

## ارزیابی فنی و زیست‌محیطی فناوری‌های حرارتی استحصال انرژی از مواد زائد

جامد شهری

آرمان شاهنظری<sup>۱</sup>، عباس روحانی<sup>۲\*</sup>، محمدحسین آق‌خانی<sup>۳</sup>، محمدعلی ابراهیمی‌نیک<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی‌ارشد مکانیزاسیون - بازیافت و مدیریت پسماند، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران (نویسنده مسئول)

<sup>۳</sup> استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

متداول‌ترین شکل استحصال انرژی از زباله، سوزاندن زباله و مهار انرژی حرارتی حاصل از آن است. این عمل، در عین کاهش حجم زباله، استفاده از منابع جایگزین انرژی را هم به همراه دارد. از مزایای دیگر آن، گندزدایی جریان زباله، با نابودی کامل ارگانیسم‌هایی است که در صورت دفع زمینی می‌تواند باعث بروز بیماری شود. در این تحقیق، روش‌های حرارتی تولید انرژی از زباله جامد شهری مورد ارزیابی قرار گرفته است. نحوه گردآوری داده‌ها به صورت پرسشنامه‌ای و همچنین بررسی منابع معتبر صورت پذیرفت. از تکنیک فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به منظور انتخاب بهترین فناوری تولید انرژی از زباله استفاده شد. نتایج نشان داد که به ترتیب معیار فنی و زیست‌محیطی با امتیازهای ۰/۵۳۳ و ۰/۴۶۷ در رتبه‌های اول و دوم قرار دارند. همچنین روش‌های پلاسما، گازیفیکاسیون، زباله‌سوز و پیرولیز به ترتیب با امتیازات ۰/۲۹۶، ۰/۲۵۴، ۰/۲۵۳ و ۰/۱۹۷ به عنوان بهترین روش برای تولید انرژی از مواد زائد مشخص شدند.

واژه‌های کلیدی: روش‌های حرارتی، استحصال انرژی، فرایند تحلیل سلسله مراتبی، زباله جامد شهری

## مقدمه

از نشانه‌های نامطلوب در زندگی شهری، تولید مقدار زیادی از زباله است که نحوه پردازش و دفع آن‌ها باعث نگرانی جهانی شده است. در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و رفاه فردی، مقدار زباله تولید شده به شدت رشد پیدا کرده است. بهترین روش در مدیریت پسماند، کاهش تولید زباله است؛ اما با بهبود شرایط اقتصادی و بالا رفتن استانداردهای زندگی، تراز مصرف افزایش یافته، میزان خرید کالاها و اجناس مختلف رشد یافته و در نتیجه، زباله بیشتری تولید می‌شود. بازیافت مواد زائد راه حل مناسبی است؛ اما در عمل، اغلب نه تجهیزات مناسب و نه امکانات زیربنایی کافی، برای یک بازیافت کارا و مؤثر وجود دارد. حتی در صورت انجام بازیافت نیز، یک حجم قابل ملاحظه‌ای از زباله به جا می‌ماند که قابلیت استفاده مجدد را نداشته و لازم است تا به شیوه‌ای دیگر دفع گردد (شفیعی، ۱۳۹۴). امروزه شیوه‌های مختلفی برای دفع زباله‌های شهری مطرح می‌باشد. در بعضی از این روش‌ها تولید انرژی اولویت دارد و در بعضی دیگر امحا زباله دارای اولویت می‌باشد. به طور کلی امروزه از روش‌های گوناگونی به منظور دفع زباله در سطح جهان استفاده می‌شود که به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند: گروه اول روش‌های ترموشیمیایی می‌باشند که با هدف تولید انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند که شامل روش‌های احتراق مستقیم، تولید گاز (گازیفیکاسیون)، پیرولیز و پلاسما می‌باشند (عبدالمالک<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵؛ عبدالله زاده و همکاران، ۱۳۸۹). گروه دوم روش‌های بیوشیمیایی با هدف امحا زباله هستند که شامل مرکز دفن (لندفیل)، کمپوست و بیوگاز می‌باشد (باغوند و همکاران، ۲۰۱۵).

در روش احتراق مستقیم، منابع جامد زیست‌توده نظیر ضایعات جنگلی - کشاورزی، ضایعات صنایع غذایی و زباله‌های جامد شهری به طور مستقیم در بویلرهای خاصی سوزانده شده و از حرارت حاصل برای تولید برق، گرما و یا ترکیبی از هر دو استفاده می‌شود. مهم‌ترین تکنولوژی تولید برق در این گروه زباله‌سوزها هستند. زباله‌سوزی فرایند اکسیداسیون مواد قابل احتراق زباله است که تولید گرما، بخار آب، نیتروژن، دی‌اکسیدکربن و اکسیژن می‌کند. بسته به ترکیبات زباله، این فرایند خروجی‌های دیگری نیز تولید می‌کند (ویلیامز<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵).

فناوری پیرولیز تخریب حرارتی مواد آلی از طریق استفاده غیرمستقیم از منابع خارجی برای تولید گرما در غیاب اکسیژن به کار برده می‌شود. درجه حرارت در این روش بین ۸۵۰-۳۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. محصولات تولید شده در این روش زغال، نفت و گاز مصنوعی است که عمدتاً شامل گاز اکسیژن، کربن منواکسید، کربن دی‌اکسید، متان و هیدروکربن‌های پیچیده می‌باشد. گاز مصنوعی را می‌توان برای تولید انرژی استفاده کرد. این گازها به طور معمول دارای ارزش حرارتی

$$10-20 \frac{MJ}{Nm} \text{ هستند (راهمن}^3 \text{ و همکاران، ۲۰۱۷).}$$

اساس فرآیند گازیفیکاسیون مشابه فرآیند پیرولیز است اما اولویت به تولید گاز داده می‌شود. گازیفیکاسیون یک فرایند ترموشیمیایی است که در آن مواد زائد جامد به سوخت و گازهای مصنوعی تبدیل می‌شود. این فرآیند در شرایط احتراق غیر مستقیم توسط اکسیداسیون جزئی و همچنین یک سری از واکنش‌های شیمیایی انجام می‌شود. محصولات این روش شامل گازهای منواکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، بخار آب، نیتروژن، متان، هیدروژن و همچنین مقداری حرارت و قیر می‌باشد (عبدالمالک، ۲۰۱۵).

پلاسما حالت چهارم ماده یا گاز یونیزه شده متشکل از مخلوطی از الکترون‌ها و یون‌ها و ذرات خنثی می‌باشد، اما در حالت کلی از نظر الکتریکی خنثی است. مهمترین جز پلاسما، گازساز آن است که می‌تواند یک یا چند مشعل قوسی پلاسما را در خود جای دهد. گازساز پلاسما محیطی با کمبود اکسیژن بوده و بنابراین هیچ احتراقی صورت نمی‌گیرد و از این رو گازساز پلاسما

<sup>1</sup> Abdelmalik

<sup>2</sup> Williams

<sup>3</sup> Rahman

یک زباله‌سوز یا سیستم احتراقی نیست (بوگارتس<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۲؛ جیانگ<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ لی<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۶؛ عبدالله‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹).

با توجه به توضیحات بالا و مزایا و کاستی‌های هر فناوری، انتخاب یکی از آنها برای مدیریت شهری امری تک‌بعدی نبوده و نیازمند تحلیلی چندگانه است.

فرایند تحلیل سلسله مراتبی توسط ساعتی پیشنهاد شد. این روش یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چند گانه است؛ 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 همکاران، ۱۳۹۴). این فرایند گزینه‌های مختلف را در تصمیم‌گیری دخالت داده و امکان تحلیل حساسیت روی معیارها و زیرمعیارها را دارد. علاوه بر این، بر مبنای 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 (بامداد<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۷). 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 همکاران، ۱۳۹۱).

راهمن و همکاران (۲۰۱۷) به انتخاب تکنولوژی مناسب برای تبدیل پسماند به انرژی در شهر داکا پرداختند. در داکا دفع مواد زائد چالش قابل توجهی است، به عنوان مثال اگر روی زمین انباشته گردد منجر به آلودگی زمین و در جاهایی که زمین کم است منجر به آلودگی آب شده و اگر سوزانده شود منجر به آلودگی هوا می‌شود. علاوه بر این، کمبود زمین و افزایش قیمت آن به ویژه در داکا، پایتخت بنگلادش، مشکلات جدیدی برای توسعه محل‌های لندفیل به وجود آورده است. با درک مسایل 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. سه گزینه شامل هضم بی‌هوازی، پیرولیز و گازی‌سازی پلاسما (PG)<sup>۸</sup> 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.

عبدالمالک (۲۰۱۵) به مطالعه‌ای در مورد روش‌های زباله‌سوزی، احتراق، پیرولیز و گازیفیکاسیون از بیومس پرداخت. برای تولید حرارت و الکتریسیته با حفظ محیط‌زیست، به طور کلی تمام روش‌های زباله‌سوزی، پیرولیز، احتراق و گازیفیکاسیون از بیومس 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 محیط زیست از اهداف اصلی آن است.

باسری و همکاران (۲۰۱۵) براساس ۴ معیار فنی، اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی و با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)<sup>۹</sup> و به انتخاب بهترین روش تولید کمپوست در دانشگاه کبانگسانگ مالزی پرداختند. در این پژوهش از دو روش تولید کمپوست شامل روش پشته‌ای و روش راکتوری استفاده کردند. ضایعات آلی روزانه از فعالیت کافه تریا و فضای سبز در داخل محوطه دانشگاه تولید می‌شد. نتیجه نشان داد که عامل فنی با وزن (۰/۵۰۰۰) 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 تعیین شده روش ویندرو بهترین روش تولید کمپوست با وزن (۰/۶۲۳۶) شناخته شد.

<sup>4</sup> Bogaerts

<sup>5</sup> Jiang

<sup>6</sup> Li

<sup>7</sup> Bamdad

<sup>8</sup> Plasma Gasification

<sup>9</sup> Analytical Hierarchy Process

ابوسما و همکاران (۲۰۱۱)، مدل ساختار کلی سلسله مراتبی<sup>۱۰</sup> را برای انتخاب تکنولوژی مناسب برای تصفیه پسماند جامد ارائه کردند. اولویت‌بندی در این مدل بر اساس حمایت‌های سیاسی، فنی، اثرات زیست‌محیطی توانایی بازار و معیار هزینه به شکل بازیافت، کمپوست، سوزاندن و یا ترکیبی از آنها بود. این تحقیق به صورت مطالعه موردی در شهر سپانگ<sup>۱۱</sup> مالزی انجام شد که بر این اساس ترکیبی از روش بازیافت و کمپوست به عنوان بهترین تکنولوژی جایگزین و مناسب آن منطقه انتخاب شد. داوودی نژاد و همکاران (۱۳۹۴) از روش تحلیل سلسله مراتبی برای اولویت‌بندی فناوری‌های تولید انرژی از فرایند تصفیه فاضلاب استفاده کردند. در این پژوهش، معیارهای فنی، اقتصادی، مدیریتی و زیست‌محیطی بر مبنای نظر خواهی از کارشناسان و با تأکید ویژه بر زیر ساخت‌های کشور مورد توجه بود. 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.

هدف از این تحقیق اولویت‌بندی شاخص‌ها و معیارهای تأثیرگذار و همچنین ارائه یک مدل کارآمد جهت انتخاب مناسب‌ترین فناوری استحصال انرژی از مواد زائد از بین روش‌های زباله‌سوزی، پیرولیز، گازی‌سازی (گازیفیکاسیون) و پلازما بر اساس معیارهای فنی و زیست‌محیطی می‌باشد؛ برای این منظور شاخص‌های مؤثر بر انتخاب بهترین تکنولوژی استحصال انرژی از زباله را از بررسی منابع معتبر استخراج کرده و سپس پرسشنامه مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی تدوین و بعد از تکمیل پرسشنامه میزان اهمیت نسبی معیارها و زیرمعیارهای تعیین شده را مشخص کرده و بر این مبنای گزینه‌های مورد نظر را رتبه‌بندی می‌کنیم.

## روش تحقیق

### فرایند تحلیل سلسله مراتبی

فرایند تحلیل سلسله مراتبی یکی از رویکردهای تصمیم‌گیری چند شاخصه است و اولین بار در سال ۱۹۷۷ توسط توماس ال ساعتی ارائه گردید. این شیوه از سازگاری منطقی زیادی با ذهن و طبیعت بشر برخوردار می‌باشد. این فرایند مجموعه‌ای از قضاوت‌ها و ارزش‌گذاری‌های شخصی را در چارچوبی منطقی به عنوان مبنای مقایسه پایه‌گذاری می‌کند (رضوی و همکاران، ۱۳۹۳).

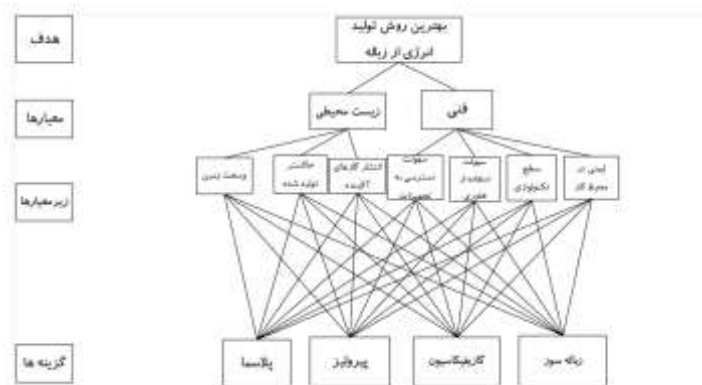
### اصول فرایند تحلیل سلسله مراتبی

ساعتی چهار اصل زیر را به عنوان اصول فرایند تحلیل سلسله مراتبی بیان نموده و کلیه محاسبات، قوانین و مقررات را بر این اصول بنا نهاده است. این اصول شامل موارد زیر می‌باشد (قدسی‌پور، ۱۳۸۷):

- اصل ۱- شرط معکوسی: اگر ترجیح عنصر A بر عنصر B برابر n باشد، ترجیح عنصر B بر عنصر A برابر با  $\frac{1}{n}$  خواهد بود.
  - اصل ۲- اصل همگنی: عنصر A با عنصر B باید همگن و قابل مقایسه باشند. به بیان دیگر برتری عنصر A بر عنصر B نمی‌تواند بی‌نهایت یا صفر باشد.
  - اصل ۳- وابستگی: هر عنصر سلسله مراتبی به عنصر سطح بالاتر خود می‌تواند وابسته باشد و به صورت خطی این وابستگی تا بالاترین سطح می‌تواند ادامه داشته باشد.
  - اصل ۴- انتظارات: هرگاه تغییری در ساختمان سلسله مراتبی رخ دهد پروسه ارزیابی باید مجدداً انجام گیرد.
- به طور کلی، فرایند 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 همکاران، ۱۳۹۴). در این پژوهش معیارهای فنی و زیست‌محیطی برای انتخاب مناسب‌ترین روش حرارتی تولید انرژی زباله جامد شهری انتخاب شد.

<sup>10</sup> (GHSM) General Hierarchy Structure Model

<sup>2</sup> Sepang



شکل ۱: درخت سلسله مراتبی معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها

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 از طریق 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. مقیاس مقایسه زوجی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مقیاس مقایسه زوجی (راهمن و همکاران، ۲۰۱۷)

۱	ارجحیت یکسان	هر دو گزینه اثر یکسانی بر هدف دارند
۳	کمی ارجحیت	ارجحیت یکی از گزینه‌ها بر دیگری (گزینه مورد مقایسه) اندک است.
۵	ارجحیت قوی	ارجحیت یکی از گزینه‌ها بر دیگری (گزینه مورد مقایسه) قوی است.
۷	ارجحیت بسیار قوی	ارجحیت یکی از گزینه‌ها بر دیگری (گزینه مورد مقایسه) بسیار قوی است.
۹	بی اندازه مرجح	ارجحیت یکی از گزینه‌ها بر دیگری در حداکثر مقدار ممکن قرار دارد.
۲،۴،۶،۸	امتیازات میانی	نشان دهنده حالت‌های میانی هر یک از حالات مقایسه‌ای فوق است.

نحوه گردآوری داده‌ها از طریق بررسی منابع معتبر و همچنین روش پرسشنامه‌ای و پرسش از کارشناسان موجود در این زمینه 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. در روش AHP چون داده‌ها یک سری اعداد نسبی هستند از میانگین‌گیری هندسی استفاده می‌شود (ساعتی<sup>۱۲</sup>، ۱۹۸۰). 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 تصمیم‌گیری در مدل AHP حاوی اطلاعاتی است که آنتروپی می‌تواند به عنوان معیاری برای ارزیابی آن به کار رود (مومنی، ۱۳۹۱). محاسبات با نرم‌افزار Expert Choice 11 انجام گرفت. اطلاعات یک ماتریس تصمیم‌گیری به صورت جدول ۲ نمایش داده می‌شود.

<sup>12</sup> saaty

جدول ۲: نحوه نمایش اطلاعات یک ماتریس تصمیم‌گیری (رضوی و همکاران، ۱۳۹۳)

گزینه‌ها	معیارها			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	....	X <sub>n</sub>
A <sub>1</sub>	r <sub>11</sub>	r <sub>12</sub>	....	r <sub>1n</sub>
A <sub>2</sub>	r <sub>21</sub>	r <sub>22</sub>	....	r <sub>2n</sub>
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
A <sub>m</sub>	r <sub>ij</sub>	r <sub>m2</sub>	....	r <sub>mn</sub>

جهت محاسبه وزن‌ها ابتدا محت وی اطلاعات ماتریس به صورت (P<sub>ij</sub>) محاسبه می‌شود (مومنی، ۱۳۹۱).

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

سپس E<sub>j</sub> از مجموعه P<sub>ij</sub>ها به ازای هر مشخصه به صورت زیر محاسبه می‌شود. به طوری که  $K = \frac{1}{L_{nm}}$  است.

$$E_j = -K \sum_{i=1}^n [P_{ij} \cdot \ln P_{ij}] \quad \forall j \quad (2)$$

بعد از E<sub>j</sub> نیاز به محاسبه عدم اطمینان یا درجه انحراف است، درجه انحراف هر یک از شاخص‌ها از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد.

$$d_j = 1 - E_j \quad \forall j \quad (3)$$

سرانجام W<sub>j</sub> برای هر یک از شاخص‌ها از رابطه ۴ بدست می‌آید.

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad \forall j \quad (4)$$

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

$$R_k = \sum_i W_i \times r_{ik} \quad (5)$$

که در این رابطه R<sub>k</sub> وزن نهایی گزینه k ام، W<sub>i</sub> وزن نهایی معیار i ام، r<sub>ik</sub> وزن نسبی گزینه k ام نسبت به معیار i ام می‌باشند.

### بررسی منابع معیارهای کمی

فناوری‌های بیوشیمیایی و ترموشیمیایی در مقایسه با یکدیگر، دارای مزایا و کاستی‌هایی می‌باشند. بازده تبدیل انرژی یا به عبارت دیگر انرژی تولید شده به ازای واحد وزن زباله ورودی، میزان کاهش در مقدار زباله دفن شده و میزان انتشار آلاینده‌ها

سه جنبه اصلی در مقایسه فنی روش‌های موجود استحصال انرژی از زباله می‌باشند؛ اما به کارگیری فناوری‌های استحصال انرژی از زباله صرفاً جهت تولید برق نبوده بلکه هدف اصلی آن، کاهش حجم زباله و تبدیل زباله به موادی بی‌ضرر می‌باشد. انرژی تولیدشده از این فناوری‌ها صرفاً یک محصول جانبی به حساب می‌آید. میزان بازدهی فناوری تولید انرژی و درصد کاهش وزن زباله در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است.

### جدول ۳: بازدهی فناوری‌های تبدیل انرژی بر حسب kWh به ازای هر تن زباله

(مأخذ: گلوور<sup>۱۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۹، آژانس بین‌المللی انرژی<sup>۱۴</sup>، ۲۰۰۱)

۴۷۰ - ۹۳۰	احتراق
۴۵۰ - ۵۳۰	پیرولیز
۴۰۰ - ۶۵۰	گازیفیکاسیون
۴۰۰ - ۱۲۵۰	پلازما

### جدول ۴: درصد کاهش وزنی زباله (%) (مأخذ: گلوور و همکاران، ۲۰۰۹)

٪ ۷۵	احتراق
٪ ۷۲ - ۹۵	پیرولیز
٪ ۹۴ - ۱۰۰	گازیفیکاسیون
٪ ۹۵ - ۱۰۰	پلازما

### نتیجه‌گیری

در حال حاضر فناوری‌های ترموشیمیایی مانند زباله‌سوز، پیرولیز، گازیفیکاسیون و پلازما و تولید سوخت از زباله (RDF)، روش‌های موجود برای تولید انرژی از زباله در کشورهای پیشرفته می‌باشد. هدف از این تحقیق ارزیابی فناوری‌های حرارتی تولید انرژی از مواد زائد جامد شهری بر اساس دو معیار فنی و زیست‌محیطی می‌باشد. با توجه به این که فناوری‌های ترموشیمیایی به جز فناوری زباله‌سوز، دارای سابقه کاربرد در داخل کشور نمی‌باشد، تعداد کارشناسانی که بر خصوصیات هر چهار فناوری منتخب در این تحقیق احاطه داشته باشند اندک است. در نتیجه به منظور امتیازدهی به معیارها و انتخاب گزینه مناسب از مصاحبه‌های حضوری و غیر حضوری با ۱۶ تن از کارشناسان شاغل در سازمان مدیریت پسماند، سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، پژوهشکده انرژی و حتی کارشناسان خارجی انجام شد.

گزینه‌های منتخب در این تحقیق شامل فناوری‌های زباله‌سوزی، گازیفیکاسیون، پیرولیز و پلازما می‌باشد. بر اساس محاسبات انجام گرفته برای معیارهای اصلی، معیار فنی با امتیاز ۰/۵۳۳ و معیار زیست‌محیطی با امتیاز ۰/۴۶۷ به ترتیب در اولویت اول و دوم قرار گرفتند. همچنین نتایج برای گزینه‌ها به ترتیب برای پلازما، گازیفیکاسیون، زباله‌سوز و پیرولیز به ترتیب با امتیازات ۰/۲۹۶، ۰/۲۵۴، ۰/۲۵۳ و ۰/۱۹۷ به عنوان بهترین روش برای تولید انرژی از مواد زائد به دست آمدند.

### جدول ۵: امتیاز نهایی و نرخ ناسازگاری گزینه‌های منتخب

گزینه‌ها	امتیاز نهایی
----------	--------------

<sup>13</sup> Glover

<sup>14</sup> IEA

۰/۲۵۳	زباله‌سوز
۰/۲۹۶	پلازما
۰/۲۵۴	گازیفیکاسیون
۰/۱۹۷	پیرولیز
۰/۰۳	نرخ ناسازگاری

### جدول ۶: امتیاز نهایی و نرخ ناسازگاری معیارها و زیرمعیارها

نرخ ناسازگاری	امتیاز نهایی	زیر معیار
۰/۰۳	۰/۵۳۳	فنی
۰/۰۵	۰/۴۶۷	زیست‌محیطی
۰/۰۰۴	۰/۱۹۳	سطح تکنولوژی
۰/۰۴	۰/۲۸۶	سهولت دسترسی به تجهیزات
۰/۰۲	۰/۲۰۲	سهولت استفاده از فناوری
۰/۰۳	۰/۳۲۰	ایمنی در محیط کار
۰/۰۱	۰/۶۸۵	انتشار گاز آلاینده
۰/۰۰۴	۰/۱۹۵	خاکستر
۰/۰۰۱	۰/۱۲۰	وسعت زمین مورد استفاده

مطابق جدول (۶) گزینه ایمنی در محیط کار با امتیاز ۰/۳۲۰ و همچنین گزینه انتشار گازهای آلاینده با امتیاز ۰/۶۸۵ به عنوان مهمترین زیر معیارهای فنی و زیست‌محیطی به دست آمدند.

به ازای هر ماتریس مقایسه زوجی تشکیل شده در این تحقیق، یک نرخ ناسازگاری توسط نرم‌افزار Expert Choice 11 برای نشان دادن میزان دقت امتیازدهی به معیارها محاسبه می‌شود. در واقع نرخ ناسازگاری وسیله‌ای است که سازگاری را نشان می‌دهد و مشخص می‌کند که تا چه حد می‌توان رتبه‌بندی‌های حاصل از مقایسات اعتماد کرد. تجربه نشان می‌دهد که اگر نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱۰ باشد، مقایسات انجام شده قابل قبول است (داوودی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۴). پس اگر مقایسات دارای نرخ ناسازگاری بالایی باشند باید مورد تجدید نظر قرار گرفته و یا حذف شوند. همان طور که در جدول (۶) نشان داده شده است، نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱۰ می‌باشد.

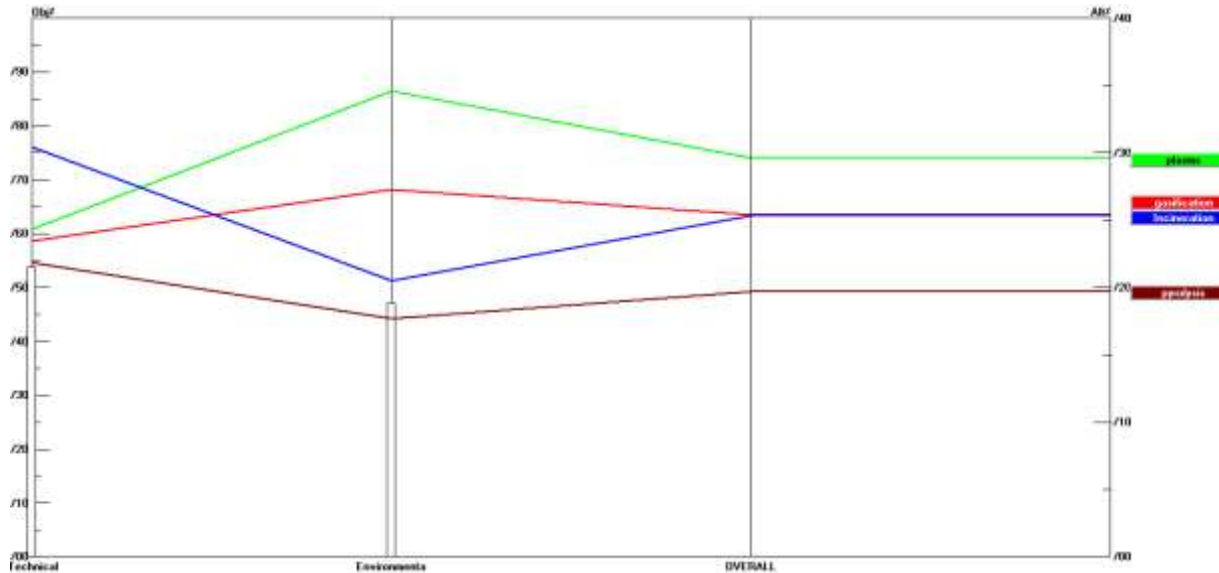
پس از بررسی منابع و مقایسه این پژوهش با تحقیقات مشابه این تحقیق، نتایج زیر حاصل شد:

راهمن و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که معیار فنی امتیاز بیشتری نسبت به معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی دارد و همچنین سیستم پلازما گازی‌سازی (PG) به عنوان رتبه نخست در بین سایر روش‌های تولید انرژی از زباله (WTE) معرفی کردند. فلاح‌زاده (۱۳۹۴) در تحقیقی به مقایسه روش‌های ترموشیمیایی پرداخت که نتیجه این تحقیق نشان داد سیستم پلازما پاک‌ترین فرایند در تولید انرژی از زباله است. عبدالملک (۲۰۱۵) نیز در مطالعه‌ای روش‌های ترموشیمیایی در تولید انرژی و هیدروژن را مورد بررسی قرار داد. نتیجه این مطالعه نشان داد که سیستم گازیفیکاسیون گزینه اقتصادی‌تر و عملی‌تر برای تولید هیدروژن و همچنین حافظ محیط زیست می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق هم نشان داد که سیستم پلازما در بین سایر روش‌های ترموشیمیایی رتبه اول را داراست که مطابق با یافته‌های تحقیقات راهمن و فلاح‌زاده می‌باشد.

از بین فناوری‌های حرارتی در ایران از زباله‌سوز آن هم تنها با هدف امحا زباله جامد شهری استفاده می‌شود و به نوعی می‌توان گفت این فناوری‌ها در ایران شناخته شده نیستند. این مقاله تلاش نمود تا با بررسی منابع معتبر و همچنین از طریق تکمیل



پرسشنامه و پرسش از کارشناسان و خبرگان موجود در این حوزه تا حدودی این فناوری‌ها را معرفی و بر اساس معیارهای زیست‌محیطی و فنی و در نظر گرفتن زیرمعیارهایی برای هر کدام از این معیارها مناسب‌ترین روش حرارتی برای تولید انرژی از زباله را معرفی نماید.



شکل ۲: نمودار حساسیت گزینه‌های تولید انرژی از زباله جامد شهری نسبت به معیارهای اصلی

## منابع

۱. باغوند، ا. زنجانیان، ح. رضانی، م. اندیک، ب. (۲۰۱۵). بررسی روش‌های مختلف زباله‌سوزی و پارامترهای موثر بر انتخاب آن با رویکرد تولید انرژی. کنفرانس بین‌المللی علوم، مهندسی و فناوری‌های محیط‌زیست پایدار.
۲. داوودی نژاد، م. بی پروا، پ. (۱۳۹۴). اولویت بندی فناوری‌های تولید انرژی از فرایندهای تصفیه فاضلاب به روش تحلیل سلسله مراتبی. نشریه انرژی ایران. شماره ۳.
۳. رضوی، س، ح. هاشمی، س. عموزاد مهدیرجی، ح (۱۳۹۳). تصمیم‌گیری چند شاخصه در شرایط اطمینان و عدم اطمینان، تهران: انتشارات ترمه.
۴. شفیعی ده‌آبادی، ع. (۱۳۹۴). زباله‌سوزی و استحصال انرژی از زباله جامد شهری. مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، گزارش ۳۳۲.
۵. 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.
۶. فلاح‌زاده، ر. ع. (۱۳۹۴). روش‌های نوین ترموشیمیایی جهت تولید انرژی از پسماند. دومین همایش ملی بهداشت محیط، سلامت و محیط‌زیست پایدار.
۷. قدسی پور، س، ح (۱۳۸۷). فرایند تحلیل سلسله مراتبی، تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
۸. مومنی، م. شریفی سلیم، ع (۱۳۹۱). مدل‌ها و نرم افزارهای تصمیم‌گیری چند شاخصه، تهران: نشر مؤلف.

9. Abdelmalik, M, S. (2015). *Biomass, incineration, pyrolysis. Combustion and gasification*. International Journal of Science and Research (IJSR). ISSN: 2319 – 7064.
10. Abusamah, M, A. AbdManaf, L. zaharianaris, A. azminsulaiman, W,N (2011). *solid waste managment: Analytical Hierarchy Process (AHP) Application of selecting treatment technology in sepan*. municipal council, malaysia
11. Barsi, N,E,A. Zaini, N,S,M. zain, S,M. saad, N,F,M (2015). *selecting the best composting technology using Analytical Hierarchy Process (AHP)*. jurnal Teknologi.
12. Bamdad, N. Mohammadzadeh-Basir, H. Narvankuhi, A. Emami, S. Saiedi, A. (2007). *Site selection methodology for industries*. Rahshah and Associates Engineers:94:54-5.
13. Bogaerts, A. Neyts, E. Gijbels, R. Vandermullar, J(2002). *Gas discharge plasmas and their application*. Spectrochimica Acta B 57. 609-658.
14. Glover, B. Mattingly, J. (2009). *Reconsidering Municipal Solid Waste as a Renewable Energy Feedstock*. Environmental and Energy Study Institute (EESI), Washington D.C.
15. IEA. Bioenergy. (2001). *Biogas and More. System and Market Overview of Anaerobic Digestion*. AEA TechnologyEnvironment, Oxfordshire.
16. Jiang, B. Zheng, T. Qiu, S. Wu, M, B. Zheng, Q, H. Yan, Z, F. Xue, Q, Z. (2014). *Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation*. chem.Eng. J. 236. 348-368.
17. Li, J. Liu, K. Yan, S. Li, Y. Han, D. (2016). *Application of thermal plasma technology for the treatment of solid waste in china: An overview*. Waste Management.
18. Rahman, s. Azeem, S,M,A. Ahammed, F. (2017). *Selection of an appropriate waste to energy conversion technology for Dhaka city, Bangladesh*. International journal of sustainable engineering.
19. Saaty,T,L. (1980). *The Analytical Hierarchy Process*. planning priority Resource Allocation. TWS publication,USA.
20. Williams, T, P. (2005). *Waste Disposal and Treatment*. John Wiley & Sons.

## Technical and environmental evaluation of thermal technologies to energy recovery from municipal solid waste

Arman Shahnazari<sup>1</sup>, Abbas Rohani<sup>2\*</sup>, Mohammad Hossein Aghkhani<sup>3</sup>, Mohammad Ali Ebrahiminik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.SC student of mechanization-waste management, university of ferdowsi, mashhad, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor Department of Biosystem, University of ferdowsi, mashhad, Iran

<sup>3</sup>Professor Department of Biosystem, University of ferdowsi, mashhad, Iran

\*Corresponding author

---

### Abstract

The most common form of energy recovery from waste, waste incineration and thermal energy harnessed from it. This practice, while reducing the volume of waste, use of alternative sources of energy as well. Other advantages of the disinfection of the waste stream, with the complete destruction of organisms that can cause disease if land disposal. In this study, thermal methods of producing energy from municipal solid waste is evaluated. How data collection was conducted through questionnaires and survey sources. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to select the best technology to produce energy from waste. The results showed that the technical and environmental criteria with scores 0/533 and 0/467 are ranked first and second. The plasma, gasification, incineration and pyrolysis methods, respectively, with scores 0/296, 0/254, 0/253 and 0/197 as the best way to produce energy from waste were identified.

**Keywords:** Thermal methods, Energy recovery, Analytic Hierarchy Process, municipal solid waste.

---