظری، آ. ۱۳۹۹. ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی نیروگاه‌های حرارتی در مدیریت پسماند. مجله علمی مهندسی مکانیک، سال ۲۹، شماره ۱۳۲، صفحات ۱۳-۹.

عبدالله‌زاده، ر، شاه‌علی، ع، ع، واسعی، س. ۱۳۸۹. " بررسی روش‌های استحصال انرژی از پسماند و شناسایی گزینه مناسب برای ایران". پنجمین همایش ملی مدیریت پسماند.

عبدلی، م، ع. پازکی، م. ۱۳۹۲. جزوه تبدیل پسماند به انرژی. دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران.

فرج‌پور باصر، س. ولی‌نژاد، ز. ۱۳۹۸. پتانسیل‌سنجی امکان تولید انرژی از پسماندهای خانگی (نمونه مطالعاتی شهر تهران). مطالعات علوم محیط زیست، دوره چهارم ، شماره سوم. صص ۱۶۴۴-۱۶۵۲.

فلاح‌زاده، ر، ع، ۱۳۹۴. روش‌های نوین ترموشیمیایی جهت تولید انرژی از پسماند. دومین همایش ملی بهداشت محیط، سلامت و محیط‌زیست پایدار

قدسی پور، س، ح.۱۳۸۷. "فرآیند تحلیل سلسله مراتبی". تهران : انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مددی قله‌زو، ه. ۱۳۹۳. ارزیابی زیست‌محیطی، فنی، اقتصادی و اجرایی دیوارهای ساختمانی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.

میرغفور، س، ح، عزیزی، ف، اسدیان اردکانی، ف. ۱۳۹۳. روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه. سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی. جهاد دانشگاهی یزد.

نائیجی، ا. نورپور، ع. قنواتی، ح. جوادیان، بهزاد. ۱۳۹۷. پتانسیل‌سنجی میزان تولید انرژی از فناوری‌های مختلف دفع پسماند شهرستان آمل. مجله مطالعات علوم محیط زیست، دوره سوم، شماره چهارم صص ۸۰۲-۸۱۱.

رضایی، ا، رهنما برگرد، ز، خرقانی، م، آقالری، ز. ۱۳۹۸. بررسی کمیت و کیفیت پسماندهای شهر مشهد در سال ۱۳۹۵ : یک گزارش کوتاه. مجله دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان. دوره ۱۸. صص ۴۱۴-۴۰۷.

خدابخشی‌پور، م، محمدی گلنگش، م، خدابخشی‌پور، م. ۱۳۹۸. ارزیابی فنی و زیست محیطی تولید بیوگاز از بقایای کشاورزی (کلش برنج). پژوهش و فناوری محیط زیست، دوره چهارم، شماره شش، صفحات ۵-۱۱.

داوودی نژاد، م، بی پروا، پ. ۱۳۹۴. اولویت بندی فناوری های تولید انرژی از فرایندهای تصفیه فاضلاب به روش تحلیل سلسله مراتبی. نشریه انرژی ایران. شماره۳.

Abdelmalik, M, S. 2015. Biomass, incineration, pyrolysis. Combustion and gasification". International Journal of Science and Research (IJSR). ISSN: 2319 – 7064

Bamdad, N., Mohammadzadeh-Basir, H., Narvankuhi, A., Emami, S., Saiedi, A. 2007. Site selection methodology for industries". Rahshah and Associates Engineers: 94:54-5.

Rahman, s., Azeem, S, M., Ahammed, F., 2017. Selection of an appropriate waste to energy conversion technology for Dhaka city, Bangladesh .International journal of sustainable engineering

Saaty, T, L., 1980. The Analytical Hierarchy Process, planning priority Resource Allocation, TWS publication, USA.

Shahnazari, A., Rafiee, M., Rohani, A., Nagar, B, B., Ebrahiminik, M, A., Aghkhani, M, H. 2020. Identification of effective factors to select energy recovery technologies from municipal solid waste using multi-criteria decision making (MCDM): A review of thermochemical technologies. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 40. 100737. https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100737

Sharma, A., Pareek, V., Zhang, D. 2015, Biomass pyrolysis - a review of modeling , process parameters and catalytic studies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 50, pp.1081-1096.