

Original Article



Modeling the Causal Loop Diagram of the Waste Management Cycle and Providing a Solution to Organize the Existing Situation (Kerman Case Study)

Received: 2023.11.25

Accepted: 2024.05.21

Hossein Vahidi,^{1*}  Mohammad Ali Bagherzadeh Kouhbanani²

¹ Department of Environment, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

² Department of Power and Control Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Organizing the collection of valuable recyclable waste at the city level has always been a major challenge for municipalities due to unprincipled activities. So far, various attempts have been made to organize these people in Iran, but all of them have failed. Almost all municipalities have accepted the presence of these people as an informal part of urban waste management. The purpose of this study is to create a new financial structure in the form of an activity license and investigate the informal flow of waste collectors in three scenarios by the causal loop diagram of the waste management cycle in Vensim software. The causal loop model obtained in this research brings a new and complete understanding of stakeholders, effective variables in cooperation, and competition between formal and informal actors in the waste management cycle of Kerman City.

Material and Methods: To simulate the performance of different financial license pricing scenarios, the concepts of simulation of system thinking, dynamic planning, and CLD model have been used in Vensim software. At first, the CLD model of the waste cycle in Kerman City was drawn and analyzed using local conditions, the infrastructures of Kerman Municipality, and the behavior of actors in collecting recyclable waste. The drawing model was developed in Vensim software based on the collected field data and statistics from 2021 to 2022. The new scenario was defined based on the use of financial licenses to organize the informal collectors of recycled waste and separation from the origin of the definition and the assumptions of the model. Three scenarios of the existing situation, the basic license price of 500000 and 1000000 Tomans were examined and compared with each other.

Results and Discussion: According to the results, in scenario 2, the municipality's share of the recycling market has increased by about 204%, and the amount of the municipality's profit, including the amount of the license issuance along with the discount, has increased by 232%. In scenario 3, the municipality's share of the recycling market has increased by about 400% compared to the current situation, and compared to the second scenario, it has increased by 64%, and the amount of the municipality's profit has increased by 507% compared to the current situation.

Conclusion: Financial licenses in the field of municipal waste management have been used in their simplest form so far, which have been mostly ineffective. The use of smart financial and licensing systems based on field conditions, the dynamics of actors' behavior, and smart policies can be a suitable solution for organizing urban waste management, especially the informal waste collection fleet.

Keywords: Waste management, Causal loop diagram, Vensim software, Systems thinking, License sale, Kerman municipality

How to cite this article:

How to cite this article:
Vahidi, H. and Bagherzadeh Kouhbanani, M.A., 2024. Modeling the Causal Loop Diagram of the Waste Management Cycle and Providing a Solution to Organize the Existing Situation (Kerman Case Study). *Environ. Sci.* 22(3): 407-426

* Corresponding Author Email Address: h.vahidi@kgut.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1357



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مدلسازی نمودار حلقه علی چرخه مدیریت پسماند و ارائه راهکار جهت ساماندهی وضع موجود (مطالعه موردی شهر کرمان)



تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

حسین وحیدی^{۱*}، محمدعلی باقرزاده کوهبنانی^۲

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: ساماندهی افرادی که به طرز غیراصولی فعالیت‌های تفکیک و جمع‌آوری پسماندهای باارزش قابل بازیافت در سطح شهر را انجام می‌دهند، همواره یکی از چالش‌های اساسی در شهرداری‌ها بوده است. تا به حال تلاش‌های مختلفی برای ساماندهی این افراد در ایران انجام شده است، اما همگی با شکست مواجه شده‌اند. تقریباً همه شهرداری‌ها حضور این افراد را به‌عنوان بخش غیررسمی در مدیریت پسماند شهری پذیرفته‌اند. هدف این مطالعه ایجاد یک ساختار جدید مالی در قالب مجوز فعالیت، جریان غیررسمی جمع‌آوری‌کنندگان پسماند را در سه سناریو توسط نمودار حلقه علی چرخه مدیریت پسماند در نرم‌افزار Vensim بررسی می‌کند. مدل حلقه علی به‌دست‌آمده در این پژوهش درک جدید و کاملی درباره ذی‌نفعان، متغیرهای مؤثر در همکاری و رقابت بین بازیگران رسمی و غیررسمی در چرخه مدیریت پسماند شهر کرمان را به ارمغان می‌آورد.

مواد و روش‌ها: به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد سناریوهای مختلف قیمت‌گذاری مجوزهای مالی از مفاهیم شبیه‌سازی تفکر سیستمی، برنامه‌ریزی پویا و مدل CLD^۱ در نرم‌افزار Vensim استفاده شده است. نمودار حلقه علی چرخه مدیریت پسماند بر اساس داده‌های آماری میدانی تحلیل و بررسی شده است. شناسایی و گردآوری اطلاعات از بازیگران غیررسمی به دلیل طبیعت غیرشفاف و گاه قانون‌گريزانه فعالیت‌های آن‌ها با چالش‌هایی روبرو بوده است. برای جمع‌آوری اطلاعات مربوط به این بازیگران، از روش‌های میدانی شامل مصاحبه‌های نیمه‌ساختار یافته با نمونه‌هایی از این فعالان و همچنین نظرخواهی از کارشناسان و مسئولین شهری استفاده شده است. وضعیت فعلی چرخه رسمی و غیررسمی مدیریت پسماند بر اساس شرایط و زیرساخت‌های شهر کرمان و برای سه سناریوی وضعیت موجود، قیمت پایه مجوز ۵۰۰ هزار و یک‌میلیون تومان بررسی و مقایسه شده است. در ابتدا مدل CLD چرخه پسماند در شهر کرمان با استفاده از شرایط محلی، زیرساخت‌های شهرداری کرمان و رفتار بازیگران در جمع‌آوری پسماندهای بازیافتی ترسیم و مورد تحلیل قرار گرفت. مدل ترسیمی در نرم‌افزار Vensim و بر اساس اطلاعات میدانی جمع‌آوری شده و آمارهای سال ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۱ توسعه داده شد. سناریوی جدید با محوریت استفاده از مجوزهای مالی برای ساماندهی جمع‌آوری‌کنندگان غیررسمی پسماندهای بازیافتی و تفکیک از مبدأ تعریف و فرضیات مدل بر اساس آن تعریف شد. سه سناریوی وضعیت موجود، قیمت پایه مجوز ۵۰۰ هزار و یک‌میلیون تومان بررسی و با یکدیگر مقایسه شدند.

نتایج و بحث: طبق نتایج، در سناریوی دو، سهم شهرداری از بازار بازیافت حدوداً ۲۰۴ درصد افزایش داشته است و میزان سود شهرداری با احتساب مبلغ صدور مجوز همراه با تخفیف ۲۳۲ درصد افزایش داشته است. در سناریوی سه، سهم شهرداری از بازار بازیافت در مقایسه با وضع موجود حدوداً ۴۰۰ درصد افزایش و در مقایسه با سناریوی دوم ۶۴ درصد افزایش و میزان سود شهرداری در مقایسه با وضع موجود ۵۰۷ درصد افزایش داشته است. نتایج حاکی از آن است که به‌کارگیری مجوزهای مالی نه تنها موجب افزایش سود شهرداری شده بلکه مدیریت پسماند شهری را نیز بهبود بخشیده است.

نتیجه‌گیری: مجوزهای مالی در حوزه مدیریت پسماند شهرداری‌ها تاکنون به ساده‌ترین حالت خود مورداستفاده قرار گرفته‌اند که عمدتاً ناکارآمد بوده‌اند. استفاده از سیستم‌های هوشمند مالی و صدور مجوز بر اساس شرایط میدانی، دینامیک رفتار بازیگران و سیاست‌گذاری‌های هوشمندانه می‌تواند راهکار مناسبی برای ساماندهی مدیریت پسماند شهری و خصوصاً ناوگان غیررسمی جمع‌آوری پسماند باشد. این پژوهش نشان داد که پیاده‌سازی مجوزهای مالی هوشمند و بهره‌گیری از ابزارهای تحلیل سیستمی می‌تواند به بهبود قابل توجهی در کارایی و اثربخشی مدیریت پسماند شهری منجر شود.

واژه‌های کلیدی: مدیریت پسماند، نمودار حلقه علی، نرم‌افزار Vensim، تفکر سیستمی، مجوز فعالیت، شهرداری کرمان

استناد به این مقاله: وحیدی، ح. و

م. ع. باقرزاده کوهبنانی، ۱۴۰۳.

مدلسازی نمودار حلقه علی چرخه

مدیریت پسماند و ارائه راهکار جهت

ساماندهی وضع موجود (مطالعه

موردی شهر کرمان). فصلنامه علوم

محیطی، ۴۲۶-۴۰۷: (۳) ۲۲، ۱۴۰۳.

* Corresponding Author Email Address: h.vahidi@kgut.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1357



مقدمه

بعنوان "جریان غیررسمی پسماند" نامید که برای اقتصاد این صنعت ضروری است و یکی از عوامل اصلی شکست طرح‌های دولتی مدیریت پسماند در کشور است. با بهبود برنامه‌های مدیریتی، اقتصادی و نظارتی، می‌توان به جلوگیری از آثار مخرب بر محیط‌زیست در شهرها کمک کرد. توسعه یک طرح جامع برای مدیریت پسماندهای شهری با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، می‌تواند منجر به بهره‌برداری بهینه از منابع شود.

مطالعه (Jamialahmadi et al., 2022) می‌تواند درس‌هایی را به سایر شهرها از چالش‌های سیستم مدیریت پسماند شهر تهران ارائه دهد. علیرغم تمام سرمایه‌گذاری‌ها و برنامه‌های اجرایی در شهر تهران میزان بازیافت در طول دهه گذشته تقریباً مقدار ۱۸٪ ثابت بوده است. تصمیمات کوتاه‌مدت، عدم درک صحیح از بخش‌های مختلف سیستم و عدم مشارکت سایر ذینفعان از مهم‌ترین نقاط ضعف حاکمیت در حوزه مدیریت پسماند در شهر تهران بوده است. طبق نتایج و بررسی‌های بدست‌آمده کیفیت روش‌های دفع تا حدی بهبود و ظرفیت کارخانه‌های کمپوست تهران افزایش یافته است ولی کیفیت کاهش، استفاده مجدد و بازیافت پسماندها (3R) بسیار ضعیف بوده و بهبود چندانی رخ نداده است.

صنعت بازیافت را می‌توان یک حوزه با پتانسیل زیاد و فعال دانست که در حال حاضر بیشتر توسط بخش خصوصی و غیردولتی فعالیت می‌کند (Baghani et al., 2016). با همکاری بخش دولتی، این جریان قابلیت هم‌افزایی قابل‌توجهی دارد. همچنین، با ایجاد ساختارهای مدیریتی، اقتصادی و نظارتی کارآمد در این حوزه، می‌توان از آثار مخرب بر محیط‌زیست در شهرها جلوگیری کرد. توسعه یک طرح جامع برای مدیریت پسماندهای شهری با بهره‌برداری بهینه از منابع می‌تواند

یکی از دلایل اصلی عدم توفیق بسیاری از طرح‌های دولتی در مدیریت پسماند در شهرهای ایران، وجود جریان غیررسمی در چرخه پردازش و بازیافت پسماندهای باارزش بازیافتی است. تاکنون تقریباً در هیچ‌کدام از پژوهش‌ها و مقالات منتشرشده در حوزه مدیریت پسماند، این جریان قدرتمند موردبررسی قرار نگرفته است. درحالی‌که برای بهبود وضعیت مدیریت پسماند در شهرداری‌ها، بایستی ابتدا این جریان و اقتصاد آن را به‌طور صحیح شناسایی کرد. برای این منظور، لازم است از مدل‌های علمی برای شناخت جریان‌های رسمی و غیررسمی و همچنین برهم‌کنش آن‌ها در مدیریت پسماند استفاده شود تا بتوان ضمن بررسی و مطالعه اقتصاد هر یک از جریان‌های رسمی و غیررسمی، علل موفقیت یا شکست طرح‌های پیشنهادی در حوزه مدیریت پسماند را تعیین کرد.

روزانه در ایران تقریباً ۴۹ هزار تن پسماند شهری تولید می‌شود و شهرداری‌ها متولی تفکیک، پردازش و بازیافت پسماندها هستند، که عملکرد ضعیفی از خود نشان داده‌اند. علل اصلی ضعف سیستم دولتی شامل عدم وجود تخصص‌های لازم در بخش دولتی، عدم وجود برنامه‌های علمی و اجرایی مناسب برای زیرساخت شهرها، وجود جریان غیررسمی و قدرتمند پردازش و بازیافت، اختلال در طرح‌ها و عدم جذب سرمایه بخش خصوصی در این حوزه است (Rajaeifar et al., 2015).

تفکیک پسماندهای پلاستیکی در حال حاضر از وضعیت نامناسبی برخوردار است. جمع‌آوری این پسماندها اکثراً توسط قشر فقیر جامعه و به‌صورت غیراستاندارد انجام می‌شود که هیچ نظارتی بر آن‌ها وجود ندارد (Parandeh and Khanjani, 2012). پسماندها به کارگاه‌های شهری منتقل می‌شوند و در آنجا خرد یا فشرده می‌شوند و برای استفاده در صنایع تبدیلی ارسال می‌شوند (Jamialahmadi et al., 2022). این جریان را می‌تواند

مؤثر باشد (Saghafi and Teshnizi, 2011). برای تدوین سیاست‌های مرتبط با مدیریت پسماند، استفاده از مدل‌سازی پویا سیستم مناسب است، زیرا این مدل توانایی حل سامانمند مشکلات و در نظر گرفتن عوامل داخلی و خارجی مؤثر بر توسعه پایدار محیطی را دارد (Bala et al., 2017; Suryani et al., 2022). نمودار حلقه علی سیستم یکی از مدل‌های مورد استفاده در برنامه‌ریزی پویا است که بر اساس تفکر سیستمی عمل می‌کند. تاکنون در ایران، مطالعه‌ای بر اساس بررسی نمودار حلقه علی سیستم مدیریت پسماند انجام نشده است و مطالعات برنامه‌ریزی پویا در این حوزه بسیار محدود است.

در مطالعه (Berenjkar et al., 2021) کاربردهای مختلف سیستم‌های پویا در سناریوها و برنامه‌های گوناگون مدیریت پسماند در کشورهای مختلف بررسی شده است. اقداماتی که بسیاری از کشورها برای تغییر در روند مدیریت پسماند خود در نظر گرفتند در یک یا چند عنصر موظف شامل تولید پسماند، کاهش، استفاده مجدد / بازیابی، بازیافت و دفع است. در مدل‌های برنامه‌ریزی پویای شرایط محلی و منطقه‌ای و تعریف درست از وضعیت بازیگران، زیرساخت‌های و سیاست‌گذاری‌ها در حوزه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی لازم و ضروری بوده و کمک شایانی به دقت مدل و نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی میدانی می‌کند. طبق نتایج، انگیزه‌های تفکیک زباله و سطح دانش مدیریت پسماند متغیرهایی هستند که همیشه تأثیر مثبتی بر کل سیستم دارند.

یکی از مطالعات جامع در حوزه تحلیل سیستمی مدیریت پسماند شهری، توسط (Breukelman et al., 2022) انجام شده است. این مطالعه بر اساس بررسی نمودار حلقه علی سیستم مدیریت پسماند صورت گرفت و روابط علی و معلولی در آن بررسی شده‌اند. همچنین، متغیرهای مدل بر اساس اثرگذاری داخلی و خارجی دسته‌بندی

شدند و در مجموعه‌ای شامل ۴۱ متغیر قرار گرفتند. در این مطالعه، ۸۷ رابطه پیوندی بین متغیرها ایجاد شد. همچنین در مطالعه‌ای که توسط مک و همکاران در سال ۲۰۱۹ انجام شد رویکرد دینامیک سیستم برای محاسبه هزینه دفع پسماندهای ساختمانی در شهر هنگ‌کنگ بررسی و یک ساختار سیستم عمومی برای تعیین هزینه شارژ بهینه دفع پسماند برای توسعه پایدار توسعه داده شد (Mak et al., 2019). در این مرجع، روابط پویا بین عوامل اجتماعی / اقتصادی و هزینه دفع پسماند متناسب با اهداف مطالعه با ادغام عوامل کمی و کیفی در قالب پرسشنامه‌ای تشریح و سپس با استفاده از مدل نمودار حلقه علی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

سوریانی و همکاران در سال ۲۰۲۲ در سناریوهای پردازش پسماند برای حمایت از توسعه پایدار محیط‌زیست با استفاده از برنامه‌ریزی پویا و مدل‌های نمودار حلقه علی را مورد بررسی قرار دادند (Suryani et al., 2022). در این مطالعه، چندین سناریو جایگزین برای بهبود وضعیت پایداری در مدیریت پسماند شهری پیشنهاد شده، که عمدتاً بر تولید کمپوست و پسماند سوزی تمرکز داشتند.

مظفر و همکاران در سال ۲۰۲۲ علل تولید پسماندهای جامد را با استفاده از مدل دینامیک سیستم (نمودار حلقه علی) مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و بررسی عمیق یک سیستم مدیریت پسماند را با درک پیچیدگی عوامل منابع تولید پسماند در مبدأ مرتبط دانستند (Muzaffar et al., 2022). در این مقاله با استفاده از یک نمودار حلقه علی، رابطه متقابل بین عوامل مؤثر ترسیم شد و سپس رفتار دینامیکی آن سیستم مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

در مطالعه ژیاو و همکاران در سال ۲۰۲۰، اثرات سیاست بر مدیریت زباله جامد شهری در شانگهای با استفاده از مدل سیستم‌های پویا مورد بررسی قرار گرفت (Xiao et al., 2020). در این مدل کل فرآیند تولید، مرتب‌سازی،

ایالت جنوب غربی نیجریه استفاده شده است و مقادیر سیستم مدیریت پسماند از مراحل تولید تا دفع شناسایی شده است (Oriola, 2014). ضمن اینکه، با استفاده از نمودار حلقه علی و نمودار جریان، یک سیستم بازگشتی و روابط دینامیکی بین متغیرهای سیستم ایجاد نموده است.

تقریباً تمامی شهرداری‌های کشور با معضل درک صحیح ساختار مدیریت پسماند شهری روبرو هستند و در نتیجه توان تصمیم‌گیری بهینه را ندارند. همان‌طور که از نتایج به‌دست‌آمده در مراجع مورد مطالعه مشاهده می‌شود، استفاده از نمودار حلقه علی در مدل‌سازی سیستم‌های مدیریت پسماند، امکانات مفیدی را فراهم می‌کند. استفاده از این مدل‌ها دقت تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری را افزایش داده و رفتار واحدهای مؤثر در چرخه مدیریت پسماند را به‌دقت نشان می‌دهد. ضمن اینکه امکان اتخاذ تصمیمات بهینه را به وجود می‌آورد. از این‌رو در این مطالعه، با استفاده از ترسیم مدل‌های شبیه‌سازی علی و معلولی نمودار حلقه علی سعی بر درک صحیح ساختار مدیریت پسماند شهر کرمان شده است. در مرحله دوم، با رسم سناریوی فعلی و دو سناریوی پیشنهادی با محوریت مجوزهای مالی فعالیت در حوزه جمع‌آوری پسماندهای باارزش از سطح شهر باهدف برای بهبود وضعیت مدیریت پسماند شهری در شهر کرمان، رابطه بین واحدهای مؤثر در این چرخه بررسی و نتایج شبیه‌سازی طبق آمار و اطلاعات سال ۱۴۰۰ مورد مقایسه قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

برای انجام این مطالعه، ابتدا با استفاده از بازدیدهای میدانی و مصاحبه با کارشناسان و مدیران سازمان پسماند شهرداری کرمان، تلاش برای شناخت و درک صحیح عملکرد چرخه اجرایی مدیریت پسماند توسط شهرداری کرمان انجام شده است. همچنین، با مراجعه به

جمع‌آوری و دفع نهایی مدیریت پسماند در قالب هفت سناریو شبیه‌سازی و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. طبق نتایج، سیاست جمعیتی تولید سرانه پسماند را کاهش، اما مقدار کل تولید پسماند را افزایش می‌دهد. سناریوهای تعریف شده دارای برنامه بازیافت همگی تقاضای دفن پسماند را کاهش داده است. طبق پیشنهاد این مطالعه توجه به پیامدهای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری شامل سیاست اقتصادی و جمعیتی، تقویت ظرفیت بازیافت و پردازش‌های بیوشیمیایی و استفاده یکجا از ریجکتی‌ها بسیار حائز اهمیت است.

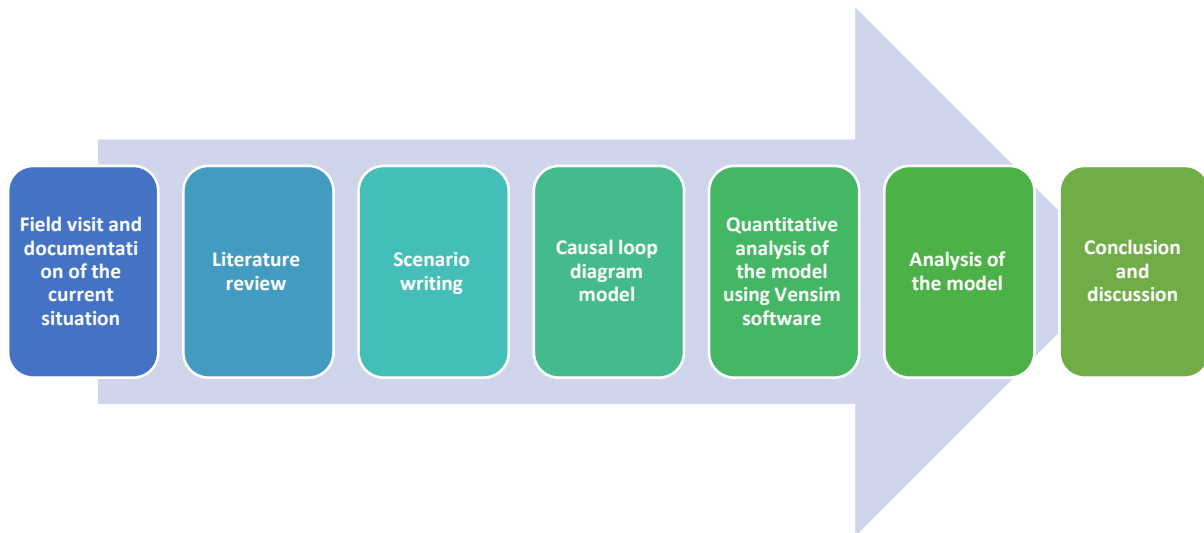
یانگ و همکاران در سال ۲۰۲۲ با استفاده از مدل‌سازی دینامیک سیستم پسماندهای جامد شهری در شهر کائوسیونگ، تایوان را پیش‌بینی کردند (Yang et al., 2022). بر اساس نتایج این مطالعه، پیش‌بینی تولید پسماندهای جامد شهری می‌تواند بعنوان مبنایی برای تدوین و تحلیل استراتژی‌های مؤثر در مدیریت پسماند شهری مورد استفاده قرار گیرد. سه فاکتور اصلی جمعیت، وضعیت اقتصادی و معیشتی مردم و وضعیت پیشین تولید پسماند بعنوان فاکتورهای اصلی مدل استفاده شده‌اند. همچنین، طبق نتایج این مطالعه، توسعه واحدهای پردازش مکانیکی و بازیافت می‌تواند کنترل هزینه سیستم‌های مدیریت پسماندهای جامد شهری را بهبود بخشد.

در تحقیق جوهانس در سال ۲۰۱۸ مدل‌سازی مدیریت یکپارچه پسماند در کشور اندونزی با هدف کاهش تولید پسماند انجام شد (Johannes, 2018). در این مطالعه از نمودار حلقه علی برای مدل‌سازی مدیریت یکپارچه پسماند استفاده کردند و سعی کردند که این پدیده واقعی و پیچیده را با استفاده از مدل‌سازی خود به صورت قابل درک و پویا برای دوره زمانی ۱۰۸۰ روز شبیه‌سازی نمایند.

اوریولا در سال ۲۰۱۴ از روش پویایی سیستم برای ارزیابی عملکرد فعالیت‌های مدیریت پسماند در یک

پیشنهادی با هدف کسب درآمد بیشتر برای شهرداری کرمان و جذب بیشتر مشارکت چرخه غیررسمی به خود، پیشنهاد شدند. به طور خلاصه گام‌های اصلی انجام مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده که روش انجام هر یک از آن‌ها و توضیحاتی درباره جزئیات در ادامه بیان شده است.

کارگاه‌های جمع‌آوری و پردازش سطح شهر (چرخه غیررسمی) و مصاحبه با برخی از صاحبان آن‌ها، روند موازی با چرخه رسمی که در این مقاله بعنوان جریان غیررسمی نام برده شده، مورد بررسی قرار گرفت. با استناد به اطلاعات به‌دست‌آمده، سناریوهایی برای وضع موجود چرخه مدیریت پسماند شهری کرمان و راهکار



شکل ۱- مراحل انجام مطالعه

Fig. 1- Study steps

بازیافتی توسط افراد دوره‌گرد (جریان غیررسمی) در سطح شهر، بسیار پایین است. افراد دوره‌گرد کیسه‌های پسماند را در محل تجمع پسماند در کوچه‌ها پاره کرده و مواد باارزش بازیافتی را جدا می‌کنند. زمانی که کامیون‌های جمع‌آوری پسماند شهرداری مراجعه می‌کنند عمدتاً بایستی پسماندهای برجا مانده را با زحمت زیاد و زمان بیشتر از حالت کیسه‌های دست-نخورده بارگیری نمایند.

بنا بر اطلاعات اخذ شده از مدیریت پسماند شهرداری کرمان، میزان تولید روزانه پسماند شهر کرمان حدوداً ۳۵۰ تا ۴۰۰ تن بوده که این میزان در روزهای پایانی سال تا سه برابر افزایش پیدا می‌کند. بنابراین اطلاعات اخذ شده که در جدول ۱ ارائه شده است، مواد باارزش قابل بازیافت در حدود ۱۶/۷۴ درصد از پسماندها را تشکیل می‌دهد.

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، شهر کرمان است. سیستم مدیریت پسماند کنونی شهرداری کرمان، یک سیستم سنتی و قدیمی است که هزینه بسیاری را بر دوش شهرداری کرمان تحمیل کرده است و درآمدزایی بسیار اندکی از محل بازیافت و غرفه‌های تفکیک از مبدأ مستقر از شهر به دست می‌آورد. درآمد حاصله در مقابل هزینه‌های انجام شده در حوزه پسماند بسیار اندک بوده که سیستم کنونی را فاقد صرفه اقتصادی نموده است. خدمات سازمان مدیریت پسماند عمدتاً بر جمع‌آوری کیسه‌های پسماند خانگی از درب منازل و انتقال آن‌ها به واحد پردازش مکانیکی مستقر در خارج شهر تمرکز دارد. عمده پسماندهای جمع‌آوری شده، پس از جداسازی مواد باارزش قابل بازیافت، در ترانشه‌های حفر شده دفن می‌شود. متأسفانه در حال حاضر راندمان واحد پردازش مکانیکی بدلیل تفکیک عمده پسماندهای باارزش

جدول ۱- آنالیز فیزیکی پسماند شهر کرمان
Table 1. Physical analysis of waste in Kerman City

درصد Percentage	پسماند Waste	ردیف Row
1.17	نان Bread	1
2.79	انواع پلاستیک All kinds of plastic	2
1.05	پت Pet	3
1.59	مشمع Nylon	4
0.70	تلق Clapping	5
0.49	فوم Foam	6
3.73	کاغذ Paper	7
3.40	مقوا Cardboard	8
1.62	فلزات آهن ferrous metals	9
0.83	فلزات غیر آهنی Non-ferrous metals	10
2.47	پارچه Cloth	11
2.89	شیشه Glass	12
0.93	چوب Wood	13
0.54	لاستیک Rubber	14
0.49	چرم Leather	15
2.75	خاک و نخاله Dirt and debris	16
1.05	تتراپک Tetrapak	17
2.33	ضایعات ویژه Special waste	18
69.18	پسماند آلی organic waste	19
100	مجموع کل پسماند The total sum of the waste	
308.27	چگالی پسماند کل (کیلوگرم بر مترمکعب) Total waste density (kg/m ³)	
0.64	سرانه (کیلوگرم به ازای هر نفر در روز) Per capita (kg per person per day)	

ریاضی و فرمول‌هایی استفاده شده است که بر اساس داده‌های تجربی و آماری معتبر، و همچنین بینش‌های ارائه شده توسط متخصصین حوزه مدیریت پسماند و تجزیه و تحلیل‌های میدانی تدوین شده‌اند. این معادلات به ما امکان می‌دهند تا

در این پژوهش از مدل‌سازی نمودار حلقه علی استفاده شده است. نمودار حلقه علی ارتباطات علی و معلولی میان پدیده‌ها را توصیف می‌کنند و بعضاً با عنوان مدل مفهومی سیستم نیز شناخته می‌شوند. برای کمی‌سازی این روابط، از معادلات

تغییرات و تأثیرات متقابل بین مؤلفه‌های مختلف سیستم را در طول زمان شبیه‌سازی و مدل کنیم. در این مدل‌ها، اجزای سیستم به صورت جزئی مورد مطالعه واقع می‌شوند و سیستم بعنوان یک جعبه سفید^۲ در نظر گرفته شده که وضعیت درون آن مشخص است. بر اساس تفکر سیستمی و نظریه سیستم‌ها، بازخورد نقش کلیدی در این حوزه دارد و تکمیل‌کننده حلقه‌ها هستند. پس از تکمیل این مرحله، نمودار حالت و جریان طراحی می‌شود. در هنگام ترسیم نمودار حلقه علی باید توجه داشت که روابط علت و معلولی با متغیرهایی که تغییرات آن‌ها با یکدیگر همبستگی دارند اما هیچ کدام علت دیگری نیستند، اشتباه گرفته نشوند (Blair et al., 2021; Haraldsson et al., 2006).

نرم‌افزار Vensim برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی پویایی سیستم‌ها طراحی شده است. این نرم‌افزار یک محیط بصری و تعاملی برای ایجاد مدل‌های پویا در سیستم‌های پیچیده فراهم می‌کند و امکان ایجاد نمودارهای حلقه علی، نمودارهای حالت و جریان و سایر مدل‌های پویای سیستم را فراهم می‌کند. این نرم‌افزار به کاربران امکان می‌دهد تا متغیرها، معادلات و روابط بین اجزای سیستم را تعریف کنند و از طریق آن، رفتار سیستم را در طول زمان شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل کنند. این نرم‌افزار جهت درک و حل مسائل پیچیده سیستم‌های دینامیک در زمینه‌هایی نظیر تجارت، اقتصاد، علوم محیطی، سیاست عمومی و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Lambraki et al., 2022). لازم به ذکر است کلیه استانداردهای ترسیم مدل‌های نمودار حلقه علی در این نرم‌افزار رعایت شده است. علاوه بر این، به منظور تحلیل دقیق‌تر، هر کدام از متغیرهای مهم در مدل دارای پارامترهای ورودی مشخصی هستند که شامل ضرایب تبدیل، نرخ‌های رشد و یا احتمالات خاصی می‌شود. این پارامترها بر اساس مطالعات موردی اخذ شده و با استفاده از تکنیک‌های آماری برای تخمین دقیق‌تر تنظیم شده‌اند. در نهایت، با ترکیب این پارامترها در مدل‌های دینامیک سیستمی، می‌توان روابط علی و معلولی را بصورت کمی شبیه‌سازی کرد.

در این مطالعه، شناسایی و گردآوری اطلاعات از بازیگران غیررسمی بدلیل طبیعت غیر شفاف و گاه قانون‌گریزانه فعالیت‌های آن‌ها با چالش‌هایی روبرو بوده است. برای جمع‌آوری اطلاعات مربوط به این بازیگران، از روش‌های میدانی شامل مصاحبه‌های نیمه ساختار یافته با نمونه‌هایی از این فعالان و همچنین نظرخواهی از کارشناسان و مسئولین شهری استفاده شده است. این مصاحبه‌ها در مکان‌هایی که جمع‌آوری غیررسمی فعالیت دارند، مانند مراکز بازیافت و مناطق جمع‌آوری پسماندها، انجام گرفته‌اند تا اطلاعات دقیق‌تری در مورد عملیات و تعاملات آن‌ها حاصل شود. بمنظور صحت‌سنجی اطلاعات جمع‌آوری شده، از مقایسه داده‌های بدست آمده از منابع مختلف، بررسی اسناد و مدارک، و استفاده از داده‌های ثانویه موجود است. این اقدام موجب افزایش اعتبار و قابلیت اتکای نتایج تحقیق شده است. در انتها بایستی اشاره داشت دقت اطلاعات میدانی رسمی در خصوص فعالیت بازیگران غیررسمی جمع‌آوری و انتقال پسماندهای باارزش در سطح شهر بسیار اندک بوده و در مرحله کنونی به جمع‌آوری و اطلاعات میدانی مستقیم و مصاحبه و بازدید اکتفا شده است.

نتایج و بحث

در بخش اول سعی شده تا بر اساس مفاهیم تفکر سیستمی، نمودار حلقه علی حاکم بر سیستم برای دو حالت «وضع موجود» و «روش پیشنهادی» ارائه شود تا دینفعان و نوع روابط حاکم بین آن‌ها مورد تحلیل و بحث قرار گیرند. نمودار حلقه علی هر دو حالت در نرم‌افزار Vensim ترسیم شدند و مدل ارائه شده برای سیستم با داده‌های تاریخی مقایسه شده است، که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته می‌شود.

تشریح سناریوها

❖ حالت اول (مدل‌سازی وضع موجود) (سناریوی اول)
در این حالت تمرکز بر مدل‌سازی وضع موجود مدیریت پسماند در شهر کرمان است. در این مدل، چرخه غیررسمی و رسمی بصورت هم‌زمان در حال فعالیت می‌باشند و دارای

جریان فروش مواد بازیافتی به شهرداری بمنظور افزایش سهم شهرداری از جریان پسماند باارزش بازیافتی و بهبود سهم شهرداری در بازار خریدوفروش پسماندهای باارزش بازیافتی است. از این رو لازم است قیمت‌گذاری مجوز و میزان تخفیف ارائه‌شده به‌گونه‌ای باشد که جمع‌آوری‌کنندگان تمایل بیشتری به فروش پسماندهای باارزش جمع‌آوری‌شده خود به شهرداری باشند تا در از تخفیف‌های مجوز بهره‌مند شوند. این موضوع می‌تواند در درازمدت زیرساخت توسعه صنایع تبدیلی و ایجاد ارزش‌افزوده از محل مدیریت نوین پسماندها و همچنین ساماندهی بهتر واحدهای غیررسمی و ارائه خدمات بهتر به آن‌ها را به دنبال داشته باشد.

در سناریو پیشنهادی، مبلغ خرید از ناوگان غیررسمی به‌صورت منصفانه و رقابتی با کارگاه‌های غیررسمی تعیین می‌شود و هیچ فشاری بر ناوگان غیررسمی برای فروش به سازمان مدیریت پسماند شهرداری وجود ندارد. حتی ناوگان غیررسمی می‌تواند پس از خرید مجوز تعریف‌شده، کلیه پسماندهای خود را به کارگاه‌های غیررسمی تحویل داده و از تخفیف‌های مجوز استفاده نکند. هدف اصلی این سناریو ایجاد ارتباط بین شهرداری کرمان و چرخه غیررسمی مدیریت پسماند با رویکرد برد-برد است، به‌نحوی که هر دو طرف بهره‌برداری کرده و منافع اقتصادی و اجتماعی آن‌ها تأمین شود. در کنار مزایای طرفین، با توجه به ساماندهی چرخه غیررسمی و افزایش نظارت بر آن‌ها، مزایای ویژه‌ای نیز برای شهروندان ایجاد می‌شود. در این روش، خرید مجوز برای جمع‌آوری‌کنندگان پسماند الزامی است و واحد نظارت شهرداری موظف به نظارت بر آن‌ها است. قیمت مجوز بایستی به‌گونه‌ای تعریف شود که تحویل پسماند باارزش بازیافتی به شهرداری کرمان و استفاده از تخفیف‌های حاصل از آن، برای جمع‌آوری‌کنندگان قابل توجیه باشد. همچنین در کنار فشارهای نظارتی بازرسان شهرداری، ناوگان غیررسمی بایستی توانایی خرید مجوز را داشته باشند. از آنجایی که هدف افزایش همکاری چرخه غیررسمی پسماند با شهرداری است، لازم است قیمت‌گذاری مجوز به‌گونه‌ای باشد که ناوگان

تضاد منافع در جمع‌آوری پسماندهای باارزش بازیافتی هستند. چرخه رسمی سهم بسیار ناچیزی از بازار بازیافت داشته و نظارت قابل توجهی بر چرخه غیررسمی وجود ندارد. ضمن اینکه ناوگان جمع‌آوری شهرداری عمدتاً بر تنظیف شهری تمرکز دارد.

❖ حالت دوم (صدور مجوز فعالیت برای جمع‌آوری‌کنندگان پسماند باارزش بازیافتی) (سناریوی دوم و سوم با فرض قیمت‌های مجوز متفاوت)

در این سناریو، با تعریف یک مجوز فعالیت همراه با تخفیف بر اساس عملکرد برای ناوگان غیررسمی جمع‌آوری پسماندهای باارزش بازیافتی، تلاش می‌شود تا فعالیت آن‌ها کنترل، نظارت، ساماندهی و کسب درآمد پایدار برای شهرداری کرمان فراهم شود. رویکرد این سناریو برد-برد-برد بین سه بازیگر اصلی، یعنی شهرداری کرمان، ناوگان غیررسمی جمع‌آوری پسماند و شهروندان، تمرکز دارد. البته بایستی اشاره داشت بصورت دقیق‌تر تنها بازیگران این مطالعه «شهرداری» و «ناوگان غیررسمی جمع‌آوری پسماند» در نظر گرفته شده است و شهروندان در نهایت از برد هر دو گروه از منافع اجتماعی و محیط زیستی بهره‌مند خواهند شد.

در این سناریو، صدور مجوز فعالیت با سقف هزینه مشخصی توسط سازمان مدیریت پسماند شهرداری کرمان انجام می‌شود و تمامی جمع‌آوری‌کنندگان پسماندهای باارزش بازیافتی ملزم به خرید این مجوز هستند. به ازای پسماند جمع‌آوری‌شده توسط این افراد و تحویل آن به سازمان مدیریت پسماند، مبلغ تمدید مجوز کاسته شده و پس از عبور از حداکثر میزان تخفیف صدور مجوز، مجوز فعالیت دوره بعدی به‌صورت رایگان صادر خواهد شد. ضمن اینکه، امکان فروش پسماند جمع‌آوری‌شده به کارگاه‌های غیررسمی نیز وجود دارد، اما در این صورت مشمول تخفیف کمتری خواهند شد. علاوه بر این، بعد از عبور از حداکثر میزان تخفیف صدور مجوز همچنان می‌توانند پسماند جمع‌آوری‌شده را به شهرداری نیز بفروشند. اگرچه فروش مجوز به‌تنهایی می‌تواند درآمد قابل توجهی برای شهرداری داشته باشد، ولی هدف اصلی در این مدل ایجاد

به صورت منصفانه و رقابتی نسبت به سایر کارگاه‌های خرید پسماند در سطح شهر بوده و تعیین قیمت به صورت شناور انجام می‌شود.

فرضیات ذکر شده، وضعیت جدیدی را در سیستم مدیریت پسماند شهر کرمان به وجود خواهند آورد که نتایج متفاوتی را بر اساس شرایط مختلف بازیگران ایجاد نماید. نتایج شبیه‌سازی انجام شده به ازای مقادیر مختلف قیمت مجوز، میزان تأثیرگذاری این روش را نشان می‌دهد. در ادامه به معرفی بازیگران و فرایندهای اصلی مدنظر جهت ترسیم مدل نمودار حلقه علی در هر دو حالت می‌پردازیم.

تعریف اجزا و بازیگران نمودار حلقه علی در این قسمت اجزای نمودارهای حلقه علی «وضع موجود» و «روش پیشنهادی» به همراه بازیگران اصلی شرح داده می‌شود. از آنجاکه تعریف دقیق این اجزا و بازیگران در درک و تحلیل مناسب مدل بسیار اهمیت دارد بایستی با دقت و جزئیات معرفی شوند. لازم به ذکر است، این موارد بر اساس شرایط محلی و منطقه‌ای در شهر کرمان تعریف شده‌اند و امکان دارد تعریف و عملکرد آن‌ها برای سایر شهرها متفاوت باشد.

جمع‌آوری کننده رسمی: منظور پیمانکاران رسمی شهرداری که قراردادهای تعهد پیمان قانونی با شهرداری دارند، یا اشخاصی که مجوز رسمی فعالیت از شهرداری به منظور فعالیت در سطح شهر اخذ کرده باشند.

جمع‌آوری کننده غیررسمی: به کسانی اطلاق می‌شود که بدون اخذ مجوز از شهرداری جهت جمع‌آوری پسماندهای بارزش بازیافتی از سطح شهر فعالیت می‌کنند و واحد نظارت شهرداری وظیفه دارد از فعالیت این افراد جلوگیری نماید.

فروش جمع‌آوری کنندگان مجوز دار به بازار غیررسمی: منظور درصد فروش مواد بازیافتی جمع‌آوری شده توسط جمع‌آوری کنندگان مجوز دار به بازارهای غیررسمی است که عددی بین ۰ تا ۱۰۰ درصد می‌باشد. این عدد ملاکی برای تحقق هدف اصلی روش پیشنهادی بوده و کوچک‌تر بودن آن نشان‌دهنده جذابیت قیمت خریداری شده توسط شهرداری است.

غیررسمی تمایل بیشتری به فروش پسماندهای بارزش جمع‌آوری شده خود به شهرداری، درازای بهره‌مندی از تخفیف‌های مجوز، داشته باشند.

لازم به ذکر است، نظارت مستمر واحد نظارت شهرداری بر صحت عملکرد جمع‌آوری کنندگان مجوز دار موجب رعایت سطح مشخصی از نکات ایمنی، بهداشتی و محیط زیستی می‌شود. در حالی که جمع‌آوری کنندگان بدون مجوز معمولاً در فرایند کاری خود مسائل ایمنی، بهداشت و محیط زیستی را رعایت نمی‌کنند و در هنگام فعالیت‌های خود خسارت‌هایی به جامعه وارد می‌کنند. بعنوان مثال، به منظور تفکیک و جداسازی پسماندهای بارزش بازیافتی اقدام به باز کردن و مخلوط نمودن کیسه‌های پسماند خانگی در سطح شهر نموده و بعد از جداسازی، مابقی پسماند را در محیط رها کرده که این موضوع باعث گسترش آلودگی، صرف هزینه بیشتر نیروهای نظافت و جمع‌آوری پسماند شهرداری به منظور پاک‌سازی مکان می‌شود. ضمن اینکه بر روی این واحدها نظارت رسمی وجود ندارد و گردش مالی این افراد معمولاً خارج از چرخه‌های مالی رسمی است. به‌طور خلاصه، فرضیات زیر برای معرفی روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است.

۱. تهیه مجوز برای تمامی افراد متقاضی فعالیت در حوزه جمع‌آوری پسماندهای بارزش بازیافتی الزامی است.
۲. واحد نظارت شهری شهرداری موظف است از فعالیت جمع‌آوری کنندگان بدون مجوز، بر اساس قوانین ساماندهی مشاغل آلاینده و دستورالعمل ساماندهی دوره‌گردها در سطح شهر، جلوگیری کند.
۳. جمع‌آوری کنندگان دارای مجوز هیچ الزامی برای فروش پسماندهای بارزش بازیافتی به شهرداری ندارند.
۴. میزان تخفیف ارائه شده جهت صدور مجوز دوره زمانی بعد وابسته به عملکرد جمع‌آوری کنندگان پسماند بوده و بر اساس میزان فروش به شهرداری تا ۱۰۰ درصد مبلغ مجوز می‌تواند مشمول تخفیف شود.
۵. قیمت خرید اقلام بارزش بازیافتی توسط شهرداری

فروش به واحد پردازش مکانیکی: منظور میزان مواد با- ارزش بازیافتی خریداری شده به صورت پسماندهای مخلوط توسط شهرداری است (برحسب تن) که برای تفکیک جهت فروش به صنایع تبدیلی بالادست به واحد پردازش مکانیکی تحویل داده می‌شود.

قیمت رسمی: قیمتی است که توسط واحد بازیافت شهرداری به منظور خرید هر یک از اقلام باارزش بازیافتی (یا پسماندهای مخلوط) تعیین می‌شود. این قیمت شناور، رقابتی و بر اساس ارزش واقعی این اقلام تعیین می‌گردد.

قیمت غیررسمی: میانگین قیمت‌هایی است که برای خرید اقلام باارزش بازیافتی توسط کارگاه‌های غیررسمی جمع‌آوری بازیافت در نظر گرفته می‌شود. در حال حاضر قیمت غیررسمی جذابیت بیشتری نسبت به قیمت رسمی دارد.

جذابیت بازار رسمی: به شرایطی گفته می‌شود که جمع‌آوری‌کنندگان ترغیب به همکاری با شهرداری شوند. جذابیت بازار رسمی می‌تواند بدلیل اختلاف قیمت با کارگاه‌های غیررسمی، سرعت تسویه حساب، تنوع محصولات خریداری شده یا ارائه خدمات بیمه و سابقه کار و ... باشد. در هنگام کمی کردن مدل، جذابیت بازار عددی بین صفر و یک در نظر گرفته می‌شود.

اصلاح قیمت رسمی: منظور میزان تغییر قیمت رسمی (در یک بازه‌ی زمانی مشخص مثلاً هفتگی) نسبت به بازه زمانی قبلی است.

شدت نظارت شهرداری: منظور میزان سخت‌گیری و شدت عمل واحد نظارت و سامان‌دهی مشاغل آلاینده، دوره‌گردها و واحدهای غیرمجاز صنفی است. در حال حاضر بدلیل عدم وجود راهکار ساماندهی اشخاص جمع‌آوری‌کننده پسماند، شدت عمل این واحد در سطح حداقلی است؛ زیرا با افزایش شدت نظارت، بایستی راهکار جایگزین ارائه گردد تا مانع از نارضایتی اجتماعی شود.

درآمد شهرداری از بازیافت: منظور درآمد ناشی از فروش مجوز فعالیت به‌علاوه سود حاصل از فروش مواد بازیافتی خریداری شده به صنایع تبدیلی یا خریداران ذیصلاح است.

قیمت مجوز: منظور مبلغی است که شهرداری بابت تمدید مجوز فعالیت از جمع‌کنندگان پسماندهای باارزش بازیافتی دریافت می‌کند. این مجوز به صورت ماهانه صادر می‌شود و مبلغ آن در پایان ماه و در هنگام تمدید مجوز ماه بعد دریافت می‌شود.

درصد تخفیف: درصد تخفیف خرید مجوز به صورت ماهیانه به کسانی که مجوز فعال داشته باشند تعلق می‌گیرد. این تخفیف می‌تواند تا ۱۰۰ درصد قیمت مجوز دوره زمانی بعد را شامل شود.

ترسیم مدل نمودار حلقه علی

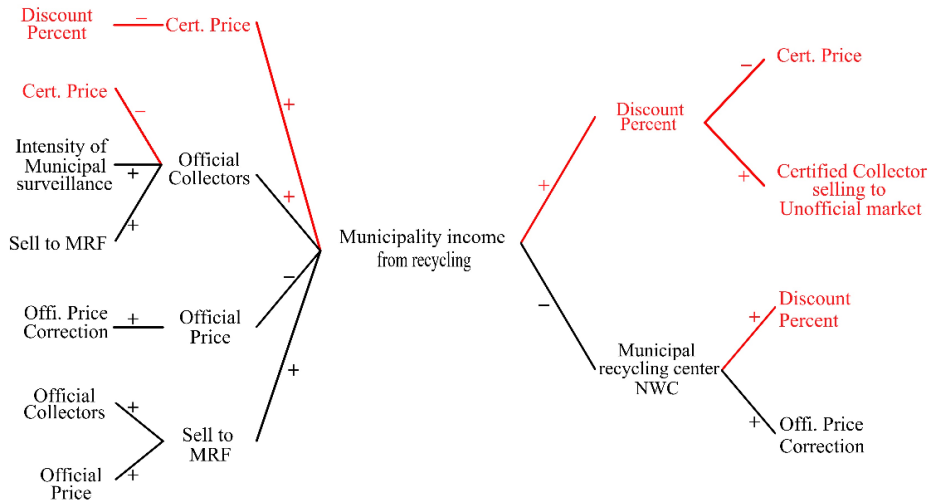
مدل‌های توصیف‌کننده عملکرد مدیریت پسماند شهرداری کرمان در دو حالت «وضع موجود» و «روش پیشنهادی» بر اساس استاندارد ترسیم نمودارهای حلقه علی انجام شده که در ادامه نحوه دستیابی به این مدل‌ها به صورت قدم‌به‌قدم ارائه شده است.

نمودار حلقه علی وضع موجود مدیریت پسماند در شهر کرمان با توجه به مصاحبه‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده، روابط علت و معلولی بین متغیرها و بازیگران سیستم مدیریت پسماند شهر کرمان به صورت نشان داده شده در جدول ۲ تعیین گردید. سطرهای این جدول نشان‌دهنده علت‌ها و ستون‌های آن نشان‌دهنده معلول‌ها هستند. چنانچه رابطه علیت یک رابطه تقویت‌کننده باشد، با علامت مثبت و در صورتی که کاهنده باشد، با علامت منفی نشان داده شده است. به بیان دیگر، اگر علت و معلول در یک جهت حرکت کنند (هر دو افزایشی یا هر دو کاهشی باشند)، این رابطه علت و معلولی با علامت مثبت و اگر علت در یک جهت (مثلاً افزایشی) حرکت کند و معلول در جهت مخالف (کاهشی) حرکت نماید، این رابطه علت و معلولی را با علامت منفی در نظر می‌گیریم. بعنوان مثال قیمت رسمی (سطر چهارم) علت سه متغیر «جذابیت بازار رسمی (ستون ششم)» با علامت مثبت، «درآمد شهرداری از بازیافت (ستون هشتم)» با علامت منفی و «فروش به واحد پردازش مکانیکی (ستون نهم)» با علامت مثبت است.

شکل ۱ نمونه‌ای از ارتباطات علی و معلولی بین متغیرها و

ارتباطهایی که به رنگ قرمز نمایش داده شده است در وضع موجود مدیریت پسماند در شهر کرمان تعریف نشدهاند و مربوط به روش پیشنهادی (سناریوی دوم) هستند که نوع رفتار سیستم را تحت تأثیر قرار می دهند.

بازیگران را نشان می دهد. همان طور که مشخص است این نوع ارتباط بین تمامی عناصر دخیل در مدل وجود دارد و در کل ارتباط پیچیده ای از همکاری های تقویت کننده و کاهنده به وجود آورده است. لازم به ذکر است، متغیرها و

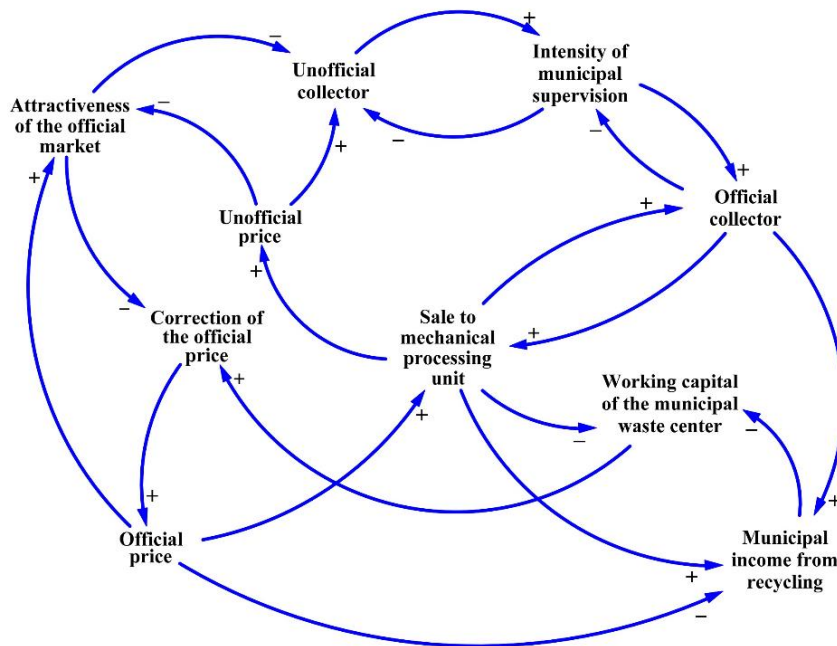


شکل ۲- نمونه ای از نحوه روابط علت و معلولی در مدل نمودار حلقه علی

Fig. 2- An example of cause and effect relationships in the causal loop diagram model

همچنین جهت اثرگذاری عوامل بر یکدیگر (جهت پیکانها از علت به سمت معلول است) و نوع اثرگذاری (مثبت یا منفی / تقویت کننده یا کاهنده) در کنار پیکانها مشخص شده است.

بر اساس جدول ۲، می توان مدل نمودار حلقه علی وضعیت موجود سیستم مدیریت پسماند در شهر کرمان را به صورت نشان داده شده در شکل ۲ ترسیم کرد. در شکل ۲ حلقه های علی و معلولی بین واحدها و ذینفعان نشان داده شده است.



شکل ۳- مدل نمودار حلقه علی وضع موجود مدیریت پسماند در شهر کرمان

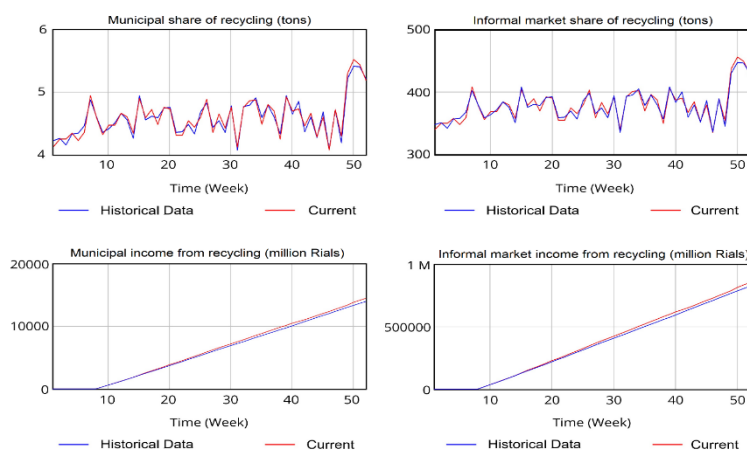
Fig. 3- Causal loop diagram model of the current state of waste management in Kerman City

جدول ۲- روابط علت و معلولی بین متغیرها و بازیگران در وضع موجود سیستم مدیریت پسماند شهر کرمان
Table 2. Cause and effect relationships between variables and actors in the current status of Kerman waste management system

		معلول‌ها (Effect)									
		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
علت‌ها (Cause)	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
	6										
	7										
	8										
	9										
	10										
	جمع‌آوری کننده رسمی Official collector										
	جمع‌آوری کننده غیررسمی Unofficial collector										
	شدت نظارت شهرداری Intensity of municipal supervision										
	قیمت رسمی Official price										
	قیمت غیررسمی Unofficial price										
	جذابیت بازار رسمی Attractiveness of the official market										
	اصلاح قیمت رسمی Correction of the official price										
	درآمد شهرداری از بازیافت Municipal income from recycling										
	فروش به واحد پردازش مکانیکی Sale to mechanical processing unit										
	سرمایه در گردش مرکز بازیافت و خرید پسماند شهرداری Working capital of the municipal waste recycling and purchase center										

شبیه‌سازی نمودار چرخه علی ارائه شده نشان می‌دهد که این مدل با دقت خوبی عملکرد سیستم را نشان می‌دهد و دقت مدل ارائه شده (نزدیکی خروجی مدل (Current) به داده‌های تاریخی (Historical)) در حدود ۹۴ درصد است. منحنی‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده خروجی مدل وضع موجود و منحنی آبی رنگ نشان‌دهنده داده‌های ثبت شده در سال ۱۴۰۰ است.

به منظور ارزیابی مدل به دست آمده برای وضع موجود سیستم مدیریت پسماند شهر کرمان، از داده‌های تاریخی جمع‌آوری شده برای سال ۱۴۰۰ استفاده شده است. شکل ۳ سهم شهرداری و کارگاه‌های غیررسمی (تناژ پسماند با ارزش بازیافتی خریداری شده) به همراه میزان سود هر کدام (برحسب میلیون ریال) را از بازار پسماندهای با ارزش بازیافتی نشان می‌دهد. گفتنی است نتایج به دست آمده از



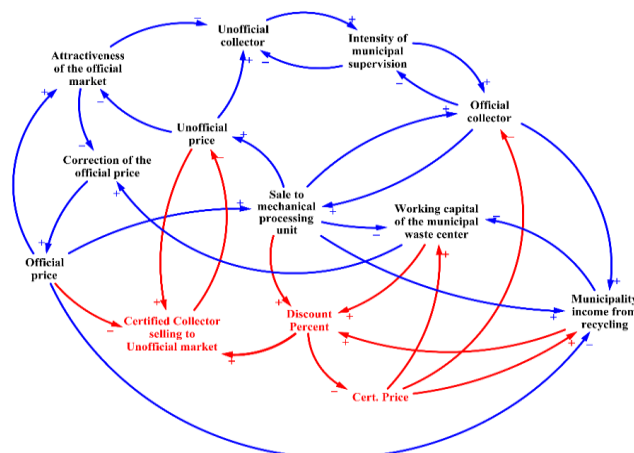
شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی مدل نمودار چرخه علی در نرم‌افزار Vensim با استفاده از داده‌های تاریخی سال ۱۴۰۰ (سناریوی اول)
 Fig. 4- The simulation results of causal cycle diagram model in Vensim software using historical data of 1400 (first scenario)

معلولی بین متغیرها و بازیگران سیستم مدیریت پسماند شهر کرمان به‌صورت نشان داده‌شده در جدول ۳ اصلاح و ارائه‌شده است. سطرهای این جدول نشان‌دهنده علت‌ها و ستون‌های آن نشان‌دهنده معلول‌ها هستند. چنانچه رابطه علیت یک رابطه تقویت‌کننده باشد، با علامت مثبت و در صورتی که کاهنده باشد، با علامت منفی نشان داده‌شده است. بر اساس جدول ۳، می‌توان مدل نمودار حلقه علی وضعیت اصلاح‌شده سیستم مدیریت پسماند در شهر کرمان را به‌صورت نشان داده‌شده در شکل ۴ ترسیم کرد. در شکل ۴ حلقه‌های علی و معلولی بین واحدها و ذینفعان نشان داده‌شده است. همچنین جهت اثرگذاری عوامل بر یکدیگر و نوع اثرگذاری (مثبت یا منفی) در کنار پیکان‌ها مشخص شده و متغیرها و بازیگران جدید در سناریوی پیشنهادی به رنگ قرمز اضافه‌شده است.

همان‌گونه که از نتایج ارائه‌شده در شکل ۳ مشاهده می‌شود، سیستم مدیریت پسماند شهر کرمان در حال حاضر سهم ناچیزی (کمتر از ۲ درصد) کل بازار را در اختیار دارد که وضع موجود را کاملاً غیراقتصادی کرده است. این موضوع با توجه به عدم فعالیت و برنامه‌ریزی شهرداری در سالهای اخیر و عدم رقابت یا همکاری با بازار غیر رسمی قابل‌درک است.

مدل نمودار حلقه علی روش پیشنهادی برای مدیریت پسماند در شهر کرمان

در این بخش ایده‌ی استفاده از مجوز فعالیت با مبلغ قابل‌توجه به همراه ارائه تخفیف‌های عادلانه بر مبنای میزان همکاری با شهرداری مدل‌سازی شده و میزان اثربخشی آن برافزایش سهم شهرداری از بازار بازیافت و میزان درآمد حاصل از بازیافت با استفاده از شبیه‌سازی نشان داده‌شده است. روابط علت و



شکل ۵- مدل نمودار حلقه علی اصلاحی مدیریت پسماند در شهر کرمان
 Fig. 5- Corrective causal loop diagram model of waste management in Kerman City

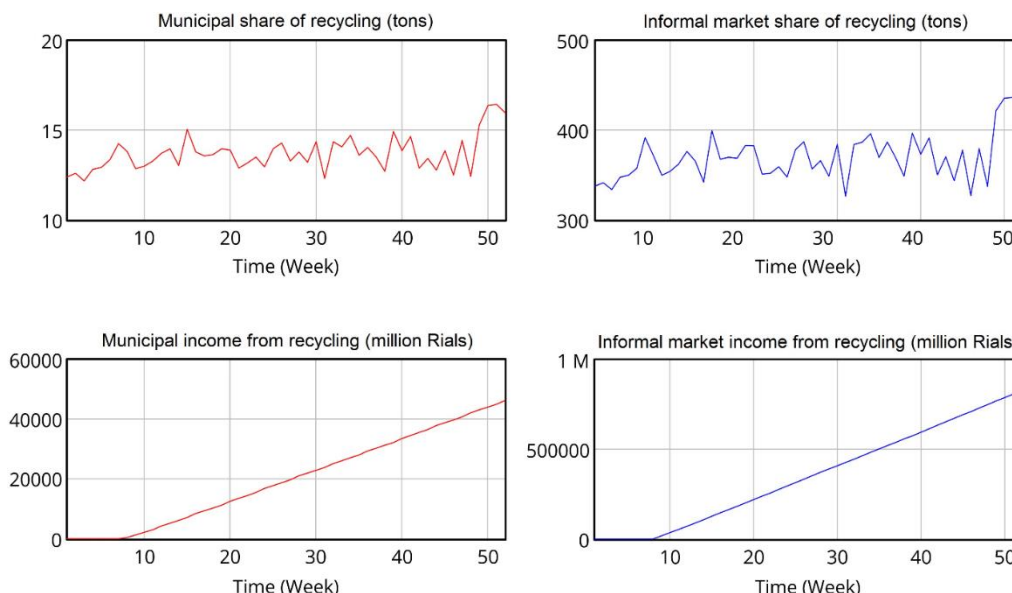
جدول ۳- روابط علت و معلولی بین متغیرها و بازیگران در روش پیشنهادی برای سیستم مدیریت پسماند شهر کرمان (راهکار مجوز و تخفیف)
 Table 3. Cause and effect relationships between variables and actors in the proposed method for the waste management system of Kerman City (permit and discount method)

	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
فروش جمع‌آوری کنندگان مجوز دار به بازار غیررسمی Selling licensed collectors to the informal market													
درصد تخفیف Discount percentage													
قیمت مجوز License price													
سرمایه در گردش مرکز بازیافت و خرید پسماند شهرداری Working capital of the municipal waste recycling and purchase center													
فروش به واحد پردازش مکانیکی Sale to mechanical processing unit													
درآمد شهرداری از بازیافت Municipal income from recycling													
اصلاح قیمت رسمی Correction of the official price													
جذابیت بازار رسمی Attractiveness of the official market													
قیمت غیررسمی Unofficial price													
قیمت رسمی Official price													
شدت نظارت شهرداری Intensity of municipal supervision													
جمع‌آوری کننده غیررسمی Unofficial collector													
جمع‌آوری کننده رسمی Official collector													
جمع‌آوری کننده رسمی Official collector													
جمع‌آوری کننده رسمی Official collector													
جمع‌آوری کننده غیررسمی Unofficial collector													
شدت نظارت شهرداری Intensity of municipal supervision													
قیمت رسمی Official price													
قیمت غیررسمی Unofficial price													
جذابیت بازار رسمی Attractiveness of the official market													
اصلاح قیمت رسمی Correction of the official price													
درآمد شهرداری از بازیافت Municipal income from recycling													
فروش به واحد پردازش مکانیکی Sale to mechanical processing unit													
سرمایه در گردش مرکز بازیافت و خرید پسماند شهرداری Working capital of the municipal waste recycling and purchase center													
قیمت مجوز License price													
درصد تخفیف Discount percentage													
فروش جمع‌آوری کنندگان مجوز دار به بازار غیررسمی Selling licensed collectors to the informal market													

❖ سناریو دوم: قیمت پایه صدور مجوز ۵۰۰ هزار

تومان

در این بخش روش پیشنهادی (به ازای قیمت پایه مجوز ۵۰۰ هزار تومان) را بر روی میزان پسماند تولیدی در سال ۱۴۰۰ شبیه‌سازی کرده تا بتوان با نتایج به‌دست‌آمده در وضع موجود مقایسه کرد و میزان اثرگذاری این سناریو را بررسی کرد. شکل ۵ سهم شهرداری و کارگاه‌های غیررسمی را به همراه میزان سود هرکدام از بازار پسماندهای باارزش بازیافتی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سهم شهرداری از بازار بازیافت حدوداً ۲۰۴ درصد افزایش داشته است و میزان سود شهرداری با احتساب مبلغ صدور مجوز همراه با تخفیف ۲۳۲ درصد افزایش داشته است.



شکل ۶- سهم شهرداری و کارگاه‌های غیررسمی به همراه میزان سود هرکدام از بازارها در سناریو دوم

Fig. 6- The share of the municipality and informal workshops along with the amount of profit of each of the markets in the second scenario

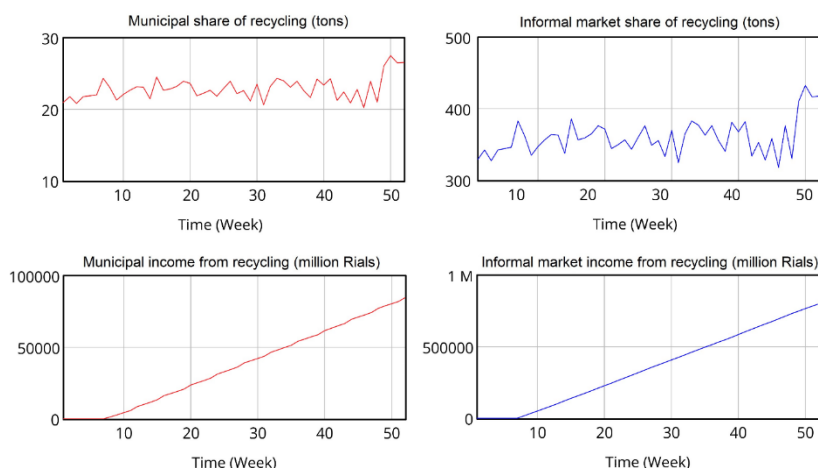
بازار پسماندهای باارزش بازیافتی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سهم شهرداری از بازار بازیافت در مقایسه با وضع موجود حدوداً ۴۰۰ درصد و در مقایسه با سناریو دوم ۶۴ درصد افزایش داشته است. همچنین میزان سود شهرداری در مقایسه با وضع موجود ۵۰۷ درصد و در مقایسه با سناریو دوم ۸۲ درصد افزایش داشته است. جدول ۴ مقایسه سناریوهای شبیه‌سازی‌شده در روش پیشنهادی و وضع موجود مدیریت پسماند شهر کرمان را نشان می‌دهد.

مدل پیشنهادی طبق شکل ۴، به ازای دو سناریو ۵۰۰ هزار تومان و یک‌میلیون تومان برای صدور مجوز شبیه‌سازی‌شده و نتایج آن باهم مقایسه شده است. در این سناریوها میانگین قیمت‌های رسمی و غیررسمی به ترتیب ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ تومان فرض شده است و قیمت فروش به بالادست نیز ۱۰۰۰۰ تومان در نظر گرفته شده است. ارقام ارائه‌شده بر اساس مصاحبه‌های صورت گرفته از سایت‌های خریدوفروش ضایعات و پسماندهای قابل بازیافت در شهر و همچنین قیمت غرفه‌های رسمی بازیافتی شهرداری‌های مختلف است. در هر دو سناریو میزان تخفیف صدور مجوز به این صورت محاسبه می‌شود که به ازای هر ۱۰۰ کیلوگرم مواد بازیافتی فروخته‌شده به شهرداری ۱۰٪ از قیمت مجوز دوره بعد مشمول تخفیف شود.

❖ سناریو سوم: قیمت پایه صدور مجوز یک‌میلیون

تومان

در این سناریو قیمت پایه مجوز یک‌میلیون تومان در نظر گرفته می‌شود و شبیه‌سازی با فرض میزان پسماند تولیدی در سال ۱۴۰۰ انجام می‌شود. از مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با نتایج وضع موجود در سال ۱۴۰۰ میزان اثرگذاری ... درصدی این سناریو نتیجه می‌شود. شکل ۶ سهم شهرداری و کارگاه‌های غیررسمی را به همراه میزان سود هرکدام از



شکل ۷- سهم شهرداری و کارگاه‌های غیررسمی به همراه میزان سود هر کدام از بازارها در سناریو سوم

Fig. 7- Share of municipality and informal workshops along with the amount of profit of each of the markets in the third scenario

موضوع بستری برای ارائه امکانات و خدمات اجتماعی مانند بیمه تأمین اجتماعی، ارتقای ایمنی شغلی، تخصصی کردن مشاغل و ... به افراد جدید جذب شده به چرخه رسمی می‌شود. مقایسه سهم شهرداری از پسماندهای بازیافتی به ازای اجرای هر سناریو و درآمد ناشی از آن در جدول ۴ نشان داده شده است.

در روش پیشنهادی با جذب هر چه بیشتر چرخه غیررسمی به سمت چرخه رسمی و همکاری با شهرداری، چرخه اقتصاد رسمی مدیریت پسماند شهری بهبود یافته و در کنار آن، دستاوردهایی مانند بهبود کیفیت محیط‌زیست، کاهش هزینه‌های تحمیلی به شهرداری و رضایت شهروندان نیز افزایش می‌یابد. همچنین، این

جدول ۴- مقایسه سهم و درآمد شهرداری از بازار پسماندهای بازیافتی در سناریوهای مختلف

Table 4. Comparison of the municipality's share and income from the recycled waste market in different scenarios

سناریوی ۳ Scenario 3	سناریوی ۲ Scenario 2	سناریوی ۱ Scenario 1	
روش پیشنهادی صدور مجوز و تخفیف بر مبنای عملکرد Proposed method of licensing and discounting based on performance		وضع موجود Current situation	
قیمت مجوز ده میلیون ریال The license price is ten million riyals	قیمت مجوز ۵۰۰۰ هزار ریال The license price is 5000 thousand riyals		
22.906 (+399%)	13.981 (+204%)	4.587	سهم شهرداری از بازار (تن در هفته) Municipal share of the market (tons per week)
360.805	369.730	379.124	سهم کارگاه‌های غیررسمی (تن در هفته) Share of informal workshops (tons per week)
84775 (+507%)	46365 (+232%)	13961	درآمد شهرداری (میلیون ریال) Municipal income (million rials)
-	816574	824227	درآمد کارگاه‌های غیررسمی (میلیون ریال) Income from informal workshops (million rials)

کنونی و سناریوی پیشنهادی جهت بهبود وضعیت مدیریت پسماند شهری ارائه شود. لذا، سیستم اصلاحی پیشنهادی که بر مبنای ایجاد یک بازار رسمی کارآمد و عادلانه به همراه مشوق‌های مالی به‌وسیله صدور مجوز و ارائه تخفیف همکاری باهدف کارآمدتر کردن همکاری شبکه غیررسمی جمع‌آوری پسماندهای بارزش بازیافتی با شهرداری از با رعایت حفظ سازوکار مالی عادلانه، پایدار و ارتباطی برد-برد ارائه شد. توسعه برنامه پیشنهادی می‌تواند باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش درآمدهای پایدار شهرداری‌ها بر اساس اصلاح رفتار در مدیریت حوزه پسماند شود. همچنین، از دیگر مزایای این راهکار سهولت در برنامه‌ریزی مدیران و کارشناسان مربوطه در اصلاح سیستم مدیریت پسماند شهری است.

طبق نتایج به ازای قیمت پایه مجوز ۵۰۰ هزار تومان (سناریوی ۲) سهم شهرداری از بازار بازیافت حدوداً ۲۰۴ درصد افزایش داشته است و میزان سود شهرداری با احتساب مبلغ صدور مجوز همراه با تخفیف ۲۳۲ درصد افزایش داشته است. در سناریوی ۳ با در نظر گرفتن قیمت پایه مجوز یک‌میلیون تومان، سهم شهرداری از بازار بازیافت در مقایسه با وضع موجود حدوداً ۴۰۰ درصد افزایش و در مقایسه با سناریو دوم ۶۴ درصد افزایش و میزان سود شهرداری در مقایسه با وضع موجود ۵۰۷ درصد و در مقایسه با سناریو دوم ۸۲ درصد افزایش داشته است.

لازم به ذکر است، از آنجاکه مطالعه مشابهی در ایران انجام نشده است نمی‌توان نتایج مدل را مقایسه نمود، لذا پیشنهاد می‌شود با توجه بیشتر به توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی پویا، بهینه‌سازی فرایندهای و انجام محاسبات کمی اقتصادی و محیط زیستی به‌منظور درک دقیق و کمی رفتار سیستم های مدیریت پسماند خصوصاً حوزه جمع‌آوری، تفکیک از مبدأ و بازیافت و همچنین امکان توسعه مرز مطالعه و دخیل کردن بازیگران بیشتر و متغیرهای جدید به مدل‌های شبیه‌سازی به‌دقت نتایج افزوده شود و با اطمینان بیشتر بتوان در حوزه سیاست‌گذاری و اجرایی قدم برداشت.

مدل نمودار حلقه علی برای دو حالت وضعیت کنونی و وضعیت اصلاح‌شده بر اساس اضافه شدن سازوکار مالی (مجموعه استفاده از مجوزهای، تخفیف‌ها، خرید نقدی عادلانه و نظارت کارآمد) بررسی و پیشنهاد شد. در نتیجه این بررسی نوع ارتباط و اثرگذاری متغیرها و بازیگران بر یکدیگر با توجه به مفاهیم روابط علی و معلولی (تفکر سیستمی) تعیین گردید. نتایج این مطالعه بعنوان اولین مطالعه تفکر سیستم در حوزه مدیریت پسماند در کشور ایران، مزیت‌ها و کاربردهای مختلفی را به دنبال دارد که در ادامه به تفصیل به آن‌ها پرداخته شده است:

۱. درک صحیح رفتار و شبکه ارتباطی متغیرها و بازیگران اصلی در مدیریت پسماند شهری
۲. پیشنهاد یک سیستم اصلاحی به‌منظور کارآمدتر کردن همکاری شبکه غیررسمی جمع‌آوری پسماندهای بارزش بازیافتی با شهرداری از طریق ایجاد یک سازوکار مالی عادلانه، پایدار و ارتباطی برد-برد
۳. کاهش هزینه‌ها و افزایش درآمدهای پایدار شهرداری‌ها بر اساس اصلاح رفتار و مدیریت حوزه پسماند
۴. سهولت در برنامه‌ریزی شهرداری در اصلاح سیستم مدیریت پسماند شهری
۵. امکان توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی پویا، بهینه‌سازی فرایندهای و انجام محاسبات کمی اقتصادی و محیط زیستی به‌منظور درک دقیق و کمی رفتار سیستم
۶. امکان توسعه بازیگران و متغیرهای جدید به مدل پیشنهادی به‌منظور ترکیب و هم‌افزایی ابزارها و راهکارهای مختلف

نتیجه‌گیری

در این مطالعه سعی شده تا درک صحیحی از رفتار و شبکه ارتباطی متغیرها و بازیگران اصلی در دو سناریوی وضعیت

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی شماره (شماره قرارداد منعقد شده) ۹۹/۲۶۲۹ با استفاده از اعتبارات پژوهشی-پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته،

پی‌نوشت‌ها

¹ Causal Loop Diagram

² White box

References

Baghani, A.N., Farzadkia, M., Azari, A., Zazouli, M.A., Vaziri, Y., Delikhoon, M. and Shafi, A.A., 2016. Economic aspects of dry solid waste recycling in Shiraz, Iran. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*. 25(133), 330-334.

Bala, B.K., Arshad, F.M. and Noh, K.M., 2017. *System dynamics. Modelling and Simulation*. 274. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2045-2>

Berenjkar, P., Li, Y.Y. and Yuan, Q., 2021. The application of system dynamics in different practices of a waste management system. *Environment, Development and Sustainability*. 1-30. doi: 10.1007/s10668-021-01362-8

Blair, C., Gralla, E., Wetmore, F., Goentzel, J. and Peters, M., 2021. A Systems Framework for international development: The data-layered causal loop diagram. *Production and Operations Management*. 30(12), 4374-4395. <https://doi.org/10.1111/poms.13492>

Breukelman, H., Krikke, H. and Löhr, A., 2022. Root causes of underperforming urban waste services in developing countries: Designing a diagnostic tool, based on literature review and qualitative system dynamics. *Waste Management and Research*. 0734242X221074189. <https://doi.org/10.1177/0734242X2210741>

Haraldsson, H.V., Belyazid, S. and Sverdrup, H.U., 2006. Causal loop diagrams—promoting deep learning of complex systems in engineering education. *Pedagogiska inspirationskonferensen-Genombrottet*.

Jamialahmadi, N., Hashemi, M., & Jalili Ghazizade, M. (2022). Assessment of the current municipal solid waste management system in Tehran, Iran: challenges and opportunities for sustainable development. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(5), 2054-2067. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01423-8>

Johannes, H. P. (2018). Waste reduction through integrated waste management modeling at Mustika Residence (Tangerang). *Journal of Environmental Science and Sustainable Development*, 1(1), 12-24. <https://doi.org/10.7454/jessd.v1i1.15>

Lambraki, I., Chadag, M., Cousins, M., Graells, T.,

منابع

Léger, A., Henriksson, P., . . . Jørgensen, P. S. (2022). Antimicrobial Resistance in South East Asia: A Participatory Systems Modelling Approach. *International Journal of Infectious Diseases*, 116, S14. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2021.12.033>

Mak, T. M., Chen, P.-C., Wang, L., Tsang, D. C., Hsu, S., & Poon, C. S. (2019). A system dynamics approach to determine construction waste disposal charge in Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118309. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118309>

Muzaffar, S., Khan, K. I. A., Tahir, M. B., & Bukhari, H. (2022). Analysing the Causes of Design Generated Waste through System Dynamics. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1896-1>

Oriola, A. O. (2014). System dynamics modelling of waste management system. Paper presented at the Proceedings of 1st Asian-Pacific System Dynamics Conference.

Parandeh, M., & Khanjani, N. (2012). The quantity and quality of hospital waste in kerman province and an overview of hospital waste quantities in Iran. *World Applied Sciences Journal*, 17(4), 473-479.

Rajaeifar, M. A., Tabatabaei, M., Ghanavati, H., Khoshnevisan, B., & Rafiee, S. (2015). Comparative life cycle assessment of different municipal solid waste management scenarios in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 886-898. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.037>

Saghafi, M. D., & Teshnizi, Z. A. H. (2011). Building deconstruction and material recovery in Iran: an analysis of major determinants. *Procedia engineering*, 21, 853-863. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2087>

Suryani, E., Hendrawan, R. A., Rahmawati, U. E., & Putri, D. M. K. (2022). Waste Processing Scenarios to Support Sustainable Environmental Development Using System Dynamics Understanding the Dynamics of New Normal for Supply Chains (pp. 101-119): Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07333-5_6

Xiao, S., Dong, H., Geng, Y., Tian, X., Liu, C., & Li, H. (2020). Policy impacts on Municipal Solid Waste

management in Shanghai: A system dynamics model analysis. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121366. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121366>

and Biorefinery, 1-9. DOI: 10.1007/s13399-022-02897-0

Yang, H.-T., Chao, H.-R., & Cheng, Y.-F. (2022). Forecasting and controlling of municipal solid waste (MSW) in the Kaohsiung City, Taiwan, by using system dynamics modeling. *Biomass Conversion*

