Journal of Urban Environmental Management

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.3, No.1; 2025.pp: 15-33

Research paper

(Received Oct. 5, 2024 Accepted Dec. 20, 2024)

Causal Loop Diagram (CLD) Model for Optimizing Urban Waste Management: Analyzing the Role of Processing Industries and Interaction with Informal Cycles in Kerman City

Hossein Vahidi[1]*, Mohammad Ali Bagherzadeh Kouhbanani[2], Somayeh Farsizadeh Zarandi[3], Mohammad Reza Naderi[4]

[1] *Department of Environment, Institute of Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran*
[2] *Faculty of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran*
[3] *Waste Management Organization, Kerman Municipality, Kerman, Iran*
[4] *Environmental Expert, Kerman Municipality, Kerman, Iran*

Abstract

Urban waste management is one of the primary challenges faced by municipalities, especially in cities where informal flows play a significant role in the collection and recycling processes. This study aims to enhance the efficiency of the urban waste management system in Kerman by proposing a Causal Loop Diagram (CLD) model that focuses on the convergence of formal and informal cycles and the development of recycling industries. In the proposed model, the addition of recycling units such as aluminum, PET, plastic, and nylon recycling, alongside municipal recycling booths, increases the system's flexibility and creates economic added value. Moreover, through financial incentives, such as issuing permits and associated discounts, the model allows for the integration of informal waste collectors into the formal cycle, leading to increased municipal revenue from recycling and improved oversight of the waste collection and disposal processes. The results indicate that this model not only reduces the municipality's waste management costs but also contributes to urban sustainability by increasing informal collectors' cooperation and enhancing monitoring. Furthermore, recycling industries, as a critical part of the waste management chain, have the potential to convert raw waste into higher-value industrial materials, thereby boosting the system's economic and environmental efficiency. This model can serve as a blueprint for other cities facing similar challenges. Consequently, the present study offers an innovative approach, making strides toward the improvement and sustainability of urban waste management, which can enhance the efficiency and mitigate the problems of traditional waste management systems in Iran.

Keywords: Integrated Urban Waste Management, Causal Loop Diagram (CLD), Recycling Industries, Financial Permits, Recycling Booths

*Corresponding Author: Hossein Vahidi
Email: *hosseinv65@gmail.com*
Phone: 09133434393

Doi: 10.48306/jumee.2024.482045.1058

نشریه علمی مدیریت محیط زیست شهری

آدرس نشریه:https://jumee.kgut.ac.ir

سال سوم/شماره اول/بهار ۱۴۰۴/صفحه ۱۵-۳۳

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۷/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۳۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱/۱

ارائه مدل علّی و معلولی برای بهینه‌سازی مدیریت پسماند شهری: تحلیل نقش صنایع تبدیلی و تعامل با چرخه‌های غیررسمی در شهر کرمان

حسین وحیدی*[۱]، محمد علی باقرزاده کوهبنانی[۲]، سمیه فارسی زاده زرندی[۳]، محمد رضا نادری[۴]

[۱] گروه محیط زیست، پژوهشگاه علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

[۲] دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

[۳] سازمان مدیریت پسماند، شهرداری کرمان، کرمان، ایران

[۴] کارشناس ارشد محیط‌زیست، شهرداری کرمان، ایران

چکیده

مدیریت پسماند شهری یکی از چالش‌های اساسی شهرداری‌ها است، به ویژه در شهرهایی که جریان‌های غیررسمی در فرآیند جمع‌آوری و بازیافت پسماند نقش مهمی ایفا می‌کنند. این مطالعه با هدف بهبود کارایی سیستم مدیریت پسماند شهری کرمان، مدلی از چرخه علی و معلولی (CLD) ارائه می‌دهد که بر همگرایی چرخه‌های رسمی و غیررسمی و توسعه صنایع بازیافتی تمرکز دارد. در مدل پیشنهادی، اضافه شدن واحدهای بازیافتی مانند بازیافت آلومینیوم، PET، پلاستیک و نایلون، علاوه بر غرفه‌های بازیافتی، باعث افزایش انعطاف‌پذیری سیستم و ایجاد ارزش افزوده اقتصادی می‌شود. همچنین، این مدل با بهره‌گیری از مشوق‌های مالی مانند صدور مجوز و تخفیفات مرتبط، امکان جذب جمع‌آوران غیررسمی به چرخه رسمی را فراهم می‌کند که موجب افزایش درآمد شهرداری از بازیافت و بهبود نظارت بر فرآیند جمع‌آوری و دفع پسماند می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که این مدل نه تنها منجر به کاهش هزینه‌های شهرداری در مدیریت پسماند می‌شود، بلکه با افزایش همکاری جمع‌آوران غیررسمی و بهبود نظارت، به توسعه پایدار شهری کمک می‌کند. همچنین، صنایع بازیافتی به عنوان یک بخش اساسی از زنجیره مدیریت پسماند، توانایی تبدیل پسماندهای خام به مواد اولیه با ارزش اقتصادی بالاتر را دارند که باعث افزایش بازدهی اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم می‌شود. این مدل می‌تواند به عنوان الگویی برای سایر شهرهایی که با چالش‌های مشابه مواجه هستند، مورد استفاده قرار گیرد. از این رو، مطالعه حاضر با ارائه یک رویکرد نوآورانه، گامی در جهت بهبود و پایدارسازی مدیریت پسماند شهری برداشته است که می‌تواند موجب افزایش کارایی و کاهش مشکلات سیستم‌های سنتی مدیریت پسماند در ایران شود.

کلمات کلیدی: مدیریت یکپارچه پسماند شهری، چرخه علی و معلولی (CLD)، صنایع بازیافتی، مجوزهای مالی، غرفه های بازیافت

Doi: 10.48306/jumee.2024.482045.1058

* نویسنده مسئول: حسین وحیدی

ایمیل: *hosseinv65@gmail.com*

تلفن: ۰۹۱۳۳۴۳۴۳۹۳

۱-مقدمه

یکی از دلایل اصلی ناکارآمدی و شکست بسیاری از پروژه‌های دولتی مدیریت پسماند در شهرهای ایران، وجود یک جریان غیررسمی و قدرتمند است که چرخه مدیریت شهری را مختل کرده و بخش عمده‌ای از سود حاصل از مدیریت پسماند شهری را به خود اختصاص داده است [۱]. تاکنون اطلاعات دقیقی در مورد فعالیت این جریان غیررسمی منتشر نشده است. اما بدون تردید، تا زمانی که این جریان رقابتی و چرخه اقتصادی آن به‌درستی شناسایی نشود، نمی‌توان انتظار پیشرفت قابل توجهی در مدیریت رسمی پسماند داشت. بنابراین، برای تحلیل تفاوت‌ها و عوامل مؤثر در موفقیت یا شکست جریان‌های رسمی و غیررسمی، نیاز به مدل‌های علمی وجود دارد که بتوانند روابط مؤثر و متغیرهای دخیل در سیستم مدیریت پسماند را به‌طور دقیق شناسایی کنند [۲]. این مدل‌ها می‌توانند به شهرداری‌ها کمک کنند تا برنامه‌ریزی‌های بهتری برای ساماندهی و سیاست‌گذاری در زمینه بهبود مدیریت پسماند داشته باشند.

در حال حاضر، تفکیک از مبدا پسماندهای بازیافتی مانند پت، فلزات، پلاستیک و نایلون از مبدأ به‌طور نامناسبی انجام می‌شود. جمع‌آوری پسماندهای ارزشمند عمدتاً توسط افراد کم‌بضاعت از درب منازل و محل های نگهداری موقت پسماند در سطح شهر و به روش‌هایی غیراستاندارد صورت می‌گیرد. این پسماندها پس از جمع‌آوری به کارگاه‌های غیرمجاز و فاقد نظارت شهرداری در سطح شهر منتقل می‌شوند. در این کارگاه‌ها، پسماندها بیشتر خرد یا فشرده شده و به‌عنوان مواد بازیافتی به صنایع تبدیلی ارسال می‌شوند. این جریان، که به عنوان "جریان غیررسمی پسماند" شناخته می‌شود، کنترل عمده اقتصاد این صنعت را در اختیار دارد و یکی از عوامل اصلی شکست طرح‌های دولتی مدیریت پسماند به‌شمار می‌رود [۳]. از این رو، هرچه کنترل این جریان پسماند بیشتر به دست مسئولانی سپرده شود که تحت نظارت‌های فنی، محیط‌زیستی و قانونی عمل می‌کنند، مشکلات مربوط به مدیریت پسماند شهری کاهش خواهد یافت و احتمال موفقیت پروژه‌های بزرگ دولتی نیز بیشتر خواهد شد. لازم به ذکر است که هدف اصلی چرخه رسمی یا طرح‌های دولتی، توسعه معیارهای عملی برای نظارت و کنترل است، در حالی که اجرای این طرح‌ها همچنان می‌تواند توسط بخش خصوصی انجام شود.

مدیریت پسماند شهری یکی از چالش‌های مهم در توسعه پایدار شهرها محسوب می‌شود. مطالعات متعددی به بررسی سیستم‌های مدیریت پسماند با استفاده از مدل‌های نمودار حلقه‌های علت و معلولی (CLD[۱]) پرداخته‌اند. در [۴] با استفاده از مدل حلقه‌های علی و معلولی(CLD) ، عوامل مؤثر بر تولید پسماند شهری شناسایی و مدل‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری در تجهیزات جمع‌آوری و آگاهی‌بخشی شهروندان موجب کاهش تولید پسماند، حفظ منابع طبیعی و ارتقای زیبایی شهر می‌شود. همچنین در [۵] با رویکرد پویایی سیستم‌ها، سیستم مدیریت پسماند اصفهان مدل‌سازی شده و سیاست‌هایی نظیر استقرار هاضم‌های بی‌هوازی و تولید سوخت جایگزین به‌عنوان بهترین راهکارها برای بهبود مالی و زیست‌محیطی سیستم پیشنهاد شده‌اند. در [۶] نیز مدل انباره-جریان برای مدیریت پسماند انگلستان ارائه شده که عملکرد سیستم را بر اساس شاخص‌های بالادستی و پایین‌دستی ارزیابی می‌کند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با تکیه بر بازیافت مواد به‌جای بازیابی انرژی و حذف مواد غذایی و آلی از جریان پسماند، می‌توان به هدف ۶۵ درصد بازیافت تا سال ۲۰۳۵ دست یافت. تمامی این مطالعات بر اهمیت استفاده از رویکردهای پویا و فناوری‌های پیشرفته برای دستیابی به مدیریت پایدار پسماند تأکید دارند.

یوسف‌زی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی نقش مهم جمع‌کنندگان پسماند در سیستم مدیریت غیررسمی پسماند در پاکستان پرداختند [۷]. این افراد که غالباً پناهنده و در شرایط نامناسبی زندگی می‌کنند، با جمع‌آوری و بازیافت پسماند به پایداری محیط‌زیست کمک می‌کنند، هرچند که از جامعه طرد شده و با انگ‌های اجتماعی مواجه هستند. این مطالعه با استفاده از روش کیفی استقرایی، به نحوه ایجاد ارزش توسط این افراد در مدیریت پسماند بدون برخورداری از شناسایی رسمی می‌پردازد. این تحقیق چالش‌هایی که آنها با آن روبرو هستند، مانند عدم شناسایی رسمی، ناامنی شغلی و قرار گرفتن در معرض خطرات سلامتی را شناسایی کرده و پیشنهاد می‌کند که ادغام این جمع‌کنندگان پسماند در سیستم‌های رسمی می‌تواند به تولید پاک‌تر و مدیریت پسماند شهری پایدار منجر شود.

مدل‌های CLD به عنوان ابزاری قدرتمند در تحلیل سیستم‌ها، نقش مهمی در شناسایی و درک روابط پیچیده و بازخوردهای موجود بین عوامل مختلف در مدیریت پسماند دارند [۸, ۹]. این مدل‌ها با ترسیم روابط علت و معلولی بین متغیرها، به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا تأثیرات متقابل بین عوامل مختلف مانند تولید پسماند، هزینه‌های مدیریت، اثرات محیط‌زیستی و رفتار اجتماعی را درک کنند. از سوی دیگر، سایت‌گذاری و برنامه‌ریزی در مدیریت پسماند نیز به انتخاب مکان‌های مناسب برای دفن و پردازش پسماند

[۱]- Causal Loop Diagram

و همچنین تدوین استراتژی‌های بهینه برای جمع‌آوری و بازیافت پسماندها می‌پردازد. ترکیب مدل‌های CLD با فرآیندهای سایت‌گذاری و برنامه‌ریزی، این امکان را فراهم می‌سازد تا با شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار سیستم، سیاست‌های موثرتری برای مدیریت پسماند تدوین شود و به بهبود کارایی اقتصادی و محیط‌زیستی سیستم منجر شود [۱۰]. این رویکرد جامع، به مدیران شهری کمک می‌کند تا با استفاده از داده‌های دقیق و مدل‌های سیستماتیک، راهکارهای پایدارتری برای مدیریت پسماند طراحی و اجرا کنند.

یکی از مطالعات جامع در زمینه تحلیل سیستمی مدیریت پسماند شهری مربوط به بروکلمن و همکاران در سال ۲۰۲۲ است [۱۱]. در این مطالعه، مروری بر مطالعات تحلیل سیستمی در زمینه مدیریت پسماند انجام شده و یک طرح جامع از نمودارهای علت و معلول مربوط به آن ارائه شده است. همچنین، متغیرهای مدل بر اساس تأثیر درون‌زا یا برون‌زا طبقه‌بندی و استفاده شده‌اند. مدل نهایی در سه خوشه و ترکیبی از ۴۱ متغیر و ۸۷ رابطه ارائه شده است.

در مطالعه‌ای که توسط مک و همکارانش در سال ۲۰۱۹ انجام شد، رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها از نظر کارایی در محاسبه هزینه دفع پسماندهای ساختمانی در هنگ‌کنگ بررسی شد [۱۲]. در این مطالعه، یک ساختار کلی سیستم برای تعیین هزینه بهینه دفع پسماند با هدف توسعه پایدار و همچنین روابط پویا بین عوامل اجتماعی/اقتصادی و هزینه دفع پسماند با توجه به اهداف مطالعه با استفاده از ترکیب عوامل کمی و کیفی در قالب یک پرسشنامه که با استفاده از مدل CLD مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، توسعه یافت.

در سال ۲۰۲۲، سوریانی و همکارانش سناریوهای پردازش پسماند را به منظور حمایت از توسعه پایدار محیط زیست با استفاده از برنامه‌ریزی پویا و مدل‌های CLD مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. در این مطالعه، چندین راه‌حل جایگزین که عمدتاً بر کمپوست‌سازی و سوزاندن تمرکز داشتند، برای بهبود پایداری مدیریت پسماند شهری پیشنهاد شد. در مطالعه دیگری، مظفر و همکاران به تحلیل علل تولید پسماند جامد با استفاده از مدل پویایی سیستم (CLD) پرداختند [۱۴]. به باور مظفر و همکاران، تحقیق عمیق در یک سیستم مدیریت پسماند نیازمند درک پیچیدگی منابع تولید پسماند از مبدأ است. با استفاده از یک نمودار حلقه علی، آن‌ها روابط بین عوامل تعیین‌کننده را رسم کرده و به تحلیل رفتار پویا در کل سیستم ادامه دادند.

یانگ و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم‌ها، تولید پسماند جامد شهری در شهر کائوشیونگ، تایوان را پیش‌بینی و کنترل کردند [۱۵]. در این مطالعه، دقت پیش‌بینی تولید پسماند جامد شهری به عنوان مبنایی برای تدوین و تحلیل استراتژی‌های مؤثر در مدیریت پسماند شهری استفاده شده است. سه عامل اصلی شامل جمعیت، شرایط اقتصادی معیشت مردم و وضعیت قبلی محصولات پسماند به عنوان عوامل کلیدی در ساخت مدل معرفی شدند. بر اساس نتایج این مطالعه، توسعه پردازش مکانیکی و بازیافت، مانند تأسیسات MRF، به ذینفعان کنترل بیشتری بر هزینه‌های مدیریت پسماند جامد شهری فراهم کرده است.

در سال ۲۰۱۸، یوهانس از مدل CLD برای بررسی امکان کاهش تولید پسماند با ایجاد و مطالعه پویایی مدیریت یکپارچه پسماند در اندونزی استفاده کرد [۱۶]. این مطالعه سعی داشت تا پدیده‌ای واقعی و پیچیده را با مدل‌سازی به شکلی قابل درک و پویا برای مدت ۳ سال شبیه‌سازی کند. در این پژوهش، رفتارهای نمایی در متغیرهای اصلی همچون نرخ تولید پسماند شهری، پسماند آلی و نرخ تولید کمپوست بر اساس نوسانات رفتاری آن‌ها شناسایی شد. علاوه بر این، در سال ۲۰۱۴، اوریولا از روش پویایی سیستم برای ارزیابی عملکرد فعالیت‌های مدیریت پسماند در ایالت جنوب‌غربی نیجریه استفاده کرد [۱۷]. بنابراین، ارزش‌های سیستم مدیریت پسماند از مراحل اولیه تولید تا جمع‌آوری و دفع شناسایی شد. با استفاده از یک نمودار حلقه علّی، نمودار ذخیره و جریان برای سیستم ایجاد شد که روابط پویا بین مقادیر سیستم را به تصویر می‌کشید.

روزانه حدود ۳۰۰ الی ۴۰۰ تن پسماند شهری توسط شهرداری کرمان جمع آوری، پردازش و دفن می شود [۱۸]. مطالعاتی درباره شناسایی ساختارهای غیر رسمی و میزان اثرگذاری آنها بر وضعیت مدیریت پسماند شهری در کرمان انجام شده است [۱۸, ۱۹]. با این حال، شهرداری کرمان با مشکلات متعددی در خصوص ساماندهی بخش غیر رسمی شامل جمع آوری کنندگان غیر رسمی و کارگاه های جمع آوری و خرید و فروش پسماندهای با ارزش بازیافتی در سطح و حومه شهر روبه‌رو است. این وضعیت فرصت های سرمایه گذاری در بخش پسماند را با چالش مواجه کرده است. در مطالعه وحیدی و همکاران در سال ۱۴۰۳ ساختار سیستماتیک مدیریت پسماند شهر کرمان بر با محوریت بخش رسمی و غیر رسمی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت [۱۸]. در این مطالعه حلقه های علّی و معلولی با توجه به شرایط بازیگران و حلقه های علّی و معلولی ترسیم و معرفی شدند. در مطالعات دیگری که توسط وحیدی و همکاران در سال ۱۴۰۳ انجام شد مدل CLD توسعه داده شده با استفاده از تئوری فازی برای سناریوهای مختلف مجوزهای مالی به منظور ساماندهی بخش جمع آوری غیر رسمی پسماند مدل سازی و بررسی شدند. این مطالعات پایه‌ای برای تحقیق حاضر فراهم کرده

و نشان‌دهنده هم‌راستایی مدل پیشنهادی ما با بهترین شیوه‌های جهانی در مدیریت پسماند است. نکته ای که در این مطالعات می تواند مورد توجه قرار گیرد عدم استفاده از صنایع تبدیلی و فرصت های تولید ارزش افزوده توسط شهرداری به منظور افزایش سطح درآمدزایی و در نتیجه امکان رقابت بیشتر با بخش غیر رسمی است.

با اضافه کردن صنایع بازیافتی و تبدیلی مانند بازیافت پت، آلومینیوم، پلاستیک و نایلون، پسماندهای با ارزش بازیافتی حاصل از پردازش مکانیکی پسماندهای شهری را می‌توان به مواد اولیه صنعتی با ارزش اقتصادی بالاتر تبدیل کرد. این فرآیندها از مواد بازیافتی، محصولات جدیدی تولید می‌کنند که در صنایع مختلف، به‌ویژه در تولید محصولات پلاستیکی، بسته‌بندی و فلزات سبک، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این کار نه تنها به کاهش نیاز به مواد اولیه خام و کاهش وابستگی به منابع طبیعی کمک می‌کند، بلکه با ایجاد چرخه اقتصادی جدید، ارزش افزوده اقتصادی برای شهرداری‌ها و شهرها ایجاد می‌کند. توسعه این صنایع توسط شهرداری‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا باعث کاهش هزینه‌های دفن زباله، کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از دفن پسماندها، و همچنین افزایش اشتغال و درآمد برای شهروندان می‌شود. در نتیجه، شهرداری‌ها با ایجاد این صنایع می‌توانند نقش مهمی در بهبود مدیریت پسماند و تحقق اهداف توسعه پایدار ایفا کنند.

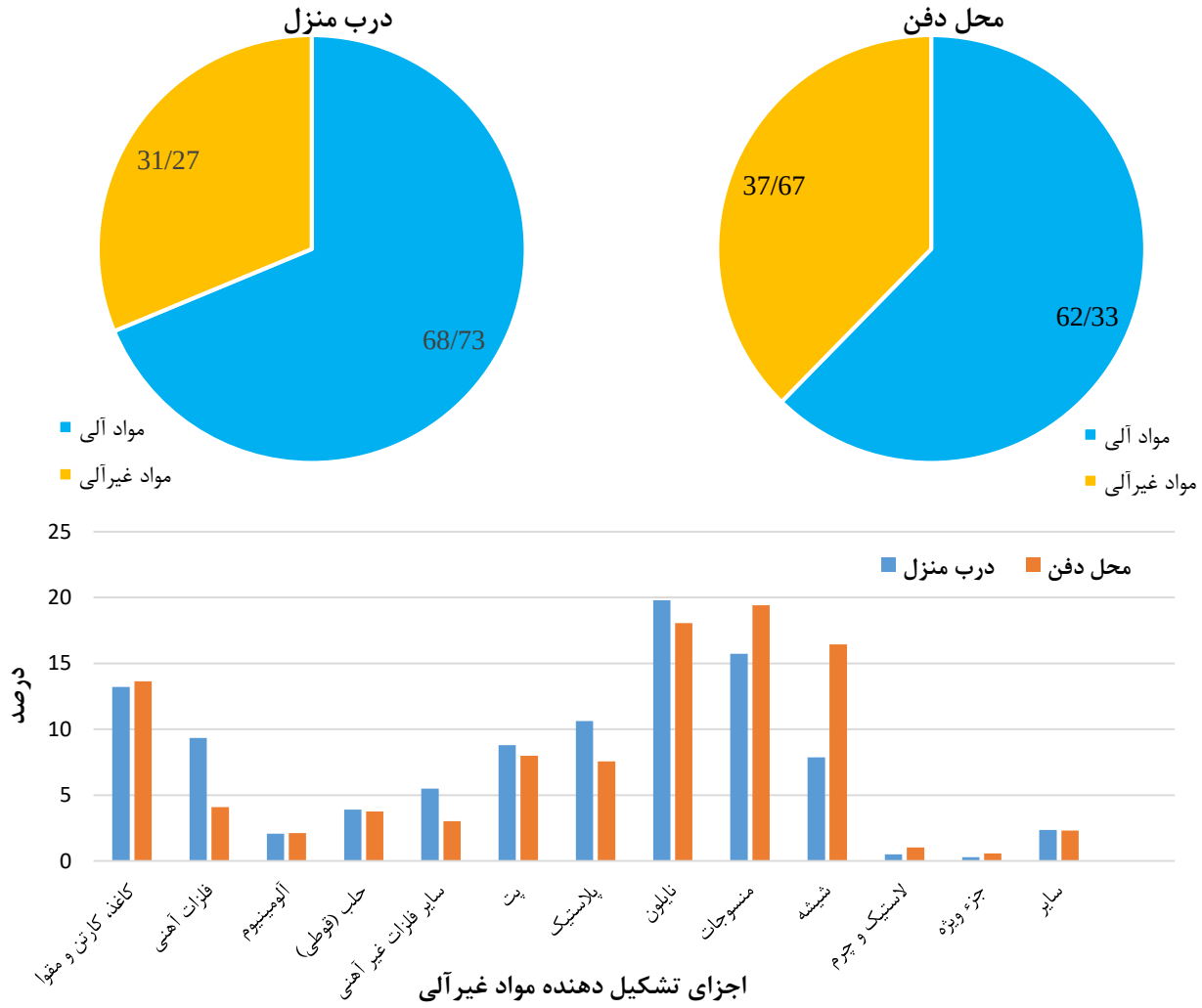
همچنین مورد دیگری که در این مطالعه در چرخه CLD پسماند شهری در نظر گرفته شده است غرفه های بازیافتی شهرداری هستند. غرفه‌های بازیافت شهرداری نقش مهمی در حمایت از تفکیک از مبدأ پسماند توسط شهروندان ایفا می‌کنند. این غرفه‌ها به‌عنوان نقاط رسمی جمع‌آوری پسماندهای بازیافتی در سطح شهر فعالیت کرده و به شهروندان امکان می‌دهند تا پسماندهای تفکیک‌شده خود را به‌صورت منظم به این مکان‌ها تحویل دهند. یکی از مهم‌ترین مزایای این غرفه‌ها، ایجاد انگیزه برای شهروندان است که با ارائه تشویق‌های مالی یا غیرمالی همچون ارائه تخفیف‌های عوارض پسماند، کالاها، یا امتیازهای ویژه، مشارکت آنان در تفکیک و تحویل پسماندهای بازیافتی را افزایش می‌دهند. علاوه بر این، این غرفه‌ها امکان خرید و جمع‌آوری پسماندهای بازیافتی را از جمع‌آورندگان غیررسمی و رسمی فراهم کرده و نقش مهمی در کاهش فعالیت‌های غیررسمی و بدون نظارت در سطح شهر دارند، که در نهایت به بهبود مدیریت پسماند شهری و کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی کمک می‌کند.

۲-مواد و روش ها

۲-۱-مراحل انجام مطالعه

پایه نمودار CLD این مطالعه بر اساس مدل ارائه شده در [۱۸] است. سعی شده تا بر اساس مفاهیم و قوانین مدلهای CLD و شرایط شهرداری کرمان و جریان های رسمی و غیر رسمی پسماند در این شهر، سناریوی توسعه صنایع بازیافتی شامل صنایع تبدیلی پت، آلمینیوم، پلاستیک و نایلون به شهرداری کرمان اضافه شده و نوع ارتباط آنها با ساختار مدل دینامیک پسماند تعریف شود. در نهایت، هدف اصلی مدل افزایش درآمد شهرداری کرمان و بهبود مشارکت فعالان چرخه غیررسمی و همکاری بیشتر با شهرداری کرمان است.

تولید روزانه پسماند در شهر کرمان به ازای هر نفر حدود ۶۵۰ تا ۷۰۰ گرم تخمین زده شده است، که با توجه به جمعیت این شهر، منجر به جمع‌آوری روزانه بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ تن پسماند می‌شود. در ادامه، آنالیز فیزیکی پسماند شهری کرمان برای یک دوره یک هفته ای در فصل تابستان سال ۱۴۰۳ در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ - آنالیز فیزیکی پسماند شهر کرمان (میانگین یک هفته در فصل تابستان)

این نمودار به مقایسه درصد اجزای مختلف پسماندهای جمع‌آوری‌شده از درب منازل و محل دفن پسماندهای شهر کرمان می‌پردازد. بیشترین سهم در هر دو دسته پسماند مربوط به مواد آلی است که درب منازل ۶۸,۷۳ درصد و در محل دفن ۶۲,۳۳ درصد از کل پسماند را تشکیل می‌دهد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که بخش عمده‌ای از پسماندهای شهری، قابل تبدیل به کمپوست هستند و می‌توان از این بخش برای تولید کودهای آلی استفاده کرد. کاغذ و کارتن با ۴,۱۳ درصد درب منزل و ۵,۱۴ درصد در محل دفن از کل پسماند (۱۳,۲۰ درصد و ۱۳,۶۴ درصد از مواد غیرآلی) نیز سهم قابل‌توجهی از پسماندها را تشکیل می‌دهند و امکان بازیافت دارند. سایر اجزای پسماند مانند پلاستیک، نایلون، و بطری‌های پت نیز درصدهای مختلفی از پسماند را تشکیل می‌دهند و اهمیت بهینه‌سازی جمع‌آوری و بازیافت این مواد را نشان می‌دهد.

نکته مهم دیگر، تفاوت نسبت‌های مواد قابل بازیافت بین پسماندهای جمع‌آوری‌شده از درب منازل و محل دفن است. به‌طور کلی، درصد پلاستیک‌ها و سایر اجزای بازیافتی در محل دفن بیشتر از پسماندهای درب منازل است که این نشان‌دهنده وجود مشکلاتی در جمع‌آوری مناسب و تفکیک از مبدأ است. این امر ممکن است ناشی از عدم مشارکت کافی شهروندان در طرح‌های تفکیک از مبدأ و عدم نظارت کامل بر فرایند جمع‌آوری و حمل‌ونقل پسماندهای شهری باشد.

۲-۲-نمودار چرخه علّی و معلولی

نمودار چرخه علّی و معلولی (CLD) یک ابزار بسیار مؤثر برای نمایش ساختارهای بازخوردی در سیستم‌ها است. این نمودار شامل مجموعه‌ای از متغیرها است که با استفاده از فلش‌هایی به یکدیگر مرتبط شده‌اند تا ارتباطات علّی میان آن‌ها را نشان دهند. این روابط

می‌توانند مثبت یا منفی باشند؛ اگر تغییر در متغیر A و B در یک جهت باشد، این رابطه مثبت است و اگر تغییرات آن‌ها در جهت مخالف باشد، رابطه منفی تلقی می‌شود [۲۰]. به‌عنوان مثال، در مدل مدیریت پسماند شهری کرمان، با فرض ثابت بودن سایر عوامل، افزایش "قیمت رسمی" (متغیر A) می‌تواند موجب افزایش " جذابیت بازار رسمی" (متغیر B) شود. بنابراین رابطه علّی بین این دو متغیر مثبت است.

مدل‌های نمودار چرخه علّی و معلولی به تبیین روابط علّی میان پدیده‌ها می‌پردازند و اغلب به عنوان مدل‌های مفهومی نیز شناخته می‌شوند. در این مدل‌ها، موضوع با رویکرد پدیدارشناسانه بررسی شده و روابط میان اجزای سیستم مدیریت پسماند، مانند "جمع‌آورندگان غیررسمی"، "غرفه‌های بازیافت" و "صنایع تبدیلی" با دقت تحلیل می‌شود. سیستم در مدل‌های علّی به عنوان یک جعبه شفاف در نظر گرفته می‌شود که اجزای درونی آن به وضوح قابل مشاهده است. بر مبنای اصول تفکر سیستمی و نظریه سیستم‌ها، بازخورد یکی از عناصر اساسی این مدل‌ها است که به تکمیل چرخه‌ها کمک می‌کند [۲۱]. به عنوان مثال، افزایش "درآمد شهرداری از بازیافت" می‌تواند منجر به افزایش "سرمایه در گردش مرکز خرید و بازیافت پسماند شهرداری" شود، که به نوبه خود امکان "اصلاح قیمت رسمی" را فراهم می‌کند، و این چرخه بازخورد مثبت می‌تواند به بهبود کلی سیستم منجر شود.

پس از انجام این مرحله، نمودار جریان و حالت سیستم طراحی می‌شود تا ارتباطات میان اجزا را به صورت دقیق‌تر نشان دهد. مراحل اصلی ایجاد یک نمودار حلقه علی (CLD) به شرح زیر است [۲۲, ۲۳]:

۱) **تعریف مشکل:** ابتدا باید مشخص کنید که مشکل چیست؟ چگونه بروز می‌کند و چه پیامدهایی دارد؟ مرزهای سیستم کجا قرار دارند؟ در این مطالعه، مشکل اصلی عدم همکاری جمع‌آورندگان غیررسمی با شهرداری و تأثیر منفی آن بر سیستم مدیریت پسماند است.

۲) **پرسیدن سوال اصلی:** سوال مشخصی که به دنبال پاسخ آن هستید را تعیین کنید. باید دقت کنید که ممکن است برای یک مشکل چندین سوال مطرح شود، اما در هر CLD فقط یک سوال باید پاسخ داده شود. برای پاسخ به سوالات متعدد، نمودارهای CLD جداگانه مورد نیاز است. سوال اصلی ما این است: چگونه می‌توان با استفاده از مشوق‌های مالی و توسعه صنایع تبدیلی، جمع‌آورندگان غیررسمی را به چرخه رسمی مدیریت پسماند جذب کرد؟

۳) **مرتب‌سازی عوامل کلیدی:** فهرستی از متغیرهای مرتبط با سوال تهیه کرده و آن‌ها را بر اساس میزان اهمیت مرتب کنید. عوامل کلیدی در این مطالعه شامل "جمع‌آورندگان رسمی"، "جمع‌آورندگان غیررسمی"، "قیمت رسمی"، "قیمت غیررسمی"، "قیمت مجوز"، "درصد تخفیف"، "غرفه‌های بازیافت"، "صنایع تبدیلی" و "درآمد شهرداری از بازیافت" هستند.

۴) **ایجاد CLD اولیه:** شروع به رسم ارتباطات میان متغیرهای انتخاب‌شده کنید. هر چرخه را به صورت جداگانه رسم کنید و بررسی کنید که آیا منطق آن درست است یا خیر. هنگام ایجاد هر ارتباط، وجود بازخورد (feedback) را نیز بررسی کنید. فرآیند رسم را تا زمانی که نسخه اولیه CLD کامل شود ادامه دهید.

۵) **ایجاد الگوی رفتار مرجع (RBP):** از RBP برای توضیح رفتار در مدل استفاده کنید. نیازی نیست همه متغیرها را در نقشه نشان دهید، بلکه تنها متغیرهایی که به توضیح رفتار بازخورد کمک می‌کنند کافی است. برای مثال، رفتار بین "جذابیت بازار رسمی" و "تعداد جمع‌آورندگان غیررسمی" می‌تواند مورد تحلیل قرار گیرد تا نشان داده شود که چگونه تغییرات در سیاست‌های شهرداری بر جذب این افراد تأثیر می‌گذارد.

۶) **تست مدل CLD:** پس از تکمیل نسخه اولیه CLD، صحت و منطق آن را بررسی کنید. مثلاً بررسی کنید که آیا افزایش "شدت نظارت شهرداری" واقعاً منجر به کاهش فعالیت "جمع‌آورندگان غیررسمی" می‌شود یا نه.

۷) **بازبینی و اصلاح:** اولین نسخه CLD معمولاً کامل نیست و نیاز به بازبینی دارد. در بحث‌های بیشتر، اغلب به بینش‌های جدیدی دست می‌یابید که ممکن است نیاز به اصلاح مدل داشته باشد. این فرآیند تکراری تا رسیدن به مدل نهایی ادامه می‌یابد. برای مثال، ممکن است متوجه شوید که "فروش جمع‌آوری‌کنندگان مجاز به بازار غیررسمی" نیز باید در مدل لحاظ شود، زیرا می‌تواند بر اهداف شهرداری تأثیر منفی بگذارد.

۸) **نتیجه‌گیری:** ممکن است نیاز به چندین مرحله بازبینی داشته باشد تا به نسخه نهایی CLD برسید. پس از رسیدن به نتیجه‌گیری نهایی، باید اطمینان حاصل شود که این نتیجه سوال اصلی را به‌طور دقیق پاسخ داده است. در صورت لزوم، سوال اولیه می‌تواند

تغییر کند. به عنوان مثال، در این پژوهش مدل نهایی باید نشان دهد که چگونه ترکیب مشوق‌های مالی، توسعه صنایع تبدیلی و افزایش نظارت می‌تواند به جذب جمع‌آورندگان غیررسمی به سیستم رسمی منجر شود.

نرم‌افزار Vensim یکی از ابزارهای قدرتمند برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های دینامیکی است. این نرم‌افزار به کاربران این امکان را می‌دهد تا مدل‌های دینامیکی را به‌صورت دقیق تحلیل کنند و توسعه دهند. Vensim قابلیت رسم و مدل‌سازی نمودارهای علت و معلولی را نیز دارد و برای بازسازی ساختار مدل‌ها با استفاده از ابزارهای مناسب و مرتبط بسیار مفید است [۲۴]. در این مطالعه از Vensim برای طراحی CLD سیستم مدیریت پسماند شهر کرمان در حالت‌های فعلی و سناریوی پیشنهادی استفاده شده و تمامی استانداردهای لازم در این فرآیند رعایت شده است. به عنوان مثال، روابط بین "فرآوری اولیه پلاستیک"، "درآمد شهرداری از بازیافت" و "سرمایه در گردش مرکز خرید و بازیافت پسماند شهرداری" به دقت مدل‌سازی شده‌اند تا تأثیر توسعه صنایع تبدیلی بر سیستم بررسی شود.

۳-بحث و نتایج

در این مطالعه، دو سناریو برای طراحی و تدوین مدل CLD در نرم‌افزار Vensim در نظر گرفته شده است که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

۳-۱-تعریف سناریوها

سناریوی اول (مدل‌سازی وضعیت فعلی): این سناریو بر مدل‌سازی شرایط کنونی مدیریت پسماند در شهر کرمان تمرکز دارد. در این مدل، چرخه‌های رسمی و غیررسمی به طور همزمان فعال هستند و در جمع‌آوری پسماندهای بازیافتی ارزشمند، رقابت و تضاد منافع وجود دارد. با توجه به کمبود نظارت کافی بر چرخه غیررسمی، ناوگان جمع‌آوری شهرداری عمدتاً به پاک‌سازی و نظافت شهری توجه دارد.

سناریوی دوم (صدور مجوز برای ناوگان غیررسمی): در این سناریو، رویکردی برد-برد میان شهرداری، ناوگان غیررسمی و شهروندان در نظر گرفته شده است که هدف آن، ساماندهی چرخه غیررسمی جمع‌آوری پسماندهای ارزشمند و ایجاد یک سیستم پایدار و کارآمد است. شهرداری کرمان برای نظارت و کنترل بهتر، مجوزهای مالی با شرایط الزام‌آور برای جمع‌آورندگان غیررسمی صادر می‌کند. این مجوزها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که میزان تعهدات مالی واحدهای غیررسمی براساس مقدار پسماند تحویلی به شهرداری کاهش می‌یابد. جمع‌آورندگانی که تعهدات خود را کامل انجام دهند، از تخفیف‌های ویژه برای تمدید مجوز برخوردار خواهند شد. این مکانیزم تشویقی، همکاری با شهرداری را جذاب‌تر کرده و باعث کاهش فعالیت‌های غیررسمی می‌شود. در عین حال، جمع‌آورندگان می‌توانند مازاد پسماند خود را پس از تکمیل تعهداتشان به کارگاه‌های غیررسمی بفروشند، اما عدم رعایت این تعهدات باعث کاهش تخفیفات در تمدید مجوز می‌شود.

نقش غرفه‌های بازیافت در این سناریو بسیار پررنگ است. این غرفه‌ها به‌عنوان مراکز جمع‌آوری پسماندهای تفکیک‌شده از شهروندان و نقاط تعامل مستقیم با جمع‌آورندگان غیررسمی عمل می‌کنند. با ارائه قیمت‌های رقابتی و پرداخت‌های سریع، این غرفه‌ها جمع‌آورندگان را به همکاری با سیستم رسمی تشویق کرده و از هدررفت منابع ارزشمند جلوگیری می‌کنند. در نتیجه، غرفه‌های بازیافت نه تنها به افزایش کارایی جمع‌آوری رسمی کمک می‌کنند، بلکه به بهبود نظارت شهرداری و کاهش آلودگی ناشی از فعالیت‌های غیررسمی نیز منجر می‌شوند.

علاوه بر این، توسعه صنایع تبدیلی یکی از ارکان اصلی این سناریو است. پسماندهای ارزشمندی که توسط شهرداری جمع‌آوری می‌شوند، به واحدهای تبدیلی مانند بازیافت پلاستیک، نایلون، پت و آلومینیوم منتقل شده و به محصولاتی باارزش نظیر گرانول پلاستیکی و شمش آلومینیومی تبدیل می‌شوند. این فرآیند، ارزش افزوده قابل‌توجهی ایجاد کرده و وابستگی به مواد خام وارداتی را کاهش می‌دهد. همچنین، خام‌فروشی پسماند جای خود را به یک زنجیره پایدار اقتصادی می‌دهد که درآمد پایدار شهرداری را تضمین می‌کند. این سناریو نه تنها موجب ارتقای زیست‌محیطی و کاهش آلودگی می‌شود، بلکه امنیت شغلی جمع‌آورندگان غیررسمی و رضایت شهروندان از سیستم مدیریت پسماند را نیز بهبود می‌بخشد.

۳-۲-تعریف اجزای سیستم و بازیگران

در این بخش، اجزای سیستم CLD و بازیگران اصلی به‌طور مختصر توضیح داده شده و در ادامه جزئیات رفتاری و شرایط مورد نیاز برای ترسیم سناریوی موردنظر نیز بررسی شده است.

جمع‌آورندگان رسمی: این گروه شامل پیمانکاران مجاز شهرداری است که با شهرداری قراردادهای رسمی دارند یا افرادی که مجوز فعالیت در سطح شهر از شهرداری دریافت کرده‌اند. این افراد موظف به رعایت اصول ایمنی، بهداشتی و محیط زیستی هستند و عملکردشان به‌طور مداوم توسط واحد نظارت شهرداری کنترل می‌شود.

جمع‌آورندگان غیررسمی: این گروه شامل افرادی است که بدون دریافت مجوز از شهرداری، اقدام به جمع‌آوری پسماندهای بازیافتی ارزشمند در سطح شهر می‌کنند. این افراد معمولاً به اصول ایمنی، بهداشتی و محیط زیستی پایبند نیستند و فعالیت‌های آن‌ها ممکن است به جامعه آسیب بزند. برای مثال، هنگام تفکیک پسماندهای بازیافتی ارزشمند، کیسه‌های پسماند خانگی را باز کرده و باقی‌مانده پسماندها را در محیط رها می‌کنند که این موضوع باعث آلودگی بیشتر در مناطق شهری می‌شود.

شدت نظارت شهرداری: شهرداری‌ها واحدی دارند که مسئولیت نظارت و ساماندهی مشاغل آلاینده و دستفروشان را برعهده دارد. در حال حاضر، به دلیل عدم وجود راه‌حل جامع برای سازماندهی جمع‌آورندگان پسماند، شدت نظارت این واحد در این حوزه به حداقل رسیده است.

قیمت رسمی: قیمت خرید پسماندهای بازیافتی ارزشمند توسط واحد بازیافت شهرداری تعیین می‌شود. این قیمت رقابتی و شناور بوده و بر اساس ارزش واقعی اقلام مشخص می‌شود.

قیمت غیررسمی: این قیمت برای خرید اقلام بازیافتی ارزشمند توسط کارگاه‌های جمع‌آوری غیرمجاز تعیین می‌شود. در حال حاضر، قیمت غیررسمی جذاب‌تر از قیمت رسمی است.

درآمد شهرداری از بازیافت: این درآمد شامل فروش مواد بازیافتی و صدور مجوزهای فعالیت برای جمع‌آورندگان غیررسمی است.

سرمایه در گردش مرکز خرید و بازیافت پسماند شهرداری (NWC): شهرداری برای رقابت با بازارهای غیررسمی پسماند نیاز به سرمایه قابل توجهی دارد تا بتواند پسماندهای جمع‌آوری شده را به صورت روزانه از واحدهای غیررسمی خریداری کند. این سرمایه باید به‌طور دقیق و کارآمد مدیریت شود و سرعت گردش آن نیز باید از بروکراسی‌های اداری شهرداری سریع‌تر باشد.

جذابیت بازار رسمی: به شرایطی اشاره دارد که جمع‌کنندگان پسماندهای بازیافتی (آنهایی که به طور مستقیم توسط شهرداری استخدام نشده‌اند و به صورت خصوصی و مستقل فعالیت می‌کنند) تشویق می‌شوند تا پسماند خود را به شهرداری تحویل داده و بفروشند. جذابیت بازار رسمی مشابه یک عامل شتاب‌دهنده در این مطالعه است که عمدتاً بر مسائل مالی متمرکز است. جذابیت بازار رسمی می‌تواند بر اساس تفاوت قیمت با واحدهای غیررسمی، سرعت تسویه حساب یا تنوع اقلام خریداری شده، ارائه خدمات بیمه و تجربه کاری و غیره باشد.

اصلاح قیمت رسمی: سازمان مدیریت پسماند شهرداری موظف است قیمت‌گذاری بر روی پسماندهای بازیافتی ارزشمند را به‌صورت اصولی انجام دهد. مهم‌ترین عامل در این زمینه حفظ رقابت قیمتی با واحدهای غیررسمی است.

درآمد شهرداری از بازیافت: این درآمد شامل فروش مواد بازیافتی و صدور مجوزهای فعالیت برای جمع‌آورندگان غیررسمی است.

فروش به MRF: شهرداری کرمان زیرساخت‌هایی در زمینه مدیریت پسماند، از جمله واحد پردازش مکانیکی دارد. با توجه به این زیرساخت، برخی از فعالیت‌های رسمی مانند غرفه‌های بازیافت در شهر، مواد ارزشمند خود را مستقیماً به واحد MRF برای پردازش تحویل می‌دهند.

قیمت مجوز: واحد بازیافت شهرداری باید قیمت مجوزهای ماهانه برای ناوگان غیررسمی که پسماندهای بازیافتی ارزشمند از شهر جمع‌آوری می‌کنند را تعیین کند. قیمت مجوز باید به اندازه کافی جذاب باشد تا جمع‌آوران غیرمجاز به شهرداری مراجعه کرده و آن را دریافت کنند.

درصد تخفیف: درصد تخفیف برای خرید مجوز به کسانی تعلق می‌گیرد که هر ماه مجوز فعال داشته باشند. این تخفیف می‌تواند تا ۱۰۰٪ از قیمت مجوز ماه بعد شامل شود.

فروش جمع‌آوران مجاز به بازار غیررسمی: یکی از فرآیندهایی که با هدف سناریوی دوم در تضاد است، فروش مواد بازیافتی جمع‌آوری‌شده توسط ناوگان غیررسمی دارای مجوز به بازارهای غیررسمی است.

فرآوری اولیه پلاستیک: در این قسمت پلاستیک های تا حد ممکن از نظر جنس و رنگ تفکیک شده و سپس خرد می شود. به طور معمول واحدهای تبدیلی پلاستیک از دستگاه های خردایش و گرانول سازی، شستن گرم، رفع آلودگی پلاستیک ها، ذوب، تنظیم کیفیت پلاستیک با افزودن مواد مکمل و سپس تزریق به قالب و تولید محصولات پلاستیکی یا تولید گرانول های پلاستیک با کیفیت جهت فروش به واحدهای تولیدی دیگر استفاده می کنند.

فرآوری اولیه نایلون: در این قسمت نایلون ها تا حد ممکن از نظر جنس و رنگ تفکیک شده و سپس خرد می شود. به طور معمول واحدهای تبدیلی نایلون از دستگاه های خردایش و گرانول سازی، شستن گرم، رفع آلودگی نایلون، تولید گرانول های نایلون و بسته بندی جهت فروش به واحدهای تولیدی دیگر استفاده می کنند.

فرآوری اولیه پت: در این قسمت پت ها تا حد ممکن از نظر جنس و رنگ (شفاف و رنگی) تفکیک شده و سپس خرد می شود. به طور معمول واحدهای تبدیلی پت از دستگاه های خردایش و گرانول سازی، شستن گرم، رفع آلودگی از پت، ذوب و سپس تولید گرانول های پت با کیفیت جهت فروش به واحدهای تولیدی دیگر استفاده می کنند.

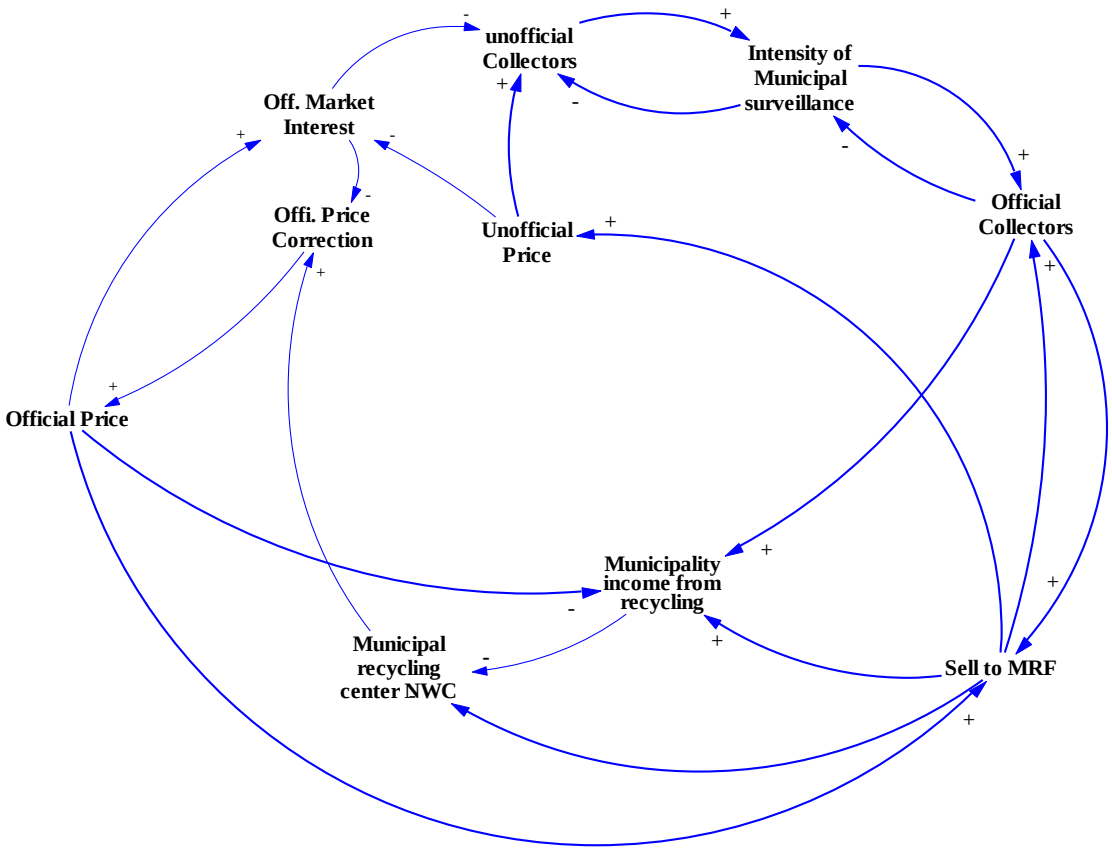
فرآوری اولیه آلومینیوم: در این قسمت قوطی های آلومینیوم با استفاده از کوره و حرارت ذوب شده و به صورت شمش جهت فروش به واحدهای صنعتی ارسال می شوند.

غرفه های بازیافت: به غرفه های مستقر در سطح شهر گفته می شود که زیر نظر شهرداری اقدام به خرید پسماندهای قبال بازیافت از شهروندان یا هر شخص تحویل دهنده پسماند می کنند. قیمت خرید اقلام بر اساس نظر شهرداری تعیین می شود. در انتهای روز مواد جمع آوری شده از این غرفه های به سایت MRF شهرداری جهت انبار و ارسال به صنایع تبدیلی یا فروش مستقیم ارسال می گردد.

اجرای این فرضیات منجر به ایجاد وضعیت جدیدی در سیستم مدیریت پسماند شهر کرمان می‌شود که می‌تواند نتایج مختلفی بسته به شرایط بازیگران به همراه داشته باشد.

۳-۳-مدل CLD وضعیت فعلی مدیریت پسماند شهر کرمان

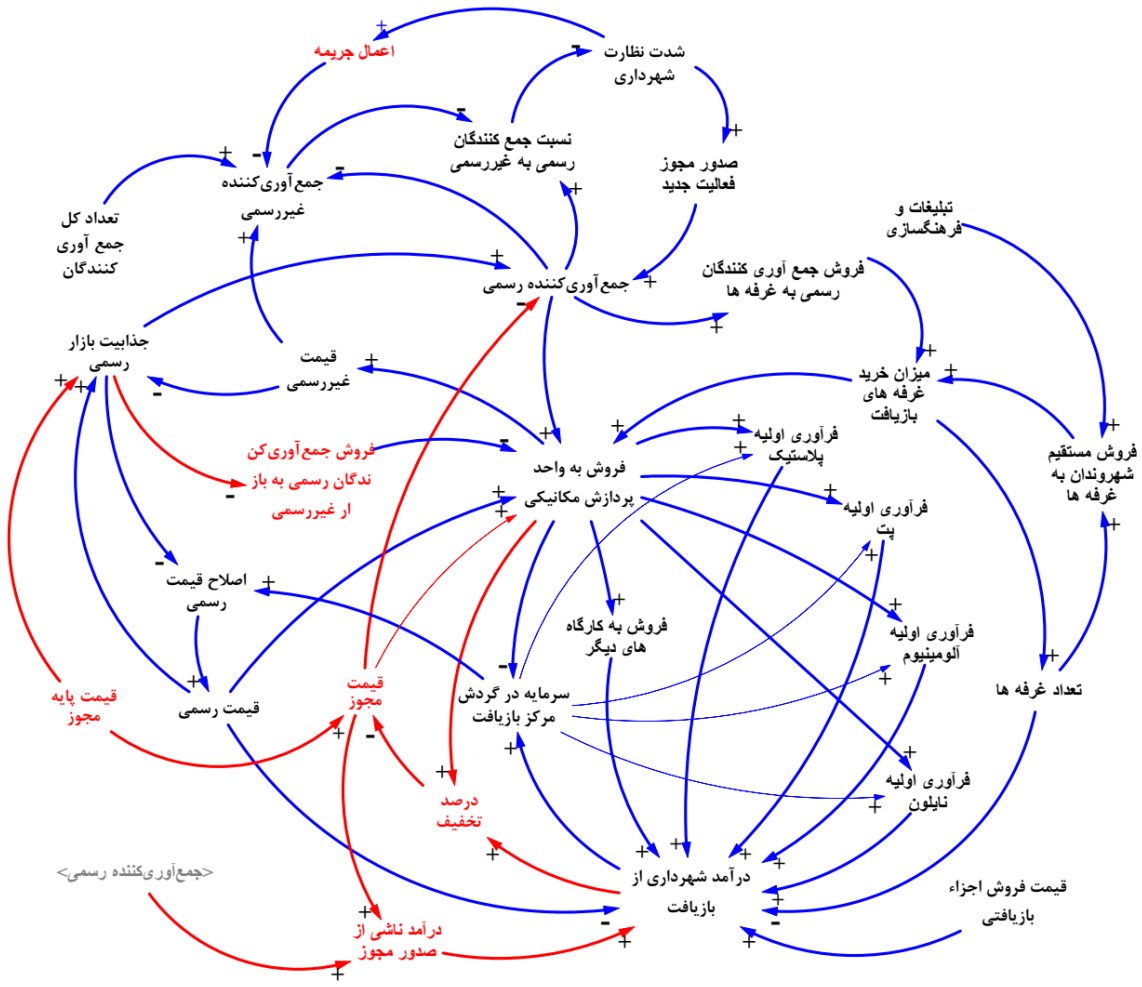
مدل CLD وضعیت فعلی سیستم مدیریت پسماند در شهر کرمان می‌تواند به صورت شکل ۲ ترسیم شود [۱۸]. در این شکل، حلقه‌های علّی و تأثیری بین واحدها و ذی‌نفعان نشان داده شده است. همچنین، جهت تأثیرگذاری عوامل بر یکدیگر (جهت فلش‌ها از علت به معلول) و نوع تأثیر (مثبت یا منفی / تقویت‌کننده یا کاهنده) در کنار فلش‌ها مشخص شده است.



شکل ۲- مدل CLD وضعیت فعلی مدیریت پسماند در شهر کرمان [۱۸]

۳-۴-مدل CLD سناریوی پیشنهادی مدیریت پسماند در شهر کرمان

مدل پیشنهادی CLD برای مدیریت پسماند در کرمان، یک رویکرد جامع و پویا ارائه می‌دهد که هدف اصلی آن کاهش فعالیت‌های غیررسمی و افزایش همکاری جمع‌آورندگان غیررسمی با شهرداری است. در این مدل، تلاش می‌شود جمع‌آورندگان غیررسمی با تشویق به ورود به چرخه رسمی، نقش مؤثری در بهبود سیستم بازیافت ایفا کنند. برای این منظور، صدور مجوزهای رسمی با هزینه‌ای معقول و ارائه تخفیفات منصفانه در نظر گرفته شده است که نه‌تنها جذابیت بازار رسمی را افزایش می‌دهد، بلکه انگیزه جمع‌آورندگان غیررسمی را برای همکاری با شهرداری بیشتر می‌کند. این سیاست‌ها همچنین به کاهش جذابیت بازار غیررسمی و به‌تبع آن، کاهش فعالیت‌های غیررسمی می‌انجامد.



شکل ۳- مدل CLD مدیریت پسماند در شهر کرمان با در نظر گرفتن نقش غرفه های بازیافتی و صنایع تبدیلی

برای موفقیت این سناریو، سیاست‌های قیمت‌گذاری رسمی و ارائه مشوق‌های مالی نقش مهمی ایفا می‌کنند. قیمت خرید پسماندهای بازیافتی توسط شهرداری به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که جذاب‌تر از قیمت بازار غیررسمی باشد و جمع‌آورندگان را به فروش مواد بازیافتی به سیستم رسمی ترغیب کند. علاوه بر این، ارائه تخفیف برای تمدید مجوزها به جمع‌آورندگان رسمی، انگیزه آن‌ها را برای حفظ همکاری با شهرداری افزایش می‌دهد.

در این مطالعه، مدل CLD پیشنهادی تفاوت‌های عمده‌ای نسبت به مدل‌های مشابه مانند مطالعه [۱۸] دارد. یکی از این تفاوت‌های اصلی، اضافه شدن واحدهای صنایع تبدیلی به چرخه مدیریت پسماند است که پیچیدگی سیستم را افزایش داده و به دلیل ارتباطات متنوع‌تر میان بخش‌های مختلف، انعطاف‌پذیری بالاتری را به سیستم مدیریت پسماند رسمی ارائه می‌دهد. این واحدها، نظیر بازیافت آلومینیوم، پلاستیک، پت و نایلون، با تبدیل مواد بازیافتی به محصولات ارزشمند مانند گرانول پلاستیک و شمش آلومینیوم، نقش مهمی در ایجاد ارزش‌افزوده و درآمدزایی برای شهرداری ایفا می‌کنند. این امر نه‌تنها نیاز به واردات مواد اولیه را کاهش می‌دهد، بلکه جریان درآمدی پایداری برای شهرداری فراهم می‌کند.

در این مدل پیشنهادی، غرفه‌های بازیافتی به‌عنوان نقاط کلیدی در نظر گرفته شده‌اند که نقش واسطه را میان شهروندان، جمع‌آورندگان و شهرداری ایفا می‌کنند. این غرفه‌ها نه تنها به‌عنوان مکانی برای جمع‌آوری پسماندهای تفکیک‌شده توسط شهروندان عمل می‌کنند، بلکه به‌عنوان نقطه‌ای برای تعامل با جمع‌آورندگان غیررسمی نیز استفاده می‌شوند. این غرفه‌ها با خرید پسماندهای ارزشمند از شهروندان و جمع‌آورندگان، نه‌تنها به افزایش جمع‌آوری رسمی کمک می‌کنند، بلکه با ایجاد تعامل مستقیم با جمع‌آورندگان غیررسمی، امکان نظارت بر فعالیت‌های آنان را فراهم می‌آورند. افزایش تعداد غرفه‌های بازیافتی و تنوع خدمات ارائه‌شده در آن‌ها، همکاری بیشتر جمع‌آورندگان غیررسمی و شهروندان را با سیستم رسمی تسهیل می‌کند و هدررفت مواد بازیافتی را به حداقل می‌رساند.

از آنجایی که در این مدل، راه‌اندازی واحدهای صنایع تبدیلی نظیر بازیافت آلومینیوم، نایلون، پت و پلاستیک هزینه‌های پایین‌تری نسبت به سایر روش‌های مدیریت پسماند مانند پیرو لیز، زباله‌سوزها و هاضم‌های بی‌هوازی دارند، شهرداری‌ها می‌توانند با سرمایه‌گذاری در این بخش‌ها نه تنها ارزش افزوده بیشتری را در زنجیره مدیریت پسماند ایجاد کنند، بلکه به ایجاد اعتماد بیشتر در میان شهروندان نیز کمک نمایند. زیرا زمانی که شهروندان بدانند پسماندهای تفکیک‌شده آن‌ها به‌صورت کاملاً علمی و قابل اعتماد به مواد اولیه باارزش تبدیل می‌شود، تمایل بیشتری به همکاری با سیستم رسمی مدیریت پسماند پیدا خواهند کرد.

این نکته که واحدهای تبدیلی در زنجیره مدیریت پسماند می‌توانند مستقیماً به تولید مواد اولیه صنعتی نظیر گرانول‌های پلاستیکی، آلومینیومی و یا سایر مواد بازیافتی منجر شوند، از جنبه‌های مهمی است که در CLD پیشنهادی مد نظر قرار گرفته است. این امر علاوه بر کاهش وابستگی به بازارهای مواد اولیه خارجی، موجب ایجاد یک جریان درآمدی پایدار برای شهرداری‌ها خواهد شد.

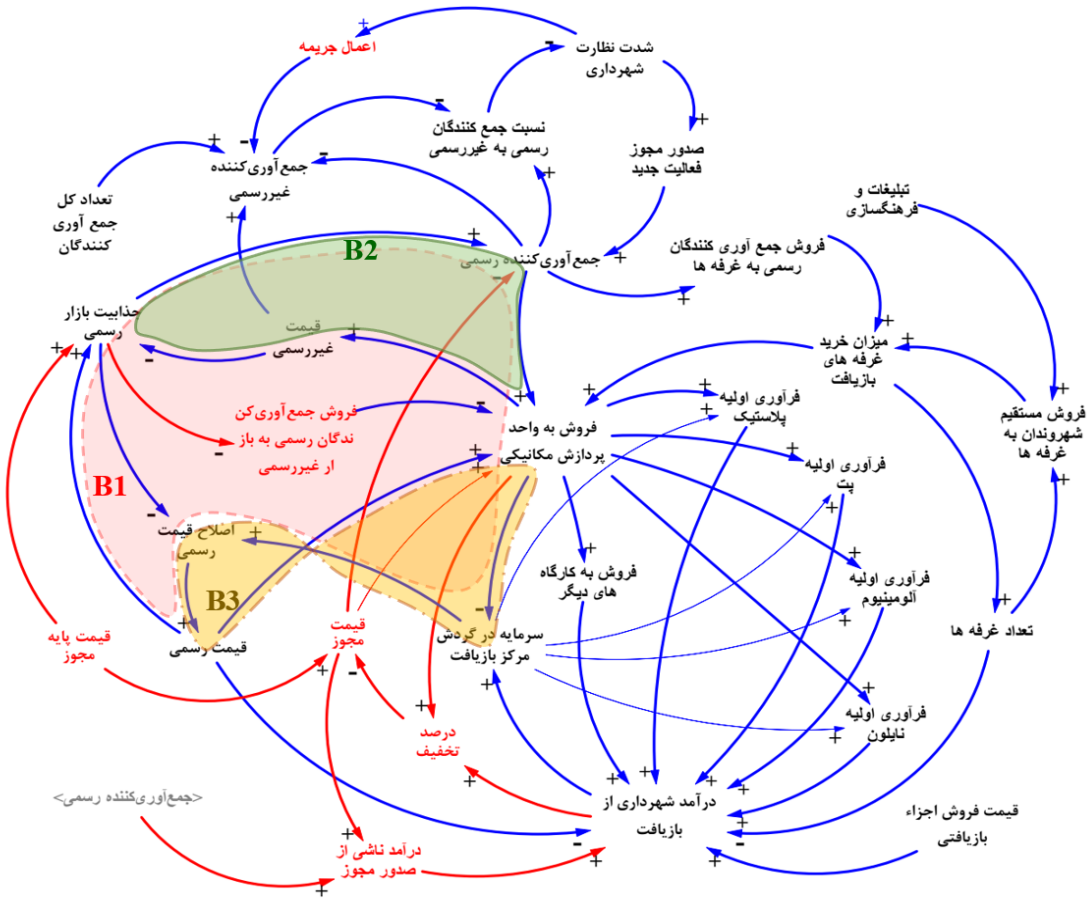
در مدل CLD جدید، ارتباطات بین بازیگران مختلف سیستم، مانند شهرداری، غرفه‌های بازیافتی، صنایع تبدیلی، و جمع‌آورندگان غیررسمی، به شکلی طراحی شده که تقویت همکاری میان این بازیگران موجب تقویت کل چرخه اقتصادی پسماند می‌شود. برای مثال، افزایش تعداد غرفه‌های بازیافتی و تعامل بیشتر آن‌ها با جمع‌آورندگان غیررسمی، نه تنها موجب افزایش جمع‌آوری پسماندهای ارزشمند می‌شود، بلکه به دلیل ایجاد یک سیستم نظارتی قوی‌تر، موجب کاهش هدررفت مواد قابل بازیافت خواهد شد.

به‌طور خاص، در این مدل، شهرداری‌ها از طریق ایجاد یک مکانیزم مالی مناسب شامل فروش مجوزها، تخفیفات و خرید منصفانه نقدی از جمع‌آورندگان غیررسمی، می‌توانند تعداد بیشتری از این جمع‌آورندگان را به چرخه رسمی بازیافت جذب کنند. این امر نه تنها به بهبود نظارت و کنترل بر جمع‌آوری پسماندهای ارزشمند می‌انجامد، بلکه به کاهش هزینه‌های ناشی از فعالیت‌های غیررسمی و افزایش درآمدهای ناشی از فروش مواد بازیافتی به صنایع تبدیلی کمک شایانی خواهد کرد.

مدل CLD پیشنهادی شامل چندین حلقه علّی و معلولی است که ارتباط میان متغیرها و بازیگران مختلف را تقویت می‌کند. در ادامه تعدادی از مهم‌ترین حلقه‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

حلقه‌های بالانسی مربوط به قیمت‌گذاری

در دیاگرام CLD شکل ۳، تعدادی حلقه مربوط به قیمت‌گذاری رسمی خرید اقلام با ارزش وجود دارد. سه مورد از مهم‌ترین این حلقه‌ها که با B1، B2 و B3 نام‌گذاری شده، در شکل ۴ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در حلقه B1، شهرداری برای رقابت با بازار غیررسمی باید قیمت رسمی را به‌گونه‌ای اصلاح کند که جذابیت بیشتری داشته باشد. افزایش قیمت رسمی یا ارائه تخفیف‌ها برای جمع‌آورندگان دارای مجوز، جذابیت بازار رسمی را افزایش می‌دهد. این امر موجب کاهش فعالیت بازار غیررسمی و در نتیجه کاهش رقابت قیمتی در این بخش می‌شود. بااین‌حال، افزایش بیش‌ازحد قیمت رسمی ممکن است تأثیر منفی بر درآمد شهرداری داشته باشد. بنابراین، این حلقه به تعادلی میان جذابیت قیمت رسمی و حفظ درآمدهای شهرداری نیاز دارد. مدیریت دقیق و بهینه این تعادل، یکی از چالش‌های کلیدی این سیستم است.



شکل ۴: حلقه‌های بالانسی مرتبط با قیمت‌گذاری رسمی خرید اقلام با ارزش

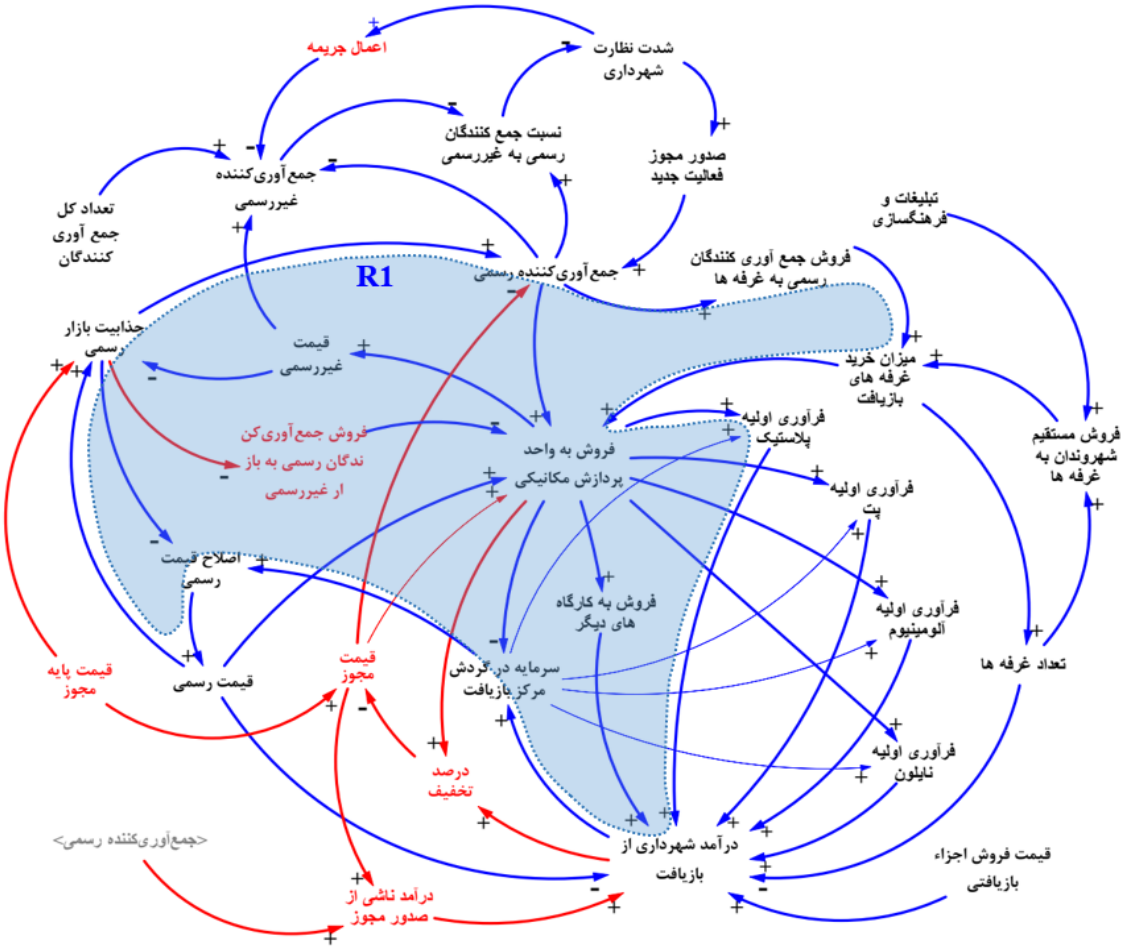
همچنین حلقه B2 به تعادل میان جذابیت بازار رسمی و غیررسمی می‌پردازد. افزایش جذابیت بازار رسمی، جمع‌آوری‌کنندگان غیررسمی را تشویق می‌کند تا به چرخه رسمی وارد شوند و در نتیجه جمع‌آوری رسمی افزایش می‌یابد. این افزایش موجب بهبود درآمد شهرداری از فروش مواد بازیافتی می‌شود. اما در ادامه، برای حفظ رقابت، بازار غیررسمی نیز قیمت خرید اقلام بازیافتی را افزایش می‌دهد که می‌تواند جذابیت بازار رسمی را کاهش دهد. این روند موجب تعادل در سیستم می‌شود، زیرا از افزایش بیش از حد جمع‌آوری‌کنندگان رسمی جلوگیری می‌کند.

در حلقه B3 نیز، این حلقه به رابطه میان سرمایه در گردش مرکز بازیافت، قیمت رسمی، جذابیت بازار رسمی و فروش به واحد پردازش مکانیکی می‌پردازد. افزایش سرمایه در گردش شهرداری امکان ارائه قیمت خرید بهتر و رقابتی‌تر را فراهم می‌کند. این امر به جذب بیشتر جمع‌آورندگان غیررسمی و افزایش جمع‌آوری رسمی منجر می‌شود. افزایش فعالیت رسمی، به شهرداری این امکان را می‌دهد که درآمد بیشتری از صدور مجوزها و فروش مواد بازیافتی کسب کند و سرمایه در گردش خود را تقویت کند. با این حال، افزایش بیش از حد قیمت رسمی باعث کاهش شدید سرمایه در گردش میشود. بنابراین این حلقه در مقدار بهینه خود به بالانس میرسد و از افزایش بیش از حد جلوگیری میشود. ضمنا اگر سرمایه در گردش شهرداری به هر دلیلی کاهش یابد (مانند مشکلات مالی یا کاهش فروش مواد بازیافتی)، این چرخه ممکن است به‌طور موقت از تعادل خارج شود و جذابیت بازار رسمی کاهش یابد. این حلقه نشان‌دهنده اهمیت مدیریت مالی صحیح در ایجاد و حفظ تعادل میان درآمدها و جذابیت بازار رسمی است.

حلقه تقویتی مربوط به صنایع تبدیلی

همانگونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، حلقه تقویتی R1 در مدل CLD ارائه‌شده، نشان‌دهنده دینامیک رشد و تسریع در سیستم مدیریت پسماند کرمان است. این حلقه از تعاملات پیچیده میان جمع‌آوری رسمی پسماند، صنایع تبدیلی، درآمد شهرداری و قیمت مجوز فعالیت شکل گرفته است. این حلقه به صورت یک چرخه مثبت عمل می‌کند و نشان‌دهنده فرآیندی است که با افزایش

جمع‌آوری رسمی پسماند، سیستم به تدریج بهبود می‌یابد و تقویت می‌شود. در ادامه، تمامی تعاملات موجود در این حلقه به تفصیل شرح داده می‌شود.



شکل ۵: حلقه تقویتی مرتبط با غرفه‌های بازیافت و صنایع تبدیلی

حلقه تقویتی R1 در مدل CLD مدیریت پسماند کرمان یکی از اجزای کلیدی است که نقش مهمی در بهبود و توسعه سیستم دارد. این حلقه با افزایش جمع‌آوری رسمی پسماند آغاز می‌شود. جمع‌آورندگان رسمی، با دریافت مجوزهای شهرداری، حجم بیشتری از پسماندهای ارزشمند را به چرخه رسمی وارد می‌کنند. این افزایش موجب کاهش فعالیت‌های غیررسمی و تقویت کنترل شهرداری بر فرآیند جمع‌آوری می‌شود. در ادامه، مواد جمع‌آوری‌شده به غرفه‌های بازیافتی منتقل می‌شوند که علاوه بر خرید مواد از شهروندان، مکانی برای تعامل مستقیم با جمع‌آورندگان رسمی (و غیررسمی) هستند. وجود این غرفه‌ها موجب بهبود جمع‌آوری پسماندهای ارزشمند افزایش کارایی سیستم مدیریت پسماند می‌شود.

مواد بازیافتی از غرفه‌ها به صنایع تبدیلی منتقل شده و به محصولاتی باارزش مانند گرانول‌های پلاستیکی و شمش‌های آلومینیومی تبدیل می‌شوند. این فرآیند موجب ایجاد ارزش افزوده در زنجیره مدیریت پسماند و افزایش درآمد شهرداری می‌شود. درآمد حاصل از فروش این مواد، سرمایه در گردش شهرداری را تقویت کرده و امکان ارائه قیمت‌های رقابتی برای خرید پسماند و پرداخت‌های سریع به جمع‌آورندگان را فراهم می‌کند. این اقدامات جذابیت بازار رسمی را افزایش داده و جمع‌آورندگان بیشتری را به همکاری با سیستم رسمی ترغیب می‌کند. در نتیجه، فعالیت‌های غیررسمی کاهش یافته و حلقه تقویتی R1 تقویت می‌شود.

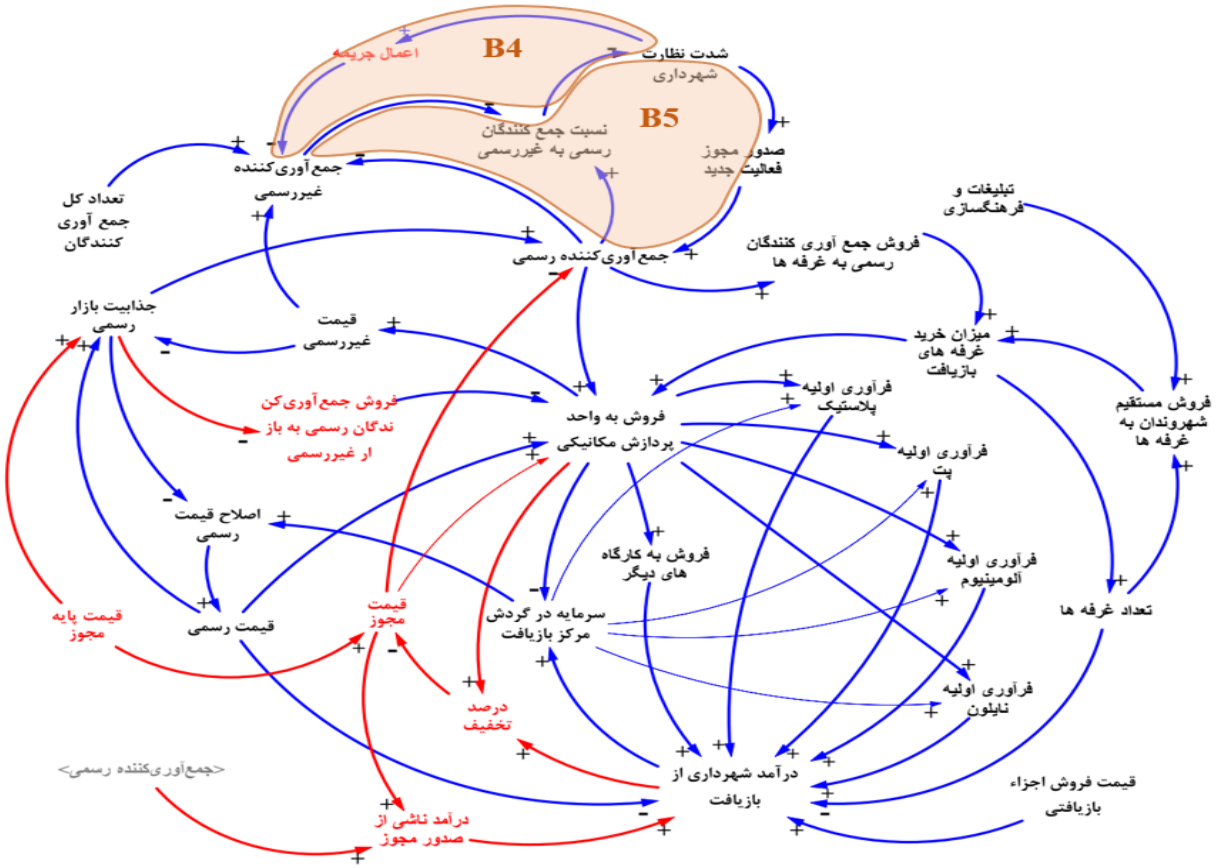
عملکرد این حلقه همچنین به بهبود شرایط زیست‌محیطی و اجتماعی منجر می‌شود. ورود جمع‌آورندگان غیررسمی به چرخه رسمی، آلودگی ناشی از فعالیت‌های غیررسمی را کاهش داده و امنیت شغلی جمع‌آورندگان را با ارائه مزایایی مانند بیمه و شرایط کاری بهتر تضمین می‌کند. علاوه بر این، شفافیت در فرآیند مدیریت پسماند، اعتماد شهروندان را جلب کرده و آن‌ها را به همکاری بیشتر با شهرداری تشویق می‌کند.

با وجود پتانسیل بالای حلقه تقویتی R1، چالش‌هایی مانند ظرفیت محدود صنایع تبدیلی، رقابت با بازار غیررسمی و مدیریت سرمایه در گردش می‌توانند بر عملکرد آن تأثیر بگذارند. افزایش جمع‌آوری رسمی نیازمند ظرفیت کافی در صنایع تبدیلی است و رقابت قیمتی با بازار غیررسمی نیز باید با اصلاح مداوم قیمت‌های رسمی مدیریت شود. در نهایت، مدیریت بهینه سرمایه در گردش نقش حیاتی در اعتمادسازی میان جمع‌آورندگان و افزایش جذابیت بازار رسمی دارد. اگر این حلقه به‌درستی مدیریت شود، می‌تواند نه‌تنها به بهبود اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم مدیریت پسماند کمک کند، بلکه کرمان را به الگویی موفق در مدیریت پایدار پسماند شهری تبدیل کند.

حلقه‌های بالانسی مربوط به واحد نظارت شهرداری

در حلقه‌های بالانسی B4 و B5 که در شکل ۶ نشان داده شده است، واحد نظارت شهرداری نقش کلیدی را ایفا می‌کند. حلقه B4 مستقیماً با شدت نظارت شهرداری و تأثیر آن بر جمع‌آوری رسمی و غیررسمی در ارتباط است. با افزایش شدت نظارت شهرداری بر فعالیت‌های جمع‌آوری غیررسمی، تمایل جمع‌آورندگان غیررسمی به فعالیت در بازار غیررسمی کاهش یافته و آن‌ها به سیستم رسمی جذب می‌شوند. این امر باعث افزایش نسبت جمع‌آورندگان رسمی به غیررسمی می‌شود. بااین‌حال، این افزایش با محدودیت‌هایی مواجه است، زیرا شدت نظارت شهرداری نمی‌تواند به‌طور نامحدود افزایش یابد. محدودیت منابع انسانی و مالی شهرداری و همچنین مقاومت جمع‌آورندگان غیررسمی، نقطه‌ای از تعادل را در سیستم ایجاد می‌کند.

حلقه B5 نیز با فرآیند صدور مجوزهای جدید برای جمع‌آورندگان غیررسمی آغاز می‌شود. شهرداری با تبلیغات و اطلاع‌رسانی مناسب و البته فشار ناشی از واحد نظارت، جمع‌آورندگان غیررسمی را به دریافت مجوز و ورود به سیستم رسمی ترغیب می‌کند. افزایش تعداد جمع‌آورندگان رسمی به بهبود جمع‌آوری پسماند و تقویت سیستم رسمی منجر می‌شود. بااین‌حال، این فرآیند نیز محدودیت‌هایی دارد. اگر تعداد جمع‌آورندگان رسمی بیش‌ازحد افزایش یابد، ممکن است رقابت میان آن‌ها افزایش یافته و سودآوری فعالیت‌های جمع‌آوری کاهش یابد. این کاهش سودآوری ممکن است جمع‌آورندگان را دوباره به سمت فعالیت‌های غیررسمی سوق دهد.



شکل ۶: حلقه‌های بالانسی مرتبط با واحد نظارت شهرداری

همانگونه که مشاهده می‌شود، این دو حلقه در تعامل با یکدیگر عمل می‌کنند و هر دو بر نسبت جمع‌آورندگان رسمی به غیررسمی تأثیرگذار هستند. شدت نظارت شهرداری (در B4) و صدور مجوزهای جدید (در B5) دو ابزار کلیدی برای کنترل و ساماندهی جمع‌آوری پسماند هستند. افزایش نظارت، فعالیت‌های غیررسمی را کاهش داده و جمع‌آورندگان را به سمت سیستم رسمی سوق می‌دهد، درحالی‌که صدور مجوزها و تبلیغات، مسیر قانونی و منظم برای ورود آن‌ها به سیستم را فراهم می‌کند.

ترکیب این دو مکانیزم، حلقه‌های بالانسی B4 و B5 را به یک ابزار قدرتمند برای مدیریت سیستم تبدیل می‌کند. بااین‌حال، موفقیت این تعاملات به تعادل دقیق میان نظارت، هزینه مجوزها، و سیاست‌های تشویقی بستگی دارد. عدم توجه به این تعادل می‌تواند منجر به کاهش کارایی سیستم یا ایجاد نارضایتی میان جمع‌آورندگان شود.

۴-نتیجه گیری

این مطالعه با ارائه یک مدل بهبودیافته نمودار چرخه علّی و معلولی (CLD)، راهکاری جامع برای بهینه‌سازی مدیریت پسماند شهری در کرمان معرفی می‌کند. تمرکز اصلی مدل پیشنهادی بر یکپارچه‌سازی چرخه‌های رسمی و غیررسمی مدیریت پسماند و تقویت همکاری میان این دو بخش است. نوآوری کلیدی مدل، ادغام صنایع تبدیلی و نقش محوری غرفه‌های بازیافتی در ساختار مدیریت پسماند است که انعطاف‌پذیری سیستم را افزایش داده و بهره‌وری آن را بهبود می‌بخشد. برخلاف مدل‌های پیشین، از جمله مطالعه [۱۱]، این مدل با افزودن واحدهای بازیافت آلومینیوم، PET، پلاستیک و نایلون، ظرفیت شهرداری کرمان برای ایجاد ارزش اقتصادی و افزایش بازگشت مالی را گسترش داده است. این رویکرد، نه تنها درآمد شهرداری را افزایش می‌دهد، بلکه زمینه را برای ساماندهی و جذب جمع‌آورندگان غیررسمی به چرخه رسمی فراهم می‌کند و مدیریت پسماند شهری را ساختارمندتر و کارآمدتر می‌سازد.

مدل CLD پیشنهادی، با ترسیم دقیق تعاملات میان بازیگران مختلف شامل جمع‌آورندگان رسمی، غیررسمی و شهرداری، ساختاری شفاف برای تقویت همکاری میان این ذی‌نفعان ارائه می‌دهد. نقش برجسته غرفه‌های بازیافتی در این مدل، تسهیل یکپارچگی چرخه‌های رسمی و غیررسمی را تضمین می‌کند و با ایجاد مشوق‌های مالی مانند قیمت‌گذاری منصفانه و صدور مجوزهای جذاب، جمع‌آورندگان غیررسمی را به همکاری با سیستم رسمی ترغیب می‌کند. این رویکرد موجب هدایت پسماندهای ارزشمند به سمت چرخه رسمی شده و در عین حال نظارت و کنترل شهرداری بر کل فرآیند جمع‌آوری پسماند را تقویت می‌کند. افزودن حلقه‌های تقویتی و بالانسی، از جمله چرخه‌های مرتبط با قیمت‌گذاری رسمی و نظارت شهرداری، به مدل CLD، ساختاری پایدارتر و انعطاف‌پذیرتر ایجاد کرده است که علاوه بر کاهش اتلاف منابع، به ارتقای پایداری زیست‌محیطی کمک می‌کند.

همچنین، گنجاندن صنایع تبدیلی در مدل پیشنهادی، زنجیره ارزش مدیریت پسماند را با تبدیل مواد خام به ورودی‌های صنعتی با ارزش، تقویت کرده است. این تغییر استراتژیک از جمع‌آوری ساده پسماند به پردازش و بازیافت، نه تنها موجب افزایش ارزش اقتصادی شده است، بلکه تأثیرات مثبت اجتماعی و زیست‌محیطی نیز به همراه دارد. تقویت صنایع تبدیلی و استفاده بهینه از پتانسیل غرفه‌های بازیافت، کرمان را به الگویی برای توسعه پایدار شهری تبدیل می‌کند که توانایی رقابت با چرخه‌های غیررسمی را دارد. در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که سیستم مدیریت پسماند کرمان، با حرکت به سمت یک ساختار سودآور و سازمان‌یافته، نه تنها می‌تواند چالش‌های محلی را حل کند، بلکه به عنوان مدلی برای شهرهای دیگر با شرایط مشابه قابل استفاده است.

۵-منابع

1. Tong, Y.D., T.D.X. Huynh, and T.D. Khong, *Understanding the role of informal sector for sustainable development of municipal solid waste management system: A case study in Vietnam.* Waste Management, 2021. **124**: p. 118-127.
2. Sengupta, D., et al., *Circular economy and household e-waste management in India: Integration of formal and informal sectors.* Minerals Engineering, 2022. **184**: p. 107661.

3. Kumar, A. and A. Agrawal, *Recent trends in solid waste management status, challenges, and potential for the future Indian cities–A review.* Current Research in Environmental Sustainability, 2020. **2**: p. 100011.
4. Morovati Sharifabadi, A. and M. Ziaeian, *Analysis of urban waste management using system dynamics approach.* Journal of Systems Thinking in Practice, 202.۳
5. Ghaffarpanah, M., M. Hosseinzadeh, and A. Kazemi, *Modeling the Waste Disposal System of Isfahan City Using System Dynamics Approach.* Modern Research in Decision Making, 2020. **5**(2): p. 81-109.
6. Ng, K.S. and A. Yang, *Development of a system model to predict flows and performance of regional waste management planning: A case study of England.* Journal of environmental management, 2023. **325**: p. 116585.
7. Yousafzai, M.T., et al., *Sustainability of waste picker sustainopreneurs in Pakistan's informal solid waste management system for cleaner production.* Journal of Cleaner Production, 2020. **267**: p. 121913.
8. Baghani, A.N., et al., *Economic aspects of dry solid waste recycling in Shiraz, Iran.* Journal of Mazandaran University of medical sciences, 2016. **2** :(۱۳۳)۵p. 330-334.
9. Saghafi, M.D. and Z.A.H. Teshnizi, *Building deconstruction and material recovery in Iran: an analysis of major determinants.* Procedia Engineering, 2011. **21**: p. 853-863.
10. Xiao, S., et al., *Policy impacts on Municipal Solid Waste management in Shanghai: A system dynamics model analysis*. Journal of Cleaner Production, 2020. **262**: p. 121366.
11. Breukelman, H., H. Krikke, and A. Löhr, *Root causes of underperforming urban waste services in developing countries: Designing a diagnostic tool, based on literature review and qualitative system dynamics.* Waste Management & Research, 2022: p. 0734242X221074189.
12. Mak, T.M., et al., *A system dynamics approach to determine construction waste disposal charge in Hong Kong.* Journal of Cleaner Production, 2019. **241**: p. 118309.
13. Suryani, E., et al., *Waste Processing Scenarios to Support Sustainable Environmental Development Using System Dynamics*, in *Understanding the Dynamics of New Normal for Supply Chains*. 2022, Springer. p. 101-119.
14. Muzaffar, S., et al., *Analysing the Causes of Design Generated Waste through System Dynamics*. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022: p. 1-14.
15. Yang, H.-T., H.-R. Chao, and Y.-F. Cheng, *Forecasting and controlling of municipal solid waste (MSW) in the Kaohsiung City, Taiwan, by using system dynamics modeling.* Biomass Conversion and Biorefinery, 2022: p. 1-9.
16. Johannes, H.P., *Waste reduction through integrated waste management modeling at Mustika Residence (Tangerang).* Journal of Environmental Science and Sustainable Development, 2018. **1**(1): p. 12-24.
17. Oriola, A.O. *System dynamics modelling of waste management system*. in *Proceedings of 1st Asian-Pacific System Dynamics Conference*. 2014.

18. Vahidi, H., M. BagherzadehKouhbanani, and A. AliHosseini, *Investigating the formal and informal cycle of waste management in Kerman using the CLD model.* Journal of Material Cycles and Waste Management, 2024: p. 1-14.
19. Vahidi, H., N. Moradi, and H. Abbaslou, *Developing of Alternative SRFs in Kerman's Cement Industry by Energy Optimization and Economical Feasibility Approaches.* Environmental Energy and Economic Research, 2017. **1**(3): p. 259-268.
20. Rifaldi, M., M. Zid, and B. Sumargo, *Causal Loop Diagram as Approaching Model Analysis in Increasing the Waste Volume at the Covid19 Pandemic Period.* Jurnal kesehatan lingkungan, 2021. **13**(3): p. 180.
21. Berenjkar, P., Y.Y. Li, and Q. Yuan, *The application of system dynamics in different practices of a waste management system.* Environment, Development and Sustainability, 2021: p. 1-30.
22. Binder, T., et al. *Developing system dynamics models from causal loop diagrams*. in *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamic Society*. 2004.
23. Dhirasasna, N. and O. Sahin, *A multi-methodology approach to creating a causal loop diagram.* Systems, 2019. **7**(3): p. 42.
24. Jones, L., *Vensim and the development of system dynamics.* Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making, 2014: p. 215-247.