

Emergy Assessment of Environmental Yield Ratio and Net Emergy Performance Indicators in Urban Waste Management: A Case Study of Karaj City

Ghazal Mehri

Master's student in Environmental Pollution, Faculty of Agricultural, Water, Food, and Functional Products, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Seyed Masoud Monavari

Professor, Department of Environmental Science, Faculty of Agricultural, Water, Food, and Functional Products, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Shahram Baikpour

* Assistant Professor, Department of Environmental Science, Faculty of Agricultural, Water, Food, and Functional Products, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

(Corresponding Author)

baikpour2004_rgsi@yahoo.com

Abstract

Background and Objective: Rapid socio-economic development has significantly increased municipal solid waste (MSW) generation. Several urban waste management strategies have been analyzed to address environmental impacts and evaluate energy-based sustainability. This study evaluates emergy-derived Environmental Yield Ratio (EYR) and net emergy across different waste treatment methods.

Materials and Methods: A descriptive-analytical approach was applied. Emergy values for each input were calculated by converting physical quantities (mass, energy, monetary units) into standard emergy units using appropriate transformity factors. Stored emergy was also estimated. Emergy-based indicators were then derived to assess resource investment efficiency and potential for emergy recovery among waste management options.

Results: Composting demonstrated Karaj's highest net emergy efficiency among the evaluated strategies. Emergy investment per gram of MSW was calculated as follows: sanitary landfill (6.51×10^6 sej/g), incineration (4.61×10^6 sej/g), and composting (8.06×10^5 sej/g). EYR and net emergy values confirm composting as the most environmentally favorable alternative.

Conclusion:

Emergy analysis indicates a direct relationship between higher EYR and increased net emergy. Composting outperforms sanitary landfilling in environmental performance, offering the most sustainable urban waste management solution for Karaj.

Keywords: Emergy Investment, Recovery, Environmental Yield Ratio (EYR), Net eMerger (NET), Urban Waste

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Received: 2024/12/24

Accepted: 2025/04/19

Doi:10.22038/jreh.2025.26107

► **Citation:** Mehri Gh, Monavari S.M, Baikpour Sh. Emergy Assessment of Environmental Yield Ratio and Net Emergy Performance Indicators in Urban Waste Management: A Case Study of Karaj City. *Journal of Research in Environmental Health*. 11(1):68-82.

ارزیابی امرژی در شاخص‌های عملکرد بازده زیست‌محیطی و امرژی خالص در پسماندهای شهری (مطالعه موردی: شهر کرج)

غزل مهری

دانشجوی کارشناسی‌ارشد آلودگی‌های محیط‌زیست، دانشکده موضوعی کشاورزی، آب، غذا و فراسودمنداها، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

سید مسعود منوری

استاد گروه محیط‌زیست، دانشکده موضوعی کشاورزی، آب، غذا و فراسودمنداها، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

شهرام بیک‌پور

* استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده موضوعی کشاورزی، آب، غذا و فراسودمنداها، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول)
baikpour2004_rsgsi@yahoo.com

چکیده

زمینه و هدف: تغییرات در شرایط اجتماعی و اقتصادی منجر به افزایش تولید زباله‌های جامد در دهه‌های اخیر شده است. سناریوهای مختلف مدیریت پسماند جامد شهری با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی و ارزیابی امرژی پیش‌بینی شده‌اند. هدف از این مطالعه ارزیابی امرژی شاخص بازده زیست‌محیطی و امرژی خالص در روش‌های مدیریت پسماند است.

مواد و روش‌ها: این تحقیق پیمایشی توصیفی و تحلیل است. به‌منظور محاسبه‌ی مقادیر امرژی در مدیریت پسماندهای شهری، ابتدا مقادیر کمی هر منبع بر اساس واحد مربوطه (جرم، انرژی، پول و غیره) به‌دست آمده و سپس در ضریب تبدیل مربوطه ضرب شد و همه به واحد امرژی تبدیل شدند. امرژی ذخیره محاسبه شد. در نهایت شاخص‌های مورد بررسی در روش‌های مختلف مدیریت پسماند جهت سرمایه‌گذاری و بازیافت امرژی محاسبه گردید.

یافته‌ها: نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که کمپوست‌سازی زباله در کرج بالاترین بهره‌وری زیست‌محیطی را در رابطه با امرژی خالص است. نتایج نشان می‌دهد کل سرمایه‌گذاری امرژی به ازای هر گرم پسماند جمع‌آوری شده به‌ترتیب در روش دفن بهداشتی ($4/61 \times 10^6$ sej/g MSW)، در سوزاندن ($4/61 \times 10^6$ sej/g MSW) در روش زباله‌سوز و در روش کمپوست ($8/06 \times 10^5$ sej/g MSW) محاسبه شد. نتایج بازده زیست‌محیطی و امرژی خالص شهر کرج نشان داد روش کمپوست مناسب‌ترین بازده زیست‌محیطی (EYR) است.

نتیجه‌گیری: نتایج ارزیابی امرژی نشان می‌دهد که با افزایش شاخص نسبت بازده زیست‌محیطی، امرژی خالص افزایش می‌یابد. روش کمپوست در مقایسه با روش دفن بهداشتی بهترین بازده زیست‌محیطی (EYR) دارد.

کلید واژه‌ها: سرمایه‌گذاری امرژی، بازیابی، بازده زیست‌محیطی (EYR)، امرژی خالص (NET)، پسماندهای شهری

◀ **استناد:** مهری غ، منوری س.م، بیک‌پور ش. ارزیابی امرژی در شاخص‌های عملکرد بازده زیست‌محیطی و امرژی خالص در پسماندهای شهری (مطالعه موردی: شهر کرج). فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. بهار ۱۴۰۴؛ ۱۱(۱): ۶۸-۸۲.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰

نوع مقاله: پژوهشی

مقدمه

دنیای مدرن که بیش از ۷/۷ میلیارد نفر در آن زندگی می‌کنند (۱) در بیش از ۱۹۰ کشور پراکنده شده است، از بسیاری جهات بسیار متنوع است (۲). بنابراین تنوع پسماندهای شهری نیز در کشورهای متفاوت است (۳، ۴). پیش‌بینی‌ها برای دهه‌های آینده نشان می‌دهد که زمین در آستانه یک انفجار جمعیتی قابل توجه است. با این حال، بشر به‌طور فزاینده‌ای از این واقعیت آگاه است که جهان شروع به دست و پنجه نرم کردن با بسیاری از مسائل و تهدیدات کرده است که تا همین اواخر وجود نداشتند یا بسیار کم بودند. علاوه بر این، به دلیل ارتباط و نفوذ متقابل آن‌ها، مشکلات ممکن است به سرعت تشدید شوند و حل آن‌ها دشوار شود. نمونه‌ی آن زباله‌های شهری است که محصول جانبی فعالیت‌های روزمره انسانی است که تهدیدی جدی برای محیط‌زیست در سراسر جهان به‌شمار می‌رود (۵). مدیریت زباله جامد شهری سنگ بنای توسعه پایدار است که برای سلامت محیط‌زیست، کارایی اقتصادی و رفاه اجتماعی بسیار مهم است (۶، ۷، ۸). با رشد جمعیت شهری و تکامل الگوهای مصرف، حجم و پیچیدگی زباله‌های تولید شده افزایش می‌یابد و چالش‌های مهمی را برای سیستم‌های مدیریت زباله منطقه‌ای ایجاد می‌کند. در کشورهای با درآمد متوسط مانند مانیل، فیلیپین و بانکوک، تایلند، این چالش‌ها اغلب با شهرنشینی سریع، زیرساخت‌های ناکافی و منابع مالی محدود ترکیب می‌شوند (۹، ۱۰، ۱۱). علی‌رغم وجود برخی سیستم‌های رسمی مدیریت زباله، این کشورها اغلب با ناکارآمدی‌هایی مانند پوشش نامناسب جمع‌آوری، روش‌های دفع نامناسب و نرخ بازیافت پایین دست‌وپنجه نرم می‌کنند (۱۲، ۱۳). بخش‌های غیررسمی زباله، از جمله جمع‌آوران زباله و بازیافت‌کنندگان در مقیاس کوچک، نقش مهمی در مدیریت زباله جامد شهری بازی می‌کنند، اما معمولاً بدون نظارت نظارتی عمل می‌کنند که منجر به خطرات بهداشتی و ایمنی می‌شود (۱۴). مدیریت پسماندهای جامد شهری کارآمد و پایدار برای حفاظت از محیط‌زیست، سلامت عمومی و کیفیت کلی زندگی ضروری است (۳). استراتژی‌های مدیریت پسماند در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه متفاوت است. محصول حاصل از هر واکنش یا فرآیند شیمیایی در محل دفع پسماندها نیز مواد ناخواسته یا غیرقابل استفاده‌ای به نام زباله تولید می‌کند (۱۵).

جمعیت انسان به‌طور تصاعدی در حال افزایش است و فعالیت‌هایی که برای برآوردن نیازهای اولیه زندگی یا بهبود سبک زندگی منجر به تولید مواد زائد بیشتر می‌شود. این مواد زائد اثرات غیرعمدی و منفی بر زندگی دارند و زیستگاه‌های شهری پرجمعیت بیشتر در معرض اثرات مخرب آن‌ها هستند (۱۶). مدیریت نادرست پسماند جامد یا پسماند نگرانی اصلی اثرات اجتماعی و زیست محیطی است. دفع بی‌رویه زباله یکی دیگر از سوء مدیریت‌هاست که آلودگی شدیدی را در خاک، آب و محیط زیست ایجاد می‌کند. آلودگی آب‌های سطحی نیز به دلیل تخلیه نامناسب و جریان بی‌رویه آن‌ها است. فقدان تکنیک مناسب مدیریت پسماند نیز عیب اصلی کشورهای در حال توسعه است (۱۵). با این حال، رویکردهای متفاوتی نسبت به پسماندها وجود دارد. زیرا شهروندان ثروتمند اغلب زباله‌ها را یک موضوع زیست‌محیطی می‌دانند در حالی که بسیاری از مردم در کشورهای در حال توسعه، حدود ۱۵ میلیون نفر در سراسر جهان، زباله‌ها را به‌عنوان یک منبع درآمد مهم در نظر می‌گیرند (۱۶). این افراد پسماندها را جمع‌آوری، دسته‌بندی، بازیافت و فروش می‌رسانند. به همین ترتیب، بسیاری از شیوه‌های خوب در شهرهای مختلف جهان با رویکرد بازیافت برای تبدیل شدن به ثروت، امتناع از تبدیل شدن به زباله و برای تبدیل شدن به پول نقد به کار گرفته می‌شود. افزایش آگاهی زیست محیطی، محدودیت بودجه و کاهش منابع طبیعی، جوامع علمی را ترغیب کرده است تا با شیوه‌های دفع زباله مقابله کنند (۱۷). تکنیک‌های اصلی مدیریت پسماند در کشورهای در حال توسعه بازیافت، تبدیل زیستی، سوزاندن است، اما به دلیل عوامل متعدد این تکنیک‌ها به اشتباه مدیریت می‌شوند. سوءمدیریت زباله شامل سوزاندن باز و تخلیه باز که به‌طور جدی بر محیط‌زیست و سلامت انسان تأثیر می‌گذارد. سوزاندن باز منجر به انتشار بسیاری از آئروسول‌های سمی منوکسید کربن، منوکسید نیتروژن، دی‌اکسید کربن، ذرات معلق و سایر آلاینده‌ها می‌شود. زباله‌های جامد آب و محیط‌زیست را نیز آلوده می‌کند (۱۵). یک سیستم مدیریت پسماند مناسب می‌تواند پسماندها را به محصولاتی با ارزش افزوده تبدیل کند. ضایعات در صورت مدیریت صحیح می‌توانند به منابع تجاری سودآور تبدیل شوند (۱۷). تحلیل‌های متفاوتی بین بخش‌های مدیریت پسماند وجود دارد. لذا امر پیچیده‌ای است که توسعه ابزارها را ضروری می‌سازد (۱۸). از این جهت روش‌های مختلفی توسعه داده شده‌اند. از این بین می‌توان به روش‌هایی مانند تحلیل ورودی و خروجی محیطی (۱۹)، ارزش‌گذاری (۲۰)، ارزیابی چرخه

حیات (۲۱، ۲۲) و تحلیل امرژی (۲۳، ۲۴) اشاره کرد. اخیراً مطالعاتی کمی در زمینه ارزیابی دقیق تأثیرات اکولوژیکی گزینه‌های مختلف مدیریت پسماند و کاهش مشکلات مدیریت پسماند شهری در جهان انجام شده است. ارزیابی چرخه زندگی مدیریت زباله جامد شهری با تأکید بر بازیافت انرژی و مواد در از شهر سامسون ترکیه نشان می‌دهد که حمل‌ونقل پسماندها و نرخ بازیافت مواد بر روی انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیر دارد (۲۵). وانگ و همکاران (۲۶)، عملکرد زیست محیطی و اقتصادی یک مرکز مدیریت پسماند مورد ارزیابی قرار دادند. در پژوهش‌های لیو و همکاران (۲۷) و لیو و همکاران (۲۸)، چهار فناوری متفاوت را در شهر پکن بررسی نمودند. در این پژوهش جهت ارزیابی تأثیرات زیست محیطی جریان‌های ورودی و خروجی به سیستم از یک روش مشترک امرژی^۱-LCA استفاده شد. علی و همکاران (۲۴)، سه سناریو مدیریت پسماند شامل روش فعلی دفن باز، دفن بهداشتی با کمپوست‌سازی و بازیافت مواد و سوزاندن با کمپوست و بازیافت در چارچوب جداول ورودی-خروجی مبتنی بر روش امرژی را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج مطالعه اشرف و همکاران (۲۹) در چرخه حیات نشان می‌دهد که هزینه کلی تأسیسات کمپوست غیرمتمرکز که بسیار کمتر از هزینه‌های مربوط به دفن پسماند است. بررسی ارزیابی چرخه حیات جیانگ و همکاران (۳۰) عمر نشان می‌دهد که حدوداً ۶۱ درصد هزینه‌های اقتصادی شامل جمع‌آوری، حمل-ونقل و تصفیه است. ارزیابی امرژی، یک رویکرد سیستماتیک از بالا به پایین برای بررسی محیط زیست و تصمیم‌گیری است. این رویکرد سعی دارد به جای جداکردن بخش‌های محیط‌زیست، آن را به‌عنوان یک سیستم کل درک کند (۳۱). امرژی نوعی آنالیز است که تمام ورودی‌ها اعم از تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر رایگان، انرژی‌های خریداری شده و خدمات را مورد ارزیابی قرار می‌دهد (۳۲، ۳۳). امرژی، انرژی را که قبلاً مورد استفاده قرار گرفته است، اندازه‌گیری می‌کند و تحلیل‌های آن کلاً با تحلیل متداول انرژی، متفاوت است. بنابراین رویکردی علمی‌تر و دقیق‌تری برای ارزیابی وضعیت و موقعیت جریان‌های مختلف جهانی می‌باشد (۳۴). با توجه به این‌که یک سیستم مدیریت پسماند کارآمد باید مبتنی بر اصول توسعه پایدار باشد که در آن زباله‌ها به‌عنوان منبع بالقوه در نظر گرفته شوند نه چیزی که باید از بین برود؛ در تحقیق حاضر از روش امرژی در زمینه ارزیابی دقیق شاخص‌های

عملکرد بازده زیست‌محیطی^۲ و امرژی خالص^۳ در پسماندهای شهری در گزینه‌های مختلف مدیریت پسماند استفاده شد. در این پژوهش از کلان شهر (کرج) در ارزیابی امرژی در شاخص‌های بازده زیست‌محیطی و امرژی خالص در سیستم‌های مدیریت پسماند استفاده شده است. علت انتخاب این شهر به‌دلیل ویژگی‌های خاص منطقه، افزایش نرخ مهاجرت، انتخاب شده است. شهر کرج امروزه با تولید بیش از ۱۲۰۰ تن پسماند (۳۵) با مسائل محیط‌زیستی زیادی از جمله فعالیت‌های ناسازگار و مزاحم در سطح شهر، توسعه بیش از حد صنایع، نبود سیستم دفع فاضلاب شهری، وجود پسماندهای روان خانگی و... در جوی‌ها و معابر و ایجاد آلودگی محیطی و بیماری و غیره دست به گریبان است. بر طبق نتایج کلی سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ شهر کرج چهارمین شهر پرجمعیت ایران است. افزایش جمعیت شهر کرج افزایش تولید پسماند را در پی داشته است. هدف این تحقیق مقایسه و بررسی سرمایه‌گذاری امرژی در روش‌های دفع پسماند جامد شهری در مراحل مختلف دفن بهداشتی، سوزاندن، کمپوست در پسماندهای شهری است تا اطمینان حاصل شود مناسب‌ترین سرمایه‌گذاری امرژی در کدام روش مورد بررسی است. در این پژوهش مزایای امرژی هر یک از فرآیندهای تصفیه نشان داده شده است. ارزیابی امرژی از کمپوست با اختصاص تبدیل کودها بر اساس محتوای پتاسیم N، فسفر P و نیتروژن K و تبدیل چرخه زمین به مواد باقی مانده محاسبه شده است.

روش کار

محاسبه نهاده‌های امرژی

برای محاسبه مقادیر امرژی جریانات سیستم، ابتدا مقادیر کمی هر منبع با استفاده از روش‌های استاندارد بر اساس واحد مربوطه (جرم، انرژی، پول و غیره) به‌دست آمده و سپس در ضریب تبدیل مربوطه ضرب شد و همه به واحد امرژی تبدیل شدند. روش‌های استاندارد تعیین مقادیر امرژی به شرح ذیل می‌باشند:

تشعشع خورشیدی^۴

امرژی تشعشع خورشیدی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد که در آن A مساحت زمین بر حسب متر مربع، I کل انرژی حاصل از تشعشع خورشیدی که بر اساس عرض جغرافیای محل و بر حسب ژول بر متر مربع است. Alb

² Emergy Yield Ratio

³ Net EMergy

⁴ Ems

¹ Emergy

برای محاسبه انرژی الکتریسیته، ابتدا برق مصرفی کل در سال بر حسب کیلو وات ساعت تعیین شده و با ضرب در $3/6 \times 10^6$ به واحد ژول تبدیل شد. سپس مقدار به دست آمده در ضریب تبدیل خورشیدی الکتریسیته ضرب شد. ضریب تبدیل انرژی نیروی الکتریسیته معادل $2/31 \times 10^5$ امژول خورشیدی بر ژول در نظر گرفته شد (۴۱).

سرمایه‌گذاری و اندازه‌گیری بازایی انرژی در مدیریت پسماند

در این تحقیق از شاخص سرمایه‌گذاری انرژی به منظور تعیین هر گرم مواد زائد جامد برای محاسبه هزینه زیست‌محیطی تصفیه یک واحد (گرم) زباله جامد با توجه به فناوری تعیین شده چه مقدار است. اندازه‌گیری انرژی ذخیره شده با استفاده از انرژی‌های محاسبه شده تقسیم بر مقدار اولیه هر بخش محاسبه می‌شود (رابطه ۳). (۳۸)

$$\text{رابطه (۳)} \quad \text{انرژی ذخیره شده} = \frac{\text{انرژی محاسبه شده}}{\text{مقدار تولید شده}}$$

ترکیب این دو شاخص باعث ایجاد نسبت بازده انرژی (EYR)^۳ و شبکه انرژی^۴ (Ne) می‌شود. در محل دفن زباله مدیریت شده، منبع مورد استفاده انرژی ذخیره شده الکتریسیته است. برای یک زباله‌سوز منبع انرژی شامل برق و گرما است. در حالی که برای کمپوست، مجموع مشارکت‌های پتاس، فسفر و نیتروژن (N، P و K) می‌باشد. به این ترتیب، مشخص می‌شود که چگونه سرمایه‌گذاری در دفع پسماند می‌تواند راهی برای صرفه‌جویی در منابع دیگر باشد.

ارزیابی انرژی در استراتژی‌های جایگزین در محل دفن

با توجه به طول عمر کارخانه‌های کمپوست و روش سوزاندن به ترتیب ۱۰ و ۲۰ سال در نظر گرفته می‌شود (۴۲). هزینه‌های انرژی ساخت و ساز دفن زباله به هزینه‌های مواد و سایر هزینه‌های تجهیزات تقسیم شدند. در حالی که داده‌های هزینه‌های تجهیزات به صورت پولی و هزینه‌های تجهیزات بر حسب گرم محاسبه می‌شود. ارزش‌های پولی با استفاده از میانگین نسبت انرژی به پول $1/59 \times 10^{12}$ SeJ/€ به واحدهای انرژی تبدیل شدند (۴۳). تبدیل برق از کشوری به کشور دیگر بسیار متفاوت و به فرآیند تولید بستگی دارد. انرژی یک تابع حالت نیست (به نقطه شروع و پایان بستگی دارد). به منظور محاسبه انرژی یا بازیافت ماده از تقسیم کل محصول بر مقدار ضایعات تصفیه شده محاسبه گردید (رابطه ۴). بر اساس رابطه (۵) در جهت بازایی انرژی با ضرب انرژی در

ضریب آلبدو^۱ است که مقدار آن در این تحقیق $0/2$ فرض شد (۳۶). همچنین (Trs)، ضریب تبدیل انرژی تشعشع خورشیدی می‌باشد که معادل یک ام ژول خورشیدی بر ژول در نظر گرفته شد.

$$\text{رابطه (۱)} \quad Em_s = A \times I \times (1 - Alb) \times Tr_s \quad \text{انرژی آب}^2$$

انرژی آب که در آن، A مساحت زمین بر حسب متر مربع، p مقدار آب ورودی و بر حسب متر، d چگالی آب و برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ΔG انرژی آزاد گیبس آب و معادل ۴۷۴۰ ژول بر کیلوگرم در نظر گرفته شد. همچنین (Tr_r) ضریب تبدیل خورشیدی انرژی آب معادل ۳۶۱۰۰ امژول خورشیدی بر ژول است (۳۷). انرژی آب با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$\text{رابطه (۲)} \quad Em_r = A \times p \times d \times \Delta G \times Tr_r \quad \text{نیروی کارگری}$$

به منظور محاسبه انرژی نیروی کارگری تعداد کل ساعات کارگری در سال در $1/96$ ضرب شد. سپس با ضرب مقدار به دست آمده در ضریب تبدیل انرژی کارگری، مقدار انرژی نیروی کارگری تعیین شد. ضریب تبدیل خورشیدی انرژی کارگری معادل $7/38 \times 10^6$ ام ژول خورشیدی بر ژول در نظر گرفته شد (۳۸).

انرژی ماشین‌آلات

برای به دست آوردن انرژی ماشین‌آلات مورد استفاده، ابتدا مقدار وزن ماشین‌آلات به کار رفته بر حسب گرم در هکتار در هر یک از مناطق مورد مطالعه محاسبه و سپس در ضریب تبدیل خورشیدی آن ضرب شد. برای محاسبه انرژی ماشین‌آلات ضریب تبدیل خورشیدی، معادل $1/01 \times 10^{10}$ امژول خورشیدی بر گرم در نظر گرفته شد (۳۹).

انرژی سوخت فسیلی

در ابتدا کل سوخت مصرفی در یک سال برای هر هکتار تعیین و سپس با ضرب آن در محتوی انرژی سوخت (۵۶/۳۱ مگاژول بر لیتر) میزان انرژی سوخت مصرفی تعیین گردید. با ضرب مقدار به دست آمده در ضریب تبدیل انرژی سوخت‌های فسیلی مقدار انرژی تعیین شد. ضریب تبدیل خورشیدی سوخت‌های فسیلی معادل $8/6 \times 10^4$ ام ژول خورشیدی بر ژول است (۴۰).

انرژی الکتریسیته

³ Environmental Yield Ratio (EYR)

⁴ NET eMergy

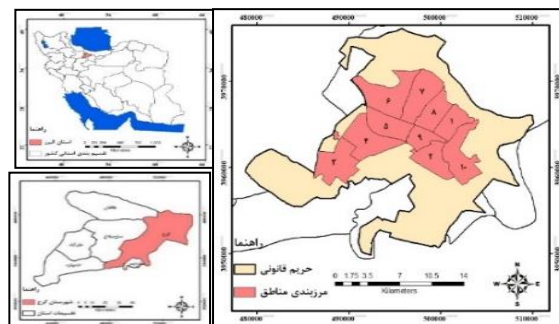
¹ Albedo

² Emr

ضریب تبدیل، مقدار بازیابی امرژی در هر روش محاسبه می گردد.

$$\text{رابطه (۴)} \quad \text{امرژی یا بازیابی مواد} = \frac{\text{کل پسماند تولید شده}}{\text{مقدار پسماندهای تصفیه شده}}$$

$$\text{رابطه (۵)} \quad \text{ضریب تبدیل} \times \text{امرژی} = \text{بازیابی امرژی}$$



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه

یافته‌ها

این پژوهش در پی آن است تا به ارزیابی امرژی در

جدول ۱. محاسبه میزان سرمایه‌گذاری امرژی در روش دفن بهداشتی

بخش	منابع	واحد	مقدار (Units/year)	ضریب تبدیل (sej/unit)	امرژی (sej/year)	امرژی ذخیره شده (sej/g MSW)	درصد امرژی ذخیره شده
جمع آوری پسماندها	جمع آوری پسماندها	g	۶/۶۰E+۱۱				
	کارگران	z	۱/۴۹E+۱۱	۷/۳۸E+۰۶	۱/۱۰E+۱۸	۱/۶۶E+۰۶	۰/۲۶
	سوخت	z	۱/۳۲E+۱۲	۶/۶۰E+۰۴	۸/۷۵E+۱۶	۱/۳۲E+۰۵	۰/۰۲
	ماشین‌آلات	g	۳/۵۲E+۰۷	۶/۷۰E+۰۹	۲/۳۷E+۱۷	۳/۱۸E+۰۵	۰/۰۶
	مصرف آب	g	۲/۲۶E+۱۰	۲/۰۳E+۰۵	۴/۵۹E+۱۵	۶/۹۵E+۰۳	۰/۰۰
تصفیه	جمع		۲/۱۶E+۱۲		۱/۴۲E+۱۸	۲/۱۲E+۰۶	۰/۳۳
	جمع آوری پسماندها	g	۵/۴۲E+۱۱				
	انواع پسماند جامد	g	۵/۱۹E+۱۱				
	پسماندهای تولیدی در RDF	g	۲/۴۴E+۱۱				
	پسماندها در دفن بهداشتی	g	۲/۴۶E+۱۲				
دفع	زائدات تولید شده از RDF	g	۲/۶۸E+۱۱	۳/۶۹E+۰۷	۹/۸۸E+۱۸	۴/۰۲E+۰۶	۰/۶۲
	هزینه‌های طرح	€	۴/۶۳E+۰۶	۱/۵۹E+۱۲	۷/۳۶E+۱۸	۲/۹۹E+۰۶	۰/۴۶
	مواد و زیرساخت‌ها	g	۲/۷۴E+۱۱	۱/۰۰E+۰۹	۲/۷۴E+۲۰	۱/۱۱E+۰۸	۱۷/۱۱
	کارگران و منابع انسانی	z	۴/۶۲E+۱۱	۷/۳۸E+۰۶	۳/۴۱E+۱۸	۱/۳۹E+۰۶	۰/۲۱
	مواد برای مدیریت بهداشتی	g	۲/۶۴E+۱۱	۱/۰۰E+۰۹	۲/۶۴E+۲۰	۱/۰۷E+۰۸	۱۶/۴۷
جمع	کامیون‌ها	g	۶/۰۱E+۱۰	۶/۷۰E+۰۹	۴/۰۳E+۲۰	۱/۶۴E+۰۸	۲۵/۱۷
	ماشین‌آلات	g	۶/۱۹E+۱۰	۶/۷۰E+۰۹	۴/۱۵E+۲۰	۱/۶۹E+۰۸	۲۵/۹۱
	سوخت	z	۲/۷۰E+۱۴	۶/۶۰E+۰۴	۱/۷۸E+۱۹	۷/۲۴E+۰۶	۱/۱۱
	برق	z	۱/۹۸E+۱۴	۱/۴۸E+۰۵	۲/۹۳E+۱۹	۱/۱۹E+۰۷	۱/۸۳
	جمع				۱/۴۲E+۲۱	۵/۷۹E+۰۸	۸۸/۸۹
سرمایه‌گذاری	جمع	g	۴/۴۲E+۱۱	۳/۸۰E+۰۸	۱/۶۸E+۲۰	۶/۸۴E+۰۷	۱۰/۵۰
	مواد شیمیایی	z	۲/۹۷E+۱۳	۱/۴۸E+۰۵	۴/۳۹E+۱۸	۱/۷۹E+۰۶	۰/۲۷
	برق				۱/۷۲E+۲۰	۷/۰۲E+۰۷	۱۰/۷۸
	جمع				۱/۶۰E+۲۱	۶/۵۱E+۰۸	۱۰۰/۰۰
	تولید برق				۵/۲۱		
سرمایه‌گذاری	مجموع امرژی خورشیدی				۱/۶۰E+۲۱		
	فاز ۱: جمع‌آوری				۲/۱۶E+۰۶		
	فاز ۲: تصفیه				۵/۷۹E+۰۸		

مرحله ۳: دفع	۷/۰۲E+۰۷
سرمایه‌گذاری امرژی	۶/۵۱E+۰۸

در رتبه دوم در سرمایه‌گذاری امرژی می‌باشد. امرژی در مرحله تصفیه ($1/72 E+20$ sej/g MSW) محاسبه شد. در مرحله جمع‌آوری ($1/23 E+07$ sej/g MSW) محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری امرژی در روش سوزاندن نسبت به روش دفن بهداشتی پسماندها کاهش یافته است ($4/61 E+08$ sej/g MSW).

نتایج ارائه شده در **جدول ۲** تجزیه و تحلیل زیاله‌سوزی نشان می‌دهد که بر خلاف نتایج در دفن بهداشتی پسماندها، بیشترین سرمایه‌گذاری امرژی روش سوزاندن پسماندها در مرحله تصفیه بیش از ۶۰٪ ($64/80$ درصد) می‌باشد. بعد از تصفیه پسماندها، مدیریت محل دفن پسماند ($28/21$ درصد)

جدول ۲. محاسبه سرمایه‌گذاری امرژی در روش سوزاندن

بخش	منبع	واحد	مقدار (Units/year)	ضریب تبدیل به امرژی (sej/unit)	امرژی (sej/year)	امرژی ذخیره شده (sej/g MSW)	درصد امرژی ذخیره شده
مدیریت پسماندها جمع‌آوری شده جامد	جمع‌آوری و تصفیه پسماند	g	۵/۷۴E+۱۱				
	منابع انسانی	z	۴/۳۲E+۱۱	۷/۳۸E+۰۶	۳/۱۹E+۱۸	۵/۵۶E+۰۶	۱/۲۱
	سوخت	z	۵/۸۰E+۱۳	۶/۶۰E+۰۴	۳/۸۳E+۱۸	۶/۶۷E+۰۶	۱/۴۵
	ماشین آلات	g	۱/۱۳E+۰۹	۶/۷۰E+۰۹	۷/۵۵E+۱۸	۱/۳۲E+۰۷	۲/۸۵
	جمع				۷/۰۲E+۱۸	۱/۲۲E+۰۷	۲/۶۵
	سوخت	z	۵/۰۲E+۱۳	۶/۶۰E+۰۴	۳/۳۲E+۱۸	۵/۷۸E+۰۶	۱/۲۵
	گاز طبیعی	z	۸/۷۸E+۱۲	۴/۸۰E+۰۴	۴/۲۱E+۱۷	۷/۳۴E+۰۵	۰/۱۶
تصفیه	برق	z	۲/۴۲E+۱۴	۱/۴۸E+۰۵	۳/۵۸E+۱۹	۶/۲۳E+۰۷	۱۳/۵۱
	منابع انسانی	z	۴/۸۶E+۱۱	۷/۳۸E+۰۶	۳/۵۹E+۱۸	۶/۲۵E+۰۶	۱/۳۵
	هزینه‌های طرح	€	۶/۳۷E+۰۷	۱/۵۹E+۱۲	۱/۰۱E+۲۰	۱/۷۶E+۰۸	۳۸/۲۵
	آب	g	۳/۳۱E+۱۲	۲/۰۳E+۰۵	۶/۷۱E+۱۷	۱/۱۷E+۰۶	۰/۲۵
	مواد شیمیایی	g	۶/۹۸E+۱۰	۳/۸۰E+۰۸	۲/۶۵E+۱۹	۴/۶۲E+۰۷	۱۰/۰۲
	جمع				۱/۷۲E+۲۰	۲/۹۹E+۰۸	۶۴/۸۰
	آب	g	۳/۷۴E+۱۰	۲/۰۳E+۰۵	۷/۵۹E+۱۵	۱/۳۲E+۰۴	۰/۰۰
دفع (تصفیه خاکستر)	برق	z	۵/۲۶E+۱۱	۱/۴۸E+۰۵	۷/۷۹E+۱۶	۱/۳۶E+۰۵	۰/۰۳
	مواد	g	۱/۱۴E+۱۰	۱/۰۰E+۰۹	۱/۱۴E+۱۹	۱/۹۸E+۰۷	۴/۳۰
	روان‌کننده‌ها	z	۱/۱۱E+۱۱	۶/۶۰E+۰۴	۷/۳۶E+۱۵	۱/۲۸E+۰۴	۰/۰۰
	جمع				۱/۵۱E+۰۷	۲/۰۰E+۰۷	۴/۳۴
	سوخت‌ها	z	۳/۳۷E+۱۲	۶/۶۰E+۰۴	۲/۲۲E+۱۷	۳/۸۷E+۰۵	۰/۰۸
	مواد	g	۱/۰۲E+۱۰	۱/۰۰E+۰۹	۱/۰۲E+۱۹	۱/۷۷E+۰۷	۳/۸۴
	هزینه‌های زیر ساخت	g	۲/۶۹E+۱۱	۲/۳۹E+۰۸	۶/۴۳E+۱۹	۱/۱۲E+۰۸	۲۴/۲۸
مدیریت (محل دفن)	جمع				۷/۴۷E+۱۹	۱/۳۰E+۰۸	۲۸/۲۱
	جمع کل				۲/۶۵E+۲۰	۴/۶۱E+۰۸	۱۰۰/۰۰
	کل امرژی خورشیدی				۲/۶۵E+۲۰		
	فاز ۱: جمع‌آوری پسماند				۱/۲۲E+۰۷		
	فاز ۲: تصفیه				۲/۹۹E+۰۸		
	فاز ۳: دفع				۲/۰۰E+۰۷		
	کل سرمایه‌گذاری امرژی				۴/۶۱E+۰۸		

محاسبه شده ($1/49 E+19$ sej) در مقایسه با روش دفن بهداشتی و سوزاندن کاهش یافته است. در مرحله جمع‌آوری ($2/32 E+07$ sej/g MSW)، حدود ۲۸/۸۱ درصد از کل سرمایه‌گذاری امرژی است. ورودی قابل توجه هزینه‌های شستشو و مصرف سوخت است.

بررسی نتایج **جدول ۳** نشان می‌دهد دفع پسماند ناشی از فرایند کمپوست بیشترین درصد امرژی را کسب کرده است ($39/72$ درصد). بعد از فرآیند دفع کمپوست تصفیه کمپوست سازی بالاترین میزان امرژی را به خود اختصاص داده است ($31/47$ درصد). هزینه مدیریت و هزینه اجرای طرح کمپوست بیشتر عامل اثرگذار در تصفیه کمپوست هستند. میزان امرژی

جدول ۳. محاسبه سرمایه‌گذاری انرژی در روش کمپوست شهر کرج

بخش	منبع	واحد	مقدار (Units/year)	ضریب تبدیل انرژی (sej/unit)	انرژی (sej/year)	انرژی ذخیره شده (sej/g MSW)	درصد انرژی ذخیره شده
مدیریت پسماندها	پسماندهای غذایی	g	۵/۴۸E+۱۰				
	ضایعات چوب	g	۳/۶۴E+۱۰				
	جمع		۱/۸۵E+۱۱				
جمع‌آوری پسماند	ظروف و انواع قوطی	g	۹/۵۳E+۰۷	۳/۰۰E+۰۹	۲/۸۶E+۱۷	۱/۵۵E+۰۶	۱/۹۲
	فولاد	g	۹/۴۸E+۰۷	۶/۷۰E+۰۹	۶/۳۵E+۱۷	۳/۴۴E+۰۶	۴/۲۷
	نیروی انسانی	j	۵/۰۹E+۱۰	۷/۳۸E+۰۶	۳/۷۶E+۱۷	۲/۰۳E+۰۶	۲/۵۲
	مصرف سوخت	j	۲/۵۵E+۱۳	۶/۶۰E+۰۴	۱/۶۸E+۱۸	۹/۱۰E+۰۶	۱۱/۳۰
	هزینه شستشو	€	۸/۲۴E+۰۵	۱/۵۹E+۱۲	۱/۳۱E+۱۸	۷/۰۹E+۰۶	۸/۸۰
	جمع				۴/۲۹E+۱۸	۲/۳۲E+۰۷	۲۸/۸۱
تصفیه (کمپوست)	برق	j	۲/۲۶E+۱۲	۱/۴۸E+۰۵	۳/۳۴E+۱۷	۱/۸۱E+۰۶	۲/۲۴
	سوخت	j	۳/۴۵E+۱۲	۶/۶۰E+۰۴	۲/۲۸E+۱۷	۱/۲۲E+۰۶	۱/۵۳
	اکسیژن مایع	g	۱/۱۹E+۰۸	۳/۸۰E+۰۸	۴/۵۲E+۱۶	۲/۴۴E+۰۵	۰/۳۰
	میکروارگانیزم‌ها	€	۱/۴۴E+۰۵	۱/۵۹E+۱۲	۲/۲۹E+۱۷	۱/۲۴E+۰۶	۱/۵۴
	منابع انسانی	j	۳/۴۷E+۱۰	۷/۳۸E+۰۶	۵۶/۲E+۱۷	۱/۳۹E+۰۶	۱/۷۲
	هزینه طرح	€	۸/۱۷E+۰۵	۱/۵۹E+۱۲	۱/۳۰E+۱۸	۷/۰۳E+۰۶	۸/۷۳
	ماشین‌آلات	€	۴/۲۹E+۰۵	۱/۵۹E+۱۲	۶/۸۲E+۱۷	۳/۶۹E+۰۶	۴/۵۸
	هزینه مدیریت	€	۱/۰۱E+۰۶	۱/۵۹E+۱۲	۱/۶۱E+۱۸	۸/۷۲E+۰۶	۱۰/۸۲
	جمع				۴/۶۸E+۱۸	۲/۵۴E+۰۷	۳۱/۴۷
دفع	تصفیه شیرابه	€	۳/۵۱E+۰۵	۱/۵۹E+۱۲	۵/۵۸E+۱۷	۳/۰۲E+۰۶	۳/۷۵
	پسماندهای دفن شده	g	۱/۰۷E+۱۰	۴/۹۹E+۰۸	۵/۳۵E+۱۸	۲/۹۰E+۰۷	۳۵/۹۷
	جمع				۵/۹۱E+۱۸	۳/۲۰E+۰۷	۳۹/۷۲
جمع کل					۱/۴۹E+۱۹	۸/۰۶E+۰۷	۱۰۰/۰۰
سرمایه‌گذاری	تولید کمپوست		۴/۳۵E+۱۰				
	کل انرژی خورشیدی		۱/۴۹E+۱۹				
	فاز ۱: جمع‌آوری پسماند		۲/۳۲E+۰۷				
	فاز ۲: تصفیه		۲/۵۴E+۰۷				
	مرحله ۳: دفع		۳/۲۰E+۰۷				
سرمایه‌گذاری انرژی			۸/۰۶E+۰۷				

هستند که نقش مهمی در تأمین انرژی موردنیاز ماشین‌آلات و تجهیزات دارند. صرف بالای سوخت‌های فسیلی باعث افزایش انرژی ورودی به سیستم می‌شود، زیرا این سوخت‌ها دارای انرژی ذخیره‌شده بالایی هستند؛ که در طول میلیون‌ها سال از انرژی خورشیدی تشکیل شده‌اند. سرمایه‌گذاری انرژی در روش‌های مختلف مدیریت پسماند، مانند دفن زباله، بازیافت، سوزاندن و تولید انرژی از زباله، به میزان مصرف سوخت‌های فسیلی وابسته است. نتایج مقایسه تأثیر سوخت‌های فسیلی و نیروی انسانی در ارزیابی انرژی شهرکرج نشان می‌دهد که سوخت‌های فسیلی تأثیر بیشتری نسبت به نیروی انسانی دارند. این موضوع به چند دلیل اتفاق می‌افتد

نتایج ارائه شده در **جدول ۴** نشان می‌دهد میزان مصرف سوخت‌های فسیلی تأثیر بیشتری بر سرمایه‌گذاری انرژی در روش‌های مختلف مدیریت پسماند دارد. در واقع در ارزیابی انرژی بر شاخص‌های نسبت بازده زیست‌محیطی و انرژی خالص در پسماندهای شهر کرج (سوخت‌های فسیلی بیشتر از نیروی انسانی اثر دارد. استفاده از سوخت‌های با کیفیت در سرمایه‌گذاری انرژی نقش به‌سزایی دارد. محاسبه نیروی کار و ماشین‌آلات در ارزیابی انرژی بسیار مهم است، زیرا این عوامل تأثیر مستقیمی بر شاخص‌های نسبت بازده زیست‌محیطی و انرژی خالص دارند. در فرآیندهای مدیریت پسماندهای شهری، انرژی مورد نیاز برای حمل‌ونقل، پردازش، بازیافت و دفع زباله‌ها عمدتاً از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود. این سوخت‌ها شامل بنزین، گازوئیل، گاز طبیعی و زغال‌سنگ

✓ کیفیت سوخت‌های مصرفی نیز بر سرمایه‌گذاری انرژی تأثیر دارد؛ سوخت‌های باکیفیت‌تر دارای بازده انرژی بالاتر هستند و باعث کاهش اتلاف انرژی در فرآیندهای مدیریت پسماند می‌شوند.

✓ نیروی انسانی به‌طور مستقیم انرژی زیادی مصرف نمی‌کند، بلکه بیشتر در فرآیندهای مدیریتی، نظارتی و اجرایی نقش دارد.

✓ سوخت‌های فسیلی به‌عنوان منبع اصلی انرژی برای ماشین‌آلات و حمل‌ونقل زباله‌ها استفاده می‌شوند، بنابراین سهم بیشتری در انرژی ورودی دارند.

جدول ۴. محاسبه نیروی کار و ماشین‌آلات بر حسب ژول

منابع	مقدار	ضریب تبدیل انرژی	میزان انرژی (MJ/ha)	میزان انرژی (J/ha)	
نیروی انسانی (ساعت)	۷/۵۸E+۰۴	۱/۹۶E+۰۰	۱/۴۹E+۰۵	۱/۴۹E+۱۱	
سوخت فسیلی (لیتر)	۳۴۹۰۷/۶۳	۳۸	۱/۳۳E+۰۶	۱/۳۳E+۱۲	
گاری دستی	وانت نیسان	کامیون روباز	خاور روباز	کامیون مکانیزه	انرژی ماشین آلات
۸۵	۴۵	۱۲	۱۵	۲۵	۳/۱۳E+۰۷
۲۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۱۹۰۰۰۰۰	۳۸۰۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰۰۰	۵/۶۹E+۰۸

جدول ۵ (۱) در دفن بهداشتی (E+۰۸) ۴/۶۱ (sej/g MSW) (جدول ۲)، در روش زباله‌سوز و در (E+۰۷ ۸/۰۶ sej/g MSW) (جدول ۳) در کمپوست محاسبه شده است. مطابق با نتایج نهایی ارائه شده در جدول (۵) کمترین میزان بازایافت انرژی در روش کمپوست (E+۰۸) ۳/۹۷ (sej/g) و بیشترین مقدار بازایافت انرژی در روش دفن بهداشتی پسماندها در شهر کرج است.

جدول ۵ نتایج بازایافت انرژی در روش‌های کمپوست، دفن بهداشتی و زباله‌سوز شهر کرج در ارائه شده است. با این فرض که در سیستم دفن زباله به‌طور میانگین هر تن زباله ۳۵۰ کیلو وات در ساعت برق تولید می‌کند. همچنین با این فرض که هر تن زباله سوزاندن ۲۴۰ کیلووات انرژی الکتریسیته و ۸۰۰۰ مگا ژول انرژی گرمایی تولید می‌کند تحلیل بازایافت انرژی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد کل سرمایه‌گذاری انرژی به‌ازای هر گرم پسماند جمع‌آوری‌شده (E+۰۸)

جدول ۵. نتایج نهایی بازایافت انرژی خالص و عملکرد بازده زیست‌محیطی

روش	تولید شده	واحد	بازایافت انرژی یا ماده	واحد	ضریب تبدیل	بازایافت انرژی	واحد
کمپوست	۷/۲۶E+۰۹	g	۰/۰۳۹۳۰۷	g/g MSW	۳/۹۷E+۰۸	sej/g	۱
N(۱/۳۲)	۷/۷۱E+۰۷	g	۰/۰۰۰۴۲۳	g/g MSW	۴/۶۲E+۰۹		
P(۰/۱۸۸)	۵/۵۴E+۰۷	g	۰/۰۰۰۳۰۰	g/g MSW	۱/۷۸E+۱۰		
K(۱/۱۵)	۶/۶۴E+۰۷	g	۰/۰۰۰۳۷۶	g/g MSW	۱/۷۴E+۰۹		
پسماندهای باقی‌مانده	۵/۱۹E+۰۹	g	۰/۰۲۸۰۹۶	g/g MSW	۱/۰۰E+۰۹		
دفن بهداشتی	۱/۲۰E+۱۳	J ^{el}	۴/۸۸۱۹۱۰	J/g MSW	۱/۴۸E+۰۵	۷/۲۳E+۰۵	sej/g
سوزاندن	۹/۵۸E+۱۳	J ^{el}	۱۶۶/۹۱۰۰۴۲	J/g MSW	۱/۴۸E+۰۵	۵/۵۹E+۰۸	sej/g
	۹/۶۴E+۱۴	J ^{therm.} (methane)	۱۶۷۹/۵۵۴۰۷۲	J/g MSW	۴/۸۰E+۰۴		

بررسی نهایی شاخص‌های عملکرد بازده زیست‌محیطی و انرژی خالص در پسماندهای شهری

روش دفع	عملکرد بازده زیست‌محیطی (EYR)	انرژی خالص
کمپوست	۴/۹۳	۳/۱۶E+۰۸
دفن بهداشتی زباله	۰/۰۰۰	-۶/۵۰E+۰۸
سوزاندن	۱/۲۱	۹/۷۹E+۰۷

(EYR) در روش کمپوست‌سازی (۴/۹۳) است، بنابراین این نوع تصفیه پسماند از نظر انرژی به‌صرفه هستند.

نتایج عملکرد بازده زیست‌محیطی به انرژی خالص شهر کرج نشان می‌دهد. بهترین و مناسب‌ترین بازده زیست‌محیطی

نامناسب‌ترین عملکرد بازده زیست‌محیطی در روش دفن بهداشتی (۰/۰۰۰) است. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد بیشترین امرژی خالص ($3/16E+08$) در روش تولید کمپوست است. در واقع عملکرد بازده زیست‌محیطی با میزان امرژی خالص رابطه همبستگی دارند. در روش کمپوست با توجه به بازیافت مواد مغذی مانند نیتروژن (N)، فسفر (P)، و پتاسیم (K) که برای حاصلخیزی خاک مفید هستند دارای بالاترین بازده زیست‌محیطی هستند. بازده زیست‌محیطی بالا در روش کمپوست ($4/93E+08$)=عملکرد بازده زیست‌محیطی)، نشان‌دهنده‌ی پایداری بیشتر این روش نسبت به سایر روش‌ها است. روش کمپوست امرژی خالص مثبت ($3/16 E+08$) به‌دست آمد، این بدان معناست که این روش انرژی بیشتری نسبت به انرژی مصرف‌شده تولید می‌کند. در روش دفن پسماندهای شهری بازده زیست‌محیطی (۰/۰۰۰) محاسبه شد، در واقع این روش مزیت زیست‌محیطی ندارد. امرژی خالص منفی ($6/50 E+08$) محاسبه شد نتایج نشان داد این روش انرژی بیشتری نسبت به انرژی تولیدشده مصرف می‌کند. در روش دفن بهداشتی آلودگی زیست‌محیطی بالاتری به‌دلیل تولید شیرابه و گازهای گلخانه‌ای تولید می‌شود. در روش سوزاندن کاهش حجم زباله‌ها و تولید انرژی از طریق احتراق انجام می‌گردد. در این روش بازده زیست‌محیطی بالاتر از دفن بهداشتی (۱/۲۱) است.

بحث

هدف این تحقیق بررسی و ارزیابی امرژی در شاخص‌های عملکرد بازده زیست‌محیطی و امرژی خالص در پسماندهای شهری کرج در جهت انتخاب مناسب‌ترین سرمایه‌گذاری امرژی انجام شده است. این مطالعه به بررسی و مقایسه‌ی از سه سیستم مدیریت پسماندهای شهری شامل دفن زباله بهداشتی، سیستم سوزاندن و تولید کمپوست پرداخته شده است. به‌طور کلی اکوسیستم‌های شهری به‌عنوان ابرارگانیسم‌ها، هتروتروف و خودتنظیم‌شونده هستند و ظاهراً به نفع انسان‌ها و برای حفظ معیشت ساخته شده‌اند.

کمپوست بهترین گزینه از نظر پایداری زیست‌محیطی و امرژی خالص مثبت است. دفن بهداشتی نامناسب‌ترین روش در این بررسی شناخته شد، چون امرژی خالص محاسبه شده، منفی است. در روش دفن بهداشتی آلودگی زیادی ایجاد می‌کند. روش سوزاندن نسبت به دفن بهداشتی مناسب‌تر است اما این روش باعث تولید آلاینده‌های هوا می‌شود و نیاز به مدیریت دقیق‌تری دارد.

در ارزیابی امرژی در مدیریت پسماند شهری، چندین چالش و خطا ممکن است بر دقت نتایج تأثیر بگذارند. این خطاها می‌توانند ناشی از محدودیت‌های داده‌ها، فرضیات مدل، روش‌های محاسباتی، و عوامل محیطی باشند. عدم دقت در اندازه‌گیری مقادیر پسماند و داده‌های مربوط به میزان تولید، ترکیب مواد، و نرخ بازیافت ممکن است دارای خطاهای آماری باشند که این امر بر روی نتایج خروجی اثرگذار است. تفاوت در منابع داده‌ای و اطلاعات مربوط به مصرف انرژی، ضریب تبدیل، و امرژی ورودی ممکن است از منابع مختلف جمع‌آوری شده باشند، باعث ناسازگاری در نتایج می‌شود. در مدل‌های ارزیابی امرژی، برخی فرآیندهای پیچیده مانند واکنش‌های شیمیایی در کمپوست، تأثیرات زیست‌محیطی دفن زباله، و کارایی احتراق در روش‌های مختلف سوزاندن ممکن است بیش از حد ساده‌سازی شوند. یکی از خطاهای این بررسی عدم در نظر گرفتن تغییرات زمانی است. برخی پارامترهای امرژی مانند کیفیت سوخت، نرخ بازیافت، و تأثیرات زیست‌محیطی ممکن است در طول زمان تغییر کنند، اما مدل‌های ارزیابی معمولاً به‌صورت ایستا هستند و این تغییرات را در نظر گرفته نمی‌شوند. از دیگر خطاهای این مطالعه عدم لحاظ تأثیرات اجتماعی و اقتصادی است. مدل‌های امرژی معمولاً بر انرژی و محیط‌زیست تمرکز دارند و عوامل اجتماعی و اقتصادی مانند هزینه‌های مدیریت پسماند، سیاست‌های دولتی، و رفتار مصرف‌کنندگان را کمتر در نظر می‌گیرند.

شهرها بدون حفظ پیوندهای پایدار با محیط خود، برای به‌دست آوردن امرژی، غذا و مواد و رهاسازی پسماندها نمی‌توانند خودتنظیم شوند. در این پژوهش، ساختار مورد بررسی در ارزیابی امرژی در شاخص‌های عملکرد بازده زیست‌محیطی، امرژی خالص، روش‌های بازیافت، کمپوست و روش دفن بهداشتی بر اساس مطالعات مشابه لیو و همکاران، (۲۸)؛ لیو و همکاران (۲۷)؛ مارچتینی و همکاران (۳۸) انجام شده است. در این تحقیق مشخص شد که تأثیر سوخت‌های فسیلی بالاتر از نیروی انسانی است این نتیجه با نتایج ژانگ و همکاران (۴۴) مبنی بر استفاده از ورودی‌های انرژی پاک، بارهای سیستم‌های صنعتی را کاهش می‌دهند، همسو و هماهنگ است. ورودی‌های انرژی پاک، بارهای سیستم فولاد را کاهش می‌دهند و مقادیر انرژی واحدها را حدود ۲ درصد کاهش می‌دهند.

ارزیابی امرژی در شاخص‌های عملکرد بازدهی زیست‌محیطی، کلیدهای دستیابی کارآمد، اقتصادی مناسب، تطابق صحیح

محیطی و نقش‌های انسانی در فعالیت‌های انسانی ارائه دهد. هم‌چنین این ارزیابی می‌تواند تفاوت‌های کیفی را در انواع مختلف ورودی در واحدهای مختلف پسماند را اندازه‌گیری کند. این نتایج با یافته‌های پان و همکاران (۵۱) مطابقت دارد. نسبت مواد زائد به مواد قابل تجدیدپذیر در کلان‌شهر کرج منعکس‌کننده فشار ناشی از محیط است، نتایج نشان‌دهنده پتانسیل محدود محیط برای مقابله با مواد زائد است. بنابراین در کلان‌شهر کرج محیط، پتانسیل محدودی برای مقابله با مواد زائد دارد. انتشار پسماند یک بخش اجتناب‌ناپذیر است که همراه با روند گردش منابع است، بنابراین نسبت مواد زائد به کل استفاده آمروزی تا حدی منعکس‌کننده بهره‌وری از منابع است. هر چه این نسبت بیشتر باشد، استرس روی محیط بیشتر می‌شود. بنابراین باعث کاهش بازده زیست‌محیطی و آمروزی خالص می‌شوند. برای مقابله با چالش‌های پیچیده ناشی از مدیریت پسماندهای جامد، فن‌آوری‌های جدید و به‌روز در تصفیه ضروری است. پیشنهاد می‌گردد از روش پیرولیز پلاسما یکی از فناوری‌های پیشرفته تصفیه حرارتی است استفاده گردد. از این روش پلاسما با دمای بالا برای تجزیه‌ی مواد آلی در پسماندها می‌توان استفاده کرد. در دمای بیش از ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، پیرولیز پلاسما به‌طور موثر ترکیبات آلی پیچیده را به مولکول‌های ساده‌تر تجزیه می‌کند. بر خلاف سوزاندن و تبدیل به گاز معمولی، تجزیه در اثر حرارت پلاسما انتشار گازهای گلخانه‌ای مضر را به حداقل می‌رساند و امکان تصفیه‌ی موثر اجزای زباله‌ها را فراهم می‌کند.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه بیان می‌شود کمپوست‌سازی کمترین استفاده از منابع به‌ازای هر گرم زباله را در مقایسه با روش سوزاندن و دفن زباله بهداشتی را دارد. هم‌چنین زباله‌سوز و کمپوست در بازیابی آمروزی از روش دفن بهداشتی بسیار کارآمدتر هستند. پسماندهای شهری که محصول جانبی فعالیت‌های روزمره انسانی است تهدیدی جدی برای محیط‌زیست است. دلایل این وضعیت را باید عمدتاً در جمعیت‌شناسی شهر کرج جستجو کرد، زیرا رشد جمعیت در این شهر به‌معنای افزایش تقاضا برای مواد غذایی است که مصرف آن باعث تولید مقدار زیادی زباله‌ی شهری می‌شود. هم‌چنین بی‌اهمیت نیست که جهان در حال تبدیل شدن به مکانی به‌طور فزاینده‌ی شهری است، در حالی‌که استاندارد بالای زندگی در کشورهای ثروتمند و مصرف بیش از حد در بازارهای نوظهور تقاضای ثابت و لجام گسیخته برای کالاهای

عرضه و تقاضا در بررسی جامع سیستم‌های انرژی یکپارچه هستند (۴۵). بنابراین، یک مدل مشترک اقتصادی، زیست‌محیطی توسعه می‌یابد و تئوری آمروزی برای ارزیابی سرمایه‌گذاری سیستم‌های مدیریت پسماند معرفی می‌شود. بر اساس مطالعه‌ی هان و همکاران (۴۵) کارایی اقتصادی، زیست محیطی با عملکرد سیستم توسط آمروزی خورشیدی ارزیابی می‌شود. نتایج مطالعه‌ی هان و همکاران با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

این مطالعه نشان می‌دهد که بالاترین مقدار آمروزی در مرحله‌ی تصفیه مربوط به روش دفن بهداشتی است ($1/42 + E21$ sej/year)، در حالی‌که کمترین مقدار آمروزی در همین مرحله به‌روش کمپوست اختصاص دارد ($4/68 + E18$ sej/year). اگر روش‌های پردازش و تصفیه پسماند به‌درستی انتخاب و مدیریت شوند، میزان سرمایه‌گذاری آمروزی در مرحله‌ی تصفیه کاهش می‌یابد. برای دستیابی به مدیریت پایدار پسماند، باید تعادل مناسبی میان منافع اقتصادی، هزینه‌های زیست‌محیطی و پذیرش اجتماعی برقرار شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که براساس درصدهای آمروزی و میزان آمروزی ذخیره‌شده، روش کمپوست کمترین میزان ذخیره آمروزی را دارد ($2/54 + E07$ sej/year)، در حالی‌که دفن بهداشتی و سوزاندن پسماند میزان بالاتری را نشان می‌دهند. اتخاذ مدل اقتصاد دایره‌ای می‌تواند استفاده مجدد از مواد زائد، حفظ منابع حیاتی و سوخت‌های تجدیدناپذیر را تسهیل کند و هم‌زمان اثرات زیست‌محیطی را در سراسر چرخه حیات کاهش دهد (۴۶، ۴۷، ۴۸). برای انتخاب فناوری مناسب در مدیریت پسماند، توازن جرم، مصرف انرژی و هزینه از اطلاعات اولیه ضروری محسوب می‌شوند (۴۹، ۵۰). در این مطالعه مشخص شد که در روش کمپوست، بیشترین ورودی در بخش جمع‌آوری پسماندهای شهری مربوط به مصرف سوخت و هزینه‌های شستشو است، نتیجه‌ای که با یافته‌های مارچتینی و همکاران (۳۸) هم‌خوانی دارد.

بررسی هزینه‌های طرح نشان می‌دهد که در روش سوزاندن، بخش تصفیه ($38/25$ ٪)، در روش کمپوست، مرحله دفن پسماند ($35/98$ ٪) و در روش دفن بهداشتی، ماشین‌آلات بخش تصفیه ($25/91$ ٪) بیشترین سهم ذخیره آمروزی را دارند. این تحقیق تأکید می‌کند. ارزیابی آمروزی در شاخص‌های عملکرد بازده زیست‌محیطی و آمروزی خالص می‌تواند اطلاعات تصمیم‌گیری کافی و کامل‌تری را با در نظر گرفتن سهم

امرزی و در پسماندهای جامد شهری (مطالعه موردی: شهر کرج) در سال ۱۴۰۳ است که با کد رهگیری ۱۶۲۹۴۹۷۸۳ انجام شده است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که در رابطه با انتشار مقاله‌ی ارائه شده به‌طور کامل از اخلاق نشر، ازجمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافعی تجاری در این راستا وجود ندارد.

حمایت مالی: نویسندگان این مقاله اعلام می‌کنند که هیچگونه حمایت مالی دریافت ننموده‌اند.

ملاحظات اخلاقی: نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هر گونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

سهم نویسندگان: غزل مهری: آنالیز معیارهای مورد بررسی، نگارش پیش‌نویس مقاله. سید مسعود منوری ارزیابی و نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله. شهرام بیک پور تعیین و بررسی معیارهای مورد بررسی، تحلیل بازده زیست‌محیطی، نگارش نهایی مقاله.

بیشتر و بیشتر را ایجاد می‌کند. در تمام این موارد، مدیریت نادرست پسماند به هدر رفت و تخلیه‌ی مواد اولیه و در نتیجه زیان‌های اقتصادی کمک می‌کند. استفاده از محیط طبیعی به‌عنوان خروجی زباله منجر به تخریب و آلودگی محیط‌زیست، تغییرات اقلیمی و آلودگی هوا می‌شود که همگی بر اکوسیستم‌ها و گونه‌های متعدد تأثیر مستقیم دارند. اثرات منفی مدیریت نادرست پسماند به‌ویژه با توجه به مواد اولیه، انرژی و عوامل محیطی در پیش‌زمینه قرار می‌گیرد. در آخر پیشنهاد می‌گردد در جمع‌آوری از داده‌های دقیق‌تر و استاندارد شده استفاده گردد تا خطاها کاهش یابند. در تحقیقات آتی استفاده از مدل‌های پویا که بتوانند تغییرات زمانی و تأثیرات اجتماعی- اقتصادی را ارزیابی امرزی در شاخص‌های عملکرد بازدهی زیست‌محیطی لحاظ کنند، پیشنهاد می‌گردد. تحلیل حساسیت برای بررسی تأثیر تغییرات در ضرایب تبدیل و کاهش خطاهای عددی، در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد.

تشکر و قدردانی: بدین‌وسیله از شهرداری شهر کرج، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در جهت جمع‌آوری داده‌ها و با مساعدت‌ها و دقت علمی خویش راهگشای مراحل مختلف این پژوهش بودند تشکر و قدردانی می‌شود. این LCA مقاله بخشی از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد با عنوان ارزیابی

References

1. UN. World Population Prospects. Retrieved 10.10.2020 from [https:// population. un. org/ wpp/ Publications/ Files/WPP2019_Highlights.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf).
2. Gwarda K. Analysis of Selected Problems of the Modern World in the Context of Municipal Waste Management. Economic and Social Development: Book of Proceedings. 2020; 11:143-50.
3. Taweessan A, Kanabkaew T, Surinkul N, Polprasert C. Integrating clustering algorithms and machine learning to optimize regional snapshot municipal solid waste management for achieving sustainable development goals. Environmental Advances. 2025; 1; 19:100607. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100607>
4. Wani MD, Dada ZA, Shah SA. What factors influence consumers' intention and food waste reduction perceptions in Indian restaurants? British Food Journal. 2025; 14; 127(2):569-87. <https://doi.org/10.1108/BFJ-07-2024-0710>
5. Ogundipe FO, Jimoh OD. Life cycle assessment of municipal solid waste management in Minna, Niger State, Nigeria. International Journal of Environmental Research. 2015; 1; 9 (4): 1305-14. [10.22059/ijer.2015.1022](https://doi.org/10.22059/ijer.2015.1022)
6. Esmaeilian B, Wang B, Lewis K, Duarte F, Ratti C, Behdad S. The future of waste management in smart and sustainable cities: A review and concept paper. Waste management. 2018; 1; 81:177-95. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.047> PMID: 30527034
7. Etim E, Choedron KT, Ajai O. Municipal solid waste management in Lagos State: Expansion diffusion of awareness. Waste Management. 2024; 15; 190:261-72. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.09.032> PMID: 39362020
8. Ye Z, Yang J, Zhong N, Tu X, Jia J, Wang J. Tackling environmental challenges in pollution controls using artificial intelligence:

A review. *Science of the Total Environment*. 2020; 10; 699: 134279.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134279> PMID: 33736193

9. De Bercegol R, Cavé J, Nguyen Thai Huyen A. Waste municipal service and informal recycling sector in fast-growing Asian cities: Co-existence, opposition or integration? *Resources*. 2017; 11; 6 (4):70.

<https://doi.org/10.3390/resources6040070>

10. Taweessan A, Koottatep T, Polprasert C. Effective measures for municipal solid waste management for cities in some Asian Countries. *Exposure and Health*. 2017; 9:125-33. <https://doi.org/10.1007/s12403-016-0227-5>

11. Zhang Z, Chen Z, Zhang J, Liu Y, Chen L, Yang M, Osman AI, Farghali M, Liu E, Hassan D, Ihara I. Municipal solid waste management challenges in developing regions: A comprehensive review and future perspectives for Asia and Africa. *Science of the Total Environment*. 2024; 25:172794.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172794> PMID: 38677421.

12. Guo HN, Wu SB, Tian YJ, Zhang J, Liu HT. Application of machine learning methods for the prediction of organic solid waste treatment and recycling processes: A review. *Bioresource technology*. 2021; 1; 319:124114.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124114> PMID: 32942236

13. Kumari T, Raghubanshi AS. Waste management practices in the developing nations: challenges and opportunities. *Waste Management and Resource Recycling in the Developing World*. 2023; 1:773-97.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90463-6.00017-8> PMID:37881551

PMCID:PMC10593884

14. Harfadli MM, Ramadan BS, Rachman I, Matsumoto T. Challenges and characteristics of the informal waste sector in developing countries: an overview. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2024; 26 (3):1294-309. <https://doi.org/10.1007/s10163-024-01929-3>

15. Ameen M, Anwar-Ul-Haq M, Sohail MI, Akmal F, Siddiqui A. Mismanagement of Waste in Developing Countries. In *Waste Problems and Management in Developing*

Countries 2023; (pp. 31-72). Apple Academic Press.

<https://doi.org/10.1201/9781003283621-3>

16. Noor T, Javid A, Hussain A, Bukhari SM, Ali W, Akmal M, Hussain SM. Types, sources and management of urban wastes. *In Urban ecology* 2020; 1 (pp. 239-263). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820730-7.00014-8>

17. Roy H, Islam MR, Tasnim N, Roy BN, Islam MS. Opportunities and Challenges for Establishing Sustainable Waste Management. *Trash or Treasure: Entrepreneurial Opportunities in Waste Management*. 2024; 27:79-123. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55131-4_4 PMID: PMC11627306

18. Zurbrugg C, Caniato M, Vaccari M. How assessment methods can support solid waste management in developing countries-a critical review. *Sustainability*. 2014; 27;6 (2):545-70.

<https://doi.org/10.3390/su6020545>

19. Nakamura S, Kondo Y. Input-output analysis of waste management. *Journal of industrial ecology*. 2002; 6 (1): 39-63.

<https://doi.org/10.1162/108819802320971632>

20. Ghinea C, Petraru M, Bressers HT, Gavrilescu M. Environmental evaluation of waste management scenarios-significance of the boundaries. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2012; 1; 20(1):76-85.

<https://doi.org/10.3846/16486897.2011.644665>

21. Yadav P, Samadder SR. Life cycle assessment of solid waste management options: A Review. *Recent research in Science and Technology*. 2014; 4; 6(1).

22. Brancoli P, Bolton K. Life cycle assessment of waste management systems. *In Sustainable resource recovery and zero waste approaches* 2019; 1 (pp. 23-33).

Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64200-4.00002-5>

23. Yang H, Chen L, Yan Z, Wang H. Emergy analysis of cassava-based fuel ethanol in China. *Biomass and Bioenergy*. 2011; 1;35(1):581-9.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.10.027>

24. Ali M, Marvuglia A, Geng Y, Chaudhry N, Khokhar S. Emergy based carbon footprinting of household solid waste

management scenarios in Pakistan. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018; 1;131:283-96.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.011>

25. Üstün Odabaşı S, Laratte B. Life cycle assessment of municipal solid waste management in Samsun, Turkey: different scenarios with emphasis on energy and material recovery. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2024; 26(5):2814-29. <https://doi.org/10.1007/s10163-024-02004-7>

26. Wang Z, Lv J, Gu F, Yang J, Guo J. Environmental and economic performance of an integrated municipal solid waste treatment: A Chinese case study. *Science of the Total Environment*. 2020; 20;709: 136096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136096> PMID: 31887493

27. Liu G, Yang Z, Chen B, Zhang Y, Su M, Zhang L. Emergy evaluation of the urban solid waste handling in liaoning province, China. *Energies*. 2013; 22; 6(10):5486-506. <https://doi.org/10.3390/en6105486>

28. Liu G, Hao Y, Dong L, Yang Z, Zhang Y, Ulgiati S. An emergy-LCA analysis of municipal solid waste management. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017; 1; 120:131-43. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.003>

29. Ashraf AI, Mohareb E, Vahdati M. Life cycle cost (LCC) for waste to compost process: Evaluation of life cycle cost for the comparison of decentralized waste to compost and landfill facility in Dhaka North City Corporation (DNCC).2025; 1-15. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4191665/v1>.

30. Jiang Y, Leng B, Xi J. Assessing the social cost of municipal solid waste management in Beijing: A systematic life cycle analysis. *Waste Management*. 2024; 1; 173:62-74. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.11.004> PMID: 37972515

31. Brown MT, Ulgiati S. Emergy, transformity and ecosystem health. *Handbook of ecological indicators for assessment of ecosystem health*. 2004. <https://doi.org/10.1201/9780203490181.ch14>

32. Tan ST, Ho WS, Hashim H, Lee CT, Taib MR, Ho CS. Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia. *Energy Conversion and Management*. 2015; 15; 102:111-20.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.010>

33. Odum HT, Accounting E. Emergy and environmental decision making. *Environmental accounting*. 1996.

34. Winfrey BK, Tilley DR. An emergy-based treatment sustainability index for evaluating waste treatment systems. *Journal of cleaner production*. 2016; 20; 112:4485-96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.074>

35. Naghibzadeh SSH, Moeinaddini M, Zafarani M. Comprehensive economic evaluation of municipal waste management and its sensitivity analysis: a case study in Karaj. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2023; 16(3):593-606

36. Ghaley BB, Kehli N, Mentler A. Emergy synthesis of conventional fodder maize (*Zea mays* L.) production in Denmark. *Ecological Indicators*. 2018; 1; 87:144-51. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.027>

37. Houshyar E, Wu XF, Chen GQ. Sustainability of wheat and maize production in the warm climate of southwestern Iran: An emergy analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 20; 172:2246-55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.187>

38. Marchettini N, Ridolfi R, Rustici M. An environmental analysis for comparing waste management options and strategies. *Waste Management*. 2007; 1; 27(4):562-71. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.04.007> PMID: 16765586

39. Campbell DE, Brandt-Williams SL, Meisch ME. Environmental accounting using emergy: Evaluation of the state of West Virginia. Narragansett, RI, USA: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Health and Environmental Effects Research Laboratory, Atlantic Ecology Division; 2005. P. 1-130.

40. Bastianoni S, Campbell DE, Ridolfi R, Pulselli FM. The solar transformity of

petroleum fuels. *Ecological modelling*. 2009; 10; 220(1):40-50.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.09.003>

41. Asgharipour MR, Mondani F, Riahinia S. Energy use efficiency and economic analysis of sugar beet production system in Iran: A case study in Khorasan Razavi province. *Energy*. 2012; 1; 44(1):1078-84.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.023>

42. Di Maria F, Micale C. Life cycle analysis of incineration compared to anaerobic digestion followed by composting for managing organic waste: the influence of system components for an Italian district. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2015; 20:377-88.
<https://doi.org/10.1007/s11367-014-0833-z>

43. Riva A, Tiezzi E. I rifiuti come risorsa sostenibile. *Gea Speciale*, Rimini, Italy. 1997:11-8.

44. Zhang J, Asutosh AT. LCA-emergy and carbon footprint analysis in a steel industry reporting system: A case study of a Chinese steel company. *Science of the Total Environment*. 2025; 1; 958:177901.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177901> PMID: 39675282

45. Han J, Han K, Wang Y, Han Y, Ye Z, Lin J. Multi-objective planning and sustainability assessment for integrated energy systems combining ORC and multi-energy storage: 4E (economic, environmental, exergy and emergy) analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2025; 1; 65:105674.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105674>

46. Kalmykova, Y.; Sadagopan, M.; Rosado, L. Circular economy from review of theories and practices to development of

implementation tools. *Resour. Conserv. Recycl.* 2018; 135, 190-201.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>

47. Grzesik, K.; Kossakowska, K.; Bieda, B.; Kozakiewicz, R. Screening Life Cycle Assessment of beneficiation processes for Rare Earth Elements recovery from secondary sources. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2019; 214, 012068.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012068>

48. Sondh, S.; Upadhyay, D.S.; Patel, S.; Patel, R.N. Strategic approach towards sustainability by promoting circular economy-based municipal solid waste management system A review. *Sustain. Chem. Pharm.* 2024; 37, 101337
<https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101337>

49. Tomić, T.; Schneider, D.R. Circular economy in waste management Socio-economic effect of changes in waste management system structure. *J. Environ. Manag.* 2020; 267, 110564.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110564> PMID: 32421664

50. Cadena E, Colón J, Artola A, Sánchez A, Font X. Environmental impact of two aerobic composting technologies using life cycle assessment. *The international journal of life cycle assessment*. 2009; 14:401-10.
<https://doi.org/10.1007/s11367-009-0107-3>

51. Pan H, Zheng X, Tian X, Geng Y, Zhang X, Xiao S, Gao Z, Yang Y, Liu X, Li L, Huang C. Toward sustainable crop production in China: A co-benefits evaluation. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 10; 361:132285.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132285>