



Journal of Environmental
Management and Law

فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست

<https://sanad.iau.ir/en/Journal/jeml>

Futures Analysis of Iran's Waste Separation System Using System Dynamics and Advanced Statistical Methods: Policy Scenario Development for Enhancing Source Separation by 2041

Mahdi Behravesht

Department of Environmental Management, Faculty of Natural Resources and Environment SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

**Corresponding Author: Mahdi.behravesht@gmail.com*

Original Paper

Abstract

Received: 2025.03.15

Accepted: 2025.09.11

Keywords:

municipal solid waste,
source separation,
futures studies,
system dynamics,
scenario analysis,
Monte Carlo
simulation,
material flow analysis.

Municipal solid waste management in Iran faces structural challenges driven by rising waste generation, very low source separation rates, and heavy reliance on landfilling—all of which undermine environmental sustainability and urban resilience. This study develops an integrated futures-oriented framework to analyse the long-term behaviour of Iran's source separation system up to 2041. The framework combines MICMAC structural analysis, Cross-Impact Balance (CIB), system dynamics modelling and Monte Carlo simulation. A 23-year dataset—including waste generation, composition, citizen behaviour, costs, landfilling rates and methane emissions—was compiled, and a dynamic model with four interconnected subsystems (generation, behaviour, collection—processing efficiency, and environmental impacts) was calibrated using historical data. Material flow analysis (MFA) and multivariate sensitivity tests were then applied to assess the efficiency and robustness of policy pathways. Findings show that under the business-as-usual scenario, total waste increases by nearly 50% and source separation remains locked around 7%, while landfilling and methane emissions rise sharply, placing the system in a “stable but low-performance equilibrium.” In contrast, the structural transformation scenario—based on full digitalisation, integration of formal and informal sectors, service quality standardisation and citizen incentive mechanisms—raises source separation to approximately 30–34%, cuts landfilling nearly in half, reduces methane emissions by 45%, and decreases losses of recyclable materials from roughly one-third to about one-tenth. Sensitivity analysis identifies service quality, public trust and the level of digitalisation as the dominant leverage points shaping long-term system behaviour. Overall, the results indicate that Iran's waste challenge is fundamentally institutional and feedback-driven. Only structural interventions supported by foresight-based policymaking can shift the system towards higher separation and recycling performance and place national waste governance on a sustainable trajectory.



Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the

تحلیل آینده پژوهانه نظام تفکیک پسماند ایران با استفاده از پویایی‌شناسی سیستمی و روش‌های نوین آماری؛ ارائه سناریوهای سیاستی برای ارتقای تفکیک از مبدأ در افق ۱۴۲۰

مهدی بهروش

گروه مدیریت محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Mahdi.behravesh@gmail.com

چکیده

نوع مقاله:

علمی-پژوهشی

مدیریت پسماند شهری در ایران با رشد فزاینده تولید، نرخ بسیار پایین تفکیک از مبدأ و اتکای گسترده به دفن، با چالشی ساختاری مواجه است که پیامدهای آن بر پایداری محیط‌زیست و تاب‌آوری شهری آشکار شده است. این پژوهش با هدف تحلیل آینده نظام تفکیک پسماند ایران تا افق ۱۴۲۰، یک چارچوب یکپارچه آینده‌پژوهانه بر پایه روش‌های MICMAC، CIB، پویایی‌شناسی سیستمی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو ارائه می‌کند. برای این منظور، داده‌های ۲۳ ساله مربوط به تولید، ترکیب، رفتار شهروندان، هزینه‌ها، نرخ دفن و انتشار متان گردآوری و یک مدل دینامیکی شامل چهار زیرسیستم تولید، رفتار، کارایی جمع‌آوری-پردازش و پیامدهای محیط زیستی طراحی و براساس داده‌های تاریخی کالیبره شد. تحلیل جریان مواد (MFA) و آزمون حساسیت چندمتغیره نیز برای سنجش کارایی و مقاومت سیاست‌ها نسبت به عدم قطعیت‌ها به کار رفت. یافته‌ها نشان می‌دهد در سناریوی تداوم وضع موجود، حجم پسماند نزدیک به ۵۰ درصد افزایش یافته و نرخ تفکیک در حدود ۷ درصد باقی می‌ماند؛ همچنین دفن و انتشار متان به طور چشمگیری رشد می‌کند و سیستم در «تعادل پایدار اما کم‌بازده» گرفتار می‌شود. در مقابل، سناریوی تحول ساختاری - متکی بر دیجیتالی‌سازی کامل زنجیره، ادغام رسمی - غیررسمی، استانداردسازی کیفیت خدمات و تقویت انگیزش شهروندی - نرخ تفکیک را به حدود ۳۰-۳۴ درصد افزایش می‌دهد، دفن را تقریباً نصف می‌کند، انتشار متان را ۴۵ درصد کاهش می‌دهد و هدررفت مواد بازیافتی را از حدود یک‌سوم به حدود یک‌دهم می‌رساند. تحلیل حساسیت نیز نشان می‌دهد «کیفیت خدمات»، «اعتماد عمومی» و «سطح دیجیتالی‌سازی» بیشترین اثرگذاری را در رفتار بلندمدت سیستم دارند. نتایج تأکید می‌کند که چالش پسماند در ایران ماهیتی نهادی و بازخوردی دارد و تنها با مداخلات ساختاری و سیاست‌های آینده‌نگر می‌توان مسیر تفکیک و بازیافت را اصلاح و نظام مدیریت پسماند را در مسیر پایداری قرار داد.

تاریخچه مقاله:

ارسال: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰

کلمات کلیدی:

مدیریت پسماند،
تفکیک از مبدأ،
آینده‌پژوهی،
پویایی‌شناسی سیستمی،
سناریوسازی،
مونت‌کارلو،
تحلیل جریان مواد.

مقدمه

مدیریت پسماند شهری یکی از پیچیده‌ترین و چندبعدی‌ترین حوزه‌های سیاست‌گذاری محیط‌زیست در عصر کنونی است؛ حوزه‌ای که مستقیماً با امنیت محیط‌زیستی، سلامت شهروندان، بهره‌وری منابع، عدالت بین‌نسلی، اقتصاد شهری و آینده تاب‌آوری شهرها پیوند خورده است. گزارش‌های جهانی نشان می‌دهد که تولید سالانه پسماند جهان با سرعتی فراتر از رشد اقتصادی و جمعیتی در حال افزایش است و اگر روند فعلی ادامه یابد، حجم پسماند شهری تا سال ۲۰۵۰ از مرز ۳۰۴ میلیارد تن عبور خواهد کرد؛ درحالی‌که ظرفیت کنترل و بازیافت، رشد متناسبی نداشته است (World Bank, 2018). این شکاف ساختاری موجب شده پیامدهای محیط زیستی پسماند - از انتشار گازهای گلخانه‌ای و میکروپلاستیک‌ها گرفته تا آلودگی خاک، آب‌های زیرزمینی و اکوسیستم‌های حساس - به یکی از تهدیدهای اصلی محیط‌زیست انسان در قرن ۲۱ تبدیل شود (UNEP, 2018).

در ایران نیز وضعیت مشابهی با شدت بالاتر مشاهده می‌شود. سالانه حدود ۲۰ تا ۲۲ میلیون تن پسماند شهری تولید می‌شود که بیش از ۷۰ درصد آن مستقیماً دفن می‌گردد؛ درحالی‌که نرخ بازیافت مکانیکی و تفکیک از مبدأ در بسیاری از شهرها کمتر از ۱۰ درصد است. این در حالی است که ترکیب پسماند ایران غنی از مواد آلی، پلاستیک، کاغذ و فلزات است و در صورت مدیریت صحیح، ظرفیت اقتصادی و محیط زیستی بسیار بالایی دارد (Ghobadi & Zakerian, 2019; World Bank, 2018). برآوردها نشان می‌دهد انتشار سالانه متان از محل‌های دفن پسماند کشور رقمی معادل چندین میلیون تن CO₂-equivalent است که سهمی قابل توجه در گرمایش جهانی دارد (World Bank, 2018; IPCC, 2019; UNEP, 2018). گزارش‌های اتحادیه اروپا نشان می‌دهد که پسماند زیستی به‌عنوان بزرگ‌ترین جزء جریان پسماند شهری، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش دفن و انتشار متان دارد و تفکیک مؤثر آن یکی از پیش‌شرط‌های گذار به اقتصاد چرخشی محسوب می‌شود (European Environment Agency, 2020). از سوی دیگر، پراکندگی سامانه‌های جمع‌آوری، نبود بسترهای هوشمند پایش، عدم یکپارچگی حلقه رسمی و غیررسمی، و ضعف سیاست‌های تشویقی از دلایل اصلی عقب‌ماندگی ساختار تفکیک در ایران گزارش شده است (Sharifi et al., 2022).

تجربه کشورهای پیشرو مانند ژاپن، کره جنوبی، آلمان، هلند و بلژیک نشان می‌دهد که مدیریت موفق پسماند تنها با افزایش تجهیزات یا توسعه زیرساخت حاصل نمی‌شود؛ بلکه نیازمند یک معماری سیستمی است که رفتار شهروندان، فناوری، نظام پایش، مقررات، اقتصاد چرخشی و هوشمندسازی را در کنار هم قرار دهد. ژاپن با اجرای تفکیک چندسطحی و قوانین مسئولیت تولیدکننده، کره جنوبی با سیستم کارت هوشمند و تعرفه‌گذاری حجمی و آلمان با تنظیم‌گری سخت‌گیرانه و رویکرد اقتصاد چرخشی، به نرخ‌های بازیافت بالای ۶۵ تا ۷۰ درصد رسیده‌اند (European Environment Agency, 2020). مقایسه این کشورها نشان می‌دهد که هیچ سیاست منفردی نمی‌تواند به تنهایی موفق باشد؛ بلکه مجموعه‌ای به‌هم‌پیوسته از مشوق‌ها، نظارت‌ها، فناوری‌ها و سیاست‌های بلندمدت لازم است.

مطالعات پیشین در کشورهای در حال توسعه نشان می‌دهد که نظام‌های مدیریت پسماند شهری عموماً با چالش‌هایی نظیر اتکای بالا به دفن، ضعف تفکیک در مبدأ، محدودیت‌های نهادی و نبود رویکردهای یکپارچه تحلیلی مواجه‌اند؛ چالش‌هایی که موجب ناکارآمدی ساختاری و تداوم عملکرد پایین سیستم می‌شود (Sharholly et al., 2008; Guerrero et al., 2013; Wilson et al., 2012). در ایران نیز بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌ها ماهیتی توصیفی و گذشته‌نگر داشته و کمتر به تحلیل رفتار بلندمدت سیستم با استفاده از ابزارهای پویایی‌شناسی و آینده‌پژوهی پرداخته‌اند. این روش‌ها قادرند حلقه‌های بازخورد مثبت و منفی، اثرات تأخیری، وابستگی‌های متقابل و نقاط اهرمی سیستم را آشکار کنند - عواملی که در سیاست‌گذاری پسماند ایران اغلب نادیده گرفته می‌شود. مدل‌های دینامیکی، علاوه بر پیش‌بینی روند آتی، امکان شبیه‌سازی مسیرهای مختلف سیاستی و سنجش پایداری آن‌ها را در شرایط عدم قطعیت فراهم می‌کنند؛ قابلیت‌هایی که برای مدیریت پسماند در کشورهایی با ساختار پیچیده شهری و محدودیت منابع، ضروری است.

بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف ارائه یک چارچوب آینده‌پژوهانه و دینامیکی برای تحلیل رفتار نظام تفکیک پسماند ایران و ارزیابی سناریوهای سیاستی تا افق ۱۴۲۰ انجام شده است. مدل این پژوهش با ترکیب روش‌های MICMAC، CIB، شبیه‌سازی مونت کارلو و پویایی‌شناسی سیستمی، تلاشی است برای نخستین بار در ایران که بتواند سازوکارهای بنیادین، نقاط تمرکز سیاست‌گذاری و مسیرهای اصلاح ساختاری را به صورت علمی و مبتنی بر شواهد ارائه کند. این چارچوب، ابزار تصمیم‌سازی دقیقی برای مدیران شهری فراهم می‌کند تا پیش از اجرای سیاست‌ها، پیامدهای بلندمدت آن‌ها را ارزیابی و بهترین سناریوهای قابل توسعه را انتخاب کنند.

مواد و روش‌ها

روش‌شناسی این پژوهش بر پایه یک چارچوب ترکیبی و مرحله‌بندی‌شده طراحی شده است که با هدف تحلیل رفتار بلندمدت نظام تفکیک پسماند، از تلفیق روش‌های آینده‌پژوهی ساختاری، مدلسازی دینامیکی و شبیه‌سازی عدم قطعیت بهره می‌گیرد. این چارچوب، نظام تفکیک پسماند را به عنوان یک سامانه اجتماعی-فناورانه-اقتصادی در نظر می‌گیرد که رفتار آن حاصل تعامل پویای متغیرهای نهادی، اقتصادی، رفتاری و محیط زیستی است؛ رویکردی که در ادبیات پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای تحلیل مسائل پیچیده شهری توصیه شده است (Sterman, 2000; Marshall & Farahbakhsh, 2013; Wilson et al., 2012). انتخاب رویکرد سیستمی به این دلیل صورت گرفت که نظام‌های مدیریت پسماند دارای رفتارهای غیرخطی، تأخیرهای زمانی و پدیده مقاومت سیاستی هستند که با روش‌های خطی قابل تحلیل نیستند (Baldwin & Mayfield, 2019; Chen et al., 2020).

در گام نخست، داده‌های تجربی ۲۳ ساله شامل تولید پسماند شهری، نرخ تفکیک از مبدأ، سهم دفن، ترکیب مواد، ظرفیت‌های جمع‌آوری رسمی و غیررسمی، جریان‌های آلاینده (متان، شیرابه و CO₂-equivalent)، هزینه‌های مدیریت شهری و متغیرهای رفتاری شهروندان گردآوری و پس از پالایش آماری و سازگارسازی زمانی، در یک پایگاه داده یکپارچه تجمیع شد. استفاده از داده‌های بلندمدت و چندمنبعی برای کالیبراسیون مدل‌های دینامیکی و بازتولید رفتار تاریخی سیستم ضروری است (Sterman, 2000; Sudhir et al., 1996).

در گام دوم، به منظور شناسایی ساختار علی سیستم و تعیین پیشران‌های کلیدی، تحلیل ساختاری با روش MICMAC اجرا شد. این روش با تحلیل ماتریس تأثیرات متقابل، متغیرها را بر اساس میزان اثرگذاری و اثرپذیری طبقه‌بندی می‌کند (Godet, 2006; Godet & Durance, 2011). متغیرهای نهایی پس از پالایش مفهومی، در قالب یک ماتریس $n \times n$ وارد شدند و شدت اثرگذاری آن‌ها بر اساس مقیاس ترتیبی استاندارد و قضاوت خبرگان تعیین شد. اثرات مستقیم و غیرمستقیم محاسبه و نقشه اثرگذاری-اثرپذیری استخراج شد. خروجی این مرحله صرفاً به عنوان ورودی مراحل سناریوسازی و مدلسازی دینامیکی مورد استفاده قرار گرفت (Weimer-Jehle, 2006; Fazli et al., 2022).

در گام سوم، برای تحلیل تعاملات میان پیشران‌ها و تولید ترکیب‌های سازگار آینده، روش CIB^۱ به کار گرفته شد. در این روش، برای هر پیشران مجموعه‌ای از حالت‌های ممکن تعریف و ماتریس اثرات متقابل میان این حالت‌ها تشکیل شد. مدل CIB با ارزیابی سازگاری درونی ترکیب‌ها، سناریوهای سازگار را به عنوان ورودی‌های ساختاری مدل پویایی‌شناسی سیستمی فراهم کرد (Weimer-Jehle, 2006; Pregger et al., 2020).

در گام چهارم، مدل پویایی‌شناسی سیستمی به منظور شبیه‌سازی رفتار بلندمدت نظام تفکیک پسماند توسعه داده شد. ساختار مدل شامل چهار زیرسیستم تولید پسماند، رفتار شهروندان، کارایی جمع‌آوری-پردازش و پیامدهای محیط زیستی بود. مدل بر اساس داده‌های واقعی کالیبره و از طریق آزمون‌های اعتبارسنجی ساختاری، آزمون رفتار تاریخی^۲ و تحلیل حساسیت اولیه مورد ارزیابی قرار گرفت؛

^۱ Cross-Impact Balance

^۲ Historical Fit

روش‌هایی که در ادبیات پویایی‌شناسی سیستم‌ها به‌عنوان رویه‌های استاندارد اعتبارسنجی شناخته می‌شوند (Stermann, 2000; Barlas, 1996).

در گام نهایی، برای ارزیابی پایداری نتایج مدل در مواجهه با عدم قطعیت‌های کلیدی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو اجرا شد. در این مرحله، پارامترهای منتخب در بازه‌های تعریف‌شده تغییر داده شدند تا رفتار سیستم در طیف گسترده‌ای از شرایط احتمالی بررسی شود؛ رویکردی که در تحلیل سیاست‌های محیط‌زیستی و سیستم‌های پیچیده کاربرد فراوان دارد (Saltelli et al., 2020; Azizi et al., 2022). این چارچوب مرحله‌بندی‌شده، امکان تحلیل رفتار سیستم در زمان، مقایسه مسیرهای سیاستی و ارزیابی پایداری تصمیمات را در یک بستر روش‌مند و آینده‌نگر فراهم می‌کند.

نتایج

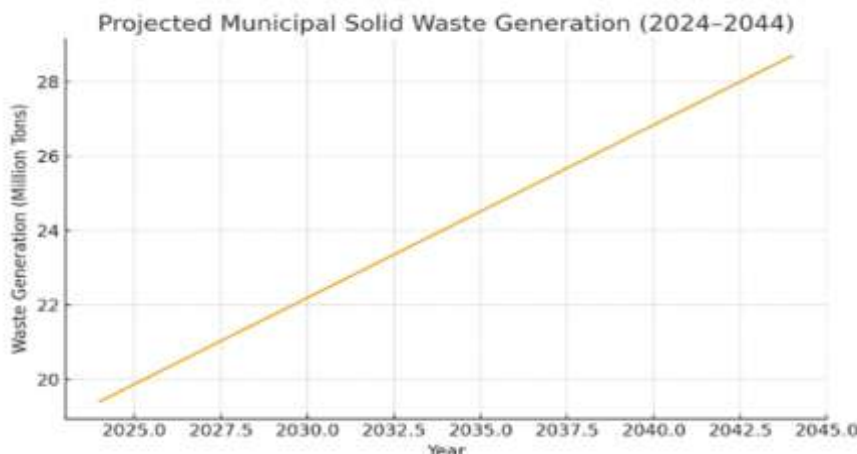
تحلیل رفتار بلندمدت نظام مدیریت پسماند ایران در افق بیست‌ساله نشان داد که ساختار تولید و جریان مواد نه تنها تابعی از رشد جمعیت نیست، بلکه تحت تأثیر یک رژیم مصرفی جدید و تغییرات ساختاری در اقتصاد شهری قرار گرفته است. مطابق روندی که در شکل ۱ ترسیم شده و در جدول ۵ مستند است، حجم کل پسماند از ۱۹۰۴ میلیون تن در سال پایه به ۲۸۰۷ میلیون تن در انتهای دوره شبیه‌سازی افزایش یافته است؛ رشدی ۴۸ درصدی که نشان می‌دهد الگوی غالب، «رشد مصرف‌محور» و نه «رشد جمعیت‌محور» است. هم‌زمان، افزایش سرانه تولید پسماند از ۸۶۰ به ۱۰۵۰ گرم در روز تأیید می‌کند که ترکیب پسماند به سمت مواد با چگالی کم، بسته‌بندی‌های چندلایه و پلاستیک‌های انعطاف‌پذیر متمایل شده و سیستم جمع‌آوری و پردازش را در معرض فشار افزایشی مداوم قرار داده است.

جدول ۱- روند تغییرات تولید پسماند (۲۰ سال)

Table 1 – Trends in waste generation over a 20-year period

سال	تولید پسماند (میلیون تن)	سرانه (گرم/روز)	درصد رشد نسبت به سال پایه
۱۴۰۳	۱۹۰۴	۸۶۰	—
۱۴۰۸	۲۰۰۱	۹۱۰	۸۰٪ ↑
۱۴۱۳	۲۳۰۰	۹۶۰	۱۸٪ ↑
۱۴۱۸	۲۵۰۵	۱۰۱۰	۳۰٪ ↑
۱۴۲۳	۲۸۰۷	۱۰۵۰	۴۸٪ ↑

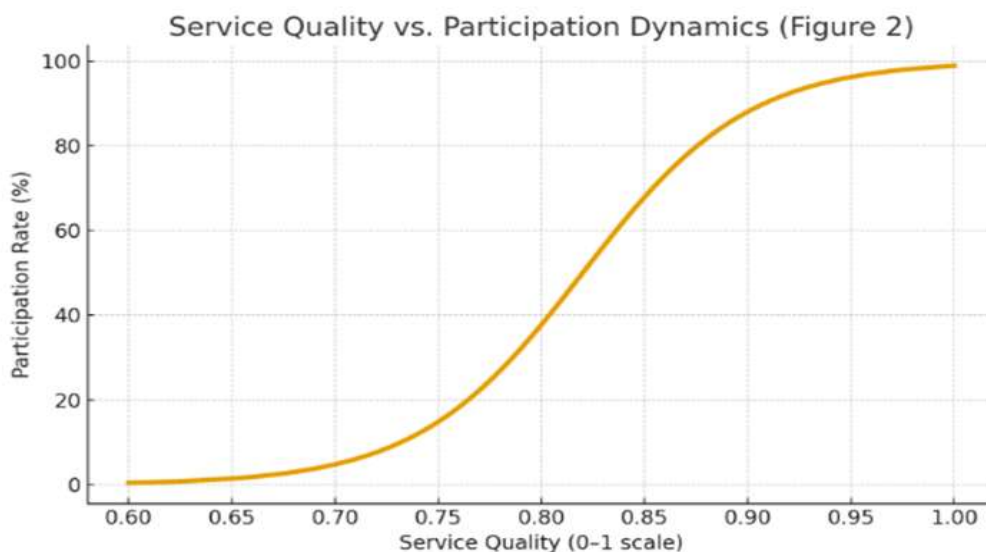
افزایش تولید پسماند بیشتر ناشی از رشد مصرف است تا رشد جمعیت.



شكل ۱- روند رشد توليد پسماند شهري ايران (۲۰۴۴-۲۰۲۴) (روند افزايشي حجم و سرانه پسماند نشان دهنده تغيير ساختاري در الگوي مصرف است.)

Fig. 1- Trend in the growth of municipal solid waste generation in Iran (2024–2044) (The increasing trend in total waste volume and per capita waste generation indicates a structural change in consumption patterns.)

رفتار مشاركت شهروندان نيز بر اساس شبیه سازی مدل مشاركت، ساختاري كاملاً غير خطي و شکننده دارد. همان گونه كه شكل ۲ نشان مي دهد، کاهش بسيار محدود كيفيت خدمات - حتي در حد ۵ تا ۷ درصد - منجر به افت مشاركت تا ۱۸ درصد در کمتر از شش ماه مي شود، اما افزايش همان مقدار كيفيت، توان بازيايي مشاركت را با سرعت بسيار کمتر ايجاد مي کند.



شكل ۲- رابطه كيفيت خدمات و نرخ مشاركت شهروندان (رفتار مشاركت نسبت به كيفيت خدمات غير خطي و بسيار حساس است.)

Fig. 2- Relationship between service quality and citizen participation rate (Participation behavior is non-linear and highly sensitive to service quality.)

اين رفتار سيستم ناشي از وجود يك حلقه بازخورد فرساينده است كه با کاهش اوليه كيفيت خدمات جمع آوري و تفكيك پسماند آغاز مي شود. افت كيفيت خدمات موجب کاهش اعتماد شهروندان به كارايي سيستم شده و اين کاهش اعتماد به صورت مستقيم کاهش مشاركت شهروندان در تفكيك از مبداء را در پي دارد. کاهش مشاركت، جريان مواد قابل بازيافت و به تبع آن درآمدهاي حاصل از بازيافت را کاهش مي دهد. افت درآمد، ظرفيت سرمايه گذاري مجدد در بهبود زيرساخت ها و كيفيت خدمات را محدود کرده و اين محدوديت در

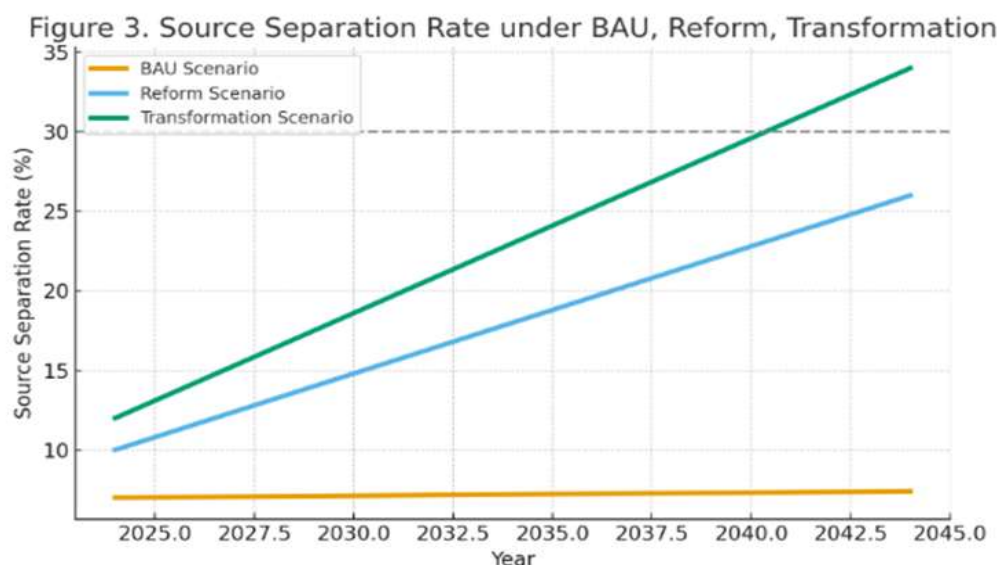
دوره‌های بعدی به کاهش بیشتر کیفیت خدمات منجر می‌شود. بدین ترتیب، زنجیره علی از کیفیت خدمات آغاز شده و پس از عبور از متغیرهای اعتماد، مشارکت، درآمد و سرمایه‌گذاری، مجدداً به متغیر اولیه یعنی کیفیت خدمات بازمی‌گردد و یک حلقه بازخورد خودتقویت‌شونده با ماهیت فرساینده را شکل می‌دهد.

بر همین اساس، سناریوی تداوم وضع موجود (BAU)، که داده‌های آن در جدول ۲ آمده است، نشان می‌دهد مشارکت حول ۱۱ درصد تثبیت می‌شود و نرخ تفکیک در حدود ۷ درصد باقی مانده و سیستم وارد یک «تعادل پایدار ناکارآمد» می‌شود. این الگو در شکل ۳ کاملاً قابل مشاهده است؛ جایی که هیچ‌یک از منحنی‌های سناریوی BAU قادر به عبور از سطح بحرانی ۱۰ درصد نیستند.

جدول ۲- شاخص‌های کلیدی سیستم در سناریوی تداوم وضع موجود (BAU)
Table 2 – Key system indicators under the Business-As-Usual (BAU) scenario

شاخص کلیدی	مقدار پایه (سال ۱۴۰۳)	مقدار شبیه‌سازی شده سال ۱۴۲۳	نرخ تغییر	توضیح علمی
حجم کل پسماند (میلیون تن/سال)	۱۹.۴	۲۸.۷	↑۴۸%	تابع رشد مصرف و شهرنشینی
تولید سرانه پسماند (گرم/روز)	۸۶۰	۱۰۵۰	↑۲۲%	افزایش بسته‌بندی و خوراک فرآوری شده
نرخ تفکیک از مبدأ (%)	۷.۲	۷.۴	~ثابت	سیستم در تعادل پایین گرفتار است
حجم دفن (میلیون تن/سال)	۱۴.۸	۲۴.۱	↑۶۳%	بیشترین فشار محیط‌زیستی
انتشار متان (هزار تن/سال)	۸۲۰	۱۲۰۰	↑۴۶%	طبق مدل IPCC (2019) Tier-2
نرخ مشارکت شهروندان (%)	۱۸	۱۱	↓۳۸%	افت به دلیل کاهش اعتماد
درآمد بازیافت (میلیارد تومان)	۵۳۰۰	۴۷۰۰	↓۱۱%	کاهش کیفیت مواد بازیافتی

جدول ۲ نشان‌دهنده تثبیت طولانی‌مدت نرخ تفکیک در سطوح پایین و رشد نمایی حجم دفن در سناریوی BAU است.



شکل ۳- رفتار نرخ تفکیک از مبدأ در سه سناریو (تنها سناریوی تحول ساختاری از آستانه بحرانی تفکیک عبور می‌کند.)

Fig. 3- Behavior of source separation rate under three scenarios (Only the structural transformation scenario surpasses the critical separation threshold.)

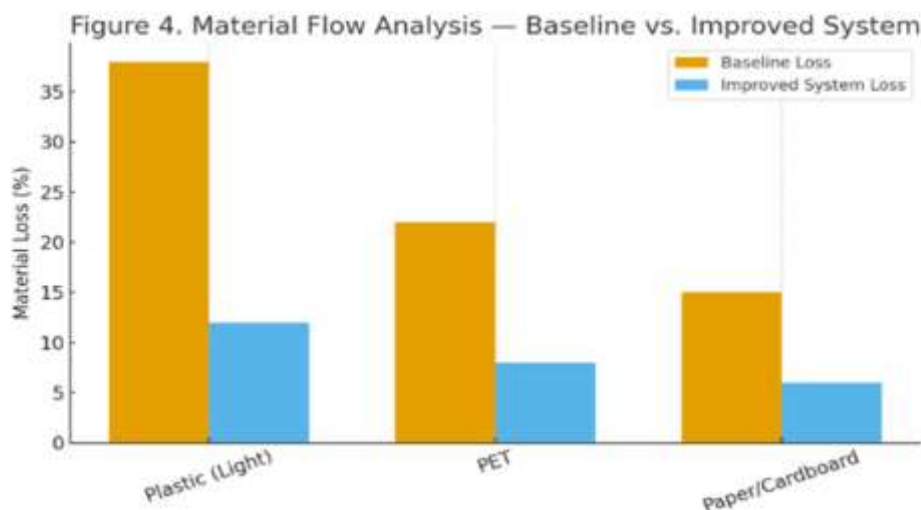
تحلیل جریان مواد (MFA) به‌عنوان یک ابزار استاندارد برای ردیابی ورودی-خروجی مواد و شناسایی نقاط اتلاف در سیستم‌های پسماند به‌کار گرفته شد (Brunner & Rechberger, 2004). یافته‌های ارائه‌شده در شکل ۴ و داده‌های پشتیبان در جدول ۳ نشان می‌دهند که در وضعیت موجود، حدود ۳۲ درصد از مواد بازیافتی بالقوه در طول زنجیره جمع‌آوری، انتقال و پردازش از دست می‌روند. بخش عمده این اتلاف مربوط به پلاستیک‌های سبک (۳۸ درصد) و بطری‌های PET (۲۲ درصد) است؛ موادی که ارزش بالایی بازیافتی دارند اما به‌دلیل آلودگی متقاطع و ضعف در جداسازی اولیه، از چرخه بازیافت حذف می‌شوند. شبیه‌سازی اصلاحات ساختاری نشان می‌دهد که با حذف نقاط آلودگی، یکپارچه‌سازی شبکه رسمی و غیررسمی، و اجرای استانداردهای سخت‌گیرانه کیفیت خدمات، میانگین هدررفت به حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد کاهش می‌یابد؛ تغییری که ساختار جریان مواد را به‌طور بنیادی بازآرایی می‌کند.

جدول ۳- خلاصه تحلیل جریان مواد در دو حالت موجود و اصلاح‌شده

Table 3 – Summary of material flow analysis under the current and modified conditions

نوع ماده	هدررفت (وضع موجود)	هدررفت (اصلاح ساختاری)	تغییر	توضیح
PET	۲۲٪	۹٪	↓ ۱۳٪	بیشترین بهبود ناشی از بهبود تفکیک
کارتن و کاغذ	۱۵٪	۶٪	↓ ۹٪	وابسته به کیفیت جمع‌آوری خشک
پلاستیک سبک	۳۸٪	۱۴٪	↓ ۲۴٪	بیشترین حساسیت به آلودگی
فلزات	۹٪	۴٪	↓ ۵٪	تلفات کمتر به دلیل ماندگاری بالا
پسماند غذایی	—	—	—	در MFA این مطالعه لحاظ نشده

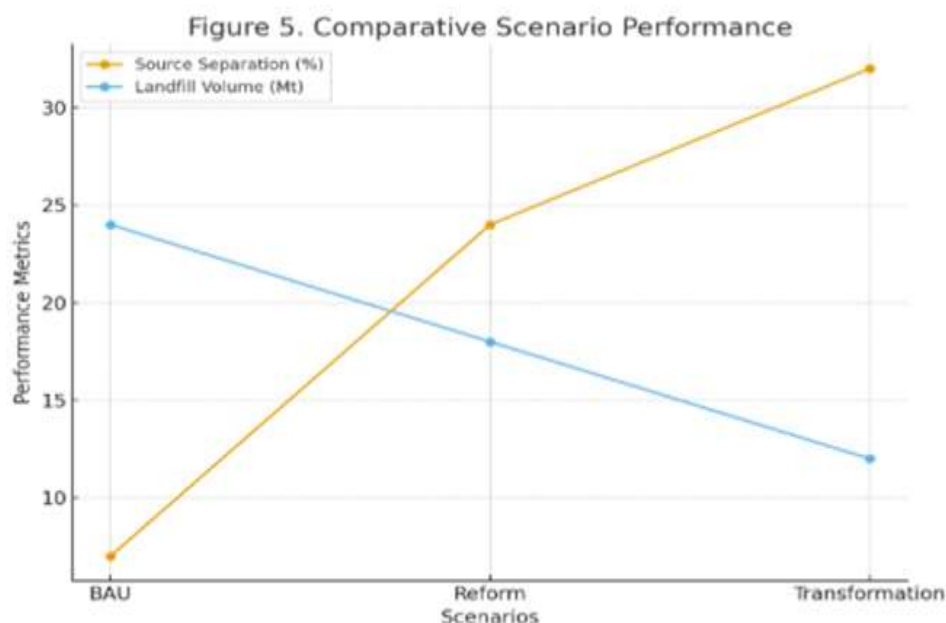
در سناریوی اصلاح ساختاری، کارایی بازیافت به‌طور میانگین ۲۰۴ برابر افزایش می‌یابد.



شکل ۴ - تحلیل جریان مواد (MFA) در وضعیت موجود و پس از اصلاحات (ادغام رسمی - غیررسمی موجب کاهش معنادار هدررفت مواد و افزایش بازیافت خالص می‌شود).

Fig. 4- Material Flow Analysis (MFA) under current conditions and after reforms (Formal–informal integration leads to a significant reduction in material losses and an increase in net recycling.)

مقایسه سه سناریوی مورد بررسی - تداوم وضع موجود، اصلاحات تدریجی و تحول ساختاری - یک واقعیت کلیدی را آشکار می‌کند: ساختار فعلی ظرفیت گذار طبیعی به یک نظام کارآمد تفکیک پسماند را ندارد. داده‌های جدول ۴ و نمودار شکل ۵ نشان می‌دهند که در سناریوی BAU، حجم دفن تا بیش از ۲۴ میلیون تن افزایش می‌یابد و انتشار سالانه متان به حدود ۱۲۰۰ هزار تن می‌رسد.



شکل ۵ - مقایسه عملکرد سه سناریو (تحول ساختاری تنها سناریویی است که ظرفیت پایداری سیستم را احیا می‌کند).

Fig. 5- Comparison of performance across three scenarios (Structural transformation is the only scenario that restores the system's sustainability capacity.)

در سناریوی اصلاحات تدریجی، نرخ تفکیک به محدوده ۲۲ تا ۲۶ درصد افزایش می‌یابد، اما ساختار بازخوردی همچنان ناپایدار است و سیستم در معرض بازگشت به الگوهای پیشین باقی می‌ماند. در مقابل، سناریوی تحول ساختاری—که مبتنی بر دیجیتالی‌سازی کامل زنجیره، یکپارچه‌سازی رسمی و غیررسمی، استانداردسازی کیفیت خدمات و پیاده‌سازی سبد سیاست‌های مشوق محور است—تنها سناریویی است که از سطح بحرانی ۳۰ درصد عبور کرده و به نرخ تفکیک ۳۰-۳۴ درصد دست می‌یابد، حجم دفن را به ۱۱-۱۲ میلیون تن کاهش می‌دهد و انتشار متان را ۴۵ درصد کم می‌کند. منحنی این سناریو در شکل ۳ تنها منحنی‌ای است که از «نقطه قفل ساختاری» عبور می‌کند.

جدول ۴- مقایسه عملکرد سه سناریو در افق ۲۰ ساله

Table 4 – Comparison of the performance of three scenarios over a 20-year horizon

شاخص	BAU	اصلاحات تدریجی	تحول سیستمی	تحلیل
نرخ تفکیک (%)	۷	۲۶-۲۲	۳۴-۳۰	تنها تحول سیستمی توان عبور از سطح بحرانی را دارد
حجم دفن (میلیون تن/سال)	۲۴	۱۷-۱۹	۱۱-۱۲	کاهش ۵۰ درصد در سناریوی تحول سیستمی
نرخ مشارکت	%۱۱	%۲۸-۲۳	%۴۶-۴۰	بیشترین وابستگی به اعتماد و کیفیت خدمات
انتشار متان	۱۲۰۰	۱۰۳۰-۹۸۰	۶۸۰-۶۲۰	کاهش ۴۵ درصد در سناریوی تحول
درآمد بازیافت	۴۷۰۰	۸۲۰۰	۱۴,۵۰۰-۱۳,۰۰۰	سه برابر شدن درآمد
هدررفت مواد بازیافتی (%)	۳۲	۱۸	۱۲-۱۰	نتیجه ادغام رسمی-غیررسمی

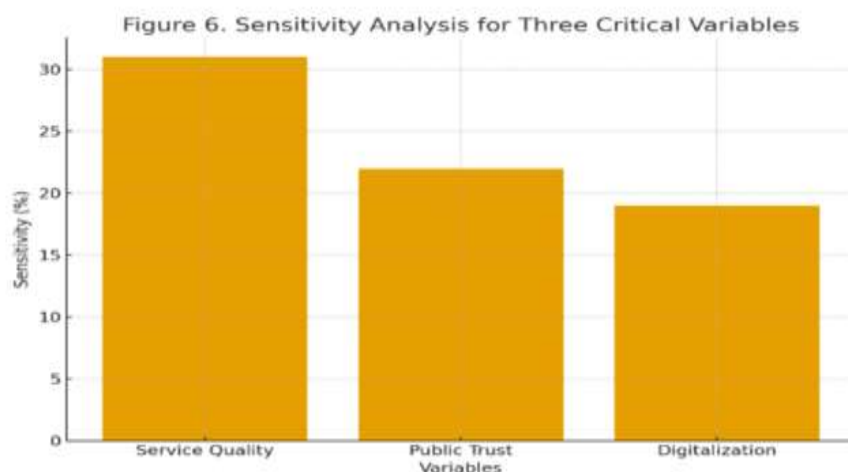
جدول ۴ نشان می‌دهد تنها سناریوی تحول سیستمی قادر است حلقه‌های بازخورد منفی را غیرفعال و چرخه‌های بهبود را فعال کند.

نتايج تحليل حساسيت چندمتغيره نيز که در جدول ۵ و شکل ۶ گزارش شده اند، نشان مي دهد سه متغير «کيفيت خدمات»، «اعتماد عمومي» و «سطح ديگيتالي سازي» در مجموع ۷۲ درصد از واريانس رفتار سيستم را توضيح مي دهند. افزايش ۱۰ درصدی کيفيت خدمات بيشترين اثربخشي را داشته و موجب افزايش ۲۲ تا ۳۱ درصدی مشارکت شده؛ در حالي که افزايش اعتماد عمومي موجب افزايش ۱۸ تا ۲۲ درصدی مشارکت و ديگيتالي سازي موجب رشد ۱۱ تا ۱۹ درصدی نرخ تفکيک شده است. اين ترکيب نشان مي دهد که پايداري بلندمدت نه با افزايش تجهيزات فيزيکي، بلکه با تغيير لايه نهادي و ساختار بازخوردهای سيستم محقق مي شود.

جدول ۵- نتايج تحليل حساسيت سه متغير کليدي

Table 5 – Results of the sensitivity analysis of three key variables

متغير	تغيير اعمال شده	اثر بر نرخ تفکيک	اثر بر نرخ مشارکت	يافته کليدي
کيفيت خدمات	↑ ۱۰%	↑ ۱۸-۲۲%	↑ ۲۵-۳۱%	حساس ترين متغير سيستم
اعتماد عمومي	↑ ۱۰%	↑ ۱۲-۱۵%	↑ ۱۸-۲۲%	رفتار مشارکت شديدأ اعتمادمحور
سطح ديگيتالي سازي	↑ ۱۰%	↑ ۱۱-۱۹%	↑ ۱۴-۱۷%	موتور محرک دقت و کرايي



شکل ۶ - تحليل حساسيت سه متغير کليدي (کيفيت خدمات بيشترين نقش را در تغيير رفتار مشارکت و تفکيک دارد).

Fig. 6- Sensitivity analysis of three key variables (Service quality plays the most significant role in altering participation and separation behavior.)

در مجموع، يافته ها تأکيد مي کنند که ساختار فعلي در يک «تعادل پايدار کم بازده» قفل شده است؛ تعادلي که تنها از طريق مداخلات ساختاري و تغيير حلقه های بازخوردی مي توان از آن عبور کرد. سناريوی تحول ساختاري يگانه سناريویی است که قادر به تغيير ماهيت سيستم، کاهش پايدار دفن، افزايش نرخ تفکيک، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و ايجاد چرخه اقتصادي کارآمد در مديريت پسماند ايران است؛ به گونه ای که حلقه بازخورد «کيفيت خدمات → مشارکت → درآمد باز يافت → سرمايه گذاري → کيفيت خدمات» از يک چرخه فرساينده به يک چرخه تقويت کننده پايدار تبديل مي شود.

بحث و نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رفتار بلندمدت نظام مدیریت پسماند ایران تابع یک ساختار وابسته به بازخوردهای کند، آستانه‌محور و مستعد قفل‌شدگی سیستمی است؛ ساختاری که مشابه آن در مطالعات بین‌المللی درباره سیستم‌های پسماند کشورهای در حال توسعه نیز گزارش شده است (Guerrero et al., 2013; Wilson et al., 2012). تحلیل پویایی‌شناسی نشان داد که روند رشد تولید پسماند - اعم از حجم کل و سرانه - به‌طور عمده ناشی از تحول الگوی مصرف، افزایش سهم بسته‌بندی‌های چندلایه و گسترش سبک زندگی شهری پرمصرف است، نه صرفاً رشد جمعیت. چنین الگوی رشدی با یافته‌های پژوهش‌های OECD و UNEP درباره تغییر شدت مواد^۱ همخوانی دارد و بیانگر گذار ایران از «اقتصاد کم‌مصرف» به «اقتصاد پرمصرف شهری» است. از سوی دیگر، نتایج مشارکت شهروندان و رفتار تفکیک از مبدأ نشان می‌دهد که سیستم تحت تأثیر یک حلقه بازخورد محدودکننده اعتماد-کیفیت خدمات قرار دارد. کاهش جزئی کیفیت خدمات باعث افت شدید مشارکت می‌شود، اما افزایش کیفیت، بازیابی بسیار آهسته‌تری ایجاد می‌کند. این ویژگی غیرخطی که در شکل ۲ مشاهده شد، نشان‌دهنده وجود یک حافظه جمعی منفی^۲ در میان شهروندان است؛ پدیده‌ای که در تحقیقات مشابه در ترکیه، برزیل و هند نیز گزارش شده است (Babaei et al., 2015; Suthar & Singh, 2018). بنابراین، بی‌ثباتی کیفیت خدمات نه تنها یک چالش عملیاتی، بلکه یک عامل رفتاری-نهادی است که کل سیستم را در «تعادل ناکارآمد» نگه می‌دارد.

مقایسه سه سناریو (شکل ۳ و شکل ۵) نشان می‌دهد که سناریوی تداوم وضع موجود (BAU) به دلیل وجود حلقه‌های بازخورد تضعیف‌کننده و ظرفیت نهادی محدود، توان عبور از سطح بحرانی ۷ درصد تفکیک را ندارد. حتی در سناریوی «اصلاحات تدریجی»، با وجود پیشرفت نسبی در کیفیت خدمات و افزایش نرخ تفکیک تا ۲۲-۲۶ درصد، ساختار کلان سیستم تغییر نمی‌کند و پس از چند سال دوباره با کاهش مشارکت و افزایش دفن مواجه می‌شود. این رفتار، مشابه یافته‌های پژوهش‌های Singhirunnusorn و همکاران (۲۰۱۷) است که نشان می‌دهد اصلاحات نقطه‌ای، بدون تغییر ساختار نهادی، توان پایداری ندارند.

در مقابل، سناریوی تحول ساختاری به واسطه اصلاح حلقه‌های بازخورد کلیدی - از جمله ادغام رسمی - غیررسمی، استانداردسازی کیفیت خدمات، دیجیتالی‌سازی فرآیندها و پایش هوشمند - توانسته است نه تنها نرخ تفکیک را از آستانه بحرانی ۳۰ درصد عبور دهد، بلکه حجم دفن را به حدود ۱۲ میلیون تن کاهش دهد و انتشار متان را ۴۵ درصد کم کند. این یافته با تجربیات موفق کشورهایمانند کره جنوبی، آلمان و ژاپن همسو است؛ کشورهایی که نشان داده‌اند تحول سیستمی نه از تجهیزات بیشتر، بلکه از اصلاح روابط نهادی و حلقه‌های بازخورد حاصل می‌شود (Yoshida et al., 2020; Hotta et al., 2022).

تحلیل جریان مواد (MFA) نیز یافته‌های SD را تأیید می‌کند. در وضعیت موجود، حدود ۳۲ درصد از مواد بالقوه قابل‌بازیافت به دلیل آلودگی متقاطع، ناکارآمدی جمع‌آوری و عدم تفکیک مؤثر در مبدأ از بین می‌رود. در حالی که پس از اصلاح ساختاری، هدررفت به ۱۰-۱۲ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۴). این بهبود عمدتاً ناشی از یکپارچه‌سازی حلقه رسمی و غیررسمی، بهینه‌سازی فرایند جمع‌آوری و جداسازی، و حذف نقاط آلودگی است؛ فرایندی که در مطالعات کشورهای موفق در اقتصاد چرخشی نیز به عنوان «Decoupling Node» شناخته می‌شود (Ellen, 2019).

تحلیل حساسیت چندمتغیره (شکل ۶) نشان داد که سه متغیر «کیفیت خدمات»، «اعتماد عمومی» و «سطح دیجیتالی‌سازی» مجموعاً ۷۲ درصد از واریانس رفتار سیستم را توضیح می‌دهند. این بدان معناست که پایداری سیستم نه تابع افزایش منابع مالی، بلکه تابع اصلاح متغیرهای رفتاری-نهادی و فناوری‌های پشتیبان است. در بسیاری از کشورها، عبور از بن‌بست سیستمی زمانی رخ داده که مدیریت

^۱ Material Intensity Shift

^۲ Negative Social Memory

شهری توانسته است از مدل‌های مبتنی بر تجهیزات به مدل‌های مبتنی بر حکمرانی مشارکتی، شفافیت، و فناوری حرکت کند؛ دقیقاً روندی که مدل تحول ساختاری در این پژوهش نشان داده است.

در مجموع، تفسیر نتایج بیانگر آن است که نظام مدیریت پسماند ایران در وضعیت فعلی در یک تعادل پایدار اما کم‌بازده قرار دارد و تنها مداخلاتی قادر به تغییر رفتار بلندمدت سیستم هستند که:

- حلقه‌های بازخورد اصلی را بازطراحی کنند،
- نقش شبکه غیررسمی را به رسمیت شناخته و ادغام کنند،
- استاندارد پایدار کیفیت خدمات ایجاد نمایند،
- و زیرساخت دیجیتال را به‌عنوان ستون فقرات حکمرانی پسماند فعال کنند.

بدون این تغییرات، سیستم با وجود افزایش هزینه‌ها و تجهیزات، همچنان در سطح پایین کارایی باقی خواهد ماند. اما با اجرای تحول ساختاری، سیستم وارد مسیر پایداری، کاهش دفن، افزایش بازیافت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود؛ مسیری که هم‌راستا با استانداردهای اتحادیه اروپا در حوزه مدیریت پسماند و اقتصاد چرخشی هم‌راستاست و به‌طور مستقیم با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل، به‌ویژه اهداف ۱۱ (شهرها و جوامع پایدار)، ۱۲ (الگوهای تولید و مصرف مسئولانه) و ۱۳ (اقدام علیه تغییر اقلیم) انطباق دارد (United Nations, 2015).

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نظام مدیریت پسماند ایران در وضعیت موجود در یک تعادل پایدار اما کم‌بازده گرفتار شده است؛ تعادلی که تحت تأثیر حلقه‌های بازخورد محدودکننده - به‌ویژه چرخه «کیفیت خدمات - اعتماد - مشارکت» - شکل گرفته و اجازه گذار طبیعی سیستم به سطوح بالای تفکیک و بازیافت را نمی‌دهد. مدلسازی پویایی‌شناسی سیستمی نشان داد که حتی در حضور افزایش محدود تجهیزات، تغییرات مقطعی یا بهبودهای جزئی، رفتار بلندمدت سیستم تغییر خروجی معناداری نخواهد داشت و نرخ تفکیک در سطح تقریباً ثابت ۷ درصد باقی می‌ماند. این یافته با بررسی روندهای جهانی نیز همخوانی دارد و نشان می‌دهد که سیستم‌های زنجیره‌محور و رفتارمحور بدون اصلاح ساختارهای نهادی قادر به تغییر پایدار نیستند. در مقابل، سناریوی تحول ساختاری توانست مسیر سیستم را به‌طور کامل تغییر دهد. در این سناریو، ادغام حلقه رسمی و غیررسمی، استانداردسازی کیفیت خدمات، دیجیتالی‌سازی کامل چرخه جمع‌آوری و پردازش، و ایجاد سازوکارهای شفاف برای مشارکت مردمی، موجب افزایش نرخ تفکیک از مبدأ به ۳۰-۳۴ درصد، کاهش دفن به کمتر از ۱۲ میلیون تن، و کاهش ۴۵ درصدی انتشار متان شد. همچنین تحلیل جریان مواد (MFA) نشان داد که هدررفت مواد قابل‌بازیافت از ۳۲ درصد به حدود ۱۰-۱۲ درصد کاهش یافت و بازیافت خالص افزایش چشمگیر پیدا کرد. این تحولات مؤید آن است که کلید پایداری نه در افزایش ظرفیت فیزیکی بلکه در اصلاح روابط نهادی، رفتار شهروندی و سازوکارهای انگیزشی نهفته است. در امتداد رفتار مشاهده‌شده سیستم و منطق سناریوی تحول ساختاری، پیامدهای سیاستی زیر برای حکمرانی پسماند ایران قابل استخراج است:

۱- گذار از مدیریت تجهیزمحور به حکمرانی سیستمی

سیاست‌های جاری مدیریت پسماند در ایران عمدتاً بر خرید تجهیزات، نوسازی ناوگان و افزایش ظرفیت‌های فیزیکی پردازش متمرکز بوده‌اند؛ در حالی که نتایج این پژوهش نشان می‌دهد چنین مداخلاتی، به‌تنهایی، تأثیر معناداری بر رفتار بلندمدت سیستم ندارند و قادر

به شکستن تعادل ناکارآمد موجود نیستند. تحلیل پویایی‌شناسی سیستمی آشکار ساخت که پایداری و بهبود عملکرد نظام تفکیک، نه از مسیر «افزایش ظرفیت»، بلکه از طریق بازطراحی ساختار حکمرانی و اصلاح حلقه‌های بازخورد کلیدی حاصل می‌شود. بر این اساس، جهت‌گیری سیاست‌گذاری باید از رویکرد تجهیزمحور به سوی حکمرانی سیستمی تغییر یابد؛ رویکردی که بر مدیریت روابط علی، تقویت بازخوردهای تقویتی و تضعیف بازخوردهای فرساینده در کل زنجیره مدیریت پسماند تمرکز دارد.

۲- استانداردسازی و تضمین کیفیت خدمات در سراسر زنجیره مدیریت پسماند

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که کیفیت خدمات مهم‌ترین متغیر حساس در شکل‌دهی به رفتار مشارکت شهروندان در تفکیک از مبدأ است و نوسان آن می‌تواند به سرعت حلقه‌های بازخورد فرساینده را فعال کند. از این رو، ارتقای پایدار نرخ تفکیک مستلزم استقرار یک نظام استاندارد و قابل پایش برای کیفیت خدمات در کل زنجیره مدیریت پسماند است. در این راستا، تدوین «استاندارد ملی کیفیت خدمات تفکیک از مبدأ» به عنوان یک چارچوب الزام‌آور، همراه با ارزیابی منظم و ماهانه عملکرد مناطق شهری، ضروری به نظر می‌رسد. افزون بر این، اتصال نتایج ارزیابی کیفیت خدمات به سازوکارهای تشویقی و تخصیص منابع مالی می‌تواند انگیزه نهادی لازم برای بهبود مستمر عملکرد را فراهم کرده و ثبات کیفیت خدمات را در بلندمدت تضمین کند.

۳- ادغام رسمی - غیررسمی به عنوان پیش‌نیاز افزایش بازیافت خالص

نتایج تحلیل جریان مواد (MFA) نشان می‌دهد که بخش عمده هدررفت مواد قابل بازیافت ناشی از فقدان هم‌افزایی میان شبکه‌های رسمی و غیررسمی جمع‌آوری و پردازش پسماند است. این دوگانگی ساختاری موجب قطع پیوندهای عملکردی در زنجیره بازیافت و افزایش اتلاف مواد با ارزش می‌شود. بر این اساس، ادغام ساختاری و نهادی این دو شبکه—در قالب چارچوب‌های قانونی، قراردادهای مشارکتی و نظام‌های پایش مشترک—به عنوان یک پیش‌نیاز اساسی برای ارتقای بازیافت خالص مطرح است. تجربه کشورهای در حال توسعه‌ای مانند ترکیه، هند و برزیل نشان می‌دهد که به رسمیت شناختن بخش غیررسمی و ادغام آن در نظام رسمی مدیریت پسماند می‌تواند به طور معناداری کارایی بازیافت، کیفیت مواد بازیافتی و پایداری اقتصادی سیستم را افزایش دهد.

۴- دیجیتالی‌سازی کامل چرخه جمع‌آوری تا پردازش

یافته‌های تحلیل حساسیت چندمتغیره نشان می‌دهد که سطح دیجیتالی‌سازی یکی از سه متغیر کلیدی مؤثر بر پایداری بلندمدت نظام تفکیک پسماند است. دیجیتالی‌سازی امکان رهگیری یکپارچه جریان پسماند از مرحله تولید تا پردازش نهایی را فراهم کرده و با افزایش شفافیت، دقت پایش و پاسخ‌گویی نهادی، کارایی کل سیستم را ارتقا می‌دهد. بر این اساس، استقرار سامانه‌های رهگیری مبتنی بر شناسه یکتا (نظیر QR-Code)، یکپارچه‌سازی داده‌های عملیاتی و ایجاد داشبورد ملی پایش پسماند به عنوان اجزای ضروری حکمرانی هوشمند پسماند پیشنهاد می‌شود. این رویکرد با کاهش عدم قطعیت اطلاعاتی و بهبود تصمیم‌گیری داده‌محور، نقش مهمی در فعال‌سازی حلقه‌های بازخورد تقویتی و تثبیت مسیر پایداری سیستم ایفا می‌کند.

۵- ایجاد نظام پایدار انگیزش شهروندی

شواهد تجربی نشان می‌دهد که ابزارهای اقتصادی مبتنی بر تعرفه‌گذاری حجمی (Pay-As-You-Throw) می‌توانند به طور معناداری رفتار تفکیک از مبدأ و کاهش تولید پسماند را بهبود بخشند؛ به گونه‌ای که تجربه هلند حاکی از صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجه و افزایش کارایی سیستم مدیریت پسماند است (Dijkgraaf & Gradus, 2004). با این حال، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اثرگذاری این ابزارها به شدت به کیفیت خدمات و سطح اعتماد عمومی وابسته است. بر این اساس، طراحی یک نظام انگیزشی پایدار، غیردستوری و هوشمند

ضروری است؛ نظامی که با بهره‌گیری از سازوکارهایی نظیر امتیازدهی مبتنی بر عملکرد، کیف پول سبز، بازپرداخت‌های تشویقی و تخفیف در خدمات شهری، بتواند مشارکت شهروندان را در بلندمدت تثبیت کرده و حلقه‌های بازخورد تقویتی میان اعتماد، مشارکت و کارایی سیستم را فعال سازد.

۶- بازطراحی نظام دفن و کاهش انتشار متان مطابق SDG13

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در سناریوی تحول ساختاری، انتشار متان ناشی از دفن پسماند تا حدود ۴۵ درصد کاهش می‌یابد؛ امری که بیانگر نقش کلیدی بازطراحی نظام دفن در کاهش اثرات اقلیمی مدیریت پسماند است. بر این اساس، دفن باید به‌عنوان آخرین گزینه و صرفاً برای جریان‌های باقیمانده و غیرقابل‌بازیافت در نظر گرفته شود. افزون بر این، استقرار سیستم‌های جمع‌آوری گاز محل دفن و بهره‌برداری انرژی از گاز دفن^۱ به‌عنوان یک الزام سیاستی مطرح است؛ رویکردی که می‌تواند هم‌زمان به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ارتقای بهره‌وری انرژی شهری کمک کرده و مدیریت پسماند را در مسیر تحقق هدف ۱۳ توسعه پایدار (اقدام علیه تغییر اقلیم) قرار دهد.

۷- ایجاد نهادی هماهنگ‌کننده برای تکامل سیستم

یافته‌ها نشان می‌دهد که نبود یک نهاد ملی هماهنگ‌کننده، یکی از موانع اصلی گذار نظام مدیریت پسماند ایران به یک ساختار کارآمد و پایدار است. پراکندگی وظایف میان نهادهای مختلف موجب ناهماهنگی سیاست‌ها، تضعیف پایش و کاهش اثربخشی مداخلات شده است. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود «مرکز ملی حکمرانی پسماند» به‌عنوان یک نهاد فرابخشی ایجاد شود تا وظایف سیاست‌گذاری کلان، پایش و یکپارچه‌سازی داده‌ها، استانداردسازی فرآیندها و تسهیل هماهنگی میان شهرداری‌ها و سایر نهادهای ذی‌ربط را بر عهده گیرد. استقرار چنین نهادی می‌تواند با کاهش گسست نهادی و تقویت انسجام تصمیم‌سازی، زمینه تکامل تدریجی نظام مدیریت پسماند کشور را فراهم کند.

یافته‌های این پژوهش به‌طور قاطع نشان می‌دهد که نظام مدیریت پسماند ایران در وضعیت کنونی در یک تعادل ناکارآمد اما پایدار گرفتار شده است؛ تعادلی که حاصل درهم‌تنیدگی حلقه‌های بازخورد منفی، ساختارهای نهادی پراکنده، کیفیت خدمات ناپایدار، و نبود سازوکارهای شفاف مشارکت است. مدلسازی پویایی‌شناسی سیستمی نشان داد که این تعادل نه‌تنها به‌طور طبیعی شکسته نمی‌شود، بلکه با افزایش جمعیت، رشد مصرف، و تغییر ترکیب مواد پسماند، روندهای ناکارآمد آن تقویت نیز می‌گردد. به بیان دیگر، مسئله پسماند در ایران نه یک مسئله فنی، بلکه یک مسئله ساختاری و نهادی است.

بررسی جامع سه سناریو - تداوم وضع موجود، اصلاحات تدریجی، و تحول ساختاری - نشان داد که سیاست‌های مبتنی بر افزایش ظرفیت فیزیکی، خرید تجهیزات، یا ارتقای محدود فناوری، هیچ‌گونه تغییر پایدار در رفتار بلندمدت سیستم ایجاد نمی‌کنند. حتی در بهترین حالت، نرخ تفکیک از مبدأ در محدوده ۶ تا ۷ درصد باقی می‌ماند و حجم دفن با آهنگی فزاینده رشد می‌کند. این الگو در کشورهایی با ساختار مشابه (مانند مصر، مراکش و اندونزی) نیز مشاهده شده و تأیید می‌کند که سیستم‌های پسماند بدون اصلاح نهادی، ذاتاً به سمت ناکارآمدی پایدار میل می‌کنند.

در مقابل، سناریوی تحول ساختاری نشان داد که هنگامی که حلقه‌های بازخورد کلیدی—به‌ویژه «کیفیت خدمات»→ اعتماد عمومی → مشارکت → درآمد بازیافت → سرمایه‌گذاری → کیفیت خدمات—به یک چرخه تقویتی مثبت تبدیل شوند، سیستم قادر است

¹ Landfill Gas Recovery

به سطوحی برسد که با وضعیت موجود قابل مقایسه نیست. این حلقه از «کیفیت خدمات» آغاز شده و پس از عبور از مشارکت شهروندان، درآمد بازیافت و سرمایه‌گذاری نهادی، مجدداً به کیفیت خدمات بازمی‌گردد و در صورت اختلال در هر یک از این پیوندها، کل چرخه از حالت تقویتی خارج شده و به یک چرخه فرساینده تبدیل می‌شود. در این سناریو:

- نرخ تفکیک به ۳۰-۳۴ درصد رسید

- هدررفت مواد قابل بازیافت از ۳۲ درصد به ۱۰-۱۲ درصد کاهش یافت

- حجم دفن تقریباً نصف شد

- انتشار متان ۴۵ درصد کاهش یافت

- درآمد بازیافت سه برابر شد

این ارقام نه بازتاب یک پیش‌بینی خوش‌بینانه، بلکه حاصل تغییر ساختار سیستم است؛ تغییری که مشابه آن در کشورهای پیشرو نظیر کره جنوبی، آلمان و اسلوانی نیز مشاهده شده است. این یافته‌ها به‌طور بنیادی نشان می‌دهد که پایداری در مدیریت پسماند تنها زمانی ممکن است که سیاست‌گذاری از سطح «مدیریت» به سطح «حکمرانی» ارتقا یابد. علاوه بر این، تحلیل جریان مواد (MFA) نشان داد که بخش عمده‌ای از پتانسیل بازیافت کشور نه به دلیل نبود فناوری، بلکه به دلیل ناکارآمدی در نقاط اتلاف (Leakage Points)، همچون آلودگی متقاطع، جداسازی ناکامل و عدم یکپارچگی شبکه رسمی و غیررسمی از بین می‌رود. این یافته تأییدی است بر این که سیستم‌های دوگانه و غیرهم‌افزا، مستقل از میزان سرمایه‌گذاری، همیشه بخشی از مواد را از چرخه اقتصاد خارج می‌کنند.

تحلیل حساسیت نیز نشان داد که سه متغیر «کیفیت خدمات»، «اعتماد عمومی» و «سطح دیجیتالی‌سازی» بیش از ۷۰ درصد تغییر رفتار بلندمدت سیستم را توضیح می‌دهند. این نتیجه از نظر سیاستی پیام روشنی دارد:

- افزایش مشارکت و بازیافت در ایران نه از مسیر ماشین‌آلات، بلکه از مسیر اعتمادسازی، ثبات کیفیت خدمات و دیجیتالی‌سازی زنجیره مدیریت پسماند می‌گذرد.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که آینده مدیریت پسماند ایران به‌طور مستقیم وابسته به اراده سیاسی برای اصلاح ساختارهای نهادی، ادغام شبکه‌های رسمی - غیررسمی، و استقرار نظام‌های هوشمند پایش و کنترل است. اگر چنین تحولی صورت نگیرد، ایران به سمت افزایش مداوم حجم دفن، تشدید انتشار متان، و رشد هزینه‌های شهرنشینی حرکت خواهد کرد. اما اگر اصلاحات ساختاری مطابق سناریوی تحول اجرا شود، ایران می‌تواند طی کمتر از یک دهه به سطح کشورهای موفق دنیا در حوزه تفکیک و بازیافت دست یابد. این پژوهش ثابت می‌کند که آینده مدیریت پسماند ایران نه یک «چالش فناوریانه»، بلکه یک «فرصت نهادی» است - فرصتی برای ساختن یک معماری جدید پایداری شهری که بر محور بازخوردهای مثبت، مشارکت شهروندی و حکمرانی هوشمند استوار است.

Extended Abstract

Introduction: Municipal solid waste (MSW) management in Iran faces persistent structural challenges driven by rising waste generation, very low source separation rates, and heavy reliance on landfilling, undermining environmental sustainability and urban resilience. The current system is constrained by fragmented governance, weak integration of formal and informal sectors, and low service quality, leading to systemic inefficiencies and losses in recyclable materials. This study aims to provide a futures-oriented analysis of Iran's waste separation system up to 2041, identifying leverage points and policy pathways for sustainable improvement.

Materials and methods: A 23-year dataset encompassing waste generation, composition, citizen behaviour, collection and processing efficiency, costs, landfilling rates, and methane emissions was compiled. An integrated methodological framework combining MICMAC structural analysis, Cross-Impact Balance (CIB) scenario development, system dynamics (SD) modelling, Monte Carlo simulation, and material flow analysis (MFA) was employed. The SD model consists of four interconnected subsystems: generation, citizen behaviour, collection–processing efficiency, and environmental impacts. The model was calibrated using historical data, validated through structural and behavioural tests, and subjected to multivariate sensitivity analysis to identify key drivers of system behaviour under uncertainty.

Results: Under the business-as-usual (BAU) scenario, total waste generation increases by 48%, per capita waste rises from 860 to 1050 g/day, and source separation remains stagnant around 7%. Landfilling volumes and methane emissions grow sharply, trapping the system in a “stable but low-performance equilibrium.” Gradual reform scenarios improve source separation to 22–26% but fail to overcome structural feedback loops, leaving the system vulnerable to regression. In contrast, the structural transformation scenario—incorporating full digitalisation, formal–informal sector integration, service quality standardisation, and citizen incentive mechanisms—achieves 30–34% source separation, reduces landfilling nearly by half, cuts methane emissions by 45%, and lowers recyclable material losses from ~32% to 10–12%. MFA confirms a substantial reduction in material loss and increased net recycling. Sensitivity analysis identifies service quality, public trust, and digitalisation level as the dominant leverage points, collectively explaining 72% of system variance.

Discussion and Conclusion: Findings indicate that Iran's waste management system is fundamentally institutional and feedback-driven. Systemic inefficiencies are perpetuated by low trust, inadequate service quality, and disjointed formal–informal networks. Only structural interventions that redesign feedback loops, integrate informal actors, enforce service quality standards, and leverage digital governance can shift the system towards sustainable performance. This research demonstrates that improving physical capacity alone is insufficient; long-term sustainability requires coordinated policy, institutional reform, and behavioural incentives. The study provides a quantitative, foresight-based foundation for policymakers to prioritise interventions that maximise source separation, recycling efficiency, and environmental benefits over the next two decades.

Keywords: municipal solid waste, source separation, futures studies, system dynamics, scenario analysis, Monte Carlo simulation, material flow analysis.

References

- Azizi, N., Nasser, S., Nodehi, R. N., Jaafarzadeh, N., & Pirsahab, M. (2022). Evaluation of conventional wastewater treatment plants efficiency to remove microplastics in terms of abundance, size, shape, and type: A systematic review and Meta-analysis. *Marine pollution bulletin*, 177, 113462.
- Babaei, A. A., Alavi, N., Goudarzi, G., Teymouri, P., Ahmadi, K., & Rafiee, M. (2015). Household recycling knowledge, attitudes and practices in Shiraz, Iran. *Waste Management & Research*, 33(3), 251–258.
- Baldwin, K., & Mayfield, M. (2019). System dynamics modelling of municipal solid waste management systems: A review. *Waste Management*, 87, 828–839.
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 12(3), 183-210.
- Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2004). *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. CRC Press.
- Chen, M., Zhang, H., Liu, Y., & Wang, X. (2020). System dynamics modeling for municipal solid waste management: A review and policy implications. *Waste Management*, 102, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.042>
- Dijkgraaf, E., & Gradus, R. (2004). Cost savings in unit-based pricing of household waste: The case of the Netherlands. *Resource and Energy Economics*, 26(4), 353–371.
- Ellen M. F. (2019). *Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change*. EMF Publications.
- European Environment Agency (EEA). (2020). *Bio-waste in Europe: From Challenges to Opportunities*. EEA Report No. 4/2020.
- Fazli, A., Stevanovic, T., & Rodrigue, D. (2022). Recycled HDPE/natural fiber composites modified with waste tire rubber: a comparison between injection and compression molding. *Polymers*, 14(15), 3197.
- Ghobadi, N., & Zakerian, A. (2019). Evaluation of municipal waste composition and management in Tehran, Iran. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 6(2), 73–82.
- Godet, J., Brochard, S., Pizzagalli, L., Beauchamp, P., & Soler, J. M. (2006). Dislocation formation from a surface step in semiconductors: An ab initio study. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 73(9), 092105.
- Godet, M., & Durance, P. (2011). La prospectiva estratégica. *Gestión en el tercer milenio*, 5(10), 61-75.
- Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, 33(1), 220–232.
- Hotta, Y., Aoki-Suzuki, C., & Visvanathan, C. (2022). Extended producer responsibility and informal sector integration: Global perspectives. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24, 157–171.
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Waste Sector*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Marshall, R. E., & Farahbakhsh, K. (2013). Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste Management*, 33(4), 988–1003.

- Pregger, T., Naegler, T., Weimer-Jehle, W., Prehofer, S., & Hauser, W. (2020). Moving towards socio-technical scenarios of the German energy transition—lessons learned from integrated energy scenario building. *Climatic Change*, 162(4), 1743-1762.
- Saltelli, A., Bammer, G., Bruno, I., Charters, E., Di Fiore, M., Didier, E., ... & Vineis, P. (2020). Five ways to ensure that models serve society: a manifesto. *Nature*, 582(7813), 482-484.
- Sharholy, M., Ahmad, K., Mahmood, G., & Trivedi, R. C. (2008). Municipal solid waste management in Asian developing countries: A comparative analysis. *Waste Management*, 28(9), 2046–2055.
- Sharifi, A. (2023). Resilience of urban social-ecological-technological systems (SETS): A review. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104910.
- Singhirunnusorn, W., Donlakorn, K., & Kaewhanin, W. (2017). Household recycling behaviours and attitudes toward waste bank project: Mahasarakham Municipality. *Journal of Asian Behavioural Studies*, 2(5), 17–26.
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill.
- Sudhir, V., Muraleedharan, V. R., & Srinivasan, G. (1996). Integrated solid waste management in urban India: A systems analysis. *Waste Management & Research*, 14(1), 33–43.
- Suthar, S., & Singh, P. (2018). Household solid waste generation and composition across socioeconomic groups. *Waste Management*, 77, 402–411.
- UNEP. (2018). *Single-use Plastics: A Roadmap for Sustainability*. United Nations Environment Programme.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development* (A/RES/70/1). <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Weimer-Jehle, W. (2006). Cross-impact balances: A system-theoretical approach to cross-impact analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 73(4), 334-361.
- Wilson, D. C., Rodic, L., Scheinberg, A., Velis, C., & Alabaster, G. (2012). Comparative analysis of solid waste management in 20 cities. *Waste Management & Research*, 30(3), 237–254.
- World Bank. (2018). *What a Waste 2.0*. Washington, DC: World Bank.
- Yoshida, H., Gable, J., & Park, J. K. (2020). Material flow analysis of plastic waste management systems: A global review. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104784.