Journal of Environmental Research
Vol. 17, No. 33, Spring & Summer 2026

Journal Homepage: www.iraneiap.ir
Print ISSN: 2008-9597 Online ISSN 2008-9590

Application of Dynamic System Model in Evaluation of Food Waste Management Policies in Iran

Document Type
Research Paper

Received:
2025/07/30

Accepted:
2026/06/08

Seyyed Mansour Jafari*[1], Seyyed Nematollah Mousavi[2]

1. Corresponding Author, PhD Student, Department of Agricultural Economics, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran. Email: Seyyedmansourjafari@gmail.com
2. Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran. Email: s.n1976@yahoo.com

Abstract

There are various solutions for providing enough food and compensating the shortages, but in the current situation, the implementation and reliance on many of these programs faces serious doubts. Therefore, it seems that the most effective tool for the realization of food security in human societies is the control of food waste. Therefore, in the present study, an attempt was made to evaluate the effects of food waste control policies by using the dynamic system model and considering the mutual relationships and feedbacks in the food production and consumption system in Iran. The results of the study showed that in basic conditions, energy consumption in the food system increases simultaneously with population growth and food demand. Also, the production of food waste and, as a result, the cost of waste disposal also increases during the simulation period. Therefore, waste management policies in the country were examined through the scenarios of per capita control of waste production, waste separation from the source and improvement of recycling technology. The results showed that the application of the third scenario during the years 2024-2040 had the most effect in food waste management. On average, the amount of produced waste will decrease by 71/82% On the other hand, this reduction has been accompanied by an increase in energy consumption efficiency. So that the volume of energy consumption has decreased to a significant amount of 28/05% on average. This decrease indicates the improvement of the consumption pattern in the coming years. In addition, under this scenario, the amount of recycling at the beginning is 98/44 million tons and at the end of the period, 28/72 million is predicted. Therefore, according to the effectiveness of these policies, the public and private sectors can have a significant impact on food waste management and conservation of non-renewable resources by creating fields for training, encouraging and improving technology.

Keywords: Dynamic system, Food waste control, Recycling, Energy management

Cite this article: Jafari, S. M., & Mousavi, S. N. (2026). Application of Dynamic System Model in Evaluation of Food Waste Management Policies in Iran. *Journal of Environmental Research*, *17* (33), 191-209. https://doi.org/10.22034/eiap.2026.256871
© The Author(s).
Publisher: Iranian Association for Environmental Assessment

DOI: https://doi.org/10.22034/eiap.2025.246792

Extended Abstract

1. Introduction and Problem Statement

Ensuring an adequate and sustainable food supply for the growing global and Iranian population is one of the fundamental challenges of the current century. Global food demand is projected to increase by 56 percent by 2050 compared to 2010. Under current conditions, where the implementation of production-expansion programs faces limitations in water, soil, and energy resources, controlling and reducing food waste and losses is recognized as the most efficient, rapid, and cost-effective tool for achieving food security. In Iran, given population growth (surpassing 90 million) and the high per capita energy consumption and food waste compared to the global average, food waste has reached an alarming level. For the first time, this study utilizes a system dynamics approach to simulate and evaluate the mutual relationships, feedback loops, and long-term behavior of the food production, consumption, waste, and energy system in Iran up to the horizon of 1419 (2040 AD).

2. Materials and Methodology

This applied-developmental research is based on a system dynamics methodology. The model structure was designed using Vensim software based on time-series data (2004–2014), library studies, and expert interviews. The simulation horizon covers a 17-year period from 2024 to 2040 (1403–1419).

The model incorporates stock variables, rates, and key auxiliary variables, including population, Gross Domestic Product (GDP), total food demand, energy consumption within the food system, generated waste volume, waste collection and landfill expenses, and recycling volume.

To examine the effectiveness of various policies, three policy scenarios were developed and implemented in comparison with the baseline scenario:

Baseline Scenario: Continuation of current trends (per capita waste generation of 0.24 tons/year, waste source separation at 7 percent, and recycling at 13 percent).

First Scenario: A 10 percent reduction in per capita waste generation, 10 percent source-separated waste collection, and improved recycling at 20 percent.

Second Scenario: A 20 percent reduction in per capita waste generation, 20 percent source-separated waste collection, and improved recycling at 30 percent.

Third Scenario (Comprehensive Combined Scenario): A 30 percent reduction in per capita waste generation, 30 percent source-separated waste collection, and improved recycling technology at 40 percent.

3. Findings and Results

Model Validation: Evaluation of simulation error and the coefficient of determination (R 2) for key variables such as population (0.92) and food demand (0.85) demonstrated that the model possesses high reliability and predictive validity.

Baseline Scenario Results: In the absence of effective policy interventions, alongside population growth and rising food demand, energy consumption in the food system exhibits an upward trend. The volume of generated waste increases from approximately 24.66 million tons to over 31.19 million tons, accompanied by a significant rise in landfill expenses.

Scenario Comparison and Effectiveness of the Third Scenario: Simulation results indicated that the Third Scenario (combining per capita waste reduction, source separation, and enhanced recycling technology) yielded the highest effectiveness in managing the country's food waste:

Reduction of Generated Waste: On average, the volume of generated waste decreases by 82.71 percent throughout the simulation period.

Energy Efficiency: Energy consumption within the food system decreases significantly (reaching up to a 45 percent reduction by the end of the period compared to the baseline), reflecting a fundamental optimization of consumption patterns.

Recycling Volume: Under this scenario, the volume of food recycling is projected to be 98.44 million tons at the beginning and 28.72 million tons at the end of the period, indicating a strategic shift toward maximum recycling and optimal waste management.

4. Conclusion and Recommendations

The findings of this study revealed that food waste is a fully systemic phenomenon characterized by complex feedback loops with economic, demographic, and energy variables. Resolving this crisis requires a comprehensive and multi-dimensional perspective.

Based on the results, it is recommended that the public and private sectors intervene through the following measures:

Expanding public education and cultural promotion to optimize household consumption patterns and reduce per capita waste.

Providing legal and economic infrastructure for source-separated waste collection alongside economic incentives for citizens

Investing in the development and modernization of advanced recycling technologies to convert waste into organic fertilizers and energy.

Enhancing energy efficiency in the agricultural sector and food supply chain industries to preserve the country's non-renewable resources

پژوهش‌های محیط‌زیست

سال ۱۷، شماره ۳۳، بهار و تابستان ۱۴۰۵

Journal Homepage: www.iraneiap.ir
Online ISSN 2008-9590 Print ISSN: 2008-9597

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

کاربرد مدل سیستم دینامیک در ایران در راستای ارزیابی سیاست‌های مدیریت پسماند غذایی در ایران

سیدمنصور جعفری*[۱]، سید نعمت‌اله موسوی[۲]

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری گروه اقتصاد کشاورزی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران. رایانامه: Seyyedmansourjafari@gmail.com
۲. دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران. رایانامه: s.n1976@yahoo.com

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۵/۰۸
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۳/۱۸

چکیده

برای تامین غذای کافی و جبران کمبودها راهکارهای مختلفی وجود دارد ولی در شرایط حال حاضر اجرا و اتکا به بسیاری از این برنامه‌ها با تردید جدی مواجه است. از این‌رو به نظر می‌رسد کارآمدترین ابزار پیش روی تحقق امنیت غذایی در جوامع بشری کنترل هدر رفت موادغذایی باشد. بنابراین در مطالعه حاضر تلاش شد با استفاده از مدل سیستم دینامیک و با در نظر گرفتن روابط متقابل و بازخوردهای موجود در سیستم تولید و مصرف غذا در ایران، اثرات سیاست‌های کنترل پسماند غذایی مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج مطالعه نشان داد در شرایط پایه، همزمان با رشد جمعیت و تقاضای موادغذایی، مصرف انرژی در سیستم غذا افزایش می‌یابد. همچنین تولید پسماند غذایی و در نتیجه مخارج دفن پسماند نیز در طول دوره شبیه‌سازی روند افزایشی دارد. بنابراین سیاست‌های مدیریت پسماند در کشور از طریق سناریوهای کنترل سرانه تولید پسماند، تفکیک زباله از مبدا و بهبود تکنولوژی بازیافت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد اعمال سناریو سوم در طی سال‌های ۲۰۲۴–۲۰۴۰ بیشترین اثربخشی را در مدیریت پسماند موادغذایی داشته است. به‌طور میانگین میزان زباله‌های تولید شده کاهش ۸۲/۷۱ درصد را به دنبال خواهد شد. از سویی دیگر این کاهش همراه با افزایش راندمان مصرف انرژی همراه بوده است. به‌طوری‌که حجم مصرفی انرژی به‌طور میانگین به میزان قابل توجه ۲۸/۰۵ درصد کاهش یافته است. این کاهش نشان‌دهنده اصلاح الگوی مصرف در سال‌های آتی می‌باشد. علاوه بر این تحت این سناریو حجم بازیافت در ابتدای دوره معادل ۹۸/۴۴ میلیون تن و در انتهای دوره ۲۸/۷۲ میلیون تن پیش‌بینی شده است. لذا با توجه به اثربخشی این سیاست‌ها بخش دولتی و خصوصی می‌توانند از طریق ایجاد زمینه‌هایی برای آموزش، تشویق و بهبود تکنولوژی تاثیر چشمگیری در مدیریت پسماند موادغذایی و حفظ منابع تجدیدناپذیر داشته باشند.

کلید واژه‌ها: سیستم دینامیک، کنترل پسماند موادغذایی، بازیافت، مدیریت انرژی.

استناد: جعفری، سید منصور و موسوی، سید نعمت‌اله (۱۴۰۵). کاربرد مدل سیستم دینامیک در ایران در راستای ارزیابی سیاست‌های مدیریت پسماند غذایی در ایران. *نشریه پژوهش‌های محیط‌زیست*، *۱۷* (۳۳)، ۱۹۱–۲۰۹. https://doi.org/10.22034/eiap.2026.256871

ناشر: انجمن ارزیابی محیط‌زیست ایران.

© نویسندگان.

سرآغاز

براساس پیش‌بینی‌های انجام شده مبنی بر تقاضای جهانی در سال ۲۰۵۰ باید ۵۶ درصد بیشتر از سال۲۰۱۰ غذا تولید شود (Arivazhagan et al., 2016). از این رو به نظر می‌رسد افزایش تولید در بخش کشاورزی به‌عنوان عامل اصلی تامین امنیت غذایی جمعیت پیش روی باشد (Hoseini, 2006). ولیکن با توجه به شرایط حال حاضر، تولید بیشتر غذا برای رفع گرسنگی محیط‌زیست، حیات جانوری و منابع پایه همچون آب و خاک را به خطر می‌اندازد. بنابراین باید به دنبال رویکردهای جدید برای تامین غذا بود (Munesue et al., 2015). سازمان غذا و کشاورزی ضایعات غذایی را به‌عنوان غذای خوراکی و سالم برای مصرف انسان توصیف می‌کند که می‌تواند بخش اعظمی از نیازهای مصرفی جمعیت رو به رشد را برآورده کند (FAO, 2011).

براساس گزارش‌ها اگر فقط یک سوم از موادغذایی تولید شده در جهان به چرخه مصرف برگردد می‌توان بخشی از غذای ۷۹۵ میلیون نفر در جهان که غذای کافی ندارند را تامین نمود. بنابراین کاهش تلفات و ضایعات موادغذایی[1] می‌تواند به‌عنوان موثرترین ابزار پیش روی سیاست‌گذاران برای تقویت امنیت غذایی ضمن کاهش فشار بر منابع‌طبیعی محسوب شود (Garrone et al., 2014). علیرغم این آگاهی هنوز اقدامات مناسبی جهت کاهش هدررفت و ضایعات غذایی انجام نشده است. کشورهای در حال توسعه مانند ایران نیز از این قضیه مستثنی نیستند. ایران با جمعیتی حدود ۸۰ میلیون نفر یکی از پر جمعیت‌ترین کشورهای دنیا است. طی ۳۰ سال اخیر جمعیت کشور حدود ۲۵ میلیون نفر افزایش یافته است (Iranian Statistics Center, 2022). گزارش‌ها حاکی از آن است که به طور متوسط حدود ۱۰۰ میلیون تن انواع محصولات کشاورزی در ایران تولید می‌شود که نتیجه آن مصرف سرانه نهاده اصلی تولید همچون انرژی به میزان ۳/۳ درصد متوسط جهانی بوده است (Energy balance sheet, 2016). بدیهی است بدون این که منابع لازم برای تولید موادغذایی متناسب با جمعیت افزایش یابد، مقدار تقاضای موادغذایی بیشتر گردیده است. این امر بیانگر تشدید در تخریب منابع زیادی از جمله آب، زمین و انرژی می‌باشد. از سویی دیگر باید توجه داشت در شرایط حاضر ضایعات موادغذایی در سطح خرده‌فروشی و مصرف در ایران برابر با تمام موادغذایی موردنیاز برای مبارزه با سوء تغذیه در سراسر کشور است. این امر بیانگر عدم توفیق کاهش ۵۰ درصدی در ضایعات غذایی در طرح‌های پنج ساله برنامه ملی بوده است. اگرچه در ایران برآورد دقیقی از ضایعات موادغذایی در سطح خانوارها وجود ندارد، ضایعات موادغذایی در ایران تقریباً به سطح هشدار رسیده است (Scientific Association of Urban Economy of Iran, 2021). بنابراین به نظر می‌رسد تامین و حفظ بلند مدت امنیت غذایی جامعه بدون اصلاح الگوی مصرف موادغذایی و معرفی شیوه کاهش ضایعات امکان‌پذیر نیست.

در سال‌های اخیر اولویت بسیاری از مطالعات، بررسی سیستم‌های تقاضای غذا و سیاست کنترل ضایعات غذایی بوده است (Xu et al., 2017). لازم به ذکر است در این بین تحقیقات کمی روش‌های حفظ انرژی را همراه با مدیریت سیستم غذایی مورد بحث قرار داده‌اند. لذا بدیهی است جهت بررسی اثر سیاست‌های کاهش ضایعات غذایی بر تولید ضایعات موادغذایی، ضایعات موادغذایی تا دفن زباله و مصرف انرژی سیستم غذایی مورد مطالعه به ویژه در ایران قرار نگرفته است. بنابراین در این پژوهش بر اساس مطالعه (Xu & Szmerekovsky, 2017)، تلاش شد تا تأثیر سیاست کنترل ضایعات غذایی بر تقاضای غذا و انرژی در ایران بررسی شود. در این راستا با توجه به روابط بین تقاضای غذا، جمعیت، تولید ضایعات غذایی و مصرف انرژی در دنیای واقعی، یک مدل سیستم دینامیک[2] یکپارچه برای بررسی رفتار متغیرها در سیستم غذایی و بررسی تأثیر سیاست کنترل پسماند موادغذایی در ایران ایجاد شد. رویکرد سیستم دینامیک می‌تواند از طریق کنترل سرانه تولید زباله، سیاست‌های تشویقی برای جداسازی زباله از منبع و بهبود فناوری بازیافت زباله، حجم زباله تولید شده و انرژی را ارزیابی کند.

در شرایطی که بحران پسماند غذایی به یکی از چالش‌های جدی محیط‌زیستی و اقتصادی در ایران تبدیل شده است، پژوهش‌های متعددی در حوزه مدیریت پسماند صورت پذیرفته است؛ اما اغلب این مطالعات رویکردهای خطی، مقطعی و توصیفی را دنبال کرده و تحلیل‌های سیستمی و پویای میان‌مدت و بلندمدت تحقیقی انجام نشده است. نوآوری این تحقیق در چند بعد قابل شناسایی است.

1. Food loss and waste
2. System Dynamic

نخست، برای اولین بار از مدل سیستم دینامیک برای شبیه‌سازی ساختار کلان و پویای مدیریت پسماند غذایی در ایران بهره‌گیری شده است؛ مدلی که با در نظر گرفتن بازخوردها، تأخیرها و روابط غیرخطی میان اجزای سیستم، امکان تحلیل دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تری از رفتار سیستم در مواجهه با سیاست‌های مختلف را فراهم می‌سازد. دوم، ساختار مدل نه صرفاً مبتنی بر داده‌های آماری، بلکه با ترکیب داده‌های کمّی و تحلیل کیفی حاصل از مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان حوزه محیط‌زیست و مدیریت شهری تدوین شده است؛ امری که به افزایش اعتبار و کاربست‌پذیری نتایج کمک شایانی کرده است. سوم، این تحقیق با طراحی و ارزیابی سناریوهای مختلف سیاستی شامل آموزش عمومی، اصلاح زنجیره تأمین غذا، اعمال مشوق‌های اقتصادی، و اصلاح قوانین، آثار هر یک را بر شاخص‌های کلیدی مدیریت پسماند (نظیر کاهش میزان پسماند غذایی، هزینه‌های مدیریت، و میزان مشارکت مردمی) در افق زمانی بلندمدت مورد بررسی قرار داده است. نهایتاً، این مطالعه با ارائه چارچوبی بومی و مبتنی بر شبیه‌سازی، ابزاری کاربردی برای سیاست‌گذاران، شهرداری‌ها و نهادهای اجرایی فراهم آورده است تا با ارزیابی پیامدهای احتمالی سیاست‌های پیشنهادی، تصمیماتی مؤثرتر و پایدارتر در حوزه مدیریت پسماند غذایی اتخاذ نمایند.

در ادامه مطالب این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. ابتدا ادبیات موضوع تحقیق مرور می‌شود. بخش سوم به روش‌شناسی و داده‌های کاربردی اختصاص دارد. نتایج شبیه‌سازی مدل در بخش چهارم و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهاد در بخش پنجم ارائه شده است.

مروری بر مطالعات

بررسی مطالعات علمی و تجربی انجام گرفته در این زمینه حاکی از آن است که اکثر مطالعات پیشین عمدتا یک مرحله از مدیریت پسماند را مدنظر قرار داده‌اند. در این بین می‌توان به مطالعه (Lv et al., 2020)، اشاره کرد که با استفاده از مدل مبتنی بر هزینه، به یافتن مکان مناسب برای بازیافت در شانگهای پرداخته‌اند که نتایج نشان داد که نرخ تولید پسماند جامد شهری شانگهای از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ حدود ۳ درصد خواهد بود. تجزیه‌وتحلیل توزیع منطقه‌ای نشان می‌دهد که مناطق مرکز شهر به دلیل تراکم بالای جمعیت و سطح مصرف، شدت بالاتری برای تولید پسماند جامد شهری دارند. چهارده مرکز بازیافت منطقه‌ای به‌عنوان مکان‌های بهینه برای ایجاد مراکز بازیافت شناسایی شدند. دستیابی به این سناریو می‌تواند منجر به کمترین هزینه کل ۱۴۴ میلیون یوان چین شود. علاوه بر این، اگر هزینه حمل‌ونقل واحد و هزینه مقیاس واحد تغییر کنند، نتایج بهینه ممکن است تغییر نمایند. (Wang et al., 2018)، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی برای اولویت‌بندی بین چهار جایگزینی دفن زباله، هضم بی‌هوازی، سوزاندن و تبدیل به گاز پرداخته‌اند که چهار فرایند جایگزین برای تصفیه زباله‌های جامد شهری شامل دفن زباله، هضم بی‌هوازی، سوزاندن و گازسازی توسط مدل توسعه داده شده مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان می‌دهد که مدل توسعه یافته می‌تواند با موفقیت به ذی‌نفعان در تعیین توالی اولویت سناریوهای جایگزین تصفیه زباله‌های جامد شهری کمک کند. (Han & Zhang, 2017)، از یک مدل داده‌های تابلویی و روش وزن‌دهی به ارزیابی تأثیر سیاست‌های جداسازی و جمع‌آوری مدیریت پسماند در هشت شهر آزمایشی در چین پرداخته‌اند. این مطالعه بر اساس داده‌های سطح شهر برای سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲، با استفاده از مدل داده‌های تابلویی و روش وزن‌دهی احتمال معکوس، تأثیر آن را بر میزان سرانه افزایش زباله‌های جامد شهری بررسی می‌کند. نشان داده شده است که سیاست جمع‌آوری تفکیک‌شده از مبدا افزایش زباله‌های جامد شهری تأثیر ناچیزی بر کاهش میزان سرانه افزایش زباله‌های جامد شهری دارد، در حالی که هزینه‌های مصرفی سرانه، میانگین اندازه خانوار و میانگین سطح تحصیلات به‌طور قابل‌توجهی تولید سرانه زباله را تسریع می‌کند. مطالعه آنها عدم تاثیر سیاست را در این مرحله نشان‌می‌دهد. از آنجایی که در این مطالعات برای ارزیابی تصمیم در زمینه مدیریت پسماند اغلب از روش‌هایی همچون تجزیه‌وتحلیل اثربخشی هزینه، ارزیابی اثرات محیط‌زیستی، هزینه‌یابی چرخه عمر، تجزیه‌وتحلیل جریان مواد استفاده شده است. این امر موجب گردید برخی مطالعات نگاه سیستمی به مدیریت پسماند را گسترش دهند. چرا که کارکرد این روش‌ها مبتنی بر ادراک ساده شده از واقعیت است که در قالب فرضیات و عدم قطعیت‌ها بیان می‌شود. در صورتی که نگاه سیستمی به مدیریت پسماند موجب می‌گردد به‌طور هم‌زمان سیاست‌های اقتصادی و اجتماعی در میان تمام متغیرها در هر زمان و مقیاسی اعمال شوند (Ding et al., 2016).

از جمله مطالعات در سال‌های اخیر می‌توان به مطالعه (Shijiang et al., 2020) اشاره نمود. آنها در مطالعه خود با استفاده از مدل سیستم دینامیک به بررسی اثر سیاست‌های اقتصادی و جمعیتی در مدیریت پسماند پرداخته‌اند که نتایج نشان داد سیاست اقتصادی تأثیر زیادی بر مدیریت آینده زباله‌های جامد شهری دارد. اگر نرخ رشد تولید ناخالص داخلی ۱ درصد کاهش یابد، تولید زباله‌های جامد شهری در سال ۲۰۳۵ به میزان ۳/۲۵ میلیون تن کاهش خواهد یافت. سیاست‌های جمعیتی، سرانه تولید زباله‌های جامد شهری را کاهش می‌دهد، اما میزان کل تولید زباله‌های جامد شهری را افزایش می‌دهد. سیاست تفکیک زباله‌های جامد شهری، تقاضای کل برای دفن زباله‌های جامد شهری را کاهش می‌دهد، اما تقاضا برای تأسیسات تصفیه زباله‌های غذایی را افزایش می‌دهد. (Lee et al., 2018)، برای مطالعه پویایی و روابط متقابل در مدیریت پسماند موادغذایی از رویکرد سیستم دینامیک برای پیش‌بینی اثربخشی سیاست‌های پسماند موادغذایی استفاده کرده‌اند که در این مطالعه، وضعیت فعلی دفن زباله و اثربخشی سیاست‌های زباله‌های غذایی با استفاده از رویکرد پویایی سیستم برای مطالعه پویایی‌ها و روابط متقابل در مدیریت زباله‌های غذایی بررسی شده است. از این مدل برای پیش‌بینی اثربخشی مدیریت زباله‌های غذایی در سناریوهای مختلف استفاده می‌شود. در میان این سناریوها، اتخاذ مرکز تصفیه زباله‌های آلی و اجرای طرح هزینه‌یابی مبتنی بر کمیت- حجم مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه انتظار می‌رود پس از اجرای این سیاست‌ها در مقایسه با روندهای فعلی، بهبودهایی حاصل شود، اما خروجی مدل نشان می‌دهد که بدون هیچ سیاست یا برنامه عملیاتی جدید دیگری، دستیابی به اهداف تعیین‌شده توسط دولت دشوار است. (Ding et al., 2016)، نیز یک مدل سیستم دینامیک را برای به تصویر کشیدن ماهیت پویا تعاملات بین اجزای مختلف در سیستم مدیریت پسماند اعمال کردند. مدل پیشنهادی آنها بر تولید، حمل‌ونقل و جمع‌آوری مدیریت پسماند و اثرات اقتصادی و محیط‌زیستی متمرکز بوده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که کاهش منبع، یک اقدام مؤثر در کاهش زباله است که می‌تواند ۲۷/۵ درصد از کل تولید زباله را کاهش دهد. رفتارهای مرتب‌سازی، مقدمه‌ای برای بهبود نرخ بازیافت و استفاده مجدد از زباله‌های ساختمانی است که ۱۵/۴۹ درصد از کل زباله‌های تولید شده را تشکیل می‌دهد. مزایای محیط‌زیستی کاهش منبع، بیشتر از مزایای رفتارهای مرتب‌سازی است. بنابراین، برای دستیابی به عملکرد محیط‌زیستی بهتر مدیریت کاهش زباله‌های ساختمانی، باید به کاهش منبع مانند فناوری‌های کم زباله و عملکرد مدیریت در محل توجه شود.

(Sharp, 2016)، از مدل سیستم دینامیک برای ارزیابی تأثیر تفکیک در هنگام جمع‌آوری و انتقال زباله در تایلند استفاده کردند در این مطالعه «سناریوی ۵» امیدوارکننده‌ترین فرصت‌ها را ارائه می‌دهد زیرا ۴۰ درصد از ساکنان مایل به جداسازی زباله‌های آلی و قابل بازیافت هستند. نتایج نشان داد که در پایان دوره شبیه‌سازی، خدمات بهتری در جمع‌آوری و حمل زباله، هزینه ماهانه کمتر، عمر طولانی‌تر محل دفن زباله و راندمان رضایت‌بخش خدمات ارائه شده به میزان ۶۰/۴۸ درصد حاصل خواهد شد.

(Guo et al., 2016)، نیز با استفاده از یک مدل سیستم دینامیک به ترکیب عوامل فنی، هنجاری و رفتاری برای تعیین تأثیر مداخلات سیاستی برای ترویج رفتارهای دفع زباله مناسب در مناطق شهری کم‌درآمد در ایالات متحده پرداخته‌اند. نتایج شبیه‌سازی، اثرات مداخلات فردی را نشان داد و همچنین تعاملات مثبت بین برخی از مداخلات بالقوه، به‌ویژه سیاست‌های مبتنی بر اطلاعات و انگیزه، و همچنین محدودیت‌های آنها را شناسایی می‌کند. این مدل می‌تواند به تحلیلگران سیاست کمک کند تا امیدوارکننده‌ترین بسته‌های مداخله را شناسایی کنند و سپس آن تعداد کم را آزمایش کنند، نه این که مجبور باشند همه ترکیبات را به‌صورت آزمایشی آزمایش کنند. تجزیه‌وتحلیل حساسیت، عدم قطعیت‌های زیادی را در مورد پاسخ‌های رفتاری به برخی از مداخلات نشان می‌دهد و نشان می‌دهد که اطلاعات حاصل از تحقیقات پیمایشی و آزمایش‌های اجتماعی در کجا می‌تواند سیاست‌گذاری را بهبود بخشد. بدیهی است مزیت سیستم دینامیک در تحقیقات داخلی نیز مشاهده شود. (Zare Mehrajari & Faramarzinejad, 2018)، در چارچوب رویکرد سیستم دینامیک مدلی بر عوامل موثر بر زباله‌های جامد شهری و تاثیر بر مشارکت ارائه کرده‌اند و نتایج نشان داد هر چه مشارکت مردم در همراهی و همکاری با برنامه‌های مختلف سیستم مدیریت مواد زاید جامد شهری بیشتر باشد، امکان موفقیت این برنامه‌ها بیشتر است و بازدهی و اثربخشی سیستم افزایش پیدا می‌کند (کاهش تولید زباله، کاهش نرخ لندفیل‌ها و ...). (Afshar Kazemi et al., 2015)، کاربرد متدولوژی پویایی‌های سیستم در تحلیل سیستم‌های تولید، جمع‌آوری و حمل پسماندهای جامد شهری (مطالعه موردی :کلان‌شهر تهران) را بررسی کرده‌اند. پس از آن که مدلی معتبر حاصل گردید، با استفاده از تحلیل سیاست و حساسیت مدل به تدوین سناریوی بهبود سیستم در راستای روش 3(R) پرداختند. در شهر تهران بهترین گزینه برای مدیریت زیرسیستم‌های تولید، جمع‌آوری و حمل پسماندها،

تاکید بر کاهش تولید و کاستن از سرانه تولید زباله، آگاهی بخشی شهروندان و مسئولان بر لزوم جداسازی زباله خشک و تر در مبدا تولید و تلاش در جهت بهبود عملکرد طرح تفکیک پسماندهای خشک است. لذا با توجه به مطالعات صورت گرفته به وضوح می‌توان بیان نمود مطالعه‌ای یافت نشد که با طراحی یک مدل بتواند رفتار متغیرهای سیستم غذا را با خطای کمتر و نزدیک به دنیای واقعی شبیه‌سازی نماید تا از این طریق بتواند به اتخاذ سیاست‌های مناسب در راستای امنیت غذایی موثر گام بردارد. در این مطالعه تلاش شد تا با یک رویکرد سیستمی ابتدا متغیرهای موثر بر هدر رفت غذایی شناسایی و رفتار سیستم تولید و مصرف غذا مورد مطالعه قرار گیرد.

مواد و روش

الف) سیستم دینامیک

سیستم دینامیک روشی برای بررسی و مدیریت سامانه‌های پیچیده و دارای بازخورد است (Kotir et al., 2016; Layani et al., 2021). این روش مناسب برای نشان دادن الگوهای رفتاری و تحلیل آنها در سیستم‌های پیچیده است و ساخت مدلی نزدیک به جهان واقعیت را به منظور درک بهتر فرایندهای مؤثر بر سیستم امکان‌پذیر می‌سازد (Sterman, 2000). آنچه که این روش را از دیگر روش‌ها با رویکرد سیستمی متمایز می‌کند توجه به بازخوردها، مفهوم ذخیره–جریان و تأخیر زمانی است (Ford, 1999). سیستم دینامیک قابلیت‌های زیادی دارد که شامل: الف) در نظر گرفتن تعامل‌های بین اجزای مختلف درون یک سیستم و درک اثرگذاری‌های متقابل زیرسیستم‌های متفاوت و در عین حال مرتبط، ب) در نظر گرفتن ساختاری درون‌زا از سیستم، ج) شناسایی تأخیرها و تأثیرات آن بر رفتار سیستم، د) ساخت مدلی نزدیک به جهان واقعی و شبیه‌سازی ساختار و رفتار سیستم، ه) تحلیل رفتار ایجاد شده در سیستم، انعطاف‌پذیری و قابلیت استفاده از متغیرهای کمّی و کیفی، است (Forrester, 1994; Sterman, 2000; Girard et al., 2015). سیستم‌های تولید غذا و تولید پسماند غذایی شامل تعامل عامل‌های مختلف است و عدم قطعیت در رابطه‌های خطی و غیرخطی میان این عامل‌ها، بررسی و ارزیابی مسئله‌ها و چالش‌های مدیریت پسماند را پیچیده می‌کند (Hassanzadeh et al., 2014).

یک فرایند چهار مرحله‌ای برای مدل‌سازی سیستم دینامیک توسط Sterman (2000) و Ford (1999) معرفی شد. این مرحله‌ها شامل تعریف مسئله، ترکیب‌بندی، ارزیابی و آزمون مدل و استفاده از مدل در تجزیه‌وتحلیل اثرگذاری‌های سناریوهای مختلف است. بیان مسئله مهمترین مرحله مدل‌سازی سیستم دینامیک است و سه مرحله بعد مرتبط با تعریف مسئله می‌باشند. شناسایی و تعریف روشن هدف‌های مدل بر مبنای مسئله می‌تواند سودمندی و اثربخشی مدل‌سازی سیستم دینامیک را افزایش دهد. این مرحله شامل: الف) تعریف مسئله، ب) شناسایی متغیرهای مهم مرتبط با مسئله به‌عنوان متغیرهای ذخیره، جریان، درون‌زا و برون‌زا، ج) تعیین بازه زمانی و مکانی، می‌باشد (Sterman, 2000). فرمول‌سازی مدل با هدف نشان دادن ساختار، مسئله‌ای است که در قسمت اول تعریف شده است. نمودار حلقه علی–معلولی و نمودار ذخیره–جریان دو ابزار بنیادین مورد استفاده در ترکیب‌بندی ساختار سیستم است. نمودار حلقه علی–معلولی اگرچه ابزار مناسبی برای نمایش ساختار بازخوردی سیستم و درون‌زایی متغیرهاست اما قادر به نمایش مفهوم‌های ذخیره–جریان نیست (Ford, 1999). در یک نمودار ذخیره–جریان، متغیرهای ذخیره که به متغیرهای سطح یا تجمعی نیز شهرت دارند، حافظه یک سیستم دینامیک هستند و زمانی که آنها در طول زمان تغییر می‌کنند وضعیت یک سیستم در هر نقطه از زمان به‌وسیله آنها تعیین می‌شود. پس از آن که مدل سیستم دینامیک ایجاد شد و اصول مختلف در مورد آن مورد بازبینی قرار گرفت، باید آن را آزمایش و اعتبارسنجی کرد. در این فرایند ممکن است، مدل مورد تجدیدنظر قرار گیرد و حتی بار دیگر صورت‌بندی شود. اعتبارسنجی مدل‌های مربوط به سیستم‌های اجتماعی، مفهومی ابهام‌برانگیز است، که همواره نقد شده است. آزمون ساختاری و آزمون رفتاری از جمله آزمون‌های اعتبارسنجی مدل سیستم دینامیک است. آزمون ساختاری با مقایسه ساختار مدل با دانش موجود در مورد سیستم واقعی ارائه شده در ادبیات موضوع، گزارش‌های سازمان‌ها و بررسی‌های ارزیابی شده انجام می‌شود. آزمون رفتاری نیز به بررسی و مقایسه رفتار یک سیستم با داده‌های تاریخی می‌پردازد (Sterman, 2000). پس از اعتبارسنجی مدل در نهایت می‌توان از سیستم طراحی‌شده جهت پیش‌بینی اثرگذاری‌های سیاست‌های مختلف و بررسی رفتار سیستم در طول زمان استفاده کرد.

ب) مدل‌سازی سیستم کنترل پسماند غذایی

میزان پسماند غذایی ناشی از مصرف غذا از حاصل‌ضرب جمعیت بر سرانه هدر رفت غذایی قابل محاسبه است. سرانه هدر رفت غذایی خود می‌تواند تابعی از آموزش و درآمد باشد. انتظار می‌رود افراد با درآمد بالاتر توجه کمتری به مدیریت هدر رفت غذایی داشته باشند. از سوی دیگر دولت می‌تواند از طریق برنامه‌های آموزشی با افزایش آگاهی سرانه هدر رفت غذایی را در ایران کاهش دهد. کاهش هدر رفت غذایی خود می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌های دولت شود. که این کاهش مخارج خود می‌تواند صرف آموزش و اجرای سیاست‌های مختلف جهت مدیریت پسماند موادغذایی شود. با توجه به نرخ مثبت رشد جمعیت در کشور، انتظار می‌رود جمعیت کشور افزایش یابد. تقاضا برای موادغذایی در کشور از دو کانال قابل تأمین است. بخشی از موادغذایی از طریق واردات و بخشی از آن از طریق تولید داخل پاسخ داده می‌شود. براساس مباحث مربوط به اقتصاد تولید، تولید موادغذایی در کشور تابعی از نهاده‌هایی همچون انرژی است. بنابراین با توجه به تقاضا برای موادغذایی و سرانه نیاز انرژی برای تولید هر واحد موادغذایی، می‌توان تقاضای انرژی در کشور که در فرایند تولید موادغذایی به‌کار گرفته می‌شود را پیش‌بینی نمود. افزایش انرژی در کنار افزایش درآمد در کشور خود بر اساس تئوری منحنی کوزنتس بر میزان آلودگی کشور اثرگذار باشد. بنابراین اجرای سیاست‌های مختلف جهت مدیریت هدر رفت غذایی می‌تواند علی‌رغم کاهش مصرف انرژی در کشور کنترل آلودگی را نیز در پی داشته باشد. برای مدل‌سازی این مدل ذهنی از نرم‌افزار ونسیم استفاده شده است. این نرم‌افزار با حل تکراری معادلات دیفرانسیل موجود در سیستم به روش تفاضل‌های محدود، رفتار سیستم را در دوره موردنظر شبیه‌سازی نشان می‌دهد. به طوری که بعد از اجرای مدل، رفتار تک‌تک متغیرهای موجود طی نمودارها و جداولی قابل ملاحظه خواهد بود.

تولید ناخالص داخلی و جمعیت دو متغیر مهم در سیستم طراحی شده می‌باشند که به‌طور مستقیم بر تقاضای غذا اثر گذارند (Ansari & Seifi, 2012, 2013). تولید ناخالص داخلی به طور مستقیم منعکس کننده توسعه اقتصادی کشور است. رشد جمعیت نیز با افزایش تقاضا برای غذا ارتباط تنگاتنگی دارد. از سوی دیگر نرخ رشد اقتصادی خود می‌تواند بر نرخ رشد جمعیت اثر گذار باشد.

در سیستم طراحی شده متغیر نیاز غذایی، مقدار غذای مورد نیاز به منظور تأمین تقاضای پیش رو با در نظر گرفتن درصدی از ضایعات است. تعادل زمانی برقرار است که عرضه غذا در بازار دقیقا برابر با تقاضای آن باشد. فرض تحقیق حاضر این است که زباله‌های غذایی بخش زیادی از عرضه غذا را به خود اختصاص می‌دهد که نمی‌توان آن را نادیده گرفت. بر اساس مطالعات مختلف از جمله (Buzby et al., 2014 ; Xu & Szmerekovsky, 2017) ، اتلاف غذایی حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد از کل غذای عرضه شده توسط صنعت غذا را به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین نیاز غذایی به‌صورت حاصل جمع کل تقاضای غذا و هدر رفت غذا محاسبه می‌شود (Xu & Szmerekovsky, 2017).

تولیدات کشاورزی، میزان محصول تولید شده در یک دوره خاص (یک سال) را اندازه گیری می‌کند (Xu & Szmerekovsky, 2017). تجزیه‌وتحلیل همبستگی و رگرسیون بین نیازهای غذایی و تولید کشاورزی در این مطالعه صورت گرفت. نتایج تحلیل همبستگی حاکی از یک همبستگی قوی بین این دو متغیر است. نتایج برآورد رگرسیون خطی نیز در مدل‌سازی سیستم دینامیک در نظر گرفته شد.

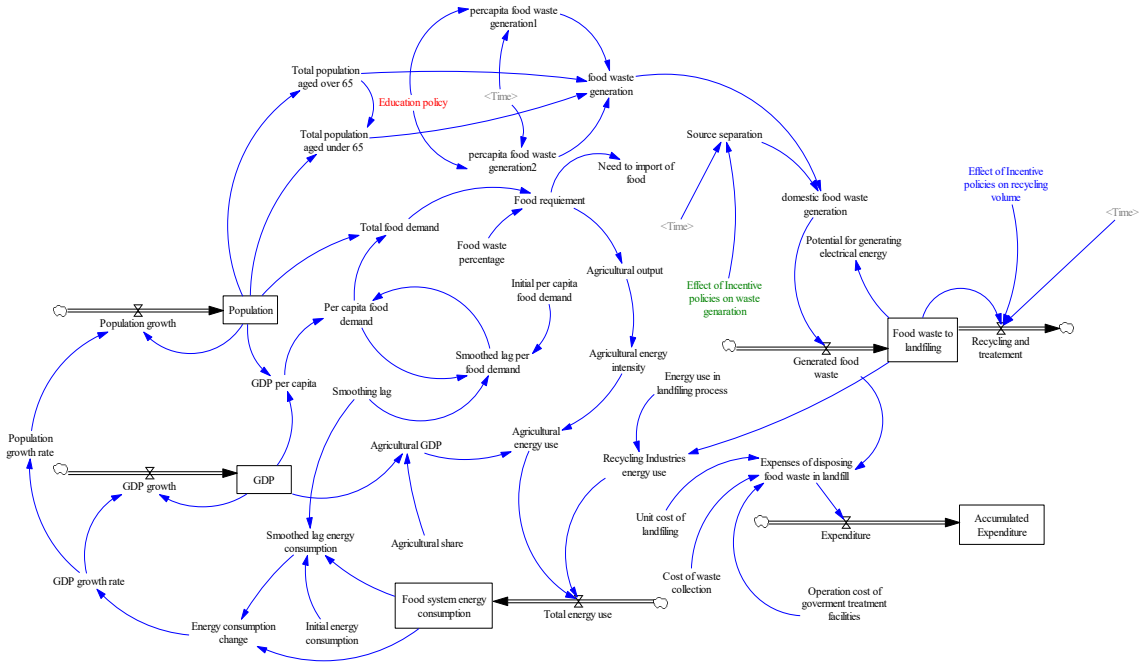
برای محاسبه کل انرژی مصرفی در بخش کشاورزی میزان مصرف مستقیم انرژی، سوخت مصرفی برای آبیاری، ماشین‌آلات و استفاده از مواد شیمیایی و همچنین مصرف غیرمستقیم انرژی در نظر گرفته شد. ایده کاربرد شدت انرژی کشاورزی و تولید ناخالص داخلی بخش کشاورزی برای اندازه گیری مصرف انرژی در بخش کشاورزی توسط (Feng et al., 2013) مطرح شد. شدت انرژی کشاورزی عمدتا تحت تاثیر بودجه کشاورزی و تولیدات این بخش است (Suh, 2015). بنابراین یک مدل رگرسیون با استفاده از شدت انرژی کشاورزی و تولیدات این بخش ساخته شد. نتایج مربوطه بیانگر وجود رابطه‌ای معنی‌دار بین دو متغیر است. سهم کشاورزی از تولید ناخالص داخلی نیز میزان مشارکت این بخش در اقتصاد ملی را اندازه گیری می‌کند (Xu & Szmerekovsky, 2017). برای بخش انرژی میزان مصرف انرژی طی فرایند دفن زباله نیز مدنظر قرار گرفته است. میزان پسماند غذایی تولید شده توسط خانوارها به مراکز دفن پسماند انتقال می‌یابد که بخشی از آن طی فرایند بازیافت، که خود وابسته به تکنولوژی بازیافت است، بازیافت می‌شود. روابط به‌کار رفته در این مطالعه به طور خلاصه در جدول (۱) گزارش شده است.

جدول ۱. متغیر و پارامترهای مدل سیستم دینامیک

نوع متغیر	نام متغیر	مقدار کمی	واحد
متغیر حالت (stock variable)	جمعیت (نفر)	۹۰۶۱۰۰۰۰	نفر
	تولید ناخالص داخلی (میلیارد- ریال)	۱۷۰,۰۰۰,۰۰۰	میلیارد- ریال
	انرژی مصرفی (بشکه نفت خام)	۶۰۰۰۰۰۰	بشکه نفت خام
	مخارج (میلیارد- ریال)	۰	میلیارد- ریال
	زباله تولید شده (تن)	۲۰۰۷۵۰	تن
	سرانه زباله تولید شده (افراد بالای ۶۵ سال) (تن در سال)	۰/۲۱۵	تن در سال
	سرانه زباله تولید شده (افراد زیر ۶۵ سال) (تن در سال)	۰/۲۶۵	تن در سال
	سهم بخش کشاورزی (درصد)	۸/۵۳	درصد
	سرانه اولیه تقاضا غذا (هزار تن)	۰/۱۳۳۰۰	هزار تن
	هزینه عملیاتی دولت (ریال در کیلوگرم)	۵۲۷	ریال در کیلوگرم
	هزینه جمع‌آوری زباله (ریال در کیلوگرم)	۱۵۹۷	ریال در کیلوگرم
	معادله		
متغیر درون زا	جمعیت	INTEG (populationgrowth,6.81229e + 007)	
	رشد جمعیت	Population × population growth rate	
	تولید ناخالص داخلی	INTEG (GDPgrowth,1.07307e + 006)	
	رشد تولید ناخالص داخلی	GDP × GDP growth rate	
	نرخ رشد تولید ناخالص داخلی	WITH LOOKUP (Energy consumption change)	
	سرانه تولید ناخالص داخلی	GDP/Population	
	نیاز غذایی	Total food demand/(1-food waste)	
	کل تقاضای غذا	Per capita food demand × Population	
	کل انرژی مصرفی	Agricultural energy use + Recycling Industries energy use	
	انرژی مصرفی در بخش کشاورزی	Agricultural energy intensity × Agricultural GDP	
	تولید ناخالص بخش کشاورزی	Agricultural share × GDP	
	تولید بخش کشاورزی	-1.46424e+006+23.96 × Food requirement (R^2 = 0.85 , p- value = 0.00	
	زباله غذایی تولید شده	(per-capita food waste generation2*Total population aged under 65)+(per-capita food waste generation1*Total population aged over 65)	
	بازیافت	IF THEN ELSE(Time<2022, 0.13*Food waste to landfilling ,((0.13+(Effect of Incentive policies on recycling volume*0.13))*Food waste to landfilling))	
	هزینه دفن زباله	(Generated food waste*Cost of waste collection) + (Generated food waste*Operation cost of government treatment facilities)+(Generated food waste*Unit cost of landfilling)	
	تقاضا غذا	0.254 × Smoothed lag per food demand + 0.0073 × GDP per capita + 0.00038 (R^2 = 0.90, p-value = 0.00)	
	هزینه	Expenses of disposing food waste in landfill/1e+009	

* Source: World Bank

در این مطالعه مرز زمانی مدل و یا بازه زمانی شبیه‌سازی تولید پسماند غذایی برای دوره ۲۰۲۴–۲۰۴۰ در نظر گرفته شد. بررسی مطالعات گذشته نشان داد که بازه زمانی در مطالعات گوناگون در زمینه مدیریت منابع از یک دوره ۱۰ ساله (Zarghami & Akbariyeh, 2012) تا ۱۰۰ ساله (Naill, 1976; Rehan et al., 2011) متغیر است. بخشی از بازه در نظر گرفته شده برای مقایسه نتایج مدل طراحی شده و داده‌های مشاهداتی به کار گرفته می‌شود. در این مطالعه داده‌های مشاهده شده در یک بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۳۸۳–۱۳۹۳) برای صحت‌سنجی مدل سیستم پویای طراحی شده استفاده شد. بخش دیگر آن نیز مربوط به ارزیابی رفتار متغیرهای سیستم طراحی شده در آینده است. با توجه به داده‌های موجود از تقاضا برای غذا و جمعیت و انرژی، در توسعه مدل سیستم دینامیک، گام‌های زمانی به صورت سالانه در نظر گرفته شد. شکل (۱) نمودار حلقه علی– معلولی برای بازیافت پسماند غذایی و ایجاد امنیت غذایی را در نرم‌افزار ونسیم نشان می‌دهد.



شکل ۱. حلقه علی و معلولی سیستم پسماند موادغذایی (Source: The authors)

در نهایت پس از اطمینان، از مدل طراحی شده برای ارزیابی اثرات سیاست‌های مدیریت پسماند غذایی استفاده شده است. سیاست‌های به‌کار رفته در این مطالعه در جدول (۲) گزارش شده است.

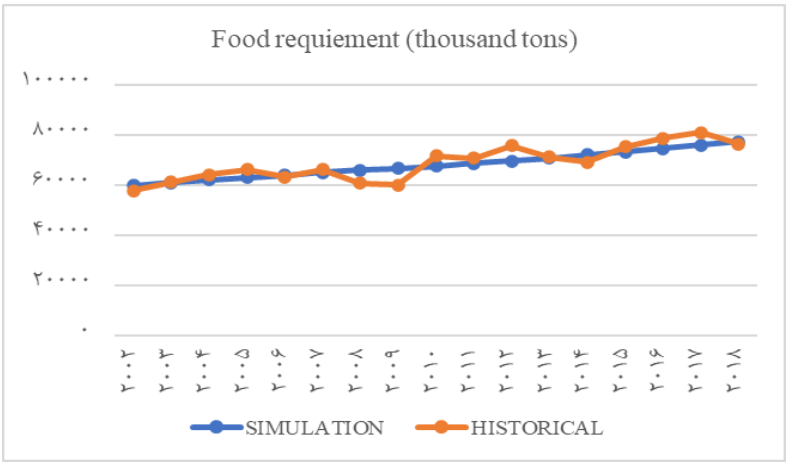
جدول ۲. سیاست‌های مدیریتی پسماند در سیستم غذا

سناریو	تأثیر آموزش در کنترل تولید سرانه زباله	سیاست‌های تشویقی به منظور تفکیک از مبدا	بهبود تکنولوژی بازیافت زباله
شرایط پایه	سرانه تولید زباله به‌طور میانگین ۰/۲۴ تن در سال	۷ درصد تفکیک زباله از مبدا	بازیافت ۱۳ درصد زباله
سناریو اول	کاهش ۱۰ درصدی سرانه تولید زباله از طریق برنامه‌های آموزشی و ترویجی	افزایش تفکیک زباله از مبدا به سطح ۱۰ درصد از طریق سیاست‌های تشویقی	بهبود تکنولوژی و افزایش میزان بازیافت به سطح ۲۰ درصد
سناریو دوم	کاهش ۲۰ درصدی سرانه تولید زباله از طریق برنامه‌های آموزشی و ترویجی	افزایش تفکیک زباله از مبدا به سطح ۲۰ درصد از طریق سیاست‌های تشویقی	بهبود تکنولوژی و افزایش میزان بازیافت به سطح ۳۰ درصد
سناریو سوم	کاهش ۳۰ درصدی سرانه تولید زباله از طریق برنامه‌های آموزشی و ترویجی	افزایش تفکیک زباله از مبدا به سطح ۳۰ از طریق سیاست‌های تشویقی	بهبود تکنولوژی و افزایش میزان بازیافت به سطح ۴۰ درصد

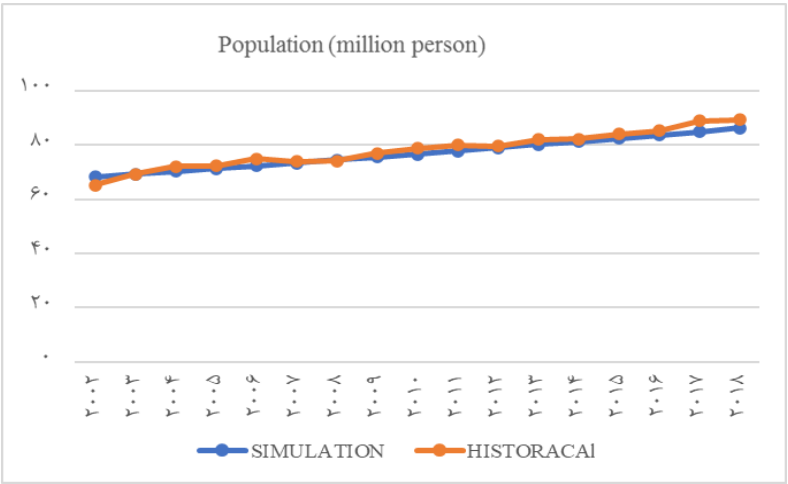
Source: Studies conducted in the field of waste control

نتایج

پس از طراحی مدل و وارد کردن رابطه‌های ریاضی و مقدارهای موردنظر برای متغیرها در سیستم طراحی شده، در آغاز توانایی مدل در شبیه‌سازی رفتار سیستم ارزیابی شد. به عبارت دیگر یکی از آزمون‌های ارزیابی مدل طراحی شده مقایسه داده‌های تاریخی با داده‌های شبیه‌سازی‌شده است. بدین‌منظور رفتار شبیه‌سازی‌شده برای متغیر جمعیت و تقاضا برای موادغذایی مورد توجه قرار گرفته است و آماره R^2 محاسبه شد. راست آزمایی مدل با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای در سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۰۲ صورت گرفت. مقایسه روند متغیرهای موردنظر طی سال‌های مورد بررسی و رفتار شبیه‌سازی‌شده توسط سیستم گویای همخوانی خوب خروجی مدل با داده‌های تاریخی است. مقدار R^2 محاسبه شده معادل ۰/۹۲ و ۰/۸۵ می‌باشد. لذا می‌توان از مدل طراحی شده برای بررسی و شبیه‌سازی اثرگذاری‌های سناریوهای مختلف استفاده کرد.



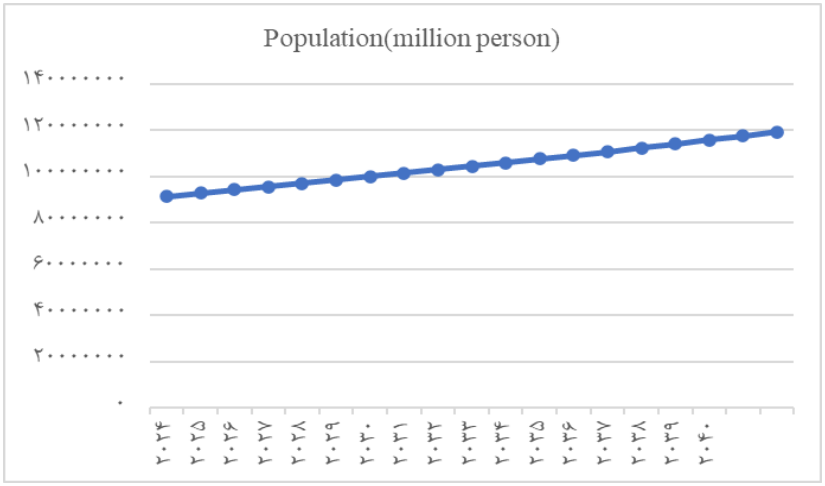
نمودار ۱. مقایسه رفتار تاریخی و شبیه‌سازی متغیر تقاضا برای موادغذایی (Source: The authors)



نمودار ۲. مقایسه رفتار تاریخی و شبیه‌سازی متغیر جمعیت (Source: The authors)

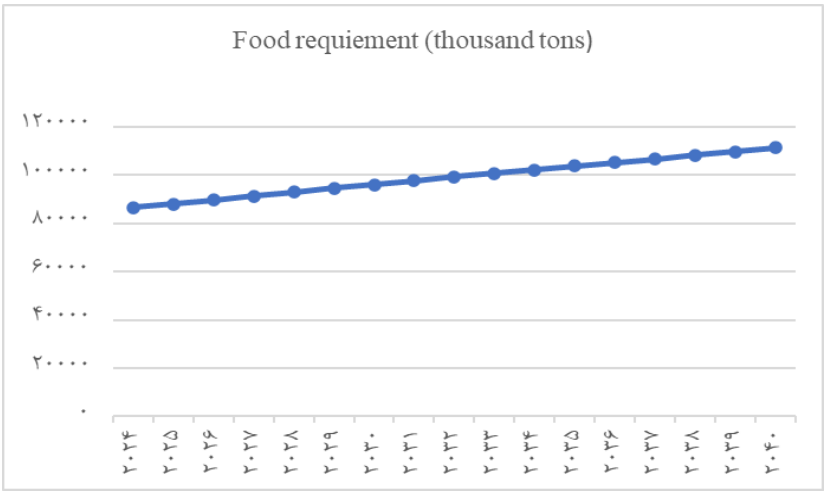
مطالعه رفتار متغیرهای کلیدی سیستم مدیریت پسماند موادغذایی تحت سناریو پایه

پس از اعتبارسنجی مدل، رفتار متغیرهای کلیدی مدل بر مبنای سناریو پایه، برای سال‌های ۲۰۲۴ تا ۲۰۴۰ شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی متغیرهای اصلی مدل در نمودارهای (۳ تا ۶) ارائه شده است.



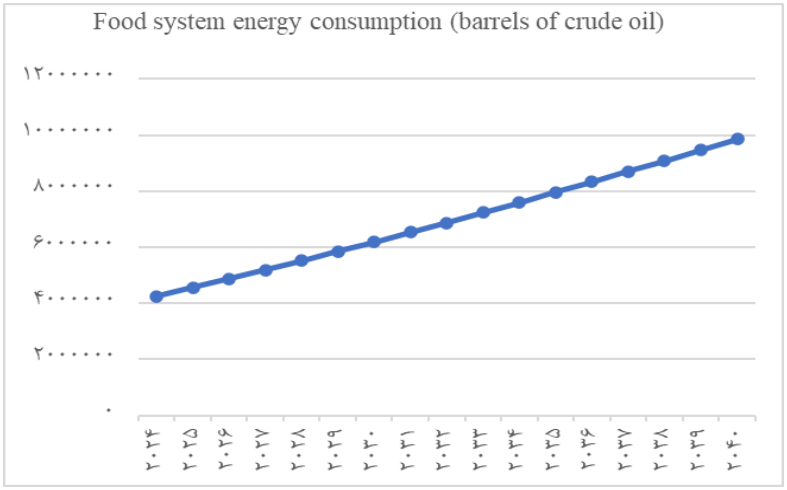
نمودار ۳. شبیه‌سازی رفتار متغیر جمعیت کشور (میلیون نفر) (Source: The authors)

نمودار (۳) مربوط به بررسی روند متغیر جمعیت در دوره شبیه‌سازی ۲۰۲۴ تا ۲۰۴۰ می‌باشد. نرخ رشد سالانه جمعیت در طول دوره مورد مطالعه در سناریو پایه معادل ۱/۴۸ درصد ثابت فرض شده است. با این نرخ رشد، میزان جمعیت در سال ۲۰۲۴ معادل ۹۴/۱۳ میلیون نفر و در سال ۲۰۴۰ معادل ۱۱۹/۰۶ میلیون نفر برآورد شده است. با توجه به روند رو به رشد جمعیت مطالعه حاضر انتظار می‌رود حجم تقاضای موادغذایی افزایش یابد.



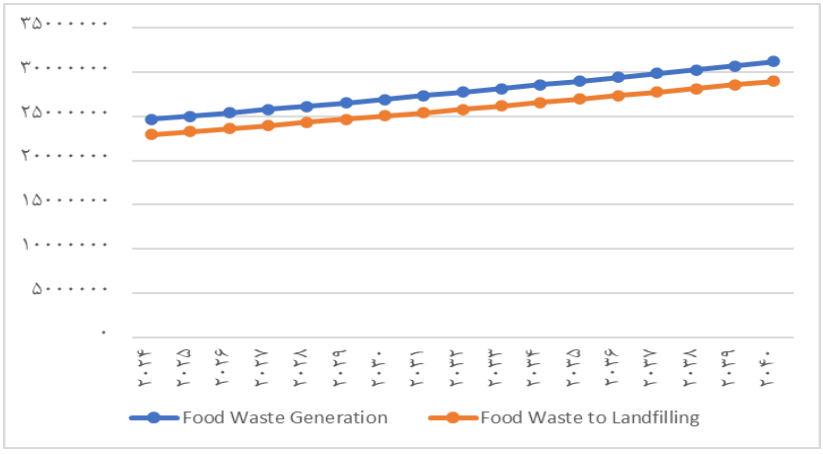
نمودار ۴. شبیه‌سازی رفتار متغیر تقاضا برای موادغذایی (هزار تن) (Source: The authors)

در نمودار (۴) روند تغییرات متغیر تقاضا برای موادغذایی ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود تقاضای موادغذایی دارای روندی افزایشی است. به طوری که مقدار این متغیر در ابتدای دوره شبیه‌سازی معادل ۳۰/ ۸۶۴۵۴ هزار تن و در انتهای دوره با رشدی معادل ۱/۳۸ درصد به ۱۱۱۱۷۵/۱۳ هزار تن می‌رسد.



نمودار ۵. شبیه‌سازی رفتار متغیر مصرف انرژی در سیستم غذا (بشکه نفت خام) (Source: The authors)

با توجه به روند روبه رشد جمعیت و تقاضای موادغذایی انتظار می‌رود تغییرات مصرف انرژی مثبت باشد. مطابق نتایج شبیه‌سازی نمودار (۵) میزان مصرف انرژی با رشد ۷/۰۵ درصد در سال ۲۰۲۴ معادل ۴۲۶۱۷۵۸ بشکه نفت خام به‌دست آمده است. مطابق با نتایج متغیر روند افزایشی را طی نموده است اما دارای بازدهی نزولی یا کاهنده بوده است. این رفتار تا انتهای دوره مورد بررسی نیز مشاهده می‌شود به‌طوری که با رشد ۴/۰۵ درصد در سال ۲۰۴۰ میزان مصرف انرژی معادل ۹۸۶۱۷۵۵ بشکه نفت خام پیش بینی شد.



نمودار ۶. شبیه‌سازی رفتار متغیر زباله تولید شده و میزان دفن (تن) (Source: The authors)

نمودار (۶) حاکی از آن است که تحت سناریو پایه و ادامه روند وضعیت موجود، کمترین میزان زباله تولید شده در ابتدای دوره شبیه‌سازی معادل ۲۴/۶۶ میلیون تن و در انتهای دوره حجم زباله تولید شده معادل ۳۱/۱۹ میلیون تن پیش‌بینی شده است. به وضوح مشخص است به دلیل روند افزایشی حجم زباله تولید شده، سالانه ضایعات غذایی ارسال شده به محل‌های دفن زباله نیز به‌طور مداوم افزایش می‌یابد. به‌طوری که میزان دفن زباله موادغذایی از ۱۵/۳۰ میلیون تن در ابتدای دوره ۲۰۲۴ با رشدی معادل ۱/۵۲ درصدی در انتهای دوره حدود ۱۹/۹۸ میلیون تن برآورد شده است. همچنین مطابق با انتظار، افزایش سالانه ضایعات غذایی ارسال شده به محل‌های دفن زباله، افزایش هزینه‌های مدیریت پسماند موادغذایی جهت رسیدگی به ضایعات در محل‌های دفن زباله را به دنبال خواهد داشت. این مساله را می‌توان در مشابهت روند افزایشی مخارج سالانه دفن ضایعات موادغذایی مشابه کرد. لذا اگر دولت سیاست مدیریت پسماند خود را بهبود نبخشد، مشکل ضایعات موادغذایی جدی‌تر خواهد شد.

اثر سیاست‌های مدیریت پسماند موادغذایی

الف) زباله تولید شده

جدول ۳. نتایج شبیه سازی میزان زباله تولید شده تحت سناریوهای مورد مطالعه

سال	سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم
۲۰۲۴	۱۹/۲۲	۱۹/۷۲	۱۷/۲۶
۲۰۲۶	۲۲/۸۵	۲۰/۳۱	۱۷/۷۷
۲۰۲۸	۲۳/۵۳	۲۰/۹۲	۱۸/۳۰
۲۰۳۰	۲۴/۲۴	۲۱/۵۴	۱۸/۸۵
۲۰۳۲	۲۴/۹۶	۲۲/۱۸	۱۹/۴۱
۲۰۳۴	۲۵/۷۰	۲۲/۸۴	۱۹/۹۸
۲۰۳۶	۲۶/۴۶	۲۳/۵۲	۲۰/۵۸
۲۰۳۸	۲۷/۲۵	۲۴/۲۲	۲۱/۱۹
۲۰۴۰	۲۸/۰۶	۲۴/۹۴	۲۱/۸۲

در جدول (۳) اثر تغییر در میزان زباله تولید شده تحت سناریو اول، دوم و سوم ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان زباله تولید شده تحت سناریو اول در سال ۲۰۲۴ معادل ۱۹/۲۲ میلیون تن پیش‌بینی شده است. همچنین این متغیر در ادامه نیز روند کاهشی به خود گرفته و در انتهای دوره به ۲۸/۰۶ میلیون تن رسیده است. تحت سناریو دوم و سوم میزان زباله تولید شده در سال ۲۰۲۴ به ترتیب ۱۹/۷۲میلیون تن و ۱۷/۲۶ میلیون تن است که این میزان در انتهای دوره تحت سناریو دوم معادل ۲۴/۹۴ میلیون تن و در سناریو سوم ۲۱/۸۲ میلیون تن می‌رسد. با فرض ثابت بودن سایر شرایط و افزایش جمعیت پیش‌بینی شده، مصرف موادغذایی در شرایط بهینه‌ای از نظر پایداری قرار می‌گیرد. به وضوح مشخص است سناریو سوم اثربخشی قابل‌توجهی نسبت به دو سناریو اول و دوم در کنترل میزان زباله تولید شده و عادت مصرفی موادغذایی دارد.

ب) ذخیره دفن زباله و بازیافت

جدول ۴. نتایج شبیه سازی میزان زباله‌های بازیافت شده و حجم دفن زباله تحت سناریوهای مورد مطالعه

سال	سناریو پایه		سناریو اول		سناریو دوم		سناریو سوم	
	حجم دفن زباله	زباله بازیافت شده	حجم دفن زباله	زباله بازیافت شده	حجم دفن زباله	زباله بازیافت شده	حجم دفن زباله	زباله بازیافت شده
۲۰۲۴	۱۵۳/۰۷	۱۹/۰۹	۱۲۹/۱۴	۲۵/۸۳	۹۸/۴۴	۲۹/۴۳	۷۱/۹۶	۲۸/۷۲
۲۰۲۶	۱۵۹/۰۹	۲۰/۶۸	۱۱۸/۹۰	۲۳/۷۸	۷۵/۴۷	۲۲/۵۷	۴۵/۵۲	۱۸/۱۷
۲۰۲۸	۱۶۴/۹۳	۲۱/۴۴	۱۱۳/۴۳	۲۲/۶۹	۶۴/۹۹	۱۹/۴۳	۳۶/۵۵	۱۴/۵۹
۲۰۳۰	۱۷۰/۶۹	۲۲/۱۹	۱۱۱/۰۴	۲۲/۲۱	۶۰/۶۷	۱۸/۱۴	۳۳/۹۱	۱۳/۵۴
۲۰۳۲	۱۷۶/۴۱	۲۲/۹۳	۱۱۰/۶۶	۲۲/۱۳	۵۹/۴۰	۱۷/۷۶	۳۳/۵۷	۱۳/۴۰
۲۰۳۴	۱۸۲/۱۵	۲۳/۶۸	۱۱۱/۵۹	۲۲/۳۲	۵۹/۶۶	۱۷/۸۴	۳۴/۰۹	۱۳/۶۱
۲۰۳۶	۱۸۷/۹۴	۲۴/۴۳	۱۱۳/۴۰	۲۲/۶۸	۶۰/۶۹	۱۸/۱۵	۳۴/۹۳	۱۳/۹۴
۲۰۳۸	۱۹۳/۸۱	۲۵/۲۰	۱۱۵/۸۱	۲۳/۱۶	۶۲/۱۳	۱۸/۵۸	۳۵/۹۰	۱۴/۳۳
۲۰۴۰	۱۹۹/۸۰	۲۵/۹۷	۱۱۸/۶۴	۲۳/۷۳	۶۳/۸۰	۱۹/۰۸	۳۶/۹۵	۱۴/۷۵

در جدول (۴) میزان تغییر در میزان زباله‌های بازیافت شده و ذخیره دفن زباله را تحت سناریو پایه، اول، دوم و سوم گزارش می‌دهد.

همان‌طور که مشخص است تحت سناریو اول میزان ذخیره دفن زباله در سال ۲۰۲۴ معادل ۱۲۹/۱۴ میلیون تن پیش‌بینی شده است که نسبت به سناریو پایه معادل ۲۳/۹۳ میلیون تن در سال ۲۰۲۴ در سطح پایین‌تری قرار دارد. در انتهای دوره نیز ۱۱۸/۶۴ میلیون تن ارزیابی شده است. لازم به ذکر است این متغیر در ادامه نیز نسبت به سناریو پایه روند کاهشی خود را حفظ کرده است. از این‌رو به نظر می‌رسد مطابق سیرکاهشی زباله تولید شده تحت سناریو اول، این نتیجه کاملا مطابق با انتظار بوده است. چرا که در طی سال‌های شبیه‌سازی میزان زباله کمتری به مراکز دفن زباله انتقال یافته است. از سویی دیگر در هر سال میزان بازیافت نیز در هر حال افزایش بوده که به‌طور غیرمستقیم بر حجم ذخیره زباله‌های دفن شده اثر گذاشته است. مطابق با نتایج تحت سناریو اول در سال ۲۰۲۴ میزان بازیافت ۲۵/۸۳ میلیون تن و در انتهای دوره ۲۳/۷۳ میلیون تن برآورد شده است.

به وضوح مشخص است ادامه روند کاهشی ذخیره زباله دفن شده تحت سناریو دوم و سوم نیز مشابه سناریو اول بوده است. به طوری‌که در ابتدای دوره سناریو دوم و سوم به‌ترتیب ۹۸/۴۴ میلیون تن و ۲۸/۷۲ میلیون تن بوده است. در انتهای دوره نیز به ۱۹/۰۸ میلیون تن تحت سناریو دوم و ۱۴/۷۵ میلیون تن تحت سناریو سوم رسیده است. مطابق با جدول (۴) می‌توان بیان نمود تغییرات در حجم بازیافت در هر یک از سناریوهای اعمال شده منفی می‌باشد. این امر نتیجه بهبود فناوری در بازیافت می‌باشد که بیشتر در انتهای سال‌های شبیه‌سازی شده نمایان شده است. تحت سناریو دوم و سوم میزان بازیافت در ابتدای دوره معادل ۲۹/۴۳ میلیون تن و ۲۸/۷۲ میلیون تن ارزیابی شده است. این میزان در انتهای دوره تحت سناریو دوم معادل ۱۹/۰۸ میلیون تن و در سناریو سوم ۱۴/۷۵ میلیون تن به‌دست آمده است.

ب) مصرف انرژی در سیستم غذا

جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی حجم انرژی مصرفی تحت سناریوهای مورد مطالعه

سال	سناریو اول	درصد تغییرات	سناریو دوم	درصد تغییرات	سناریو سوم	درصد تغییرات
۲۰۲۴	۴۲۳۵۴۶۴	-۰/۶۱	۴۱۹۸۲۷۶	-۱/۴۸	۴۱۶۱۷۰۰	-۲/۳۴
۲۰۲۶	۴۷۴۰۴۱۵	-۲/۸۶	۴۵۶۴۸۳۸	-۶/۴۶	۴۴۱۶۳۹۱	-۹/۵۰
۲۰۲۸	۵۲۰۹۷۱۱	-۵/۶۶	۴۸۵۴۲۰۴	-۱۲/۱۰	۴۵۸۷۱۲۶	-۱۶/۹۳
۲۰۳۰	۵۶۶۰۵۴۴	-۸/۵۲	۵۱۰۸۸۸۹	-۱۷/۴۴	۴۷۲۹۸۹۰	-۲۳/۲۶
۲۰۳۲	۶۱۰۴۰۴۱	-۱۱/۲۳	۵۳۴۹۸۷۹	-۲۲/۲۰	۴۸۶۴۹۶۸	-۲۹/۲۵
۲۰۳۴	۶۵۴۷۴۵۷	-۱۳/۷۱	۵۵۸۷۵۸۷	-۲۶/۳۶	۴۹۹۹۷۵۶	-۳۴/۱۱
۲۰۳۶	۶۹۹۵۵۷۱	-۱۵/۹۴	۵۸۲۷۲۳۱	-۲۹/۹۸	۵۱۳۶۹۹۹	-۳۸/۲۷
۲۰۳۸	۷۴۵۱۵۸۱	-۱۷/۹۳	۶۰۷۱۴۸۲	-۳۳/۱۳	۵۲۷۷۷۶۴	-۴۱/۸۷
۲۰۴۰	۷۹۱۷۶۸۱	-۱۹/۷۱	۶۳۲۱۷۶۱	-۳۵/۸۹	۵۴۲۲۵۱۵	-۴۵/۰۱

همان‌طور که در جدول (۵) ملاحظه می‌شود حجم انرژی مصرفی در ابتدای دوره مورد بررسی تحت سناریو اول معادل ۴۲۳۵۴۶۴ بشکه نفت خام پیش‌بینی شده است که این میزان در سناریوی دوم و سوم معادل ۴۱۹۸۲۷۶ بشکه نفت خام و ۴۱۶۱۷۰۰ بشکه نفت خام محاسبه شده است. به بیان دیگر اثر بخشی سناریو اول معادل ۶۱/ ۰درصد و اثر بخشی سناریو دوم و سوم معادل ۱/۴۸ درصد و ۲/۳۴ درصد می‌باشد. به وضوح مشخص است اعمال سیاست‌ها در همان ابتدای دوره موفقیت‌آمیز بوده است و انرژی مصرفی در هر سه سناریو روند کاهشی نسبت به سناریو پایه به خود گرفته است. همچنین در انتهای دوره شبیه‌سازی نیز این متغیر روند خود را حفظ کرده است. اثربخشی سناریو دوم نیز در انتهای دوره با ۳۵/۸۹ درصد تغییرات بیشتر از سناریو اول برآورد شده است. همان‌طور که مشخص است مطابق با انتظار اعمال سناریوها در طی سال‌های ۲۰۲۴ تا ۲۰۴۰ نسبت به سناریو پایه اثربخشی قابل‌توجهی بر کاهش میزان انرژی مصرف شده در صنعت غذا داشته است. باید توجه داشت سناریو سوم به‌عنوان موثرترین سناریو شناخته شود. چرا که در طی سال‌های

شبیه‌سازی شده حجم مصرفی انرژی با تغییرات کمتری افزایش یافته است. به‌عبارتی دیگر با وجود روند افزایشی رشد جمعیت تحت اعمال این سناریو در مصرف انرژی بیش از پیش صرفه‌جویی شده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

با توجه به رشد روزافزون جمعیت، تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع‌طبیعی، دستیابی به امنیت غذایی پایدار، به چالشی اساسی برای بسیاری از کشورها از جمله ایران تبدیل شده است. در این شرایط، یکی از راهکارهای کلیدی که می‌تواند هم‌زمان چندین مسئله محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی را هدف قرار دهد، مدیریت بهینه پسماند غذایی است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از رویکرد سیستم دینامیک، کوشیده است تا با تحلیل روابط علّی و متقابل میان متغیرهایی همچون جمعیت، تقاضای غذا، مصرف انرژی و میزان پسماند، چارچوبی علمی و شبیه‌سازی‌پذیر برای تصمیم‌گیری سیاست‌گذاران ارائه دهد. نتایج مدل‌سازی این پژوهش با استفاده از رویکرد سیستم دینامیک نشان داد که رابطه‌ای تنگاتنگ بین رشد جمعیت، افزایش تقاضای موادغذایی، مصرف انرژی و تولید پسماند غذایی وجود دارد.

در شرایط پایه، ادامه روند فعلی منجر به رشد قابل‌توجهی در میزان پسماند و مصرف انرژی می‌شود که نه‌تنها هزینه‌های دفن زباله را افزایش می‌دهد، بلکه نظام غذایی کشور را با آسیب‌پذیری جدی مواجه می‌سازد. با این حال، شبیه‌سازی سه سناریوی سیاستی (آموزش، تفکیک از مبدا و ارتقاء فناوری بازیافت) نشان داد سناریوی سوم که ترکیبی از هر سه رویکرد است، بیشترین اثربخشی را در کاهش حجم زباله (تا حدود ۸۲ درصد) و صرفه‌جویی در مصرف انرژی (بیش از ۴۵ درصد) داشته است. این موضوع به‌خوبی نقش مهم سیاست‌گذاری یکپارچه و مبتنی بر مدل‌سازی پویا را در بهینه‌سازی سیستم غذایی کشور برجسته می‌کند.

مدل طراحی شده در این تحقیق نشان داد که با تداوم روند فعلی، تولید پسماند غذایی و مصرف انرژی در کشور به‌طور فزاینده‌ای افزایش یافته و پیامدهایی همچون فشار بر منابع‌طبیعی، هزینه‌های سنگین دفن زباله و تشدید آسیب‌پذیری محیط‌زیستی را در پی خواهد داشت. نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مختلف سیاستی بیانگر آن است که اجرای هم‌زمان سه راهبرد: کاهش سرانه تولید زباله از طریق آموزش و تغییر رفتار مصرف‌کننده، تفکیک زباله از مبدا با مشوق‌های اقتصادی، و ارتقای فناوری‌های بازیافت (سناریوی سوم)، بیشترین اثربخشی را در مهار روند رو به رشد تولید پسماند و مصرف انرژی داشته است. در این سناریو، میزان تولید زباله تا حدود ۸۲ درصد کاهش یافت و مصرف انرژی در سیستم غذایی نیز به‌طور متوسط ۴۵ درصد کاهش یافت که گویای بهبود چشمگیر در بهره‌وری انرژی و اصلاح الگوی مصرف است.

این یافته‌ها به‌خوبی نشان می‌دهد که مسئله پسماند غذایی یک معضل صرفاً فنی یا فرهنگی نیست، بلکه یک پدیده سیستمی است که نیازمند مداخله‌های هوشمندانه، چندبعدی و مبتنی بر شبیه‌سازی و ارزیابی بلندمدت است. در واقع، مدل سیستم دینامیک توانسته با درک دقیق رفتار دینامیکی سیستم غذایی و اثر متقابل متغیرهای درونی، ابزاری دقیق و کاربردی برای تحلیل سیاست‌های مدیریت پسماند فراهم سازد.

با فرض جهانی بدون تغییر آب‌وهوایی، برای تامین تقاضای جهانی برای غذا مقدار آب برداشت شده توسط کشاورزی بایستی ۱۱ درصد افزایش یابد که به معنای مصرف بیشتر آب می‌باشد. این در حالی است که تغییرات آب‌وهوایی همانند خشکسالی و کاهش بارندگی، محدودیت منابع آبی را بر جهان تحمیل نموده است. همچنین جهت تأمین تقاضای موادغذایی، عملکرد در واحد سطح لازم است بیشتر شود که این اقدام از طریق بذرهای اصلاح شده، استفاده کود و سموم شیمیایی صورت خواهد گرفت. به طوری‌که در دراز مدت ممکن تعادل بین طبیعت و اقتصاد و تولید را برهم زده شود. لذا کنترل پسماند و به‌خصوص پسماندهای غذایی به موضوع مورد توجه سیاست‌گذاران در سال‌های اخیر تبدیل شده است. در این تحقیق تلاش شد تا به نحوی مدلی مناسب برای مدیریت پسماند موادغذایی در بلند مدت طراحی گردد که نتیجه آن افزایش توانایی برقراری امنیت غذایی برای پاسخگویی به تقاضای جمعیت رو به رشد باشد. باید توجه داشت افزایش تولید پسماند موادغذایی از طرف مردم نادیده گرفته می‌شود. به طوری که سبک زندگی و عوامل اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی عامل اصلی ایجاد الگوهای پیچیده تولید پسماند موادغذایی هستند. به این منظور آگاهی مصرف‌کنندگان موادغذایی از طریق آموزش و سیاست‌های تشویقی می‌تواند گامی موثر برای رسیدن به هدف مطالعه باشد. از سویی دیگر یکی از راهبردهای مهم درکنترل و

کاهش ضایعات غذایی بهبود تکنولوژی سیستم‌های بازیافت است. چرا که بی‌توجهی و عدم کنترل و فقدان محل‌های مناسب دفن زباله مشکلات خاصی را به دنبال خواهد داشت که بازتاب آن سلامت و محیطزیست را تهدید می‌کند. لذا با بازیافت علاوه بر بازگشت موادغذایی به چرخه مصرف، از آسیب به محیطزیست نیز جلوگیری می‌کند. نتایج نشان داد که حجم تقاضا برای موادغذایی که تحت تأثیر رشد جمعیت می‌باشند، در حال افزایش است. به واسطه رشد تقاضای غذا و جمعیت حجم زباله تولید شده افزایش یافته و حجم ذخیره دفن زباله روند صعودی را طی خواهد نمود. بنابراین سیستم غذایی کشور در پاسخگویی به تقاضای فزاینده در آیندهای نزدیک آسیب‌پذیر است. بنابراین می‌توان انتظار داشت با ادامه شرایط موجود امنیت غذایی و محیطزیستی در آینده با وضعیت نامطلوبی مواجه شوند. چنین شرایطی تأییدی بر لزوم اجرای سیاست‌های مدیریت پسماند موادغذایی است. مطابق با نتایج هر سه سناریو در کاهش زباله تولید شده، افزایش بازیافت و کاهش حجم ذخیره دفن زباله عملکرد موفقی را داشته‌اند. همچنین نتایج کاهش مصرف انرژی در سیستم غذا را به دنبال دارد که با مطالعه (Lee et al., 2018; Hénault et al., 2017) مطابقت دارد. در این راستا پیشنهاد می‌شود اعتمادی متقابل بین مردم و مسئولین ایجاد شود و اهمیت محتوی مشارکت در تدوین سیاست‌ها برجسته شود تا فاصله بین مردم و دولت کاهش یابد. همچنین با سرمایه‌گذاری مناسب برای بازیافت، از زباله‌های جمع‌آوری شده برای تولیدات جدید استفاده شود تا از بروز خسارت به محیطزیست تا حدودی جلوگیری شود. از سویی دیگر باید توجه داشت در سال‌های اخیر میزان بهره‌وری انرژی در ایران کاهش یافته و این امر به دلیل افزایش شدت مصرف انرژی است. چرا که با افزایش جمعیت در کشور، تقاضا برای غذا و در نتیجه تقاضا برای انرژی در بخش کشاورزی و صنایع غذایی به‌عنوان نهاده اصلی تولید افزایش می‌یابد. در نتیجه اگر روند فعلی شدت انرژی کنترل نشود نه تنها به اهداف مصوب در سند چشم انداز نخواهیم رسید، بلکه یکی از واردکنندگان اصلی حامل های انرژی در جهان نیز خواهیم بود. بنابراین لازم به ذکر است مطالعه حاضر با اتخاذ این سیاست‌ها تلاش قابل ملاحظه‌ای برای کاهش میزان مصرف انرژی در صنعت غذا انجام داده است. به‌طوری که به طرز ناباورانه‌ای از چرخه نابودی منابع جلوگیری کرده است تا دیگر برای نسل‌های آتی هزینه‌های جبران‌ناپذیری باقی نماند.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی مدل سیستم دینامیک، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران و نهادهای اجرایی کشور، نگاه سیستمی و بلندمدت به مسئله مدیریت پسماند غذایی داشته باشند. اتخاذ رویکردهایی چون گسترش آموزش عمومی برای افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان در جهت اصلاح الگوی مصرف و کاهش هدررفت غذا، می‌تواند نقش مؤثری در تغییر رفتار جامعه ایفا کند. همچنین، ایجاد بسترهای مناسب برای تفکیک زباله از مبدا با استفاده از سیاست‌های تشویقی اقتصادی، همراه با سرمایه‌گذاری هدفمند در توسعه فناوری‌های نوین بازیافت، از دیگر اقداماتی است که باید مورد توجه قرار گیرد. این اقدامات، در صورت هماهنگ‌سازی نهادی میان دولت، شهرداری‌ها، بخش خصوصی و جامعه مدنی، می‌تواند به کاهش هزینه‌های دفن زباله، افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش آسیب‌های محیطزیستی منجر شود. از سوی دیگر، ارتقای شاخص‌های بهره‌وری انرژی در بخش کشاورزی و صنایع غذایی نیز باید به‌عنوان بخشی از راهبرد جامع مدیریت منابع مطرح باشد، چرا که با ادامه روند فعلی مصرف انرژی، نه‌تنها دستیابی به اهداف توسعه پایدار دشوار خواهد شد، بلکه فشارهای اقتصادی و محیطزیستی بر کشور افزایش خواهد یافت. بنابراین، ایجاد تعامل مؤثر میان مردم و حاکمیت، نهادینه‌سازی مشارکت عمومی در تدوین سیاست‌ها و بهره‌گیری از ابزارهای نوین تحلیل سیستم‌ها، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای گذار از وضعیت موجود به سوی آینده‌ای پایدار در حوزه امنیت غذایی و حفظ منابع است.

منابع

Afshar Kazemi, M.A., Eftekhar, L. & Omrani, Gh. (2016). The use of System Dynamics Methodology for Analysis of Generation, Collection and Transport Systems of Municipal Solid Waste (The case of metropolitan city of Tehran). *J.Env. Sci. Tech., Vol 18*, No.2, 107-126. (in Persian)

Ansari, N., & Seifi, A. (2013). A system dynamics model for analyzing energy consumption and CO_2 emission in Iranian cement industry under various production and export scenarios. *Energy Policy, 58*: 75-89.

Ansari, N., & Seifi, A., (2012). A system dynamics analysis of energy consumption and corrective policies in Iranian iron and steel industry. *Energy 43* (1), 334e343.

Arivazhagan, R., Geetha, P., & Ravilochanan, P. (2016). Assessment of wastages in fruit supply chain with respect to fruit processing units in Tamilnadu, India. Int. *Food Res. 23* (2), 723-732.

Buzby, J.C., Farah-Wells, H., & Hyman, J. (2014). The estimated amount, value, and calories of postharvest food losses at the retail and consumer levels in the United States. USDA-ERS Econ. Inf. Bull. Number 121.

Ding, Z., Yi, G., Tam, VWY., & Huang, T. (2016). A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China. Waste Manag 51:130–141.

Energy balance. (2016). Vice President of Electricity and Energy Affairs, Electricity and Energy Macro Planning Office. (in Persian)

FAO. (2013). Food wastage foot print. Impacts on natural resources, FAO, Rome.

Feng, Y.Y., Chen, S.Q., & Zhang, L.X. (2013). System dynamics modeling for urban energy consumption and CO2 emissions: a case study of Beijing, China. *Ecol. Model. 252*, 44e52.

Ford, A. (1997). System dynamics and the electric power industry. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society, 13*(1): 57-85.

Ford, F. A. (1999). Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems. Island Press.

Forrester, J.W. (1994). System dynamics, systems thinking, and soft OR. *System Dynamics Review, 10*: 245-256.

Garrone, P., Melacini, M., & Perego, A., (2014). Opening the black box of food waste reduction. *Food Policy 46*, 129-139.

Girard, C., Rinaudo, J. D., Pulido-Velazquez, M., & Caballero, Y. (2015). An interdisciplinary modelling framework for selecting adaptation measures at the river basin scale in a global change scenario. *Environmental Modelling & Software, 69*, 42–54.

Guo, H.Q., Hobbs, B.F., Lasater, M.E., Parker, C.L., & Winch, P.J. (2016). System dynamicsbased evaluation of interventions to promote appropriate waste disposal behaviors in low-income urban areas: a Baltimore case study. *Waste Manag. 56*, 547-560.

Han, H.Y., & Zhang, Z.J. (2017). The impact of the policy of municipal solid waste sourceseparated collection on waste reduction: a case study of China. J. Mater. *Cycles Waste Manag. 19*, 382-393.

Hassanzadeh, E., Elshorbagy, A., Wheater, H., & Gober, P. (2014). Managing water in complex systems: An integrated water resources model for Saskatchewan, Canada. *Environmental Modelling & Software, 58*, 12-26.

Hénault-Ethier, L., Martin, J-P., Housset, J. (2017). A dynamic model fororganic waste management in Quebec (D-MOWIQ) as a tool to review environmental, societal and economic perspectives of a waste management policy. *Waste Manag 66*:196–209

Kotir, J. H., Smith, C., Brown, G., Marshall, N., & Johnstone, R. (2016). A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. *Science of the Total Environment, 573*, 444-457.

Layani, G., Bakhshoodeh, M., Zibaei, M., & Viaggi, D. (2021). Sustainable water resources management under population growth and agricultural development in the Kheirabad river basin, Iran. *Bio-based and Applied Economics, 10*(4), 305-323.

Lee C. K. M., Ngl, K. K. H., Kwong, C. K., & Tay, S. T. (2018). A system dynamics model for evaluating food waste management in Hong Kong, China. *Journal of Material Cycles and Waste Management, 21*:433–456.

Lv, J., Dong, H., Geng, Y., & Li, H. (2020). Optimization of recyclable MSW recycling network: a Chinese case of Shanghai. *Waste Manag. 102*, 763-772.

Munesue, Y., Masui, T., & Fushima, T. (2015). The effects of reducing food losses and food waste on global food insecurity, natural resources, and greenhouse gas emissions. *Environ. Econ. Policy Stud. 17*, 43-77.

Sharp, A. (2016). A System Dynamics Model to Evaluate Effects of Source Separation of Municipal Solid Waste Management: A Case of Bangkok, Thailand. *Waste Management, 52*, 50-61.

Shijiang, X., Huijuan, D., Yong, G., Xu, T., Chang, L., & Haifeng, L. (2020).Policy impacts on Municipal Solid Waste management in Shanghai: A system dynamics model analysis. J. Clean. 262.

Sterman, J.D. (2000). Business dynamics, systems thinking and modeling for a complex world (No. HD30. 2 S7835 2000). Boston.

Suh, D. (2015). Declining energy intensity in the U.S. agricultural sector: implications for factor substitution and technological change. *Sustainability, 7*. 13192-13205.

Wang, Z.F., Ren, J.Z., Goodsite, M.E., Xu, G.Y., (2018). Waste-to-energy, municipal solid waste treatment, and best available technology: comprehensive evaluation by an interval valued fuzzy multi-criteria decision making method. J. Clean. Prod. 172, 887-899.

Xu, Y., & Szmerekovsky, J. (2017). System dynamic modeling of energy savings in the US food industry. *Journal of Cleaner Production, 165*, 13-26.

Zare MehrjerdI, Y. & Faramarzinejad, M. 2019. A System Dynamics Modeling Approach To Evaluation Pu blic Participation In The Management Of Municipal Solid Waste. Industrial Engineering Management. 35(1): 149-156. (in Persian)

Zarghami, M., & Akbariyeh, S. (2012). System dynamics modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran. *Resources, Conservation and Recycling, 60*, 99-106.