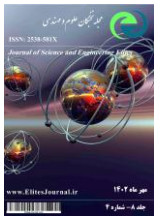
مجله نخبگان علوم و مهندسی
Journal of Science and Engineering Elites
جلد ۸- شماره ۴ - سال ۱۴۰۲
www.ElitesJournal.ir



مدلسازی سیستم مدیریت پسماندهای شهری با تمرکز بر پتانسیل‌های بهبود در شاخص های اقتصادی، زیست محیطی و نرخ تکنولوژی بازیافت با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم

آرش اسلام پناه

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، پردیس البرز، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Arash.eslampanah@ut.ac.ir

ارسال: مرداد ماه ۱۴۰۲ پذیرش: مهر ماه ۱۴۰۲

چکیده

در این مقاله به مدلسازی سیستم مدیریت پسماندهای شهری با تمرکز بر پتانسیل‌های بهبود در شاخص‌های اقتصادی، زیست محیطی و نرخ تکنولوژی بازیافت با رویکرد پویایی شناسی سیستم پرداخته شد. تحقیق حاضر با توجه به ماهیت مسأله اصلی تحقیق، از نوع ترکیبی است، یعنی این تحقیق ماهیتاً هم از مجموعه روش‌های مناسب کیفی استفاده می‌کند و هم جعبه ابزار خود را از ابزارها و روش‌های کمّی محروم نمی‌سازد. جهت انجام تحقیق، ابتدا با بررسی و مطالعه سیستم مدیریت پسماند شهر تهران و گفتگو با مدیران و کارشناسان سازمان، متغیرهای موثر در مدل و فرایند مدیریت پسماند شهری شناسایی و مدل پویا اولیه طراحی گردید. پس از طراحی مدل پویای مدیریت پسماند، از نظر ساختاری و رفتاری، اعتبار مدل ارزیابی گردید و پس از تایید اعتبار مدل، رفتار مدل برای سیستم موجود با استفاده از داده‌های سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹، بررسی و عملکرد سیستم مدیریت پسماند در شهر تهران ارزیابی گردید. پس از شبیه‌سازی و تعیین اعتبار مدل، سیاست یا سناریوهای مختلفی از جمله کاهش هزینه پایه فرهنگ‌سازی و بهبود ارتباط با جامعه در راستای فرهنگ‌سازی، استفاده از تکنولوژی‌های انقلاب صنعتی چهارم جهت تفکیک در مبدا و بازیافت و احداث کارخانه هاضم بی هوازی مورد آزمون قرار گرفته و بهترین گزینه معرفی شده است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که اجرای هریک از طرح‌های پیشنهادی می‌تواند در بهبود حداقل یکی از عملکردهای مالی و زیست محیطی موثر واقع شود. اما می‌توان گفت از منظر رفتار سود، سیاست " بهبود ارتباط با جامعه و فرهنگ‌سازی با هزینه‌های کمتر" و از منظر رفتار انتشار کل، سیاست "احداث کارخانه هاضم بی هوازی" بهترین سیاست‌ها می‌باشد.

کلمات کلیدی: مدیریت پسماند؛ زباله‌های شهری؛ مدلسازی پویا.

۱– مقدمه

از زمان انقلاب صنعتی حجم و تنوع زباله‌ها آنقدر زیاد شد که کم کم به یک مسأله بسیار مهم تبدیل شد. این رشد چشمگیر زباله‌ها باعث به وجود آمدن مشکلاتی شد که مهمترین آن مربوط به محیط زیست و سلامت افراد جامعه می‌شود. از این‌رو، مدیریت زباله‌ها، توجه محققین و مسئولین را به خود جلب کرد و راهکارهای گوناگونی برای نحوه جمع‌آوری، حمل و نقل، پردازش، بازیافت یا انهدام زباله‌ها ارائه [۱-۲].

مدیریت پسماند یا مدیریت زباله [۱]، مدیریت جمع آوری، حمل و نقل، پردازش، بازیافت یا دفع و انهدام زباله‌ها (مواد زاید) است. پسماند حجیم ترین مصنوع دست بشر است. روزانه بیش از ۳/۵ میلیون تن زباله در سراسر جهان تولید می شود که در کشورهای

[۱] Waste management

توسعه یافته ۸۰ در صد از پسماند بازیافت می شود و به چرخه مصرف باز می گردد،وباقیمانده به صورت بهداشتی دفع یا سوزانده می‌شود. پسماندهای مرطوب به پسماندهای فاسد شدنی شامل باقیمانده مواد غذایی، سبزیجات، میوه جات، پسماندهای باغبانی،و فضای سبز گفته می‌شود که در طبیعت به آسانی فاسد شده تجزیه می‌گردند و حدود ۷۰ درصد پسماندها را تشکیل می‌دهند. این مواد همگی پر حجم بوده و به سرعت فضای پر ارزش محله‌ای دفع پسماند را اشغال می‌کنند[۳]. پسماند های خطرناک منازل به پسماندها به دو دسته تقسیم می شوند: دسته اول: موادی چون باند زخم، پوشک بچه، سرنگ، سرم، سر سوزن و تیغ دسته دوم، موادی چون باطری ماشین، انواع دیگر باطری، لامپ مهتابی، ظروف سم، حشره کش ها، روغن، گریس و غیره [۴].

از طرفی هم اکنون در عصر تکنولوژی هستیم و چهارمین انقلاب صنعتی اجتناب ناپذیر بوده و تأثیر آن بر مدیریت پسماند نیز قابل توجه است[۵]. این انقلاب شامل تلفیق فناوری‌های دیجیتالی با مدیریت پسماند است که در هر بخش از مدیریت زباله از رباتیک گرفته تا حسگرها نیز پیشرفت‌هایی را شاهد خواهیم بود. پیشرفت در IR بی سابقه بوده و رویکردهایی مانند قدرت برقراری ارتباط، چاپ سه بعدی (سه بعدی)، تولید ماژول ها، اتومبیل های خودران خودکار و البته دسترسی به دانش ضایعاتی، اینترنت اشیاء، RFID و ... از فرصت های جدید ایجاد شده توسط انقلاب صنعتی چهارم در زمینه مدیریت پسماند است[۶].

مدرنیته و شهرنشینی شتابان و رشد روزافزون مصرفگرایی باعث تولید مواد زاید و تولید پسماندهای شهری شده است که مانع سلامت و زیست پذیری محیطی سکونتگاه های انسانی شده است که اهمیت و ضرورت آن را در مطالعات شهری نشان می‌دهد. هدف پژوهش حاضر ارائه مدل مدیریت پسماند شهری با رویکرد مدلسازی پویا است. در این مقاله به رویکرد مدلسازی پویا جهت مدیریت پسماندهای شهری با تمرکز بر پتانسیل های بهبود در شاخص های اقتصادی و زیست محیطی و نرخ تکنولوژی بازیافت پرداخته می‌شود. در این تحقیق، نخست به تشریح سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهری، روش شناسی مدل سازی پویا و پیشینه تحقیقات انجام شده در خصوص مدل سازی دینامیکی سیستم های مدیریت مواد زاید جامد شهری پرداخته شد. در گام بعدی مدلی پویا از سیستم های تولید، جمع آوری و حمل زباله در شهر تهران ارائه گردید. پس از تدوین مدل در محیط نرم افزاری پویا، نتایج حاصل از اجرای مدل را تحلیل نموده و جهت اعتباردهی به مدل آن را تحت آزمون های اعتبارسنجی قرار داده‌ایم.

۲– پیشینه تحقیق

دی نولا[1] همکاران (۲۰۱۸) به مدلسازی مدیریت پسماندهای جامد پرداختند. در این کار، یک مدل پویا برای تجزیه و تحلیل فعل و انفعالات بین عناصر اصلی سیستم زباله در کامپانیا و تکامل آن‌ها در افق زمانی حساس – سایپرز توسعه یافته است. این مدل روند ایجاد ظرفیت و جریان زباله از طریق گزینه‌های تصفیه موجود را که برای مقابله با بحران ایجاد شده است، در نظر می‌گیرد. این مدل همچنین چارچوب تحلیلی برای کشف تأثیرات سیاست های جایگزین زباله فراهم می کند[۷].

ژیائو[2] و همکاران (۲۰۱۸) در مقاله ای با عنوان یک مرور کلی از بازیافت زباله قابل بازیافت در چین و توصیه‌هایی برای راه حل‌های یکپارچه، با هدف بررسی چارچوب مقررات و سیاست‌های بازیافت مجدد موارد قابل بازیافت[3] چین، شناسایی مشکلات موجود و ارائه راه حل‌های مناسب برای بهبود بازیافت مجدد موارد قابل بازیافت چین پرداخته است. یک چارچوب یکپارچه با استفاده از یک مدل سرمایه گذاری خصوصی[4]، ترکیب سیستم RWR با سیستم جمع آوری مواد زاید جامد و با استفاده از تکنولوژی اینترنت برای ایجاد پلت فرم جامع اطلاعات و استفاده از تکنولوژی اینترنت به عنوان یک راه حل منحصر به فرد و موثر برای حل مشکلات چین RWR پیشنهاد شده است[۸].

[1] Di Nola
[2] Xiao
[3] Recyclable waste recycling (RWR)
[4] *Public-Private Partnership (PPP*)

سامپلاک[1] و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی پتانسیل گرمای جهان با استفاده از تولیدکنندگان زباله برپایه لجستیک معکوس پرداخته‌اند. در این مقاله به یک مسئله خاص برای جریان شبکه پرداخته شده که در آن زباله‌های مختلط شهری به عنوان یک حامل انرژی ثانویه و تا حدودی تجدیدپذیر از تولید کنندگان زباله (شهرداری‌ها)، از طریق امکانات پیش پردازش، به تصفیه نهایی خود در واحدهای پردازش زباله منتقل می‌شوند و در آن بهینه جریان مورد نظر است. نتایج به دست آمده برای حداقل هزینه‌های کل، از جمله تصفیه و حمل و نقل، مربوط به تولید و ذخیره مقدار مشخصی از کربن دی‌اکسید و سایر گازهای گلخانه‌ای است که توسط پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) توضیح داده شده است. سهم GWP زباله‌ها در مکان های مختلف و فن آوری‌های مختلف در بین تولید کنندگان زباله متفاوت است به همین دلیل یک مسئله جریان شبکه برای شناسایی دقیق پسماندهای ارائه شده است. این مدل از ایده های اصلی مدل سازی شبکه چند کالایی پیروی کرده و تغییرپذیری هزینه و سهم GWP را برای کلیه تولید کنندگان در منطقه مورد بررسی نشان می دهد[۹].

واندر ورف[2] و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله‌ای با عنوان کمینه‌سازی زباله توسط خانوارها – استراتژی اطلاعات منحصر به فرد در هلند، با استفاده از روش مدل سازی چند سطحی که از تمام اندازه گیری های مشاهده شده استفاده می کند به این نتیجه رسیدند که استراتژی های اطلاعاتی می توانند زمانی که آگاهی مردم از اثربخشی این استراتژی ها و عواقب و نتایج افزایش یابد، در کاهش زباله‌های خانگی موثر باشند[۱۰].

ژانگ و ژائو [3] (۲۰۱۹) در مقاله ای با عنوان نظارت داوطلبانه خانوارها در دفع زباله با استفاده از داده‌های مطالعات میدانی در مورد جوامع و خانوارهای چهار ناحیه حومه در چین، از توسعه چارچوب تجزیه و تحلیل بصورت تجربی از تمایل خانوارها و فعالیت های واقعی در نظارت بر دفن زباله استفاده می کند. این مقاله از چارچوب IAD [4] برای تجزیه و تحلیل تصمیمات مانیتورینگ نظارتی خانگی در زمینه دفع زباله استفاده می‌کند. از چارچوب IAD برای تعدادی از تحقیقات در مورد مدیریت عمومی منابع در سراسر جهان استفاده شده است. از آنجا که نظارت بر خانوار در روند دفع زباله اساسا موضوع اقدام جمعی است، استفاده از چارچوب آنالیز صنعتی وتوسعه فریم ورک نه تنها به ما کمک می کند تصمیمات مانیتورینگ خانواده‌ها را در دفع زباله در سطح جامعه و فرد بررسی کنیم، بلکه ما را قادر می‌سازد تا متغیرهای کلیدی را که بر تمایل به رفتار نظارتی واقعی خانوارها در همان چارچوب نشان دهد. نتایج تجربی نشان می دهد که مدرنیزاسیون جامعه به طور قابل توجهی باعث افزایش احتمال دخالت خانوارها در دفع زباله می‌شوند، در حالی که اندازه اجتماع و ناهمگونی ثروت و قومیت به طور جدی مانع دخالت خانواده‌ها در نظارت بر دفن زباله ها می‌شود. مهمتر از همه، نتایج نشان می دهد که جامعه کارکنان با کادرهای تمام وقت برای مدیریت سلامت شور و شوق خانواده ها در انجام نظارت بر دفن زباله ها را کاهش می دهد، اما سهام سرمایه اجتماعی و نظارت همکارانه، شرکت در فعالیت‌های نظارتی بر دفع زباله و امکان خانواده ها را افزایش می‌دهد. بهبود زیرساخت‌های اجتماعی و شرایط اقتصادی، کاهش مداخله خارجی در امور اجتماعی و پرورش سهام سرمایه اجتماعی، روشی مهم برای افزایش مشارکت عمومی در حکومت داری محیطی است[۱۱].

پینها و ساگاوا [5](۲۰۲۰) در مقاله خود یک مدل پویایی سیستم برای مدیریت پسماند جامد شهری ارائه کردند که دید کاملی از منابع درگیر، مقصد پسماندها و ساختار هزینه خدمات / سیستم را فراهم می کند. سهم اصلی این مقاله، ارائه یک ابزار برنامه‌ریزی مالی برای مدیران است که به آنها امکان می دهد یک تجزیه و تحلیل سناریو، برای پشتیبانی از تصمیمات استراتژیک یا تاکتیکی، مانند گسترش ظرفیت، سرمایه گذاری در بهبود عملیاتی و غیره در اختیار داشته باشند. به عنوان یک مطالعه موردی، بافت یک شهر ۲۳۰،۰۰۰ نفری برزیل مدل‌سازی شد و سناریوها برای ۱۰ سال پیشنهاد شد. سناریویی که نتایج بهتری را با سرمایه گذاری

[1] Šomplák
[2] Van der Werf
[3] Zhang & Zhao
[4] Institutional analysis and development framework
[5] Pinha & Sagawa

های عملی ارائه می دهد، افزایش ۸/۵٪ به ۱۵٪ در جمع آوری زباله های خشک همراه با بهبود بهره وری از فرآیند مرتب سازی را توصیف می‌کند. شبیه سازی ها نشان داد که درآمدهای حاصل از قابل بازیافت هزینه های ارائه دهنده خدمات را پوشش نمی‌دهد[۱۲].

بارنس[1] و همکاران (۲۰۲۰) به مدلسازی انباشت زباله در شهرداری کواداسو در اشانتی پرداخته‌اند. در این مقاله، یک مدل ریاضی برای توصیف انباشت زباله در شهرداری کواداسو معرفی می‌شود که زباله‌های خیابان‌ها، زباله‌ها در ناودان‌ها، زباله‌های سطل زباله، زباله‌های خانگی، زباله های موجود در بازار و زباله‌های ارسال شده به محل های زباله را با استفاده از داده‌های کیفی را دسته‌بندی می‌کند[۱۳].

روشان و ریشی [2](۲۰۲۰) سیستم مدیریت زباله هوشمند موثر و کارآمد برای شهرهای هوشمند با استفاده از اینترنت اشیاء را بررسی کردند. مقاله آنها، سیستم مدیریت پسماند ارائه شده توسط محققان در شهرهای مختلف هوشمند را مرور کرده و سپس یک سیستم مدیریت زباله هوشمند موثر و کارآمد را پیشنهاد می کند[۱۴].

تیواری[3] (۲۰۲۱) به بررسی مسئله شهر هوشمند و استفاده از اینترنت اشیاء در مدیریت پسماند چنین شهری را مطالعه کرده است. مقاله وی، برنامه تجربی مدیریت پسماند را پیشنهاد می کند که می تواند در شهرهای هوشمند اجرا شود. آزمایش مدیریت پسماند ارائه شده در این مطالعه یک سیستم متصل از اشیاء هوشمند به نام سطل زباله هوشمند است که امکان نظارت بر زمان واقعی را فراهم کرده و اعلان خودکار را در مورد وضعیت زباله برای کمک به مدیریت موثر زباله ارسال می کند.

دامادی و نامجو (۲۰۲۱) به بررسی مسئله استفاده از بلاکچین جهت هوشمندسازی مدیریت پسماند پرداخته‌اند. در مقاله آنها، یک سیستم مدیریت پسماند جدید بر اساس محاسبات مه [4] و فناوری بلاک چین پیشنهاد شده است[۱۵].

حیدر [5] و همکاران (۲۰۲۱) نیز سیستم مدیریت پسماند هوشمند با استفاده از فناوری RFID را پیشنهاد کردند. چاکرابورتی[6] و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی مدیریت پسماند هوشمند پرداخته و سیستم مدیریت پسماند هوشمند با برنامه های تحت وب و تلفن همراه ، فرآیند بازرسی مواد زائد جامد و هیدریک، سیستم مدیریت کل فرآیند جمع آوری و سیستم های کنترل کامیون مانند GPS را پیشنهاد کردند. فلورز و یو[7] (۲۰۲۱) نیز یک سیستم مدیریت پسماند هوشمند مبتنی بر LoRaWAN را پیشنهاد کرده‌اند. این سیستم به دنبال کاهش سطل‌های زباله و کانتینرها است که در حداکثر ظرفیت ذخیره سازی خود قرار دارند[۱۶-۱۷].

همانطور که مشاهده می‌شود، تاکنون در زمینه مدلسازی مدیریت پسماندها تحقیقات زیادی صورت گرفته که در برخی از آن‌ها نیز از رویکرد مدلسازی پویا استفاده شده است. همچنین در زمینه تکنولوژی‌های مدیریت پسماند نیز تحقیقتی انجام شده است که بیشتر در رابطه با طراحی سطح زباله و استفاده از تکنولوژی در جمع‌آوری است. در تحقیق حاضر تاثیر استفاده از تکنولوژی‌های جمع آوری و بازیافت نیز در نظر گرفته شده است. آنچه که تحقیق حاضر از سایر تحقیقات متمایز می‌کند، ارزیابی میزان بهبود در شاخص‌های اقتصادی و محیطی با مدیریت پسماندهای شهری از طریق مدلسازی پویا با در نظر گرفتن استفاده از تکنولوژی گردآوری و بازیافت می‌باشد.

۳-روش تحقیق

این پژوهش از نوع توسعه ای – کاربردی محسوب می شود. روش انجام تحقیق بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای (مرور ادبیات و کارهای تحقیقاتی پیشین) انجام می‌پذیرد. جهت گردآوری اطلاعات از مطالعات کتابخانه‌ای و مقالات موجود در نشریه‌های بین المللی معتبر و همچنین کتاب‌های مرتبط، پایان نامه ها و سایت‌های اینترنتی استفاده خواهد شد. سپس در مراحلی از تحقیق که

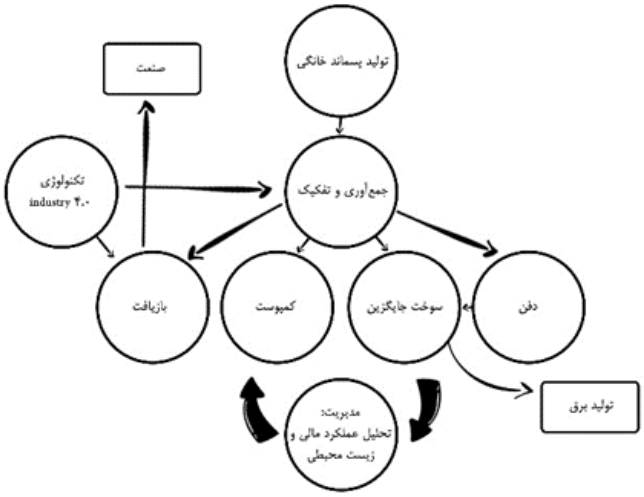
[1] Barnes
[2] Roshan & Rishi
[3] Tiwari
[4] Fog computing
[5] Heidar
[6] Chakraborty
[7] Flores & Yoo

ممکن است نیاز به دانش خبرگان باشد از مصاحبه استفاده خواهد شد. جامعه آماری شامل کلیه داده‌های مربوط به مدیریت زباله‌های شهری در شهر تهران است که داده های سال ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ بعنوان نمونه انتخاب گردید.

در این تحقیق مدل مدیریت پسماندهای شهری با رویکرد مدلسازی پویا طراحی گردید. فرایند کار شامل بیان مساله و تعیین فرضیه پویا، صورت بندی مدل، شبیه سازی و اعتبار سنجی و در انتها تحلیل سناریوهای بهبود مساله می باشد. تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از اجرای مدل پویا در محیط نرم افزار ونسیم صورت گرفت.

۳-۱- طراحی مدل پویا جهت مدیریت پسماند زباله‌های خانگی

هر سیستم، معمولاً در یک سلسله مراتب، جزئی از یک سیستم بزرگتر است؛ به عبارتی، زیر سیستمی از یک سیستم بزرگتر (فرا سیستم) است. همچنین، یک زیر سیستم، لزوماً، فقط متعلق به یک فرا سیستم نیست. اگر تغییری در یکی از زیر سیستم‌ها به وجود آید؛ تبعات آن، باید در تمامی فرا سیستم‌های آن بررسی شود. همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود؛ سیستم مدیریت پسماند شامل ۳ سیستم "تولید پسماند"، "پردازش و دفع" و"مدیریت" می‌باشد.



شکل ۱- سیستم مدیریت پسماند

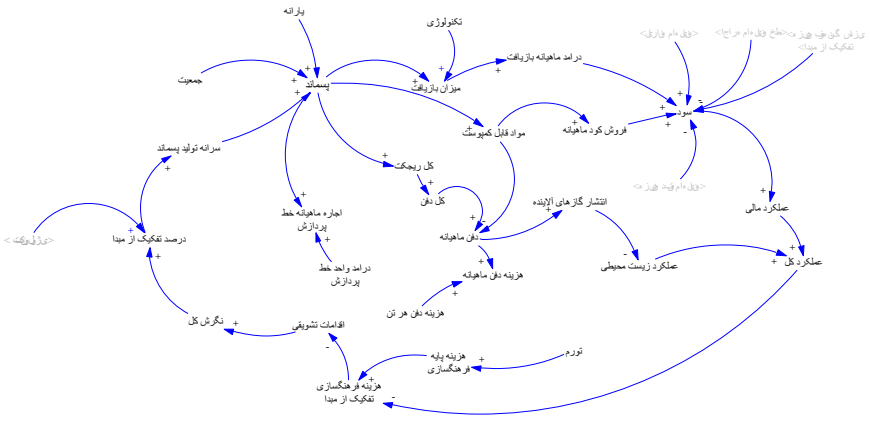
در شکل بالا، تولید پسماند خانگی از بخش مسکونی ناشی می‌شود و در سیستم پردازش و دفع، در ابتدا جمع آوری و تفکیک صورت گرفته و سپس ۴ عمل بازیافت، کمپوست، سوخت جایگزین (تبدیل به انرژی) و دفن انجام می‌شود. سپس داده‌های مربوطه از سیستم "پردزش و دفع" به مدیریت ارسال شده و مدیریت عمکرد اقتصادی و محیطی را محاسبه می‌کند. همچنین، بخش بازیافت، مواد بازیافت شده را به بخش صنعت که یکی از سیستم‌های شهری است، ارسال می‌کند. زیرسیستم سوخت جایگزین، انرژی جهت تولید برق ارسال می‌کند و بخش دفن نیز گازهای گلخانه‌ای برای زیرسیستم سوخت جایگزین تولید می‌کند.

۳-۲- نمودار علی معلولی و نمودار انباشت و جریان

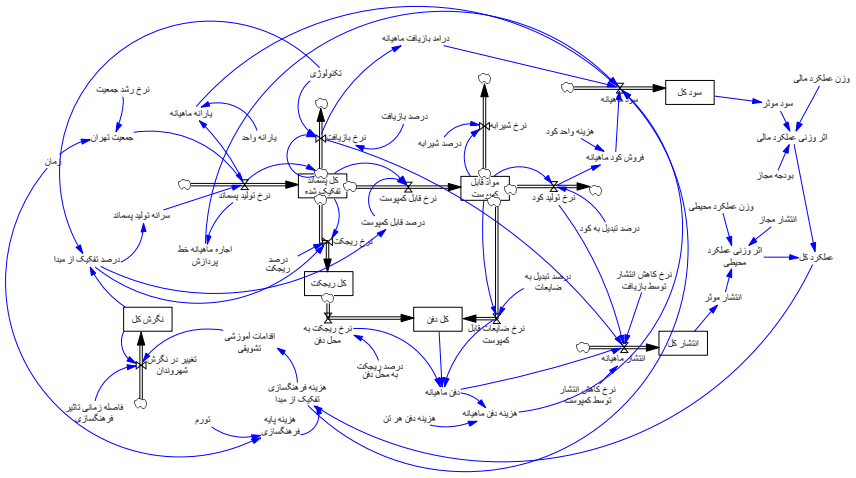
با مشخص شدن فرضیات پویا، حلقه‌های علّت و معلولی مهم رسم می‌شوند. تبیین و ترسیم حلقه‌های علّی و معلولی یک سیستم، یکی از مراحل مهم طراحی و تحلیل سیستم‌های مربوط به پدیده‌ی پویا است. همان‌گونه که قبلاً هم ذکر شد؛ پایایی[1] یک سیستم، می‌تواند بیانگر میزان توانایی یک سیستم در مواجهه با مسائل گوناگون باشد. پایایی ، یک مشخصه‌ی وابسته به زمان است که فقط پس از یک زمان سپری شده قابل تعیین است؛ ولی، در هر زمان، قابل پیش‌بینی است. در ادامه، با استفاده از سیستم‌های پویا، یک سیستم مدیریت پسماند به صورت یک سری روابط علّی و معلولی در آمده و در شکل (۲)، نشان داده شده است. هدف از رسم این شکل علّت و معلولی، ارزیابی، کنترل و در نهایت افزایش پایایی در یک سیستم مدیریت پسماند است. در این شکل، تعاملات

[1] Reliability

علّی و معلولی درون سیستم با در نظر گرفتن جهت و نحوه‌ی تأثیر با علامت‌های + و - مشخص شده است. همان‌گونه که در شکل، مشخص است؛ بین متغیرهای مهم و کلیدی سیستم، روابط علّی و معلولی زیر برقرار است و به دفعات، بین متغیرها، ارتباط رفت و برگشتی صورت می‌گیرد و هر یک از آن‌ها، در کاهش یا افزایش دیگری به صورت پویا و در قالب روابط علّی و معلولی، مؤثر است.



شکل ۲- نمودار علی و معلولی سیستم مدیریت پسماند



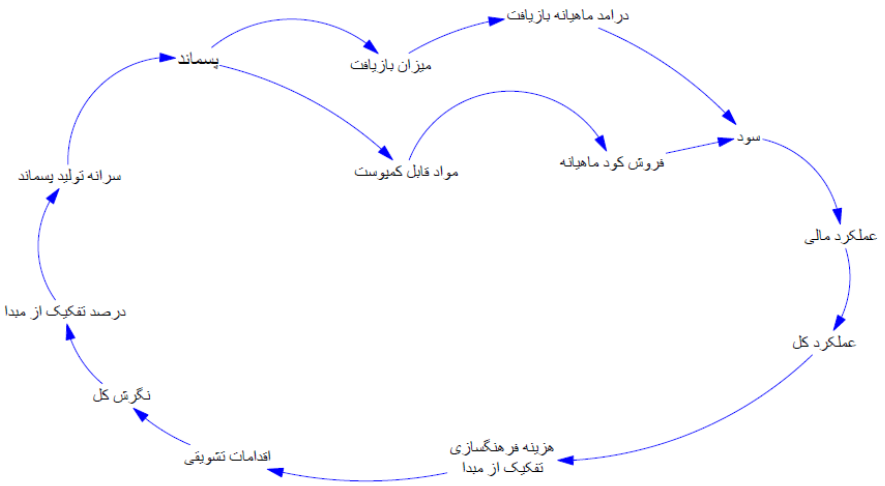
شکل ۳- نمودار انباشت و جریان سیستم مدیریت پسماند

شکل بالا، انباشت جریان سیستم پردازش و دفع پسماند شهر تهران را نشان می‌دهد. برای ارزیابی منطقی شکل انباشت جریان در این مدل از شرح متغیر کلیدی نرخ تولید پسماند، کار آغاز می‌شود. این متغیر به معنای میزان پسماند ورودی به کارخانه پردازش پسماند است که بصورت ماهانه در متغیر کل پسماند تفکیک شده انباشت می‌گردد. متغیر کل پسماند تفکیک شده به معنای تمامی پسماندهای جداسازی شده روی خطوط پردازش پسماند در کارخانه کمپوست شهر تهران است. این پسماندها پس از تفکیک شدن به مواد آلی باارزش، مواد غیرعالی باارزش و مواد مخلوط کم ارزش به سه بخش مختلف کارخانه ارسال می‌شوند که این مواد متغیرهای "نرخ مواد قابل کمپوست"، "نرخ بازیافت" و "نرخ ریجکت" نمایندگی می‌کنند.

در هریک از این بخش‌ها فرآیند متناسب به منظور پردازش صورت گرفته و محصولات بازیافتی و کود فروخته شده و مواد مخلوط کم ارزش به محل دفن زباله ارسال می‌گردد. در مدل بالا، به ازای هر فرایند، متغیر متناظر، تخصیص داده شده است. هزینه، درآمد و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از هر بخش بصورت ماهانه در دو متغیر نرخی به نام‌های "سود ماهیانه" و "انتشار ماهیانه" وارد می‌شود که هریک در متغیری از جنس حالت تجمیع می‌گردد. این متغیرهای حالت در هر دوره زمانی با مقادیر مجاز مد نظر مقایسه شده و در صورت عدم تخطی از مقادیر مجاز، روند فعلی ادامه می‌یابد.

در صورتی که عملکرد مالی و زیست محیطی به عنوان خروجی سیستم پردازش، از مقادیر مجاز بیشتر شوند، مفهوم این است که فرآیند فعلی اثربخشی لازم را نداشته و می‌بایست در سیستم تغییراتی اعمال شود. در این مدل خروجی سیستم که عملکرد کل

است، بصورت بازخور روی ورودی سیستم یعنی نرخ تولید پسماند اثر می‌گذارد و با ایجاد تغییرات در هزینه فرهنگ‌سازی تفکیک از مبدا به اصلاح آن می‌پردازد.



شکل ۴- حلقه بازخوردی در مدل

۳-۳- مفروضات مدلسازی و فرضیه‌های پویا

در این تحقیق مدیریت پسماند خانگی مدلسازی شده که سیستم‌ها و زیرسیستم‌های آن در بخش قبل نشان داده شد.

- جریان پسماند شهری مد نظر در مدل تحقیق حاضر، تنها شامل پسماندهای گردآوری شده از بخش مسکونی بوده و همان زباله‌های خانگی می‌باشند.
- در این مدل فرض بر این است که کلیه پسماند توسط شهرداری جمع‌آوری شده و دفع غیرقانونی وجود ندارد.
- درصد تفکیک از مبدا پسماند خانگی تنها تابع آگاهی و نگرش شهروندان و تکنولوژی بکارگرفته شده در سطل‌های زباله است.
- کلیه هزینه‌ها و و درآمدهای واحد فرآیندهای پردازش و دفع بصورت مقادیر ثابت درمدل فرض شده‌اند و با گذر زمان تغییر نمی‌کنند.
- عملکرد زیست محیطی سیستم، تنها تابع سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای فرض شده و از سایر آلودگی‌ها از جمله آلودگی آب و خاک صرف نظر شده است.
- در محاسبه فاکتورانتشار گازهای گلخانه‌ای ترکیبات مختلف پسماند در هر فرایند، از روش ارزیابی چرخه حیات استفاده شده است. بدین صورت که علاوه بر گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در فرایندهای دفن، بازیافت و کمپوست، گازهای گلخانه‌ای اجتناب شده به واسطه استفاده از زباله‌های بازیابی شده به جای مواد دست اول و کود شیمیایی نیز در محاسبات لحاظ شده‌اند.

همچنین فرضیه‌های پویا در تحقیق حاضر به شرح زیر هستند:

- استفاده از تکنولوژی در تفکیک از مبدا سبب افزایش درصد تفکیک از مبدا پسماندها می‌شود.
- کاهش هزینه‌های پایه فرهنگ‌سازی سبب بهبود در اقدامات تشویقی آموزشی و نگرش کل می‌شود. نگرش کل با ایجاد فرهنگ‌سازی تفکیک از مبدا سبب کاهش هزینه‌ها، افزایش سود و در نتیجه بهبود عملکرد کل می‌شود.
- کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود سبب افزایش سود، کاهش انتشار کل و در نهایت افزایش عملکرد کل می‌شود.
- استفاده از تکنولوژی در بازیافت سبب افزایش درصد بازیافت و درآمد حاصل از بازیافت و در نتیجه افزایش سود کل می‌شود.

- افزایش درصد بازیافت، درصد قابل کمپوست و کاهش درصد ریجکت سبب افزایش سود و کاهش انتشار کل و در نهایت افزایش عملکرد کل می‌شود.
- عملکرد کل بصورت بازخور روی ورودی سیستم یعنی نرخ تولید پسماند اثر می‌گذارد و با ایجاد تغییرات در هزینه فرهنگ‌سازی تفکیک از مبدا به اصلاح آن می‌پردازد.

۳-۴- متغیرهای مدلسازی پویا

متغیرهای مدل تحقیق حاضر به شرح جدول (۲) هستند. در جدول (۲) نام متغیر و واحد آن ذکر شده و همچنین در این بخش رابطه ریاضی جهت محاسبه متغیر در ونسیم نیز ارائه شده است.

جدول ۲- متغیرهای تحقیق

ردیف	نام متغیر	واحد اندازه‌گیری
۱	نرخ تولید پسماند	تن در ماه
۲	جمعیت	نفر
۳	کل پسماند تفکیک شده	تن
۴	نرخ بازیافت	تن در ماه
۵	نرخ تولید کود	تن در ماه
۶	کل دفن	تن
۷	سود ماهیانه	ریال در ماه
۸	اثر وزنی عملکرد مالی	میانگین وزنی
۹	انتشار ماهیانه	تن دی اکسید کربن در ماه
۱۰	اثر وزنی عملکرد محیطی	میانگین وزنی
۱۱	عملکرد کل	مجموع میانگین وزنی
۱۲	هزینه پایه فرهنگ سازی	ریال در ماه
۱۳	هزینه فرهنگ سازی تفکیک از مبدا	ریال در ماه
۱۴	تغییر در نگرش شهروندان	نگرش در ماه
۱۵	نگرش کل	نگرش
۱۶	درامد بازیافت	ریال
۱۷	درصد تفکیک از مبدا	۱ تقسیم بر ماه
۱۸	تکنولوژی	میزان استفاده از تکنولوژی در ماه

در جدول بالا، متغیر " نرخ تولید پسماند" با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\text{waste production rate}=\text{capitation of waste production}\times\text{population} \quad (۱)$$

در رابطه بالا،

waste production rate : نرخ تولید پسماند

capitation of waste production : سرانه تولید پسماند

population : جمعیت

همچنین متغیر جمعیت در هر دوره برابر است با تعداد افراد ساکن در شهر که با فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{population}_t=\text{population}_{t_0}\times(1+\text{population rate})^t \quad (۲)$$

در رابطه بالا،

t: دوره زمانی و t_0 نشان دهنده دوره اول است.

population_t: جمعیت در دوره t

population_{t_0}: جمعیت در دوره اول

population rate: نرخ رشد جمعیت

جهت محاسبه مقدار کل پسماند تفکیک شده، مطابق رابطه (۳) اقدام گردید:

$$\text{Total Separated waste} = \text{waste production rate} - \text{recycled rate} - \text{Compostable rate} - \text{reject rate} \quad (۳)$$

Total Separated waste: کل پسماند بازیافت شده

recycled rate: نرخ بازیافت

Compostable rate : نرخ قابل کمپوست

reject rate: نرخ ریجکت

متغیر "نرخ بازیافت" با استفاده از رابطه ریاضی زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{recycled rate} = \text{tech_rate} \times \text{recycled percentage} \times \text{Total Separated waste} \quad (۴)$$

recycled percentage: درصد بازیافت

tech_rate: درصد استفاده از تکنولوژی

متغیر "نرخ تولید کود" با استفاده از رابطه ریاضی زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Fertilizer production rate} = \text{Percentage of conversion to fertilizer} \times \text{Compostable rate} \quad (۵)$$

Fertilizer production rate : نرخ تولید کود

Percentage of conversion to fertilizer : نرخ تبدیل به کود

متغیر کل دفن با رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$\text{total of diposal} = \text{reject rate} + \text{Compostable rate} \quad (۶)$$

total of diposal : کل دفن

متغیر "سود ماهیانه" با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$\text{Monthly profit} = (ap + as + aid) - (ac + af + acd) \quad (۷)$$

Monthly profit : سود ماهیانه

ap : اجاره ماهیانه خط پردازش

as : یارانه ماهیانه

aid : درآمد بازیافت ماهیانه

ac : هزینه فرهنگ سازی تفکیک از مبدا

af :هزینه کود ماهیانه

acd : هزینه دفن ماهیانه

متغیر "اثر وزنی عملکرد مالی" با رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\text{financial per} = \begin{cases} 0 & \text{if budget} < \text{profit} \\ \dfrac{|\text{profit} - \text{budget}|}{\text{profit}} \times w & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۸)$$

profit: سود موثر

budget : بودجه مجاز

w : وزن عملکرد مالی

محاسبه متغیر انتشار ماهیانه بصورت زیر انجام می گیرد:

$$\text{monthly emission}=(\text{recycled rate}\times\text{R-reduce rate})+(\text{Compostable rate}\times\text{C-reduce rate})+(\text{Monthly disposal}\times\text{D- rate}) \quad (۹)$$

monthly emission : انتشار ماهیانه

R-reduce rate : نرخ کاهش انتشار توسط بازیافت

C-reduce rate : نرخ کاهش انتشار توسط کمپوست

D- rate : نرخ انتشار توسط دفن

جهت محاسبه متغیر اثر وزنی عملکرد زیست محیطی از رابطه (۱۰) استفاده شد:

$$\text{environment per}=\begin{cases}0 & \text{if effective emission}<\text{allowed emission}\\ \dfrac{|\text{effective emission-allowed emission}|}{\text{effective emission}}\times ew & \text{otherwise}\end{cases} \quad (۱۰)$$

environment perpeffective emission : انتشار موثر

allowed emission : انتشار مجاز

ew : وزن عملکرد محیطی

متغیر عملکرد کل از مجموع اثر وزنی عملکرد زیست محیطی و اثر وزنی عملکرد مالی به دست می‌آید.

هزینه پایه فرهنگ سازی با رابطه زیر محاسبه می شود (غفارپناه و همکاران، ۱۳۹۹):

$$\text{The basic cost of culture building}=۵,٤\times۱.۸\times۱.۱^{[\frac{t}{۱۲}]} \quad (۱۱)$$

متغیر هزینه فرهنگ سازی تفکیک از مبدا با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می گردد:

$$\text{cost of culture building}=\text{the basic cost of culture building}\times(۱+\text{performace}) \quad (۱۲)$$

cost of culture building : هزینه فرهنگ سازی تفکیک از مبدا

the basic cost of culture building : هزینه پایه فرهنگ سازی

performace : عملکرد کل

- نحوه محاسبه متغیر تغییر در نگرش شهروندان از طریق میزان اقدامات آموزشی و تشویقی اندازه‌گیری می‌شود.
- نگرش کل نیز مجموع متغیر تغییر در نگرش شهروندان است.
- متغیر درآمد بازیافت بصورت تابع look up تعریف شده که تابعی از نرخ بازیافت است.
- متغیر درصد تفکیک از مبدا بصورت تابع look up تعریف شده که تابعی از نگرش کل است.

همچنین مقادیر پارامترهای ثابت مدل در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مدل

پارامتر	مقدار	واحد	پارامتر	مقدار	واحد
یارانه واحد	۱۱۰۰۰۰	تومان/تن	درصد تبدیل به کود	۰/۲۹۸	۱/ماه
درامد واحد اجاره خط پردازش	۵۰۰۰۰۰	تومان/تن	درصد تبدیل به ضایعات	۰/۱۸۵	۱/ماه
هزینه واحد کود	۴۰۰۰۰۰	تومان/تن	نرخ کاهش انتشار بازیافت	۱/۰۲	TonCO2/ton
هزینه دفن هر تن پسماند	۱۵۰۰۰۰	تومان/تن	نرخ انتشار دفن	۰/۷۱	TonCO2/ton
فاصله زمانی تاثیر گذاری فرهنگ‌سازی	۲	ماه	نرخ کاهش انتشار توسط کمپوست	۰/۰۱۲	TonCO2/ton
درصد بازیافت	۰/۰۲	۱/ماه	وزن عملکرد مالی	۰/۶	dmnl
درصد کمپوست	۰/۶	۱/ماه	وزن عملکرد محیطی	۰/۴	dmnl
درصد ریجکت	۰/۳۸	۱/ماه	تورم	۰/۳	dmnl
درصد شیرابه	۰/۵۱۷	۱/ماه	تکنولوژی	۳۰	درصد

۴- نتایج محاسباتی

در بخش قبل، مدلی پویا برای یک سیستم مدیریت پسماند در شهر تهران طراحی شد. در این بخش، به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از اجرای مدل و اعتبارسنجی مدل پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که مدلسازی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار ونسیم DSS.64 صورت گرفته و برای آزمون مدل، علاوه بر تایید متخصصان و خبرگان از آزمون‌های اعتبار ساختاری و رفتاری شامل آزمون سازگاری ساختار و ابعاد مدل، آزمون خطای انتگرال گیری، آزمون شرایط حدی و آزمون بازتولید رفتار استفاده شده است. همچنین تحلیل حساسیت پارامترهای مدل برای تعیین پایداری مدل انجام شده است.

۴-۱- اجرای مدل شبیه‌سازی

مدل شبیه‌سازی شده، پس از طراحی به اجرا در می‌آید. این شبیه‌سازی، در افق زمانی دو ساله به اجرا در آمده است. در بخش قبل، متغیرها و نحوه محاسبه آنها شرح داده شد. همچنین در مدل مقادیر ثابت نیز وجود دارند که مقادیر آنها نیز ارائه شد.

ابتدا، اعتبار ساختاری مدل با نظرسنجی از متخصصان و خبرگان مدیریت پسماند شهر تهران و براساس نتایج آزمون‌های سازگاری ابعاد و مدل بررسی و تایید شد؛ و همچنین شبیه‌سازی اولیه در محیط نرم افزار ونسیم صورت گرفت.

۴-۲- ارزیابی پایایی مدل

جهت ارزیابی پایایی و اعتبار مدل، داده‌های مربوط به مدیریت پسماند شهر تهران طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ به نرم افزار وارد شده و مدل اجرا گردید. سپس با اجرای آزمون رفتار بازتولید شده، رفتار حاصل از شبیه‌سازی متغیرهای اصلی با رفتار مرجع آنها مقایسه گردید و شاخص RMSPE[1] با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید.

$$RMSPE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left(\frac{s_t-a_t}{a_t}\right)^2} \quad (۱۳)$$

در رابطه بالا:

n: تعداد دوره زمانی

s_t: نتایج شبیه سازی در زمان t

a_t: رفتار مرجع یا مقادیر واقعی در زمان t

جهت تایید مدل، مقدار شاخص RMSPE باید کمتر از ۰.۱ باشد. برای بررسی اعتبار مدل، مقادیر متغیر نرخ تولید پسماند برای سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ در نظر گرفته شد.

[1] Root Mean Square Percentage Error

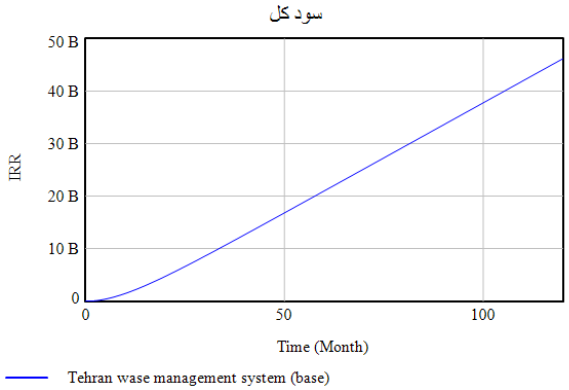
جدول ۴- نتایج بررسی اعتبار مدل با توجه به مقادیر متغیر "نرخ تولید پسماند"

سال	نتایج مدل شبیه‌سازی S_t	رفتار مرجع a_t	مقدار $(\frac{S_t-a_t}{a_t})^2$
۱۳۹۰	۷۶۶۸۱۸	794965	0/0013
۱۳۹۱	۷۹۰۱۳۴	819192	0/0013
۱۳۹۲	۷۹۸۹۶۰	820230	0/0007
۱۳۹۳	۸۱۲۳۴۶	841480	0/0012
۱۳۹۴	۸۳۲۳۷۰	858694	0/0009
۱۳۹۵	۸۳۸۴۰۱	859376	0/0006
۱۳۹۶	۸۴۰۲۱۰	862995	0/0007
۱۳۹۷	۸۴۳۹۳۴	869403	0/0009
۱۳۹۸	۸۶۵۴۹۰	895065	0/0011
۱۳۹۹	۸۹۴۳۸۰	924029	0/0010

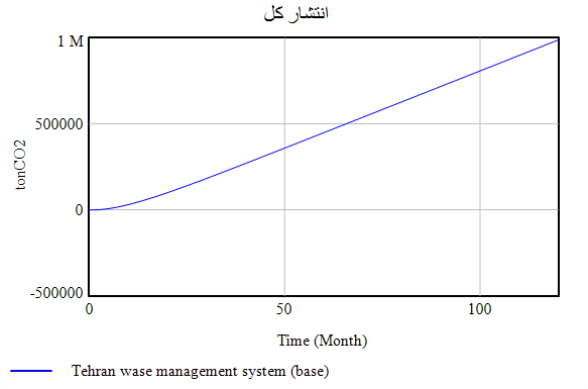
مقدار کل شاخص نیز مطابق با رابطه (۱۳) برابر با ۰/۰۹۸ که کمتر از ۰/۱ بوده و نشان دهنده تایید اعتبار رفتاری مدل شبیه‌سازی شده در محیط نرم افزار ونسیم است.

۴-۳- بررسی رفتار و عملکرد سیستم مدیریت پسماند موجود

مدل شبیه‌سازی سیستم مدیریت پسماند براساس داده‌های ماهیانه طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹، اجرا و رفتار متغیرهای کلیدی سیستم، جهت ارزیابی عملکرد سیستم مدیریت پسماند، بررسی شد.



شکل ۵- تغییرات رفتار متغیر سود کل



شکل ۶- تغییرات رفتار متغیر انتشار کل

شکل (۵) و شکل (۶) تغییرات رفتار دو متغیر هدف که سود کل و انتشار کل هستند را نشان می‌دهند. از نظر مدیران سازمان مدیریت پسماند، متغیر "سود" مهمترین متغیر است. متغیر "سود" نشان دهنده میزان سوددهی سازمان از سیستم مدیریت پسماند است و سود و زیان سازمان را در فرایندهای مدیریت پسماند مدیریت می‌کند. لذا این متغیر (سود) مشخص می‌کند که سیستم مدیریت پسماند کارا است یا خیر و به مدیران در تصمیم‌گیرها و اتخاذ استراتژی‌های مدیریت پسماند، کمک می‌کند.

همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، سود روند افزایشی داشته و می‌توان سیستم مدیریت پسماند را از لحاظ اقتصادی، مثبت ارزیابی کرد. در شکل (۵) مشاهده می‌شود که شیب افزایش سود، تند بوده و نشان دهنده این است که هزینه‌های سیستم توانایی غلبه بر افزایش سود را ندارند.

یکی دیگر از متغیرهای کلیدی در سیستم مدیریت پسماند، میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای است. در نمودار (۶)، رفتار این متغیر در ۱۲۰ ماه (ماهها طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، رفتار این متغیر نیز افزایشی است.

متغیر انتشار گازهای گلخانه‌ای، یکی از متغیرهای کلیدی در ارزیابی عملکرد سیستم مدیریت پسماند است. این متغیر برایند گازهای گلخانه‌ای منتشر شده حاصل از دفن پسماندها و گازهای گلخانه‌ای اجتناب شده توسط فرایندهای کمپوست و بازیافت می‌باشد. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، با شروع زمان شبیه‌سازی، این متغیر روند افزایشی داشته و تا پایان شبیه‌سازی در حال افزایش است. رفتار افزایشی این متغیر نشان دهنده تجمیع گازهای گلخانه‌ای ناشی از دوره‌های زمانی پیاپی میباشد.

برخلاف متغیر سود که نشان دهنده شرایط مناسب سیستم از لحاظ اقتصادی است، رفتار متغیر انتشار گازهای گلخانه‌ای، نمایانگر ضعف سیستم مدیریت پسماند فعلی شهر تهران از نظر اثرات محیطی می‌باشد. رفتار افزایشی متغیر انتشار گازهای گلخانه‌ای در شکل (۶) نشان دهنده این است که گازهای گلخانه‌ای منتشر شده حاصل از دفن پسماندها بیشتر از گازهای گلخانه‌ای اجتناب شده توسط فرایندهای کمپوست و بازیافت می‌باشد. مطابق شکل (۶) نشان می‌دهد که میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در سال پنجم به بیش از ۵۰۰ هزار تن و در پایان سال دهم به یک میلیون تن رسیده است.

۴-۴- تحلیل حساسیت

در این بخش حساسیت مدل در مقابل تغییر پارامترهای مدل بررسی گردیده است. تحلیل حساسیت کمک می‌کند تا پارامترهایی که سبب تغییر رفتار مدل شده و بر متغیرهای تاثیر گذار هستند، شناسایی شوند. شناسایی این متغیرها، می‌تواند به مدیران سازمان مدیریت پسماند شهر تهران کمک کند تا راه‌حل و سیاست مناسب جهت افزایش عملکرد سیستم اتخاذ نمایند.

همانطور که در شکل (۳) یعنی مدل تحقیق مشاهده می‌شود، نرخ تولید پسماند، تحت تاثیر جمعیت، یارانه و سرانه تولید پسماند می‌باشد. از طرفی سرانه تولید پسماند نیز تحت تاثیر نگرش کل است. متغیر نگرش کل، تحت تاثیر اقدامات آموزشی تشویقی و فاصله زمانی تاثیر فرهنگسازی می‌باشد.

پسماند تولید شده کل به بخشهای بازیافت، دفن و تولید کود ارسال شده و نرخ هر کدام از این بخشها نیز بصورت پارامترهای ثابت مدل در نظر گرفته شده است. روابط بین متغیرهای مختلف مدل نشان می‌دهد که هر رفتار هر کدام از متغیرها بر سایرین تاثیر گذاشته و در نهایت سود و میزان انتشار کل و در نتیجه عملکرد کل سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهند. همچنین عملکرد کل نیز بر هزینه فرهنگسازی تفکیک از مبدا تاثیر گذاشته و در صورت افزایش عملکرد، مقادیر سایر متغیرها بهبود یافته و مجددا منجر به بهبود عملکرد سیستم مدیریت پسماند می‌شوند.

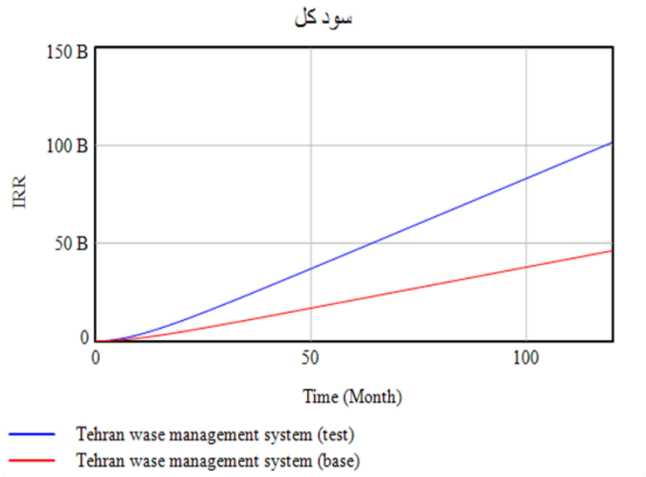
با توجه به اینکه عملکرد محیطی سیستم مدیریت پسماند فعلی، دارای ضعف بوده و انتشار گازهای آلاینده منفی ارزیابی شده است، در این بخش با تغییر مقادیر متغیرها، تغییر رفتار مدل بررسی می‌شود.

در این بخش تاثیر پارامترهای زیر را بررسی می‌کنیم؛ لازم به ذکر است که انتخاب پارامترها براساس میزان کنترل سیستم بر تغییر آنها صورت گرفته است. بعنوان مثال نرخ تورم، نرخ جمعیت، یارانه واحد و پارامترهایی از این قبیل، در کنترل مدیران سازمان‌ها نبوده و در سیاست‌گذاری نمی‌توانند دخیل باشند. از طرفی پارامترهای مربوط به نگرش کل (هزینه پایه فرهنگ‌سازی)، تکنولوژی، درصد بازیافت، درصد کمپوست، درصد ریجکت، درصد تبدیل به کود، درصد تبدیل به ضایعات، می‌توانند در سازمان طی برخی سیاست‌گذاری‌ها تغییر کنند و در این تحقیق حساسیت رفتار مدل در قابل این پارامترها بررسی شده است.

جدول ۵- مقادیر پارامترهای مدل

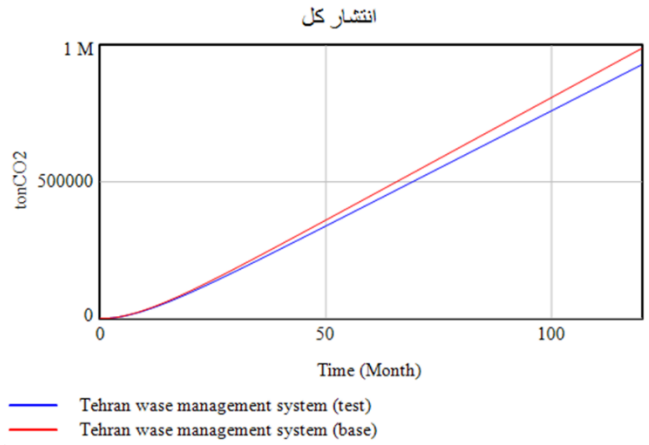
پارامتر	مقدار	مقدار جدید
هزینه پایه فرهنگ‌سازی	$۵.۴ \times ۱۰^{۸} \times ۱.۱^{t}$	$۴ \times ۱۰^{۸} \times ۱.۱^{t}$
تکنولوژی	۰/۰۲	۰/۰۳
درصد کمپوست	۳۰	۷۰
درصد ریجکت	۰/۳۸	۰/۳
درصد شیرابه	۰/۵۱۷	۰/۵۱۵
درصد تبدیل به کود	۰/۲۹۸	۰/۴۱۵
درصد تبدیل به ضایعات	۰/۱۸۵	۰/۰۷

مقادیر جدید پارامترها در جدول بالا ارائه شده است، این مقادیر براساس نظر مدیران سازمان مدیریت پسماند و براساس امکان‌پذیری ایجاد تغییر در آنها تعیین گردیده است. در ادامه، با تغییر مقادیر پارامترها در مدل شبیه‌سازی و اجرای مدل، با رسم نمودارهای مربوطه، تغییر رفتار سود و انتشار کل را بررسی کرده‌ایم.



شکل ۷- بررسی رفتار متغیر سود در مدل با کاهش هزینه پایه فرهنگ‌سازی

در شکل (۷) مشاهده می‌شود که با کاهش هزینه پایه فرهنگ‌سازی، مقدار سود نسبت به حالت پایه افزایش یافته است. دراین حالت نیز مانند حالت پایه، رفتار سود، افزایشی می‌باشد.

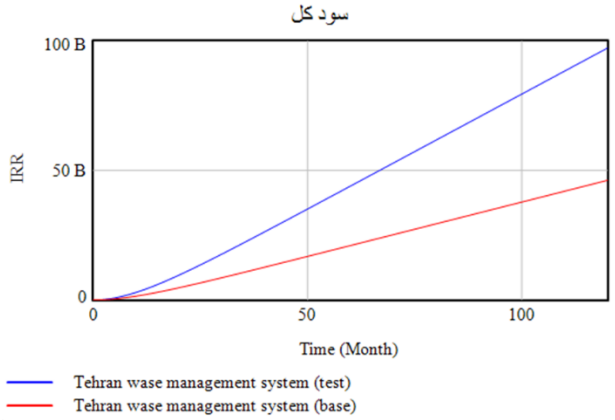


شکل ۸- بررسی رفتار متغیر انتشار کل با کاهش هزینه پایه فرهنگ‌سازی

در شکل (۸) مشاهده می‌شود که با کاهش هزینه پایه فرهنگ‌سازی، مقدار انتشار کل مانند حالت پایه رفتار افزایشی دارد، اما نسبت به حالت پایه کاهش یافته و تاثیر کاهش این هزینه بر انتشار کل رضایت‌بخش است. از طرفی در این نمودار مشاهده می‌شود، انتشار کل در ماه‌های اولیه، بدون تغییر بوده و یا کاهش کمی در مقابل حالت پایه دارد. اما با گذشت زمان، میزان کاهش انتشار کل بیشتر شده و اختلاف دئ نمودار قابل مشاهده است.

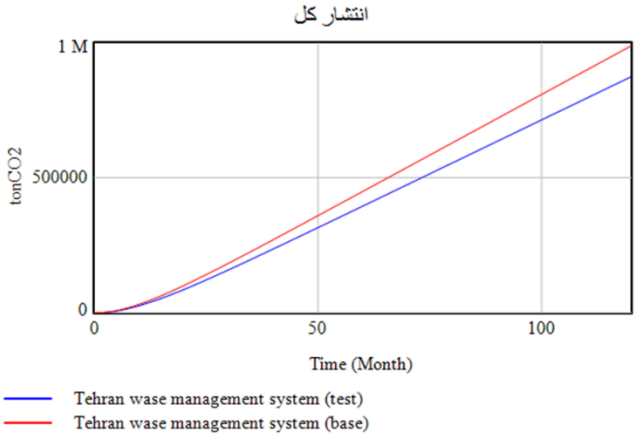
دلیل این تاثیر و رفتار این است که کاهش هزینه پایه فرهنگ‌سازی، در ابتدا باعث افزایش سود و در نتیجه افزایش عملکرد کل در دوره‌های بعدی می‌گردد. از طرفی، عملکرد کل بر هزینه‌های فرهنگ‌سازی تفکیک از مبدا تاثیر دارد و سبب بهبود برنامه‌های تشویقی و بهبود نگرش افراد خواهد شد. بهبود نگرش افراد نیز بر نگرش کل تاثیر گذاشته و الگوهای مصرفی و بهبود شرایط تفکیک از مبدا می‌گردد. از طرفی درصد تفکیک از مبدا بر درصد قابل کمپوست و نرخ ریجکت تاثیر گذاشته و درصد قابل کمپوست و نرخ ریجکت نیز بر کل دفن اثر می‌گذارند و در نهایت کل دفن بر انتشار ماهیانه و انتشار کل.

حال این تاثیرات در دوره‌های اول، کمتر بوده و در دوره‌های بعدی تاثیر خود را بیشتر نشان می‌دهد، زیرا که با گذشت هر ماه، افزایش سود و عملکرد کل، تاثیرات بیشتری بر نگرش کل و کاهش انتشار خواهند داشت و این اثر تقویت می‌گردد.



شکل ۹- بررسی رفتار متغیر سود در مدل با افزایش درصد بازیافت، کمپوست و کاهش درصد ریجکت

در شکل (۹) مشاهده می‌شود که با افزایش درصد بازیافت، کمپوست و کاهش درصد ریجکت، مقدار سود نسبت به حالت پایه افزایش یافته است. دراین حالت نیز مانند حالت پایه، رفتار سود، افزایشی می‌باشد. در واقع افزایش درصد بازیافت، کمپوست و کاهش درصد ریجکت سبب بالا رفتن درامد بازیافت و درامد حاصل از فروش کود و در نتیجه افزایش سود می‌شود.

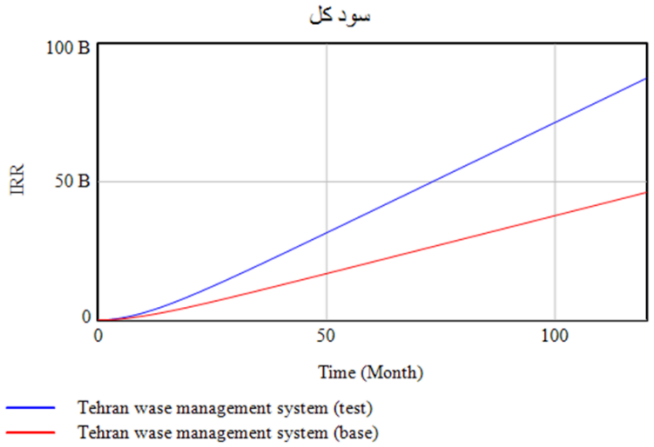


شکل ۱۰- بررسی رفتار متغیر انتشار کل با افزایش درصد بازیافت با افزایش درصد تکنولوژی، کمپوست و کاهش درصد ریجکت

در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که با افزایش درصد تکنولوژی و در نتیجه درصد بازیافت، کمپوست و کاهش درصد ریجکت، مقدار انتشار کل مانند حالت پایه رفتار افزایشی دارد، اما نسبت به حالت پایه کاهش یافته و تاثیر کاهش این هزینه بر انتشار کل رضایت‌بخش است. از طرفی در این نمودار مشاهده می‌شود، بر خلاف تاثیر کاهش هزینه‌های فرهنگسازی، کاهش انتشار کل از ماه‌های اولیه، قابل مشاهده است. دلیل این تاثیر کاملا واضح است و با افزایش تکنولوژی (در نتیجه افزایش درصد بازیافت)، کمپوست و کاهش درصد ریجکت، اجتناب از انتشار گازها بر اثر بازیافت و کمپوست بیشتر شده و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از دفن نیز کاهش یافته و برایند کل یا همان انتشار کل کاهش می‌یابد.

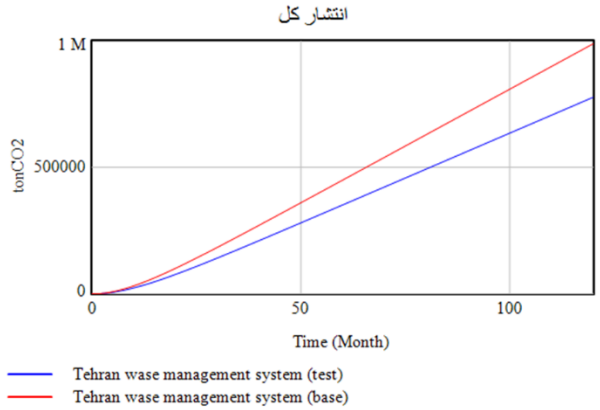
از طرفی، افزایش درصد تکنولوژی، کمپوست و کاهش درصد ریجکت، سبب بالا رفتن سود و کاهش انتشار گازها و در نتیجه افزایش عملکرد می‌گردد. همانطور که قبلا شرح داده شد، افزایش عملکرد سبب بهبود نگرش کل گردیده و در دوره‌های بعد

(ماه‌های بعد) اثر مثبت افزایش عملکرد نیز به افزایش درصد بازیافت و در نتیجه بهبود اقتصادی و محیطی و در نهایت بهبود عملکرد کل می‌شود.



شکل ۱۱- بررسی رفتار متغیر سود در مدل با کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود

در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که با کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود، مقدار سود نسبت به حالت پایه افزایش یافته است. دراین حالت نیز مانند حالت پایه، رفتار سود، افزایشی می‌باشد. در واقع کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود سبب بالا رفتن درامد حاصل از فروش کود و در نتیجه افزایش سود می‌شود. مشاهده میشود که افزایش سود با کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود نسبت به افزایش سود بر اثر افزایش درصد بازیافت، کمپوست و کاهش درصد ریجکت، کمتر است.



شکل ۱۲- بررسی رفتار متغیر انتشار کل با کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود

در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که با کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود، مقدار انتشار کل مانند حالت پایه رفتار افزایشی دارد، اما نسبت به حالت پایه کاهش یافته و تاثیر کاهش این هزینه بر انتشار کل رضایت‌بخش است. از طرفی در این نمودار مشاهده می‌شود، بر خلاف تاثیر کاهش هزینه‌های فرهنگسازی، کاهش انتشار کل از ماه¬های اولیه، قابل مشاهده است. دلیل این تاثیر کاملا واضح است و با کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود، اجتناب از انتشار گازها بر اثر بازیافت و کمپوست بیشتر شده و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از دفن نیز کاهش یافته و برایند کل یا همان انتشار کل کاهش می‌یابد.

از طرفی، مانند افزایش درصد بازیافت، کمپوست و کاهش درصد ریجکت، کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود نیز سبب بالا سود و کاهش انتشار گازها و در نتیجه افزایش عملکرد می‌گردد. همانطور که قبلا شرح داده شد، افزایش عملکرد سبب بهبود نگرش کل گردیده و در دوره‌های بعد (ماه‌های بعد) اثر مثبت افزایش عملکرد نیز به افزایش درصد بازیافت و در نتیجه بهبود اقتصادی و محیطی و در نهایت بهبود عملکرد کل می‌شود.

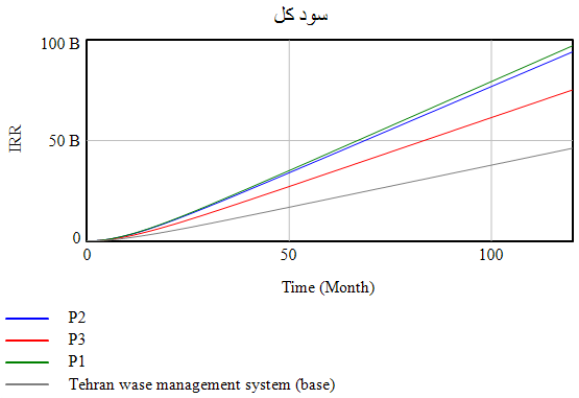
۴-۵- سیاستگذاری جهت بهبود سیستم مدیریت پسماند در شهر تهران

در بخش قبل با استفاده از ابزار تحلیل حساسیت، رفتار مدل را با تغییر پارامترها بررسی کردیم. نتایج تحلیل حساسیت را در اختیار مدیران سازمان مدیریت پسماند شهر تهران قرار داده و از انها در خواست شد، سیاست‌های احتمالی جهت بهبود عملکرد سیستم مدیریت پسماند را مطرح کرده و آن سیاست‌ها بررسی و بهترین سیاست انتخاب گردید.

جدول ۶- سیاست‌های پیشنهادی براساس نتایج تحلیل حساسیت جهت بهبود سیستم مدیریت پسماند

شماره سیاست	عنوان سیاست	دلایل انتخاب سیاست	پارامترهای مربوطه	توضیحات
P1	بهبود ارتباط با جامعه و فرهنگ‌سازی با هزینه‌های کمتر	تاثیر کاهش هزینه پایه فرهنگ‌سازی بر افزایش نگرش کل و تاثیر رضایت بخش بر سود و انتشار کل	هزینه پایه فرهنگ‌سازی	بهبود ارتباط با جامعه در راستای فرهنگ‌سازی می‌باشد. از طرفی کاهش هزینه پایه فرهنگ‌سازی مد نظر است و لذا این سیاست به دنبال تشکیل تیم فرهنگ‌سازی متشکل از افراد داوطلب و همچنین استفاده از کانال‌های علاقه‌مند به محیط زیست جهت اطلاع رسانی با کمترین هزینه می‌باشد.
P2	استفاده از تکنولوژی جدید انقلاب صنعتی چهارم جهت تفکیک در مبدا و بازیافت	تاثیرات افزایش درصد بازیافت، درصد قابل کمپوست و کاهش درصد ریجکت بر افزایش سود و کاهش انتشار کل و در نهایت افزایش عملکرد کل	درصد بازیافت، درصد قابل کمپوست و درصد ریجکت	تغییر در پارامترهای مذکور، نیازمند تغییر در خطوط پردازش پسماند بوده و این سیاست به "اصلاح خطوط پردازش پسماند" می‌پردازد.
P3	احداث کارخانه هاضم بی هوازی	تاثیر کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود بر افزایش سود، کاهش انتشار کل و در نهایت افزایش عملکرد کل	درصد شیرابه، درصد تبدیل به ضایعات و درصد تبدیل به کود	جهت کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود، کارشناسان، احداث کارخانه هاضم بی هوازی را بعنوان راه حل پیشنهاد کرده‌اند.

در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) رفتار سود و انتشار کل، در نتیجه رفتار عملکرد، در نتیجه اعمال هر سیاست‌ها در کنار یکدیگر جهت مقایسه و انتخاب بهترین سیاست بررسی شده است.

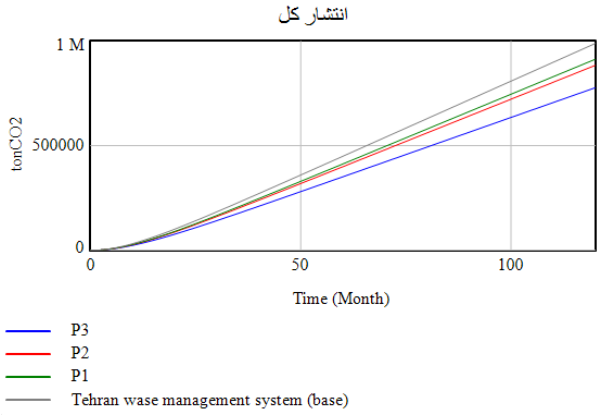


شکل ۱۳- بررسی رفتار متغیر سود پس از اعمال سیاست‌های مختلف

در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که سیاست اول، بیشتر از سیاست‌های دوم و سوم سبب افزایش سود شده است. با بررسی رفتار سود در مقابل اعمال سیاست‌های مختلف، می‌توان گفت، " بهبود ارتباط با جامعه و فرهنگ‌سازی با هزینه‌های کمتر" بیشترین تاثیر را بر افزایش سود دارد. از طرفی، سیاست " استفاده از تکنولوژی‌های انقلاب صنعتی چهارم جهت تفکیک در مبدا و بازیافت " در رتبه

دوم از منظر تاثیر بر افزایش سود را دارد. همچنین میزان سود در نتیجه اعمال سیاست " احداث کارخانه هاضم بی هوازی" از حالت کنونی سیستم مدیریت پسماند بهتر بوده و در میان دو سیاست دیگر در رتبه سوم قرار دارد.

به نظر می‌رسد، سیاست‌های دوم و سوم، نیازمند صرف هزینه بوده و سیاست اول، کاهش هزینه پایه فرهنگ‌سازی است. لذا با وجود اینکه هر سه سیاست، تاثیرات مثبت بر سود دارند، هزینه سیاست اول کمتر بوده و بیشترین تاثیر را بر افزایش سود دارد. می-توان گفت از منظر رفتار سود، سیاست " بهبود ارتباط با جامعه و فرهنگ‌سازی با هزینه‌های کمتر" بهترین سیاست می‌باشد.



شکل ۱۴- بررسی رفتار متغیر انتشار کل پس از اعمال سیاست‌های مختلف

در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که سیاست سوم، بیشتر از سیاست‌های اول و دوم سبب کاهش انتشار کل و افزایش عملکرد کل شده است. با بررسی رفتار انتشار کل در مقابل اعمال سیاست‌های مختلف، می‌توان گفت، " احداث کارخانه هاضم بی هوازی" بیشترین تاثیر را بر کاهش انتشار کل دارد. از طرفی، سیاست " استفاده از تکنولوژی‌های انقلاب صنعتی چهارم جهت تفکیک در مبدا و بازیافت " در رتبه دوم از منظر تاثیر بر کاهش انتشار کل را دارد. همچنین میزان کاهش انتشار کل در نتیجه اعمال سیاست " بهبود ارتباط با جامعه و فرهنگسازی با هزینه‌های کمتر" از حالت کنونی سیستم مدیریت پسماند بهتر بوده و در میان دو سیاست دیگر در رتبه سوم قرار دارد. می‌توان گفت از منظر رفتار انتشار کل، سیاست احداث کارخانه هاضم بی هوازی" بهترین سیاست می‌باشد.

۵- جمع‌بندی و پیشنهادات

در این مقاله به مدلسازی پویا سیستم مدیریت پسماند زباله‌های شهری در شهر تهران پرداخته شد. در این راستا، ابتدا با بررسی و مطالعه سیستم مدیریت پسماند شهر تهران و گفتگو با مدیران و کارشناسان سازمان، متغیرهای موثر در مدل و فرایند مدیریت پسماند شهری شناسایی و مدل پویا اولیه طراحی گردید. پس از طراحی مدل پویا مدیریت پسماند در محیط نرم افزار ونسیم، از نظر ساختاری و رفتاری، اعتبار مدل ارزیابی گردید. پس از تایید اعتبار مدل، رفتار مدل برای سیستم موجود بررسی و عملکرد سیستم مدیریت پسماند در شهر تهران ارزیابی گردید. سپس با آنالیز حساسیت، تاثیر پارامترهای مدل بر عملکرد سیستم بررسی و براساس این نتایج، سه سناریو یا سیاست تعیین شد. در نهایت، عملکرد سیستم برای هر سیاست بررسی و بهترین سیاست انتخاب گردید.

نتایج این تحقیق بطور کلی به شرح زیر می‌باشند:

- در سیستم فعلی مدیریت پسماند شهر تهران، سود روند افزایشی داشته و سیستم مدیریت پسماند از لحاظ اقتصادی، مثبت ارزیابی شد. از طرفی، رفتار متغیر انتشار گازهای گلخانه‌ای، نمایانگر ضعف سیستم از نظر اثرات محیطی می‌باشد. رفتار افزایشی متغیر انتشار گازهای گلخانه‌ای نشان دهنده این است که گازهای گلخانه‌ای منتشر شده حاصل از دفن پسماندها بیشتر از گازهای گلخانه‌ای اجتناب شده توسط فرایندهای کمپوست و بازیافت می‌باشد.
- کاهش هزینه پایه فرهنگ‌سازی، مقدار سود نسبت به حالت پایه افزایش یافته است و با تغییر این پارامتر، رفتار سود همچنان افزایشی است.

- کاهش هزینه پایه فرهنگ‌سازی، مقدار انتشار کل مانند حالت پایه رفتار افزایشی دارد، اما نسبت به حالت پایه کاهش یافته و تاثیر کاهش این هزینه بر انتشار کل رضایت‌بخش است.
- کاهش هزینه پایه فرهنگ‌سازی، در ابتدا باعث افزایش سود و در نتیجه افزایش عملکرد کل در دوره‌های بعدی می‌گردد. از طرفی، عملکرد کل بر هزینه‌های فرهنگ سازی تفکیک از مبدا تاثیر دارد و سبب بهبود برنامه‌های تشویقی و بهبود نگرش افراد خواهد شد. بهبود نگرش افراد نیز بر نگرش کل تاثیر گذاشته و الگوهای مصرفی و بهبود شرایط تفکیک از مبدا می‌گردد. از طرفی درصد تفکیک از مبدا بر درصد قابل کمپوست و نرخ ریجکت تاثیر گذاشته و درصد قابل کمپوست و نرخ ریجکت نیز بر کل دفن اثر می‌گذارند و در نهایت کل دفن بر انتشار ماهیانه و انتشار کل تاثیر می‌گذارد.
- افزایش درصد بازیافت، کمپوست و کاهش درصد ریجکت سبب بالا رفتن درامد بازیافت و درامد حاصل از فروش کود و در نتیجه افزایش سود می‌شود.
- افزایش درصد بازیافت، کمپوست و کاهش درصد ریجکت، سبب افزایش اجتناب از انتشار گازها بر اثر بازیافت و کمپوست و کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از دفن شده و در نتیجه برایند کل یا همان انتشار کل کاهش می‌یابد.
- افزایش درصد بازیافت، کمپوست و کاهش درصد ریجکت، سبب بالا رفتن سود و کاهش انتشار گازها و در نتیجه افزایش عملکرد می‌گردد.
- افزایش عملکرد سبب بهبود نگرش کل گردیده و در دوره‌های بعد (ماههای بعد) اثر مثبت افزایش عملکرد نیز به افزایش درصد بازیافت و در نتیجه بهبود اقتصادی و محیطی و در نهایت بهبود عملکرد کل می‌شود.
- کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود سبب بالا رفتن درامد حاصل از فروش کود و در نتیجه افزایش سود می‌شود. همچنین، افزایش سود با کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود نسبت به افزایش سود بر اثر افزایش درصد بازیافت، کمپوست و کاهش درصد ریجکت، کمتر است.
- با کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود، اجتناب از انتشار گازها بر اثر بازیافت و کمپوست بیشتر شده و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از دفن نیز کاهش یافته و برایند کل یا همان انتشار کل کاهش می‌یابد.
- از منظر سود، بهترین سیاست کاهش هزینه پایه فرهنگ‌سازی و بهبود ارتباط با جامعه در راستای فرهنگ‌سازی می‌باشد.
- از منظر اثرات محیطی، بهترین سیاست، کاهش درصد شیرابه، کاهش درصد تبدیل به ضایعات و افزایش درصد تبدیل به کود، با استفاده از احداث کارخانه هاضم بی هوازی می‌باشد.

براساس نتایج تحقیق، پیشنهادات کاربردی زیر ارائه می‌شود:

- با توجه رفتار انتشار کل و تاثیرات محیطی منفی، به مدیران سازمان پیشنهاد می‌شود، در راستای بهبود عملکرد محیطی سیستم، برنامه‌ریزی مناسب کرده و با بودجه‌بندی بهینه، اقدامات آموزشی مناسب جهت اصلاح فرهنگ مصرف مردم جامعه و بهبود نگرش آنها را در صدر برنامه‌های خود قرار دهند.
- همچنین مدیران می‌توانند با اصلاح خط پردازش پسماند با تکنولوژی‌های انقلاب صنعتی چهارم و احداث کارخانه بی هوازی در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای گام بردارند.
- به مدیران سازمان مدیریت پسماند پیشنهاد می‌شود از تکنولوژی‌های نوین مانند اینترنت اشیاء، RFID و ... جهت مدیریت پسماند استفاده کرده و سیستم سنتی را به سیستم هوشمند تبدیل نمایند. استفاده از تکنولوژی‌های انقلاب صنعتی چهارم، هزینه‌های گرداوری پسماند، حمل و نقل، جداسازی و تفکیک را کاهش داده و سبب افزایش سود و افزایش عملکرد می‌گردد.

- به مدیران پیشنهاد می‌شود، به جای اجرای یکی از سیاست‌های پیشنهادی، ترکیبی از آن‌ها را انتخاب و اجرا نمایند.

۶- منابع

1. Nikzamir, M., baradaran, V., Panahi, Y. (2021). A Supply Chain Network Design for Managing Hospital Solid Waste. *Industrial Management Studies*, 19(60), 85-120. doi: 10.22054/jims.2021.40574.2283

2. Ferronato, N., Alarcón, G. P. P., Lizarazu, E. G. G., & Torretta, V. (2020). Assessment of municipal solid waste collection in Bolivia: Perspectives for avoiding uncontrolled disposal and boosting waste recycling options, Resources, Conservation and Recycling, 105234.

3. Ghatak, Tapas. (2016). Municipal Solid Waste Management in India: A Few Unaddressed Issues. Procedia Environmental Sciences. 35. 169-175. 10.1016/j.proenv.2016.07.071.

4. Andersson, Camilla & Stage, Jesper. (2018). Direct and indirect effects of waste management policies on household waste behaviour: The case of Sweden. Waste Management. 76. 10.1016/j.wasman.2018.03.038.

5. Schwab K (2015) The fourth industrial revolution. What it means and how to respond. Foreign Affairs. Available at: https://www.foreignaffairs.com/ articles/2015-12-12/fourth-industrial-revolution

6. Di Nola, M.F., Escapa, M., P. Ansah, J. (2018). Modelling solid waste management solutions: The case of Campania, Italy. Waste Management, Volume 78, August 2018, Pages 717-729.

7. Xiao, SH., Dong, H., Geng, Y., Brander, M. (2018). An overview of China's recyclable waste recycling and recommendations for integrated solutions. Resources, Conservation & Recycling 134 (2018) 112–120.

8. Šomplák, R., Pavlas, M., Nevrlý, V., Touš, M., Popela, P. (2019). Contribution to Global Warming Potential by waste producers: Identification by reverse logistic modelling. Journal of Cleaner Production, Volume 208, 20 January 2019, Pages 1294-1303.

9. Vander Werff, E., Vrieling, L., Zuijlen, B.V., Worrell, E. (2019). Waste minimization by households–A unique informational strategy in the Netherlands. Resources, Conservation & Recycling 144 (2019) 256–266.

10. Zhang, ZH., Zhao, L. (2019). Voluntary monitoring of households in waste disposal: An application of the institutional analysis and development framework. Resources, Conservation & Recycling 143 (2019) 45–59.

11. Pinha ACH, Sagawa JK, A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis, Journal of Cleaner Production (2020), doi: https:// doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122350.

12. Barnes, Benedict & Boateng, Francis & Sebil, Charles & Owusu, Enock. (2020). Mathematical Modeling of Wastes Pile-Up in Kwadaso Municipality in Ashanti, Ghana. European Journal of Pure and Applied Mathematics. 13. 893-913. 10.29020/nybg.ejpam.v13i4.3813.

13. Roshan, Rakesh & Rishi, Om Prakash. (2020). Effective and Efficient Smart Waste Management System for the Smart Cities Using Internet of Things (IoT): An Indian Perspective. 10.1007/978-981-15-6014-9_54.

14. Tiwari, Pradeep. (2021). Smart Waste Management System for Smart City based on Internet of Things (IoT). Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT). 12. 6. 10.17762/turcomat.v12i10.5189.

15. Damadi, Hamid & Namjoo, Mohammadreza. (2021). Smart Waste Management Using Blockchain. IT Professional. 23. 81-87. 10.1109/MITP.2021.3067710.

16. Haider, Saqib & Chaudhari, Himanshu & Halder, Angcon & Sen, Apurva & K, Shashikala. (2021). Smart Waste Management System using RFID. SSRN Electronic Journal. 10.2139/ssrn.3843724.

17. Chakraborty, Sanjiban & Mehta, Aniket & Sheikh, Shaheen & Jha, Ashmita & Manjunath, Cr. (2021). SMART WASTE MANAGEMENT SYSTEM. JETIR, Volume 8, Issue 5.

Flores, Edwin & Yoo, Sang Guun. (2021). A Smart Waste Management System Based on LoRaWAN. 10.1007/978