

# Comparison of environmental effects of different municipal waste management options using life cycle assessment (case study: Varamin city)

Mina Rezaei<sup>1</sup> , Sajjad Rahimi<sup>2</sup> 

1. Vice Chancellery of Health, Torbat Heydaryeh University of Medical Sciences, Torbat Heydaryeh, Iran

2. Department of Basic Sciences, Khomein University of Medical Sciences, Khomein, Iran

**Corresponding author:** Sajjad Rahimi, Department of Basic Sciences, Khomein University of Medical Sciences, Khomein, Iran. e-mail: [sj.rahimi.b@gmail.com](mailto:sj.rahimi.b@gmail.com)

Received: 24 December 2024

Revised: 13 April 2025

Accepted: 21 April 2025

## Abstract

**Background & Aim:** Population growth, increased consumption, and waste generation are major concerns for human societies. Without proper management, these factors can have adverse effects on the environment and human health. This study aimed to evaluate the environmental impacts of various municipal waste management options using the life cycle assessment (LCA) method and identify the most suitable management scenario.

**Methods:** In this study, Ecoinvent 3.6 (2019) and SimaPro 9.0.0.48 software were used. The effects of recycling rates on the scenarios were analyzed using sensitivity analysis. The proposed scenarios were as follows: Scenario 1: Composting and landfill disposal, Scenario 2: Material recovery facilities (MRF), composting, and landfill disposal, Scenario 3: MRF, anaerobic digestion, and landfill disposal, Scenario 4: MRF, composting, anaerobic digestion, and landfill disposal, Scenario 5: Waste incineration combined with landfill disposal.

**Results:** The results showed that a higher recycling rate significantly reduces emissions from each waste management system. Scenario 2 had the lowest overall environmental impact, with a global warming potential of 867.20 kg CO<sub>2</sub> eq./t, eutrophication potential of 0.35 kg PO<sub>4</sub> eq./t, acidification potential of 0.17 kg SO<sub>2</sub> eq./t, human toxicity potential of 1.4 kg DB eq./t, and tropospheric ozone formation potential of 0.07 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq./t.

**Conclusion:** Combining material recovery facilities with biological treatment can considerably reduce environmental impacts. The findings of this study can serve as a reference for cities in developing countries looking to design and implement environmentally sustainable municipal waste management systems that contribute to sustainable development.

## Keywords:

Life cycle assessment, Sensitivity analysis, Composting, Municipal waste management, Anaerobic digestion

**How to Cite this Article:** Rezaei M, Rahimi S. Comparison of environmental effects of different municipal waste management options using life cycle assessment (case study: Varamin city). J Torbat Heydaryeh Univ Med Sci. 2025;13(2):26-39. DOI: [10.61882/jmsthums.13.2.26](https://doi.org/10.61882/jmsthums.13.2.26)

# مقایسه اثرات زیست محیطی گزینه های مختلف مدیریت پسماند شهری با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات (مطالعه موردی: شهر ورامین)

مینا رضائی<sup>۱</sup> ID، سجاد رحیمی<sup>۲</sup> ID

۱. معاونت بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران  
۲. گروه علوم پایه، دانشکده علوم پزشکی خمین، خمین، ایران

## چکیده

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۰/۰۴

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۲/۰۱

**زمینه و هدف:** افزایش جمعیت، افزایش مصرف و تولید پسماند از نگرانی های جدی جوامع بشری است که در صورت عدم وجود مدیریت صحیح، اثرات نامطلوبی بر محیط زیست و سلامتی بشر خواهد داشت. مطالعه حاضر، باهدف ارزیابی اثرات زیست محیطی گزینه های مختلف مدیریت پسماند شهری با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات و با بررسی سناریوهای مختلف و معرفی سازگارترین سناریو انجام شد.

**روش ها:** در این مطالعه از Ecoinvent 3.6 (۲۰۱۹) و نرم افزار SimaPro 9.0.0.48 استفاده شد. تأثیر نرخ بازیافت بر سناریوها با استفاده از آنالیز حساسیت مورد ارزیابی قرار گرفت. سناریوهای پیشنهادی به ترتیب شامل سناریو ۱: کمپوست سازی و دفن پسماند، سناریو ۲: تأسیسات بازیابی مواد، کمپوست سازی و دفن پسماند، سناریو ۳: تأسیسات بازیابی مواد، هاضم بی هوازی و دفن پسماند، سناریو ۴: تأسیسات بازیابی مواد، کمپوست سازی، هاضم بی هوازی و دفن پسماند و سناریو ۵: سیستم پسماندسوزی در ترکیب با دفن پسماند هستند.

**نتایج:** نتایج نشان داد نرخ بازیافت می تواند به طور قابل توجهی میزان انتشارات را از هریک از سیستم مدیریت پسماند کاهش دهد. سناریوی ۲ دارای کمترین تأثیر کلی زیست محیطی است و نتایج شامل پتانسیل گرمایش جهانی  $\text{kg CO}_2 \text{ eq./t}$  ۸۶۷/۲۰، یوتریفیکاسیون معادل  $\text{kg PO}_4^{3-} \text{ eq./t}$  ۰/۰۳۵، اسیدی سازی معادل  $\text{kg SO}_2$  ۰/۱۷، پتانسیل سمیت انسان معادل  $\text{kg 1,4 DB eq./t}$  ۳/۸۹ و تولید ازن تروپوسفری معادل  $\text{kg C}_2\text{H}_4$  ۰/۰۷  $\text{eq./t}$  به دست آمد.

**نتیجه گیری:** در صورت تلفیق تأسیسات بازیابی مواد و تصفیه بیولوژیکی اثرات زیست محیطی به طور قابل توجهی کاهش می یابد. یافته های این مطالعه می تواند به عنوان مرجعی برای شهرهای کشورهای درحال توسعه به منظور کمک به برنامه ریزی و بهره برداری از سیستم های مدیریت پسماند سازگار با محیط زیست و در راستای توسعه پایدار باشد.

## کلیدواژه ها:

ارزیابی چرخه حیات، آنالیز حساسیت، کمپوست سازی، مدیریت پسماند شهری، هاضم بی هوازی

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی تربت حیدریه محفوظ است.

## مقدمه

مدیریت پسماند جامد شهری از چالش‌های زیست‌محیطی جدی برای کشورهای در حال توسعه است. افزایش جمعیت به‌عنوان یک عامل مهم در تولید پسماند به‌ویژه از مناطق مسکونی و نیز بخش‌های تجاری و صنعتی است. باوجود مسائل زیست-محیطی، اجتماعی و اقتصادی، می‌توان از پسماند به‌عنوان یک منبع ارزشمند به‌منظور تولید انرژی و نیز تأمین نیازهای انرژی آینده استفاده نمود (۱). بااین‌حال مدیریت نامناسب پسماند، پتانسیل گرمایش جهانی و تأثیرات منفی بر محیط‌زیست در نتیجه انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت انسان از قبیل متان، دی‌اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن دارد (۲). تجزیه و تحلیل، نظارت، پایش و اندازه‌گیری سیستم‌های مدیریت پسماند پیچیده و دشوار است (۳)؛ بنابراین با ایجاد یک سیستم مدیریت پسماند با ساختار استاندارد اثرات منفی بر سلامت انسان و محیط‌زیست به حداقل می‌رسد (۴).

ارزیابی چرخه حیات ابزار مبتنی بر تعیین کمیت بارهای زیست-محیطی بالقوه مرتبط با چرخه عمر محصول یا یک فرآیند است. ارزیابی چرخه حیات (LCA) که براساس استاندارد سری ۱۴۰۴۰ ایزو تدوین‌شده روشی برای سنجش اثرات زیست‌محیطی یک محصول یا فرآیند در کل چرخه حیات آن است. این ارزیابی شامل چهار مرحله است: ۱) تعریف هدف و دامنه (تعیین محدوده و اهداف مطالعه)، ۲) تحلیل موجودی چرخه حیات (LCI) (جمع‌آوری داده‌های ورودی و خروجی)، ۳) ارزیابی تأثیر چرخه حیات (LCIA) (تحلیل اثرات زیست‌محیطی با روش‌هایی مانند ReCiPe و ۴) تفسیر نتایج (تحلیل داده‌ها، شناسایی نقاط بحرانی و ارائه راهکارهای بهبود) (۲).

یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای مورد استفاده در ارزیابی چرخه حیات، نرم‌افزار SimaPro است که توسط یک شرکت هلندی توسعه‌یافته است. این نرم‌افزار داده‌های ورودی را پردازش کرده و اثرات زیست‌محیطی (۱۸ پدیده زیست‌محیطی) (تغییرات اقلیمی، اسیدی شدن، یوتروفیکاسیون و

غیره) و نیز فاکتورهای نهایی (سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و کاهش منابع) را محاسبه و به متخصصان، محققان و شرکت‌ها کمک می‌کند تا اثرات زیست‌محیطی محصولات و فرآیندها را در طول چرخه حیاتشان ارزیابی و بهینه‌سازی کنند (۲، ۵). در مطالعه‌ای سناریو پیشنهادی شامل دفن پسماند، کمپوست، هضم بی‌هوازی و بازیافت و تأثیر آن بر شاخص‌های زیست‌محیطی با استفاده از نرم‌افزار GaBiPro مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج حاصل از مطالعات نشان داد که سیستم مدیریت پسماند جامد شهری شهر دهلی به دلیل انتشارات حاصل از حمل‌ونقل و دفن پسماند بر محیط‌زیست تأثیر منفی می‌گذارد (۶). با استفاده از ارزیابی چرخه حیات، چهار سناریو مدیریت پسماند در شهر ناگپور کشور هند مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که پارامترهای گرمایش جهانی، سمیت انسان و یوتروفیکاسیون، ایجاد ازن فتوشیمیایی در سناریوهای تأسیسات بازیابی مواد، کمپوست‌سازی و دفن کمترین اثرات زیست‌محیطی در مقایسه با سناریوهای کمپوست‌سازی و دفن به‌تنهایی داشتند (۷). یاد او و همکاران نیز در سال ۲۰۱۸ به نتیجه مشابه دست یافتند (۸).

سریواستوا و نما چهار گزینه مدیریت پسماند (کمپوست، بازیافت، سوزاندن و دفن) را برای دهلی ارزیابی کردند. داده‌های مورد بررسی شامل کمیت و ترکیب زباله به‌عنوان ورودی و بازیافت انرژی، انتشار به هوا و آب به‌عنوان خروجی است. این مطالعه نتیجه گرفت که بازیافت اثرات زیست‌محیطی کمی دارد (۹). Babu و همکاران چهار گزینه دفن زباله - تلنبار کردن در فضای باز، دفن زباله با و بدون جمع‌آوری گاز و دفن زباله به‌صورت راکتور زیستی - را برای شهر بنگلور مقایسه کرد. داده‌های موجودی شامل مصرف سوخت و برق به‌عنوان ورودی و انتشار گازهای گلخانه‌ای از عملیات واحد به‌عنوان خروجی است. بر اساس پتانسیل کاهش انرژی، پتانسیل گرمایش جهانی و اوتروفیکاسیون، این مطالعه به این نتیجه

است (شکل ۱). طبق سرشماری اخیر سال ۱۳۹۵، جمعیت آن ۲۲۸/۶۲۸ و تراکم جمعیت ۴۶۸۳۴۹ نفر در هر کیلومترمربع

است. ترکیب پسماند در جدول ۱ ارائه شده است.

باتوجه به ترکیبات پسماند، برای بازیابی منابع از آن، روش‌های تصفیه بیولوژیکی مانند کمپوست و هاضم بی‌هوازی، ممکن است مناسب باشد. علاوه بر این، پسماند آلی مانند پلاستیک، لاستیک، چرم و چوب که ارزش حرارتی بالایی دارند، می‌توانند با استفاده از گزینه‌هایی مانند سوزاندن مدیریت شوند. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها و مقایسه سناریوهای مختلف از نرم‌افزار Excel و برای نمایش مناسب نتایج از نمودارهای میله‌ای به‌منظور تصمیم‌گیری بهینه در طراحی پایدار استفاده شد.

رسید که دفن زباله‌های بیو راکتور حداقل تأثیرات را داشته است (۱۰).

بنابراین، هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی ارزیابی چرخه حیات و ارائه یک ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری مناسب جهت درک اثرات زیست‌محیطی ناشی از گزینه‌های مختلف مدیریت پسماند در شهر ورامین، به‌منظور انتخاب بهترین سناریو جهت به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی با استفاده از نرم‌افزار SimaPro 9.0.0.48 است. انتظار می‌رود یافته‌های تحقیق حاضر به تعیین بهترین فرصت‌ها برای کاهش تأثیرات منفی آینده در مدیریت پسماند بینجامد.

### روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه و مشخصات پسماند شهری

شهر ورامین در جنوب شرق تهران به عرض جغرافیایی ۳۵/۳۲ و طول جغرافیایی ۵۱/۶۴ و در ارتفاع ۹۱۸ متری از سطح دریا



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی شهرستان ورامین، استان تهران

جدول ۱: خصوصیات پسماند مورد مطالعه

| نوع پسماند        | درصد | نوع پسماند | درصد | نوع پسماند | درصد |
|-------------------|------|------------|------|------------|------|
| مواد آلی          | ۴۱/۳ | کاغذ       | ۱۱/۹ | مواد خنثی  | ۱۸/۸ |
| پلاستیک           | ۹/۹  | شیشه       | ۰/۴  | چرم        | ۰/۶  |
| منسوجات           | ۵/۳  | سایر مواد  | ۱۰/۶ | فلز        | ۰/۸  |
| مواد خطرناک خانگی | ۰/۴  | -          | -    | -          | -    |

**ارزیابی چرخه حیات**

پژوهش حاضر براساس استاندارد ISO 14040 در چهار بخش هدف و دامنه، تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و تفسیر داده‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (۱۱).

**تعریف هدف و محدوده**

این مطالعه باهدف مقایسه اثرات زیست‌محیطی احتمالی پنج سناریو مدیریت پسماند با استفاده از ارزیابی چرخه حیات انجام شد. محدوده دوره در نظر گرفته‌شده از دروازه تا گور بود که شامل حمل‌ونقل پسماند به تأسیسات تصفیه (تلمبار کردن، تأسیسات بازیافت مواد، کمپوست، هضم بی‌هوازی و سوزاندن) و همچنین دفع نهایی آن است. مرز سیستم و همچنین ورودی‌ها (انتقال جرم، مصرف انرژی)، خروجی، انتشارات به محیط‌زیست و محصولات تولیدی (بیوگاز، الکتریسیته، کمپوست و مواد هضم شده) در شکل ۲ نشان داده‌شده است. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر جریان شیرابه و انتشار از سطوح زمین در نظر گرفته نشد و استراتژی جمع‌آوری پسماند برای همه سناریوها در منطقه مورد مطالعه یکسان فرض شده است. در این مطالعه به‌منظور مدل‌سازی، تحلیل و بررسی اثرات زیست‌محیطی از نرم‌افزار SimaPro 9.0.0.49 و پایگاه داده 3.6 Ecoinvent Database و روش Recipe Midpoint (H) V 1.13 استفاده شد. واحد عملکردی یک مفهوم کلیدی در مطالعات ارزیابی اثرات زیست‌محیطی می‌باشد که امکان مقایسه اثرات احتمالی در سناریوهای مختلف را فراهم می‌سازد و در این مطالعه به ازای یک‌تن پسماند در نظر گرفته شده است.

**سناریوهای پیشنهادی مدیریت پسماند****کمپوست‌سازی و دفن پسماند**

درمجموع ۲۵ درصد از پسماند شهری به واحد تولید کمپوست و ۷۵ درصد باقیمانده مستقیماً و بدون هیچ‌گونه پردازشی به مرکز دفن انتقال می‌یابد. فرض بر این است که کمپوست تولیدشده به‌عنوان کود کشاورزی قابل‌استفاده است. در این

مطالعه روش تولید کمپوست از نوع ویندرو بوده که توسط دستگاه ترنر، زیرورو می‌شود. در طی این فرآیند ماشین‌آلاتی جهت غربالگری پیش و پس‌پردازش و آلودگی‌زدایی استفاده می‌شود که همگی نیاز به مصرف برق و سوخت دیزل دارند. در مطالعه حاضر انتشارات ناشی از مصرف انرژی و انتشار مستقیم از فرآیند کمپوست‌سازی در نظر گرفته شدند همچنین به ازای هر تن پسماند ۱/۳۳ لیتر سوخت دیزل و ۲/۷ کیلووات ساعت برق نیاز است (۱۲).

**تأسیسات بازیابی مواد، کمپوست‌سازی و دفن پسماند**

در این سناریو ۱۵ درصد پسماند جهت بازیابی مواد باارزش و قابل‌استفاده مجدد به تأسیسات بازیابی مواد، ۵۵ درصد به واحد تولید کمپوست (بخش آلی پسماند) و ۳۰ درصد باقیمانده بدون هیچ‌گونه عملیاتی به مرکز دفن منتقل می‌شوند. البته لازم به ذکر است که زائدات باقیمانده از تأسیسات بازیابی مواد و واحد تولید کمپوست نیز به مراکز دفن منتقل می‌شود. تأسیسات بازیابی مواد شامل تسمه نقاله جهت انتقال پسماند که نیاز به مصرف برق و روغن دیزل دارد. فرض بر این است که عملیات تفکیک به‌صورت دستی انجام می‌شود. در این واحد انتشارات تولیدشده به دلیل مصرف انرژی خواهد بود همچنین به ازای هرتن پسماند ۰/۷ لیتر گازوئیل و ۰/۴۵ کیلووات ساعت برق نیاز است (۷).

**تأسیسات بازیابی مواد، هاضم بی‌هوازی و دفن پسماند**

در سناریو سوم فرض بر این است که ۱۵ درصد پسماند جهت بازیابی مواد باارزش و قابل‌استفاده مجدد به تأسیسات بازیابی مواد، ۵۵ درصد به واحد هاضم بی‌هوازی (بخش آلی پسماند) و ۳۰ درصد باقیمانده بدون هیچ‌گونه عملیاتی به مرکز دفن منتقل می‌شوند. لازم به ذکر است که زائدات هریک از مراحل به مرکز دفن منتقل می‌شود و بیوگاز تولیدشده از هاضم بی‌هوازی خالص‌سازی شده و از آن در واحد حمل‌ونقل به‌عنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی و یا در مناطق مسکونی استفاده می‌شود و از مواد هضم شده می‌توان به‌عنوان کود استفاده کرد. فرض بر این است که به ازای هرتن پسماند آلی ورودی به هاضم ۸۵۰

سوزاندن با مصرف انرژی همراه است (۷۰ کیلووات ساعت به ازای هرتن پسماند) (۱۶). در مطالعه حاضر انتشار حاصل از فرآیند سوزاندن و مصرف برق در نظر گرفته شده است. زباله-سوز بسترسیال پیوسته معمولاً در دمای ۸۰۰-۹۰۰ درجه سلسیوس بهره‌برداری می‌شود و به ازای هرتن پسماند ۵۰-۰ کیلوگرم متان و ۰/۰۶۷ کیلوگرم اکسیدنیتروژن منتشر می‌کند (۱، ۱۷).

#### فهرست چرخه حیات

یک گام اساسی در فرآیند ارزیابی چرخه حیات، تهیه فهرستی از قبیل از جریان‌های مواد، جریان‌های انرژی و انتشارات محیطی است. در ابتدا، شناسایی تمام فرآیندهایی که در طول چرخه زندگی یک محصول یا فرآیند اتفاق می‌افتد، از تولید انرژی و مواد خام گرفته تا دفع پسماند می‌بایست در نظر گرفته شود. علاوه بر این، مستقیماً در طول فرآیند و یا از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و پایگاه‌های داده موجود، داده‌های مربوط به فرآیندها شامل ورودی‌ها، خروجی‌ها و انتشارات در هوا، آب‌و خاک جمع‌آوری شد.

کیلوگرم ماده هضم شده (۱۲) و ۱۲۰ مترمکعب بیوگاز تولید خواهد شد (۱۳). از طرفی احتمال کاهش پتانسیل گرمایش جهانی متصور می‌شود (یک مترمکعب بیوگاز معادل ۰/۴۵ کیلوگرم گاز مایع است) (۱۴) و هرکیلوگرم گاز مایع ۱/۶۷ کیلوگرم دی اکسیدکربن منتشر می‌کند (۱۵).

#### تأسیسات بازیابی مواد، کمپوست‌سازی، هاضم بی‌هوازی و دفن پسماند

در سناریو چهارم فرض بر این است که ۱۵ درصد پسماند جهت بازیابی مواد با ارزش و قابل‌استفاده مجدد به تأسیسات بازیابی مواد، ۵۵ درصد به واحد تصفیه بیولوژیکی (هاضم بی‌هوازی و تولید کمپوست) و ۳۰ درصد باقیمانده بدون هیچ‌گونه عملیاتی به مرکز دفن منتقل می‌شوند. بیوگاز، کود کمپوست و ماده هضم شده از محصولات نهایی سناریو پیشنهادی است.

سناریو پنجم: سیستم زباله‌سوزی در ترکیب با دفن پسماند ۸۰ درصد پسماند به نیروگاه زباله‌سوز منتقل می‌شود و مقدار باقی‌مانده در مرکز دفن، دفع می‌شود. نیروگاه زباله‌سوز از نوع بستر سیال پیوسته در نظر گرفته شد. فرض بر این است که



شکل ۲: مرزبندی سناریوهای پیشنهادی مورد مطالعه

محیط و همچنین ورودی‌هایی مانند گازوئیل به‌عنوان سوخت، انرژی و خروجی‌هایی مانند کود کمپوست، ماده هضم شده و

با توجه به مرز سیستم در نظر گرفته شده در این مطالعه، چرخه حیات سیستم مدیریت پسماند و انتشار گازهای گلخانه‌ای به

بازیافت شده از پسماند به عنوان نرخ بازیافت در نظر گرفته شده است. در این مطالعه مواد قابل بازیافت شامل کاغذ، پلاستیک، شیشه، فلزات، لاستیک و چرم و منسوجات در نظر گرفته شده‌اند. در هر یک از سناریوها، اثرات نرخ‌های مختلف بازیافت، از ۱۰ درصد تا ۷۰ درصد مورد بررسی قرار گرفته است (۱۸، ۱۹).

بیوگاز محاسبه می‌شود. اطلاعات در سه بخش ورودی‌ها، محصولات و انتشارات در جدول ۲ ارائه شده است.

### آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت از طریق تغییر نرخ بازیافت پسماند در سناریوهای مختلف و با در نظر گرفتن پارامترهای زیست-محیطی، اثرات زیست‌محیطی را بررسی می‌کند. درصد مواد

جدول ۲: اطلاعات ورودی برای سناریوهای پیشنهادی سیستم مدیریت پسماند

| ورودی‌ها                      | واحد           | سناریو ۱ | سناریو ۲ | سناریو ۳ | سناریو ۴ | سناریو ۵ |
|-------------------------------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| دیزل                          | L              | ۲/۵۹     | ۲/۳۸     | ۲/۳۸     | ۲/۸      | ۲/۴۵     |
| الکتریسیته                    | KWh            | ۰/۵۲     | ۱/۳      | ۱۵       | ۷/۳      | ۵۲       |
| محصولات جانبی                 |                |          |          |          |          |          |
| کمپوست                        | T              | ۰/۰۵۹    | ۰/۱۶     |          | ۰/۰۷     | -        |
| ماده هضم شده                  | T              | -        | -        | ۰/۴      | ۰/۲      | -        |
| بیوگاز                        | M <sup>3</sup> | -        | -        | ۱/۳      | ۱/۴      | -        |
| الکتریسیته                    | KWh            | -        | -        | ۲۱/۲     | ۲۱/۲     | -        |
| حرارت                         | MJ             | -        | -        | ۲۴/۰۵    | ۲۴/۰۵    | -        |
| خروجی‌ها (انتشار به هوا)      |                |          |          |          |          |          |
| CO <sub>2</sub>               | Kg             | ۱۹۲۰/۵   | ۹۷۴/۲    | ۹۶۴/۳    | ۹۶۹/۶    | ۱۷۲۵     |
| SO <sub>2</sub>               | Kg             | ۰/۲      | ۰/۱۴۵    | ۰/۲۲     | ۰/۰۱۸    | ۰/۵۱     |
| PO <sub>4</sub>               | Kg             | ۰/۰۷     | ۰/۰۳۴    | ۰/۰۳۴    | ۰/۰۳۴    | ۱/۵      |
| 1,4 DB                        | Kg             | ۷        | ۳/۸۹     | ۵/۷۸     | ۴/۶۷     | ۸۹۸/۶    |
| Sb                            | Kg             | -۰/۰۵    | -۰/۰۳    | -۰/۰۳    | -۰/۰۳    | -۰/۰۴    |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | Kg             | ۰/۰۹۵    | ۰/۰۶۶    | ۰/۰۸۱    | ۰/۰۷     | -۰/۰۱    |

### نتایج

#### اثرات زیست‌محیطی سناریوهای پیشنهادی مدیریت پسماند

#### شهری

طبق برآورد، میزان تولید پسماند در شهر ورامین ۳۲۷ تن در روز و سرانه تولید ۷۵۰-۷۰۰ گرم به ازای هر نفر در روز به دست آمد. گازهای کنترل نشده، سوزاندن، حمل و نقل، فرایندهای تصفیه بیولوژیکی و تولید انرژی عمده‌ترین فعالیت‌هایی هستند که باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند. سهم فرایندها در انتشار گازهای گلخانه‌ای و مزایای هریک از سناریوها در جدول ۳ نشان داده شده است. مشخص شد که

سناریوی ۲ دارای حداکثر مزیت در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. علاوه بر این، مزایای کاهش انتشار گازهای از طرفی سناریوهای ۲ و ۵ به ترتیب کمترین و بیشترین سهم در انتشار محصولات اسیدی (معادل ۰/۱۷ kg SO<sub>2</sub> eq./ton) و اوتروفیکاسیون (۰/۴۹ eq./t PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> kg) را دارند. از میان نتایج احتمالی، سناریوی ۲ کمترین تأثیر سمیت (kg 1,4 DB eq./t) را دارد. مطابق نتایج، سناریوی ۵ کمترین میزان پتانسیل اکسیداسیون (معادل ۰/۰۲ kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq./t) و سناریو ۱ بیشترین میزان (معادل ۰/۱ kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq./t) دارد.

بازیافت (تغییر در کمیت مواد بازیافتی مانند کاغذ، پلاستیک، فلزات، منسوجات و غیره که برحسب درصد کمی سازی شده اند) و اثرات آن بر محیط زیست همبستگی معکوس دارد. گلخانه ای را می توان در سناریوهای ۱، ۳ و ۴ مشاهده کرد (شکل ۳)، اما نسبت به سناریو ۲ کمتر است. همچنین، جدول ۴ نشان می دهد که سناریوهای ۱ و ۲ به ترتیب بیشترین و کمترین پتانسیل گرمایش جهانی  $\text{kg CO}_2/\text{ton}$  ۱۹۲۰/۳ و ۸۶۷/۲۰ را دارد.

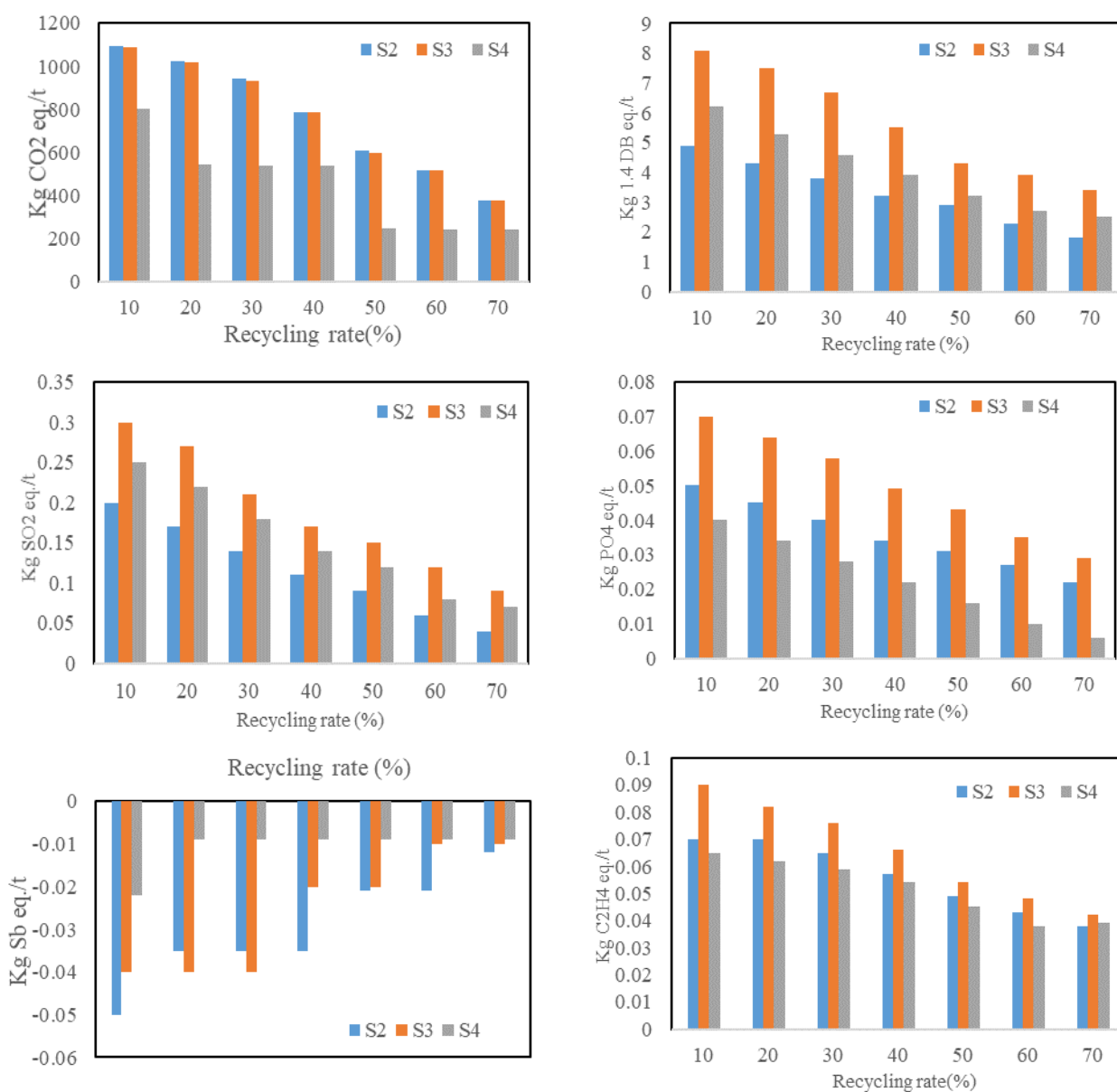
همچنین، مقادیر به دست آمده از پارامترها برای انتشار گازهای گلخانه ای، پتانسیل اسیدسازی، پتانسیل اتریفیکاسیون، پتانسیل سمیت انسانی به ترتیب  $\text{kg CO}_2\text{eq t}^{-1}$  ۵/۶۵ تا ۱۱/۳۶  $\text{kg SO}_2\text{eq t}^{-1}$  ۱/۲۴ تا ۳/۴۵،  $\text{kg PO}_4\text{eq t}^{-1}$  ۰/۱۹ تا ۰/۶۸  $\text{kg 1,4-DBeq t}^{-1}$  ۰/۳۵ تا ۴/۲۲ به دست آمد. نتیجه آنالیز حساسیت براساس افزایش نرخ بازیافت از ۱۰ به ۷۰ درصد در شکل ۱ آمده است. این بررسی برای سناریوهای ۲، ۳ و ۴ که دارای تأسیسات بازیابی مواد هستند انجام شد. مطابق نتایج، تغییر در نرخ

جدول ۳: سهم فعالیت ها در پتانسیل گرمایش جهانی و فواید هریک از سناریوها در پتانسیل گرمایش جهانی

| سهم فعالیت ها در انتشار گازهای گلخانه ای         | واحد                         | سناریو ۱ | سناریو ۲ | سناریو ۳ | سناریو ۴ | سناریو ۵ |
|--------------------------------------------------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| گاز لندفیل کنترل نشده                            | $\text{Kg CO}_2\text{eq./t}$ | ۱۹۱۵/۱۸  | ۸۵۷/۵۳   | ۹۱۹/۴۵   | ۸۶۸/۳۸   | ۳۳۹/۳    |
| حمل و نقل                                        |                              | ۲/۳۰     | ۲/۳۰     | ۲/۳۰     | ۲/۳۰     | ۲/۳۰     |
| تولید کمپوست                                     |                              | ۷/۱۲     | ۲۱/۴     | –        | ۱۴/۳     | –        |
| هضم بی هوازی                                     |                              | –        | –        | ۴۰       | ۲۹/۸     | –        |
| نیروگاه زباله سوزی                               |                              | –        | –        | –        | –        | ۱۲۰۱/۳   |
| مصرف الکتریسیته                                  |                              | –        | ۰/۰۲     | ۰/۱۲     | ۰/۰۶     | ۰/۵۵     |
| مصرف دیزل                                        |                              | ۱/۷۲     | ۲/۸۵     | ۰/۲۸     | ۲/۱      | –        |
| فواید هریک از فعالیت ها                          | $\text{Kg CO}_2\text{eq./t}$ | –        | –        | –        | ۲۳       | –        |
| جایگزینی سوخت مایع با بیوگاز                     |                              | ۱/۴      | ۴/۴۰     | –        | ۲/۷      | –        |
| عدم استفاده از کودهای معدنی (کمپوست)             |                              | –        | –        | ۱۰       | ۴/۶      | –        |
| عدم استفاده از کودهای معدنی (ماده هضم شده)       |                              | –        | –        | –        | ۵/۷۸     | –        |
| کاهش انتشار کربن در صورت استفاده از ماده هضم شده |                              | ۴/۶۲     | ۱۲/۵     | ۳/۷      | ۵/۴      | –        |
| کاهش انتشار کربن در صورت استفاده از مواد کمپوست  |                              | –        | –        | ۰/۲۵     | ۰/۲۵     | –        |
| اجتناب از تولید برق (هاضم)                       |                              | –        | –        | ۲/۱      | ۲/۱      | –        |
| اجتناب از مصرف سوخت                              |                              | –        | –        | –        | –        | –        |
| کل سهم انتشار گاز گلخانه ای                      |                              | ۱۹۲۰/۳   | ۸۶۷/۲۰   | ۸۹۹/۴    | ۸۷۳/۱۱   | ۱۵۴۳/۴۵  |

جدول ۴: نتایج چرخه حیات سناریوهای پیشنهادی

| سناریوها | اسیدی شدن محیط<br>(Kg SO <sub>2</sub> eq./t) | اوتریفیکاسیون<br>(Kg PO <sub>4</sub> eq./t) | گرمایش جهانی<br>(Kg CO <sub>2</sub> eq./t) | پتانسیل سمیت<br>(Kg 1,4DB eq./t) | Kg Sb eq./t | اکسیداسیون<br>(Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq./t) |
|----------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------|
| ۱        | ۰/۲                                          | ۰/۰۶                                        | ۱۹۲۰/۳                                     | ۷/۰۰                             | -۰/۰۶۵      | ۰/۱                                                    |
| ۲        | ۰/۱۷                                         | ۰/۰۳۵                                       | ۸۶۷/۲۰                                     | ۳/۸۹                             | -۰/۰۳۳      | ۰/۰۷                                                   |
| ۳        | ۰/۲۲                                         | ۰/۰۳۵                                       | ۸۹۹/۴                                      | ۶/۵۹                             | -۰/۰۳۳      | ۰/۰۸                                                   |
| ۴        | ۰/۱۸                                         | ۰/۰۴۵                                       | ۸۷۳/۱۱                                     | ۴/۱۳                             | -۰/۰۳۵      | ۰/۰۷۵                                                  |
| ۵        | ۰/۴۹                                         | ۰/۰۵                                        | ۱۵۴۳/۴۵                                    | ۱۰۰۰/۲۰                          | -۰/۰۵       | -۰/۰۲                                                  |



شکل ۳: نمودار آنالیز حساسیت سناریوهای پیشنهادی (سناریوهای ۲، ۳ و ۴)

## بحث

براساس نتایج، پیشگیری از دفن پسماند در مراکز دفع مهم‌ترین نقش را در کنترل و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. علاوه بر این، استفاده از بیوگاز به جای گاز مایع، استفاده از کمپوست و مواد هضم شده به جای کودهای معدنی، تولید انرژی و حرارت از هاضم‌ها همگی باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند (۱). سهم فرایندها در انتشار گازهای گلخانه‌ای و مزایای هریک از سناریوها در جدول ۳ نشان داده شده است. مشخص شد که سناریوی ۳ دارای حداکثر مزیت در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است و دلیل آن این است که نسبت بیشتری از پسماندهای آلی به هاضم بی‌هوازی منتقل می‌شود و بیوگاز ناشی از آن جایگزین گاز مایع به عنوان سوخت پخت‌وپز در منازل و از طرفی کود حاصل شده در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. گازهای مسئول گرمایش کره زمین شامل متان، دی‌اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و هیدروکلروفلوروکربن‌ها هستند. تجزیه بخش آلی پسماند توسط فرایندهای بیولوژیکی منجر به تولید بیومتان و دی‌اکسیدکربن بیوژنیک و سوزاندن بخش غیرقابل تجزیه زیستی پسماند (پلاستیک، پارچه، لاستیک و چرم) در نیروگاه‌های زباله‌سوزی باعث آزادسازی دی‌اکسیدکربن غیرزیستی می‌شود. اگرچه فرض بر این است که دی‌اکسیدکربن بیوژنیک در گرمایش زمین بی‌تأثیر بوده و متان یک گاز گلخانه‌ای قوی است (۲، ۳).

جدول ۴ نشان می‌دهد که سناریوی ۲ دارای کمترین پتانسیل گرمایش جهانی بوده و دلیل آن وجود فرآیند تولید کمپوست است که باعث کاهش میزان تولید متان زیستی می‌شود. تحقیقات نشان داد، دفن یک کیلوگرم پسماند (متوسط ترکیب پسماند در کشورهای اروپایی) دارای پتانسیل گرمایش جهانی ۱/۰۸ نانوگرم است که از مطالعه حاضر کمتر به نظر می‌رسد (۲۰). در مطالعه دیگری پتانسیل گرمایش جهانی ناشی از دفن پسماند آلی در حدود ۳۷ درصد و نسبت به سایر پارامترهای زیست‌محیطی سهم بیشتری را به خود اختصاص داده است (۲۱). یک تن پسماند آلی ۰/۳۳ تن کمپوست تولید می‌کند (۱۷) و

یک تن کمپوست می‌تواند ۷۰ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن (۲۲) منتشر کند و یک تن پسماند آلی می‌تواند ۰/۸۵ تن ماده هضم شده (۲۳) تولید کند و یک تن ماده هضمی ۸ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن (۲۴) آزاد می‌کند. این اطلاعات در برآورد اثرات سناریوها مختلف استفاده شده است.

طی فرآیند کمپوست، گازهای اسیدی مانند اکسیدهای نیتروژن و اکسیدهای سولفور به اتمسفر آزاد می‌شوند که علت اصلی اسیدی شدن محیط زیست است. محققان اخیراً به این نتیجه رسیده‌اند که اکسیدهای نیتروژن، سهم اسیدی شدن بیشتری نسبت به اکسیدهای سولفور دارد که ممکن است به دلیل استفاده از کودهای معدنی نیتروژن‌دار و ویژگی‌های پسماند شهری باشد (۷). سناریوی ۵ بیشترین سهم در انتشار ترکیبات اسیدی  $\text{kg SO}_2 \text{ eq./ton}$  ۰/۴۹ دارد که علت آن، تبدیل محتوای سولفور و نیتروژن پسماند سوزانده شده به گازهای اسیدی مانند اکسیدهای سولفور و نیتروژن است که پدیده اسیدی شدن را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. علاوه بر این، فرآیندهای کمپوست‌سازی و دفن پتانسیل انتشار گازهایی مانند اکسیدهای نیتروژن و آمونیاک را دارند. سناریوی ۲ با کمترین سهم تأثیرگذاری (معادل  $\text{kg SO}_2 \text{ eq./ton}$  ۰/۱۷) برآورد شد؛ زیرا محتوای سولفور و نیتروژن کمتری در فرآیندهای کمپوست‌سازی و تأسیسات بازیابی مواد درگیر فرآیندهای اکسیداسیون می‌شوند. مطالعات دیگر پژوهشگران نشان می‌دهد که نیروگاه زباله‌سوزی بیشترین تأثیر اسیدی‌سازی محیط  $\text{kg SO}_2 \text{ eq./ton}$  ۰/۶۵ را دارد (۵). یک مطالعه گزارش داد که کمپوست‌سازی با دفن پسماند دارای کمترین میزان اسیدی‌سازی  $\text{kg SO}_2 \text{ eq./ton}$  ۰/۱۹ و تأسیسات بازیابی مواد، هاضم بی‌هوازی با سناریوی دفن پسماند دارای بالاترین قدرت اسیدی‌سازی معادل  $\text{kg SO}_2 \text{ eq./ton}$  ۰/۶۸ است (۷).

Rahimi و همکاران در سال ۲۰۱۹ بیان کردند که سناریو کمپوست کردن (۵۵ درصد)، بازیافت (۱۰ درصد)، بازیابی انرژی (۵ درصد) و دفن بهداشتی (۳۰ درصد) حداقل اثرات

مشکلات تنفسی حتی در صورت تماس با دز کم ازن می‌شود (۶). اکسیدانهای فتوشیمیایی نظیر ترکیبات آلی فرار، دی اکسیدکربن، دی اکسیدنیتروژن، اکسیدهای نیتروژن و ذرات ریز که در اثر فرآیندهای ذکر شده، به محیط انتشار می‌یابند، منجر به تشکیل ازن تروپوسفری می‌شوند. مطابق نتایج سناریوی ۵ کمترین میزان پتانسیل اکسیداسیون معادل  $kg\ C_2H_4\ eq./t$   $-0.02$  و سناریو ۱ بیشترین میزان  $0.1$  را دارد. Anchal و همکاران در سال ۲۰۲۳، از بین سناریوهای پیشنهادی (سناریو ۱: بازیافت، کمپوست و پسماندسوزی، سناریو ۲: بازیافت، کمپوست، بازیافت و دفن بهداشتی، سناریو ۳: بازیافت، کمپوست و دفن بهداشتی و سناریو ۴: بازیافت و دفن بهداشتی)، سناریو ۳ را به عنوان مناسب ترین گزینه انتخاب کردند (۱۴).

طی نتایج آنالیز حساسیت، مشخص شد که تأسیسات بازیابی مواد مزایا زیست محیطی ناشی از بازیافت را افزایش می‌دهند. تحقیقات همچنین نشان داده است که ترکیب تأسیسات بازیابی مواد، کمپوست سازی و دفن پسماند منجر به افزایش مزایای شاخص های زیست محیطی می‌شود (۵، ۷). به هر حال این پژوهش همچون سایر پژوهش ها دارای محدودیت هایی است. به رغم تلاش هایی که جهت جمع آوری دقیق اطلاعات در این مقاله صورت گرفت، اما محدودیت های داده ای، روش شناسی، تفسیری و هزینه ای باید در تحلیل ها مورد توجه قرار گیرند تا نتایج دقیق، شفاف و قابل اعتماد باشند. همچنین مطالعات بعدی در راستای ارزیابی چرخه حیات پسماند شهری باید به داده های دقیق، تحلیل های جامع و بهینه سازی فرآیندها توجه داشته باشند تا نتایج بهتری در زمینه کاهش اثرات زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی مدیریت پسماند به دست آید.

#### نتیجه گیری

مطالعه حاضر به منظور ارزیابی مناسب ترین و پایدارترین سیستم مدیریت پسماند با استفاده از نرم افزار ارزیابی چرخه حیات جهت انتخاب سناریو با کمترین اثرات زیست محیطی انجام

زیست محیطی را دارد (۲۱). همچنین Pragma و همکاران در سال ۲۰۲۴ با استفاده از ارزیابی چرخه حیات نشان دادند که دفن بهداشتی پسماند اثرات زیست محیطی کمتری بین سناریوهای پیشنهادی (سناریو ۱: تلنبار پسماند، سناریو ۲: دفن بهداشتی، سناریو ۳: ۴۰ درصد تلنبار پسماند و ۶۰ درصد دفن بهداشتی، سناریو ۴: ۱۰ درصد پسماندسوزی، ۳۵ درصد تلنبار کردن و ۵۵ درصد دفن بهداشتی) داشته و بیشترین تأثیرات زیست محیطی منفی مربوط به سناریو تلنبار پسماند است (۱۳). مواد مغذی مانند آمونیاک، اکسیدنیتروژن و فسفات مسئول اوتروفیکاسیون هستند. فرآیندهای بیولوژیکی در داخل محل دفن گازهای نیتروژن و فسفردار تولید می‌کنند که می‌توانند در شیرابه حل شوند و اثرات منفی بیشتری بر محیط زیست داشته باشند. سناریو ۲ و ۳ کمترین تأثیر اوتروفیکاسیون  $kg\ PO_4^{3-}\ eq./t$   $0.04$  را دارند که دلیل آن، جداسازی پسماند در مبداء است. همچنین تحقیقات نشان داده است که تلنبار کردن پسماند دارای اوتروفیکاسیون بالایی است ( $kg\ PO_4^{3-}\ eq./t$   $0.47$ ) طی این مطالعات وجود لاینرهای مصنوعی غیرقابل نفوذ و تصفیه شیرابه، واحد تولید کمپوست و دفن زباله کمترین اوتروفیکاسیون را خواهند داشت (۵). گزارش شده است در مراکز دفن، یک کیلوگرم پسماند  $0.25$  نانوگرم اوتروفیکاسیون ایجاد می‌کند (۲۵). سمیت انسان در اثر انتشار آلاینده‌هایی مانند ذرات معلق، اکسیدهای سولفور، اکسیدهای نیتروژن و فلزات سنگین ایجاد می‌شود. سناریوی ۵ (سوزاندن همراه با دفن پسماند) به دلیل انتشار بالای فلزات سنگین، اکسیدهای سولفور، اکسیدهای نیتروژن در طول فرآیند احتراق، منجر به بالاترین سمیت برای انسان است ( $kg\ 1,4\ DB\ eq./t$   $1000/20$ ). از میان نتایج احتمالی، سناریوی ۲ کمترین تأثیر سمیت ( $kg\ 1,4\ DB\ eq./t$   $2/89$ ) را دارد که نشان می‌دهد واحد کمپوست و بازیافت مواد تأثیر کمتری بر انتشار عوامل سمی نسبت به دفن پسماند دارند. فعل و انفعالات شیمیایی بین اکسیدهای نیتروژن، مونوکسیدکربن و آلاینده‌های آلی فرار در حضور نور خورشید باعث تولید ازن تروپوسفری شده که منجر به بروز آسم و سایر

تأثیرات زیست محیطی، مانند نظر اسیدی سازی، یوتریفیکاسیون، سمیت انسان، تولید ازن تروپوسفری و پتانسیل گرمایش جهانی نیز می توانند به طور قابل توجهی با اتخاذ تأسیسات بازیابی مواد و روش های تصفیه بیولوژیکی مانند کمپوست سازی و هاضم بی هوازی کاهش یابند.

#### تشکر و قدردانی

مطالعه حاضر در کمیته اخلاق دانشکده علوم پزشکی خمین با کد IR.KHOMEIN.REC.1403.019 به ثبت رسیده است. بدین وسیله نویسندگان از دانشکده علوم پزشکی خمین جهت تأمین بودجه انجام این پروژه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

#### تضاد منافع

در این پژوهش هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان گزارش نشده است.

#### مشارکت نویسندگان:

- (۱) مفهوم پردازی و طراحی مطالعه، یا جمع آوری داده ها، یا تجزیه و تحلیل و تفسیر داده ها: همه نویسندگان
- (۲) تهیه پیش نویس مقاله یا بازبینی آن جهت تدوین محتوای اندیشمندانه: همه نویسندگان
- (۳) تأیید نهایی دست نوشته پیش از ارسال به مجله: همه نویسندگان

شد. در میان ۵ سناریوی پیشنهادی، سناریوی ۲ (تأسیسات بازیابی مواد، واحد تولید کمپوست همراه با دفن پسماند)، کمترین تأثیرات زیست محیطی جهت مدیریت پسماند را داشت. میزان پارامترهای زیست محیطی بررسی شده در سناریو ۲ شامل پتانسیل گرمایش جهانی  $867/20 \text{ kg CO}_2 \text{ eq./t}$ ، اسیدی سازی  $0/35 \text{ kg PO}_4^{3-} \text{ eq./t}$ ، پتانسیل سمیت انسان معادل  $1/4 \text{ kg SO}_2 \text{ eq./t}$ ، و تولید ازن تروپوسفری معادل  $2/89 \text{ kg C}_2\text{H}_4 \text{ eq./t}$  و  $0/07$  به دست آمد.

سناریو ۲ با حداقل انتشار گازهای گلخانه ای بیشترین سود و کمترین میزان گرمایش جهانی را در میان سناریوها داشت؛ زیرا بخش آلی پسماند به هاضم بی هوازی انتقال و بیوگاز و ماده هضم شده تولید می کند. بیوگاز را طی فرآوری به بیومتان تبدیل و جایگزین گازهای مایع کرده و یا در منازل مسکونی می توان استفاده کرد. از ماده هضم شده نیز می توان به عنوان کود در بخش کشاورزی استفاده نمود. با این حال، سناریوی ۳ پتانسیل سمیت انسانی بیشتری در مقایسه با سناریوهای ۲ و ۴ داشت. به نظر می رسد سناریو ۲ بهترین سناریو برای مدیریت پسماند برای شهر ورامین باشد و کمترین تأثیرات زیست-محیطی را از نظر اسیدی سازی، یوتریفیکاسیون، سمیت انسانی و تولید ازن تروپوسفری داشته است که از نظر بهداشت و محیط زیست نیز نسبتاً مطلوب هستند.

ارزیابی چرخه حیات سیستم های مدیریت پسماند نشان می دهد که انتشار گازهای جمع آوری نشده مراکز دفن پسماند، بزرگترین تهدید بالقوه برای محیط زیست هستند. مقوله های

## References

- Awasthi SK, Sarsaiya S, Kumar V, Chaturvedi P, Sindhu R, Binod P, et al. Processing of municipal solid waste resources for a circular economy in China: An overview. *Fuel*. 2022;317:123478.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123478>
- Richard EN, Hilonga A, Machunda RL, Njau KN. Life cycle analysis of potential municipal solid wastes management scenarios in Tanzania: the case of Arusha City. *Sustainable Environment Research*. 2021;31(1):1-13.  
<https://doi.org/10.1186/s42834-020-00075-3>
- Prado V, Cinelli M, Ter Haar SF, Ravikumar D, Heijungs R, Guinée J, et al. Sensitivity to weighting in life cycle impact assessment (LCIA). *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2020;25(12):2393-406.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-019-01718-3>
- Rana R, Ganguly R, Kumar Gupta A. Evaluation of solid waste management in satellite Towns of Mohali and Panchkula-India. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*. 2017;43(4):280-94.  
<https://doi.org/10.5276/JSWTM.2017.280>
- Rana R, Ganguly R, Gupta AK. Life-cycle assessment of municipal solid-waste management strategies in Tricity region of India. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2019;21(3):606-23  
<https://doi.org/10.1007/s10163-018-00822-0>
- Mandpe A, Bhattacharya A, Paliya S, Pratap V, Hussain A, Kumar S. Life-cycle assessment approach for municipal solid waste management system of Delhi city. *Environmental Research*.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113424>
- Nyitrai J, Almansa XF, Zhu K, Banerjee S, Hawkins TR, Urgun-Demirtas M, et al. Environmental life cycle assessment of treatment and management strategies for food waste and sewage sludge. *Water Research*. 2023;240:120078.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120078>
- Yadav P, Samadder SR. Environmental impact assessment of municipal solid waste management options using life cycle assessment: a case study. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(1):838-54.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0439-7>
- Srivastava AK, Nema AK. Life cycle assessment of integrated solid waste management system of Delhi. *Towards life cycle sustainability management: Springer*; 2011. p. 267-76.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-007-1899-9\\_26](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1899-9_26)
- Babu GS, Lakshmikanthan P, Santhosh L. Life cycle analysis of municipal solid waste (MSW) land disposal options in Bangalore City. *ICSI 2014: Creating Infrastructure for a Sustainable World 2014*. p. 795-806.  
<https://doi.org/10.1061/9780784478745.075>
- (ISO) IOFS. ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva, Switzerland: European Standard; 2006.  
<https://www.iso.org/standard/37456.html#lifecycle>
- Mulya KS, Zhou J, Phuang ZX, Laner D, Woon KS. A systematic review of life cycle assessment of solid waste management: Methodological trends and prospects. *Science of The Total Environment*. 2022;831:154903.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154903>
- Paul PP, Bari QH, Sajju JA, Islam MR, editors. Life cycle assessment of municipal solid waste management in Khulna city of Bangladesh. *AIP Conference Proceedings*; 2025: AIP Publishing LLC.  
<https://doi.org/10.1063/5.0247428>
- Sharma A, Ganguly R, Gupta AK. Life cycle assessment of municipal solid waste generated from hilly cities in India-A case study. *Heliyon*. 2023;9(11).  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21575>
- Hoornweg D, Bhada-Tata P. What a waste: a global review of solid waste management. 2012.  
<https://doi.org/10.1596/17388>
- Zarea MA, Moazed H, Ahmadmoazzam M, Malekghasemi S, Jaafarzadeh N. Life cycle assessment for municipal solid waste management: a case study from Ahvaz, Iran. *Environmental monitoring and assessment*. 2019;191(3):131.

<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7273-y>

17. Liu M, Tan Z, Fan X, Chang Y, Wang L, Yin X. Application of life cycle assessment for municipal solid waste management options in Hohhot, People's Republic of China. *Waste Management & Research*. 2021;39(1):63-72.

<https://doi.org/10.1177/0734242X20959709>

18. Lakiotia EN, Moustakas KG, Komilisc DP, Domopoulou AE, Karayannisa VG. Sustainable solid waste management: Socio-economic considerations. *Chem Eng*. 2017;56:661-6.

<https://doi.org/10.3303/CET1756111>

19. Thushari I, Vicheanteab J, Janjaroen D. Material flow analysis and life cycle assessment of solid waste management in urban green areas, Thailand. *Sustainable Environment Research*. 2020;30(1):21.

<https://doi.org/10.1186/s42834-020-00057-5>

20. Mannheim V. Perspective: Comparison of end-of-life scenarios of municipal solid waste from viewpoint of life cycle assessment. *Frontiers in Built Environment*. 2022;8:991589.

<https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.991589>

21. Rahimi F, Atabi F, Nouri J, Omrani G. Using life cycle assessment method for selecting optimal waste management system in Tehran city. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*. 2019.

<https://doi.org/10.18502/jehsd.v4i4.2019>

22. Fazio S; Vaccari L; Mathieux F. EPLCA - European Platform on Life Cycle Assessment. European Commission; 2016. JRC102497.

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC102497>

23. Cheniti H, Kerboua K, Sekiou O, Aouissi HA, Benselhoub A, Mansouri R, et al. Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management within Open Dumping and Landfilling Contexts: A Strategic Analysis and Planning Responses Applicable to Algeria. *Sustainability*. 2024;16(16):6930.

<https://doi.org/10.3390/su16166930>

24. Lodato C, Tonini D, Damgaard A, Fruergaard Astrup T. A process-oriented life-cycle assessment (LCA) model for environmental and resource-related technologies (EASETECH). *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2020;25(1):73-88.

<https://doi.org/10.1007/s11367-019-01665-z>