پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۵، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، صص۸۱-۱۰۹

مدل‌سازی سیستم پردازش و دفع پسماند شهری اصفهان با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم

محسن غفارپناه[۱]، مهناز حسین زاده[۲*]، عالیه کاظمی[۳]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ ارسال: ۱۹ / ۰٤/ ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: ۲۰ / ۰۲ / ۱۳۹۹

چکیده

اصفهان یکی از کلان‌شهرهای ایران، با وجود این‌که از دیرباز به عنوان شهری پیشگام در مدیریت پسماند کشور شناخته می‌شده اما هنوز هم با یک سیستم مبتنی بر دفن در محل دفن زباله به پردازش و دفع پسماند می‌پردازد. لذا، سازمان مدیریت پسماند اصفهان با تدوین برنامه‌ای تحت عنوان "اصفهان ۱٤۰۰ شهری بدون دفن پسماند" سعی بر تبدیل تدریجی سیستم فعلی به یک سیستم مدرن مبتنی بر تولید انرژی و مواد با ارزش از زباله‌ها دارد. پژوهش حاضر با هدف انتخاب بهترین راه‌کار امحای پسماندهای شهری از منظر مالی و زیست محیطی به شبیه‌سازی سیستم پردازش و دفع پسماند اصفهان با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم پرداخته است. متغیرهای اصلی مدل طراحی شده، نرخ تولید پسماند تر، انتشار کل گاز گلخانه‌ای و سود کل سیستم بعلاوه استراتژی‌های پردازش و دفع پسماند یعنی کمپوست، بازیافت و دفن در محل دفن زباله هستند. پس از شبیه سازی و تعیین اعتبار مدل راه‌کارهای مختلفی از جمله استقرار هاضم بی‌هوازی، اصلاح خطوط پردازش پسماند و تولید سوخت جایگزین از زباله‌های غیرآلی در سیستم 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. در این بین اجرای متوالی سیاست‌های "استقرار هاضم بی‌هوازی" و "خط تولید سوخت جایگزین" بهترین گزینه به منظور ارتقای سیستم پردازش و دفع پسماند در شهر اصفهان شناخته شده است.

واژگان کلیدی: سیستم پردازش و دفع پسماند، پویایی‌شناسی سیستم، شهر اصفهان

---

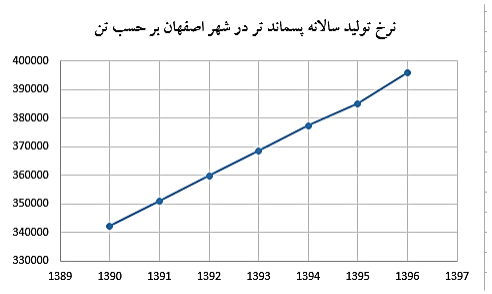
* نویسندهٔ مسؤول مقاله E-mail: mhosseinzadeh@ut.ac.ir

۱- مقدمه

درست در زمانی که کشورهایی نظیر آلمان و سوئد به دنبال وارد کردن پسماند از سایر کشورها و تبدیل آن به پول و انرژی هستند [٤٣]، واحدهای خدمات شهری بسیاری از جوامع در حال توسعه مانند ایران در مواجهه با پسماندهای تولیدی کشورشان ناکام مانده‌اند. این ناکامی که محصول کمبود منابع مالی و یا مدیریت ناکارآمد پسماند است، علاوه بر زیان‌های مالی منجر به تهدیدات جدی بهداشت عمومی و محیط زیست در این کشورها شده است [٤٤]. مدیریت پسماند به عنوان حلقه مفقوده توسعه پایدار در این مناطق، شامل زنجیره‌ای از فعالیت-هاست که از پیش تولید پسماند آغاز شده، با جمع‌آوری و تفکیک ادامه یافته و با پردازش و دفع نهایی خاتمه می‌یابد [٤٥]. شاید نرخ تولید پسماند با توجه به سرانه ۰,٦٤ کیلوگرمی که نصف میانگین جهانی است، مشکل اصلی مدیریت پسماند در ایران نباشد اما پردازش و دفع به عنوان آخرین مرحله از این زنجیره یک معضل جدی در این کشور محسوب می‌شود. شایان ذکر است که دفن پسماند به عنوان نامطلوب‌ترین گزینه پردازش و دفع موجود در هرم پسماند، به علت سادگی و کم هزینه بودن با ۸٤٪ پرکاربردترین روش در این کشور شناخته می‌شود [٤٦].

اصفهان به عنوان یکی از کلان‌شهرهای ایران با جمعیتی بالغ بر ۲ میلیون نفر و سابقه ای ٦۰ ساله در بازیافت زباله‌های آلی، از دیرباز به عنوان شهری پیشگام در مدیریت پسماند کشور شناخته می‌شود. این شهر که با تولید روزانه ۱۱۰۰ تن پسماند تر روبه‌رو است، از استراتژی‌های بازیافت، کمپوست و دفن در راستای امحای این پسماندها استفاده می‌کند. نکته-ای که مدیریت پسماند در اصفهان را با سایرشهرهای ایران متمایز می‌کند سابقه دیرینه این شهر در کمپوست زباله‌ها و همچنین تجربه موفق در زمینه فرهنگ‌سازی تفکیک از مبدأ پسماند است که سهم دفن مستقیم پسماند در این شهر را به ٤٤٪ رسانده است [٤٧]. اگرچه این مقدار با توجه به آمار نگران کننده دفن پسماند در کشور مقدار معقولی به نظر می‌رسد، اما اصفهان هنوز هم راه بسیار طولانی تا رسیدن به مدیریت یکپارچه پسماند به شیوه‌ای که در کشورهای توسعه یافته شاهد هستیم، دارد. شکل ۱ روند تغییرات نرخ تولید سالانه پسماند تر در اصفهان در فاصله سال‌های ۹۰ تا ۹۷ را نشان می‌دهد. . این رشد بی‌رویه و عدم بهبود سیستم پردازش و دفع پسماند به‌طور متناسب با آن، موجب دفن بیش از حد زباله‌ها و به تبع آن انتشار روزانه

صدها تن گاز گلخانه‌ای از محل دفن زباله اصفهان شده است.



شکل ۱ روند افزایش نرخ تولید سالیانه پسماند تر در اصفهان

در همین راستا شهرداری اصفهان در سال ۱۳۹٤ به تدوین برنامه‌ای تحت عنوان "اصفهان ۱٤۰۰ شهری بدون دفن پسماند" پرداخت که تحت اجرای این برنامه، سیستم پردازش و دفع پسماند اصفهان به تدریج از حالت پردازش دفن محور به یک سیستم مدرن مبتنی بر تولید مواد با ارزش و انرژی از زباله‌ها تبدیل خواهد شد.

بدیهی‌ست که پیش‌نیاز هرگونه تحول در سیستم پردازش و دفع، تحلیل و امکان سنجی گزینه‌های پیش رو به منظور تصمیم‌گیری منطقی در راستای جایگزینی فرآیند فعلی خواهد بود. زیرا که با توجه به هزینه بالای هر یک از این اقدامات، بدون آگاهی از نتایج آن‌ها در عملکرد سیستم در بلندمدت و تنها اکتفا به آزمون و خطا، ممکن است صدمات غیر قابل جبرانی بر سیستم وارد شود. همین امر تا به امروز منشأ شکل‌گیری پژوهش‌های متنوعی با موضوع امکان سنجی پیش از اجرای برنامه‌های اصلاحی در سیستم مدیریت پسماند کشورهای مختلف شده است. برخی از این پژوهش‌ها تنها اهداف مالی را مد نظر قرار داده‌اند [٤٨] و تعدادی از منظر زیست محیطی به این امر پرداخته‌اند [٤٩]، برخی نیز همزمان هم جنبه مالی و هم جنبه زیست محیطی را ملاک انتخاب بهترین روش پردازش و دفع پسماند قرار داده‌اند [۵۰]. امروزه مقوله پردازش و دفع پسماند تحت تاثیر کلیه مراحل موجود در چرخه مدیریت پسماند، به مسئله‌ای پیچیده و میان رشته‌ای تبدیل شده است. همچنین به علت تاثیرات متقابل این فعالیت‌ها

و تغییرات لحظه‌ای هریک، نگرش سنتی در بررسی مجزّای تنها گروهی از فرآیندهای مربوط به پردازش و دفع و عدم توجه به ماهیت پویای مدیریت پسماند، در عمل ناکارآمد شده است. در نتیجه به منظور مقابله با پیچیدگی‌های سیستم و مطالعه آن بصورت همه جانبه نیازمند یک روش به روز و اثربخش مثل پویایی‌شناسی سیستم هستیم.

لذا، در این پژوهش هدف ارائه مدلی پویا از سیستم پردازش و دفع پسماند شهری اصفهان است تا اثر راه‌کارهای تعریف شده در برنامه‌ی "اصفهان ۱۴۰۰ شهری بدون دفن پسماند" از منظر مالی و زیست محیطی دربلندمدت مورد آزمون قرار گرفته و به‌عبارتی به ارزیابی پیش از اجرای این راه‌کارها با استفاده از شبیه‌سازی پرداخته شود.

۲- مرور ادبیات

پژوهش‌ها در زمینه مدیریت زباله‌های شهری سابقه‌ای بسیار طولانی در ادبیات دارد. این مطالعات از لحاظ موضوعی تمامی مباحث مرتبط با پسماندهای شهری از تولید، کاهش، بازیافت و دفن گرفته تا فاکتورهای انسانی موثر بر مدیریت آن‌ها را پوشش می‌دهند. بطور تخصصی در زمینه روش‌های کمّی، از دهه هفتاد میلادی شاهد رشد چشم‌گیری در مقالات منتشر شده مرتبط با زباله‌ها هستیم. تا کنون روش‌های مختلفی از حوزه برنامه‌ریزی ریاضی شامل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی، غیرخطی، چندهدفه و غیرقطعی [۱۰] به منظور تصمیم‌گیری در مورد چگونگی مدیریت پسماندهای شهری توسعه یافته‌اند. با این‌حال اغلب این مدل ماهیتی ایستا و کوتاه مدت دارند. در دو دهه اخیر به دلیل تغییر نگرش محققان به فعالیت‌های مرتبط با مدیریت پسماند از حالت جزء نگری به رویکرد سیستمی، استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم در این زمینه توسعه بسیاری یافته است. رویکرد سیستمی به همان اندازه که به خوبی ارتباط و تأثیر متقابل اجزایی مثل تولید، جمع‌آوری، پردازش و دفع زباله ها را بیان می کند، پیچیدگی را افزایش می‌دهد و غلبه بر این پیچیدگی مستلزم استفاده از تکنیکی کارآمد مثل پویایی سیستم‌ها است [۱]. نخستین بار مشایخی [۵۲] به توسعه یک مدل پویا از سیستم مدیریت پسماند با هدف گذار از شیوه‌های دفع سنتی پسماند به سمت روش‌های جدید پرداخت. برخی از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده اخیر در زمینه مدیریت پسماند شهری با استفاده از

رویکرد پویایی‌شناسی سیستم در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱. برخی از تحقیقات اخیر در زمینه مدیریت پسماند جامد شهری با استفاده از پویایی‌شناسی سیستم

محقق (سال)	موضوع	راه‌کارهای مورد بررسی
[۵۳] ۱۳۹۵	کاربرد متدولوژی پویایی‌های سیستم در تحلیل سیستم‌های تولید ،جمع‌آوری و حمل پسماندهای جامد شهری (مطالعه موردی:کلان‌شهر تهران)	با توجه به نتایج این پژوهش، بهترین گزینه برای مدیریت زیرسیستم-های تولید، جمع آوری و حمل پسماندها، تأکید بر کاهش تولید و کاستن از سرانه تولید زباله خشک و تر در مبدأ تولید و تلاش در جهت بهبود عملکرد طرح تفکیک پسماندهای خشک است.
[۵۴] ۱۳۹۵	پیش‌بینی میزان تولید پسماند شهری با استفاده از روش سری زمانی تکنیک (ARMA) و مدل سازی پویایی سیستم (نرم افزارVensim)	نتایج حاصله نشان می دهد که جمعیت و شاخص تورم بر میزان تولید پسماند با P value به ترتیب برابر با ۰۲۶/۰ و ۰ با میزان تولید پسماند رابطه معناداری دارند. میانگین سالیانه میزان تولید پسماند در سال ۱۴۰۰ در روش سری زمانی و پویایی سیستم به ترتیب به ٤/۱۵۰۱ ton/day و ۱٤۳٦ ton/dayخواهد رسید. همچنین نرخ رشد سالیانه تولید پسماند ٤٤/۳ ٪ بدست آمده است
[۵۵] ۱۳۹۸	یک رویکرد مدل‌سازی سیستم پویا برای ارزیابی مشارکت مردم در مدیریت ضایعات جامد شهری	نتایج این پژوهش نشان می‌دهد هر چه مشارکت مردم در همراهی و همکاری با برنامه‌های مختلف سیستم مدیریت مواد زاید شهری بیشتر باشد امکان موفقیت این برنامه‌ها بیشتر است.
[۵۶] ۱۳۹۸	مدیریت ضایعات حاصل از ساخت و تخریب در پروژه‌های صنعت ساخت با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها	نتایج شبیه‌سازی نیز نشان می‌دهد افزایش دفن زباله‌ها در محل‌های غیرمجاز سبب افزایش مصرف سوخت و انرژی و درنتیجه آن افزایش هزینه‌های مصرف سوخت می‌گردد. این پژوهش با بررسی و ارزیابی تحقیقات و اقدامات انجام‌شده درزمینهٔ پسماندها و نخاله‌های ساختمانی، در پی روشن نمودن استفاده از دیدگاه سیستمی با استفاده از پویایی سیستم‌ها در جهتی است که به کمک آن بتوان با استفاده از تحلیل هزینه – سود، پیمانکاران را تشویق به دفع نخاله‌های ساختمانی به روشی کند که در جهت توسعه صنعت ساختمان و حفظ محیط زیست و صرفه‌جویی‌های ناشی از آن گردد.

محقق (سال)	موضوع	راه‌کارهای مورد بررسی
[57] 2016	بررسی تأثیر تفکیک از مبدأ بر عملکرد مدیریت پسماند	در این مقاله شش سیاست که هریک درصد خاصی از جداسازی مبدأ را نمایندگی می‌کند، برای بهبود سیستم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در نهایت سیاست جداسازی پسماند ۴۰ درصد به عنوان بهترین گزینه معرفی شده است که می‌تواند در پایان یک دوره ده ساله طول عمر محل دفن زباله‌ها را افزایش داده و هزینه‌های مدیریت پسماند را کاهش دهد.
[58] 2016	بررسی راهکارهای مقابله با رفتارهای ناصحیح در دفع زباله	طراحی مدلی با ترکیب سیستم داینامیک و دیدگاه‌های اقتصادی-روانشناختی به منظور یافتن بهترین راهکار در اصلاح رفتار دفع زباله توسط افراد و خانوارها، معرفی ترکیبی از بهبود هنجارهای اجتماعی و مشوّق‌های مادّی به عنوان بهترین سناریو
[59] 2016	عملکرد زیست محیطی کاهش پسماند عمرانی	اجرای اولیه مدل نشان می‌دهد که کاهش تولید پسماند باعث ایجاد روند نزولی در دفع قانونی وغیرقانونی پسماندها شده می‌شود، تست سناریوها نشان می‌دهد که افزایش جداسازی پسماندها و استفاده از سنجه‌های کاهش پسماند باعث کاهش هزینه‌های مدیریت پسماند می شود.
[60] 2018	مدلسازی راه‌کارهای مدیریت پسماند خشک: مطالعه موردی کامپانیا در ایتالیا	در این پژوهش ۴ سیاست جداسازی در مبدأ مورد آزمون قرار گرفته و در نهایت میزان جداسازی پسماند ۷۰ درصد به عنوان بهترین راهکار برای کاهش افزایش ظرفیت مکان دفن مورد نیاز انتخاب شده است.
[61] 2019	**یک رویکرد پویایی‌شناسی سیستمی برای تعیین هزینه دفن پسماندهای ساختمانی در هنگ کنگ**	در این پژوهش هزینه دفن پسماندهای ساختمانی را عامل مهمی در کاهش اثرات زیست محیطی دفن پسماندها عنوان کرده و در تعیین هزینه بهینه دفن پسماندها هم ابعاد اقتصادی و هم ابعاد اجتماعی را توأماً مد نظر قرار داده و با بررسی دو دسته سیاست به این نتیجه رسیده که درصد افزایش بهینه در محل های دفن زباله اصلی و هزینه های دفن برای عموم مردم نباید به ترتیب از ۲۵۰٪ و ۴۰۰٪ تجاوز کند.
[62] 2020	بررسی اثرات سیاست‌گذاری در مدیریت پسماند جامد شهری در شانگ‌های: تحلیلی با استفاده	این پژوهش به بررسی اثرات سه دسته سیاست اقتصادی، جمعیت-شناختی، و جمع آوری پسماند در قالب هفت سناریو در شهر شانگ-های چین می‌پردازد. با توجه به نتایج این پژ.هش سیاست اقتصادی با

محقق (سال)	موضوع	راه‌کارهای مورد بررسی
	از مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها	فرض رشد GDP با نرخ یک درصد موجب کاهش ۳,۲۵ میلیون تن پسماند تا سال ۲۰۲۵ خواهد شد.

در پژوهش‌های انجام شده سیاست‌های پیشنهادی با توجه به شرایط حاکم بر شهرها و کشورهای مختلف طراحی شده‌اند. سیاست‌های پیشنهادی بیشتر در زمینه بهبود سیاست تفکیک در مبدأ طراحی شده‌اند و سیاست‌هایی مشابه با آن‌چه پیش روی سیستم مدیریت پسماند اصفهان قرار دارد مورد آزمون قرار نگرفته‌اند.

۳- روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش به مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار سیستم مدیریت پسماند شهری شهر اصفهان به منظور بررسی اثر راه‌کارهای تعریف شده در برنامه‌ی "اصفهان ۱٤۰۰ شهری بدون دفن پسماند" از منظر مالی و زیست محیطی با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم پرداخته شده است. پویایی سیستم روشی برای شناخت، تحلیل اجزا و رفتار سیستم‌های پیچیده به‌منظور مشاهده رفتارهای آتی سیستم است [٦٣-٦٤]. گام‌های حل مسأله با استفاده از این رویکرد عبارتند از: ۱) تعریف مسأله، ۲) تعریف فرضیه پویا و رسم نمودارهای علت و معلولی، ۳) رسم نمودار جریان، ٤) تعیین اعتبار مدل و تحلیل حساسیت ٥) طراحی و آزمون سیاست‌ها [٦٥-٦٦].

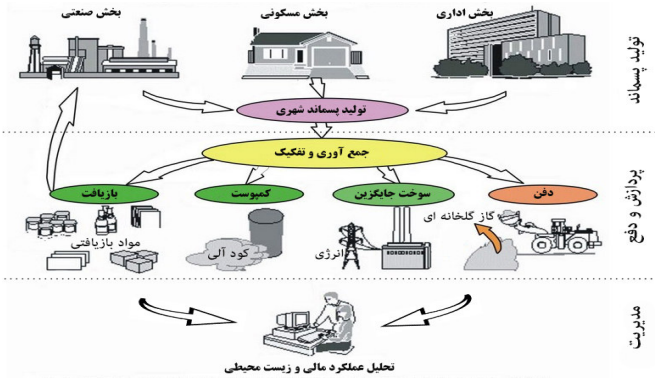
گردآوری داده‌ها با استفاده اسناد و مدارک سازمان مدیریت پسماند استان اصفهان شامل نقشه راه سازمان مدیریت پسماند اصفهان[٦٧]، و آخرین ورژن سند WARM14[٦٨] [٦٩]، داده‌های بانک مرکزی و همچنین مصاحبه با متخصصان سازمان مدیریت پسماند اصفهان انجام شده است. مدلسازی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار Vensim DSS. 64 صورت گرفته است و برای آزمون مدل علاوه بر تأیید متخصصان از آزمون‌های اعتبار ساختاری و رفتاری شامل آزمون سازگاری ساختار و ابعاد مدل، آزمون خطای انتگرال‌گیری، آزمون شرایط حدی و آزمون بازتولید رفتار بهره گرفته شده است. تحلیل حساسیت پارامترهای مدل برای تعیین

پایداری مدل با استفاده از نرم افزار انجام شده است.

۴- یافته‌های پژوهش

۴-۱- نمودار زیرسیستم

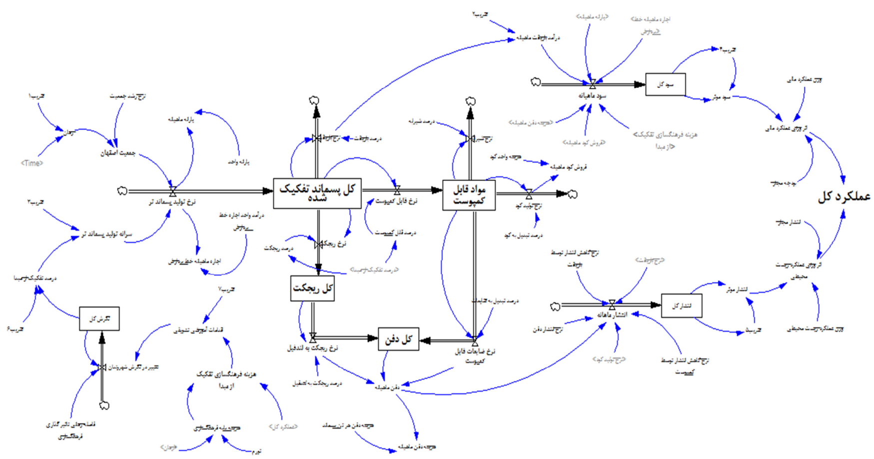
نمودار زیرسیستم نشانگر معماری کلی مدل است و ارتباطات و تعاملات بین آن‌ها را نشان می‌دهد. این نمودار اساس شکل‌گیری نمودار علت و معلولی بوده و جزئیات روابط بین زیر سیستم‌ها در نمودار علت و معلولی بیان می‌شود. درشکل ۲ سه زیرسیستم تولید پسماند، پردازش و دفع و همچنین مدیریت مالی و زیست محیطی پسماند به همراه نحوه تعامل فیمابین آن‌ها ارائه شده است.



شکل ۲ نمودار زیرسیستم برای سیستم پردازش و دفع پسماند اصفهان

۴-۲-نمودار انباشت-جریان

شکل ۳ نمودار انباشت-جریان سیستم پردازش و دفع پسماند اصفهان را نشان می‌دهد.



شکل ۳ نمودار انباشت-جریان سیستم پردازش و دفع پسماند اصفهان

برای ارزیابی منطقی نمودار انباشت-جریان در این مدل از شرح متغیر کلیدی نرخ تولید پسماند تر کار آغاز می‌شود. این متغیر به معنای میزان پسماند ورودی به کارخانه پردازش پسماند اصفهان 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 اصفهان است. این پسماندها پس از تفکیک شدن به مواد آلی با ارزش، مواد غیرآلی با ارزش و مواد مخلوط کم ارزش به سه بخش مختلف کارخانه ارسال می‌شوند که این مواد را 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 جهت دفن به محل دفن زباله ارسال می‌شوند که در این مدل به ازای فرآیند متغیر متناظر تخصیص داده شده است. هزینه، درآمد و میزان گاز گلخانه‌ای منتشر شده از هر بخش بصورت ماهانه در متغیر نرخی به نام "سود ماهیانه" و "انتشار ماهیانه" وارد می‌شود که هریک در متغیری از جنس حالت تجمیع می‌شوند. این متغیرهای حالت در هر دوره زمانی با مقادیر مجاز مد نظر مقایسه می‌شوند و در صورت عدم تخطّی 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 تر اثر می‌گذارد و با ایجاد تغییرات در هزینه فرهنگ‌سازی تفکیک از مبدا به اصلاح آن می‌پردازد. مفروضات نمودار انباشت-جریان عبارتند از:

- جریان پسماند شهری مد نظر در این مدل تنها شامل پسماندهای تر جمع‌آوری شده از مناطق پانزده‌گانه شهر اصفهان است و شامل پسماند شهرهای اقماری و مواد قابل بازیافت تحویل شده از درب منازل و ایستگاه‌های بازیافت نمی‌شود.
- در این مدل فرض بر این است که کلیه پسماند تر تولیدی در سطح شهر، توسط شهرداری جمع‌آوری می‌شود و دفع غیر قانونی پسماند تر وجود ندارد.
- درصد تفکیک از مبدا پسماند شهری تنها تابع آگاهی و نگرش شهروندان در نظر گرفته شده و از تأثیر تسهیلات و امکانات ارائه شده توسط شهرداری به علت برون‌سپاری و عدم کنترل توسط سازمان مدیریت پسماند، چشم‌پوشی شده است.
- کلیه هزینه‌ها و درآمدهای واحد فرآیندهای پردازش و دفع بصورت مقادیر ثابت در 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 به دلیل محدودیت در معیارهای اندازه‌گیری صرف نظر شده است.
- در محاسبه فاکتور انتشار گازهای گلخانه‌ای ترکیبات مختلف پسماند در هر فرآیند، از روش ارزیابی چرخه حیات استفاده شده است. بدین‌صورت که علاوه بر گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در فرآیندهای دفن، بازیافت و کمپوست، گازهای گلخانه‌ای اجتناب شده به‌واسطه استفاده از زباله‌های بازیابی شده به جای مواد دست اول و کود شیمیایی نیز در محاسبات لحاظ شده‌اند. همچنین به منظور پیروی از راهنمای منتشر شده توسط مجمع بین‌المللی تغییرات اقلیمی در سال ۲۰۰۶، کربن دی اکسید ناشی از منشأ زیست‌زا در محاسبات شرکت داده نشده است.

روابط ریاضی میان برخی از مهم‌ترین متغیرهای اصلی موجود در نمودار انباشت-جریان

و واحد اندازه‌گیری آن‌ها در جدول ۲ ارایه شده‌اند.

جدول ۲ روابط ریاضی میان متغیرهای نمودار جریان

ردیف	متغیر اصلی	واحد اندازه-گیری	رابطه ریاضی اجرا شده در Vensim
۱	جمعیت اصفهان	person	$۲,۰۱۱۰۱ \times ۱۰^{۶} \times (۱ + \text{نرخ رشد جمعیت})^{\text{زمان}}$
۲	نرخ تولید پسماند	ton/Month	جمعیت اصفهان × سرانه تولید پسماند تر
۳	کل پسماند تفکیک شده	ton	$\int$ نرخ ریجکت − نرخ قابل کمپوست − نرخ بازیافت − نرخ تولید پسماند تر ۰ = مقدار اولیه
٤	نرخ بازیافت	ton/Month	کل پسماند تفکیک شده × درصد بازیافت
٥	نرخ تولید کود	ton/Month	مواد قابل کمپوست × درصد تبدیل به کود
٦	کل دفن	ton	$\int$ نرخ ضایعات قابل کمپوست + نرخ ریجکت به محل دفن زباله ۰= مقدار اولیه
۷	سود ماهیانه	IRR/Month	− (درآمد بازیافت ماهیانه + یارانه ماهیانه + اجاره ماهیانه خط پردازش) + فروش کود ماهیانه + هزینه فرهنگسازی تفکیک از مبدا) (هزینه دفن ماهیانه
۸	اثر وزنی عملکرد مالی	Dmnl	$If(\text{سود موثر} > \text{بودجه مجاز}, Then(۰), Else((\frac{\lvert\text{سود موثر}\rvert - \lvert\text{بودجه مجاز}\rvert}{\lvert\text{سود موثر}\rvert}) \times (\text{وزن عملکرد مالی}))$
۹	انتشار ماهیانه	tonCO2/Month	+ (نرخ کاهش انتشار توسط بازیافت × نرخ بازیافت) + (نرخ کاهش انتشار توسط کمپوست × نرخ قابل کمپوست) (دفن ماهیانه × نرخ انتشار دفن)
۱۰	اثر وزنی عمکرد زیست محیطی	Dmnl	$If(\text{انتشار موثر} > \text{انتشار مجاز}, Then(۰), Else((\frac{\text{انتشار موثر} - \text{انتشار مجاز}}{\text{انتشار موثر}}) \times (\text{وزن عملکرد زیست محیطی}))$
۱۱	عملکرد کل	Dmnl	اثر وزنی عملکرد زیست محیطی + اثر وزنی عملکرد مالی

ردیف	متغیر اصلی	واحد اندازه-گیری	رابطه ریاضی اجرا شده در Vensim
۱۲	هزینه پایه فرهنگسازی	IRR/Month	$(۱.۱)^{\left[\frac{\text{زمان}}{۱۲}\right]} \times ۱۰^{۸} \times ۵,۴$
۱۳	هزینه فرهنگسازی تفکیک از مبدا	IRR/Month	(عملکرد کل+۱)× (هزینه پایه فرهنگسازی)
۱۴	تغییر در نگرش شهروندان	Attitude/Month	If (نگرش کل > … ه زمانی تاثیر گذاری ,اقدامات آموزشی و تشویقی) $Smooth$ ($Then$, (۰
۱۵	نگرش کل	Attitude	$\int$ تغییر در نگرش شهروندان ۰.٦٥ = مقدار اولیه
١٦	درآمد بازیافت	IRR	$Look\ Up$ (نرخ بازیافت)
۱۷	درصد تفکیک از مبدا	1/Month	$Look\ Up$ (نگرش کل)

متغیرهای " درآمد بازیافت ماهیانه" و " درصد تفکیک از مبدا" بصورت توابع لوک آپ تعریف شده‌اند که متغیر اول تابعی از" نرخ بازیافت" و متغیر دوم تابع "نگرش کل" است. مقادیر ثابت مدل و واحد اندازه‌گیری آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ مقادیر ثابت مدل و واحد اندازه‌گیری آن‌ها

متغیر	واحد	مقدار	متغیر	واحد	مقدار
یارانه واحد	IRR/ton	۱۱۰۰۰۰	درصد تبدیل به کود	1/Month	۰,۲۹۷۵۲
درآمد واحد اجاره خط پردازش	IRR/ton	٤٢٠٠٠٠	درصد تبدیل به ضایعات	1/Month	۰,۱۸۵۱۲٤
هزینه واحد کود	IRR/ton	۳۱۵۰۰۰	نرخ کاهش انتشار توسط بازیافت	tonCO2/ton	-۱,۰۲
هزینه دفن هر تن پسماند	IRR/ton	۱۳۰۰۰۰	نرخ انتشار دفن	tonCO2/ton	۰,۷۱

متغیر	واحد	مقدار	متغیر	واحد	مقدار
فاصله زمانی تاثیر گذاری فرهنگسازی	Month	۲	نرخ کاهش انتشار توسط کمپوست	tonCO2/ton	-۰,۰۱۲
درصد بازیافت	1/Month	۰,۰۱۵	وزن عملکرد مالی	Dmnl	۰,٦
درصد قابل کمپوست	1/Month	۰,٦۰۵	وزن عملکرد زیست محیطی	Dmnl	۰,٤
درصد ریجکت	1/Month	۰,۳۸	تورم	Dmnl	۰,۲
درصد شیرابه	1/Month	۰,۵۱۷۳۵٦			

۴-۳- شبیه‌سازی اولیه، اعتبارسنجی مدل و آزمون سیاست‌ها

پس از بررسی اعتبار ساختاری مدل توسط متخصصان سازمان مدیریت پسماند شهر اصفهان و با پشت سر گذاشتن موفقیت آمیز آزمون‌های سازگاری ابعاد و سازگاری مدل در نرم‌افزار Vensim شبیه‌سازی اولیه انجام شده است. سپس با انجام آزمون بازتولید رفتار، رفتار حاصل از شبیه‌سازی متغیرهای اصلی با رفتار مرجع آن‌ها مقایسه شده و مقدار شاخص RMSPE [۷۰] محاسبه شده است. برای نمونه نتیجه انجام این آزمون برای متغیر "نرخ تولید پسماند تر" تا سال ۱٤۰۱ را با مقادیر پیش‌بینی شده به روش سری زمانی که از اسناد سازمان مدیریت پسماند اصفهان استخراج شده، ارایه شده است (جدول ٤). شاخص RMPSE یکی از روش‌های آماری تایید رفتار مدل است که اختلاف داده های واقعی (At) و داده های شبیه سازی شده (St) را نشان می‌دهد. برای تایید رفتار سیستم این شاخص باید کمتر از ۰,۱ باشد.

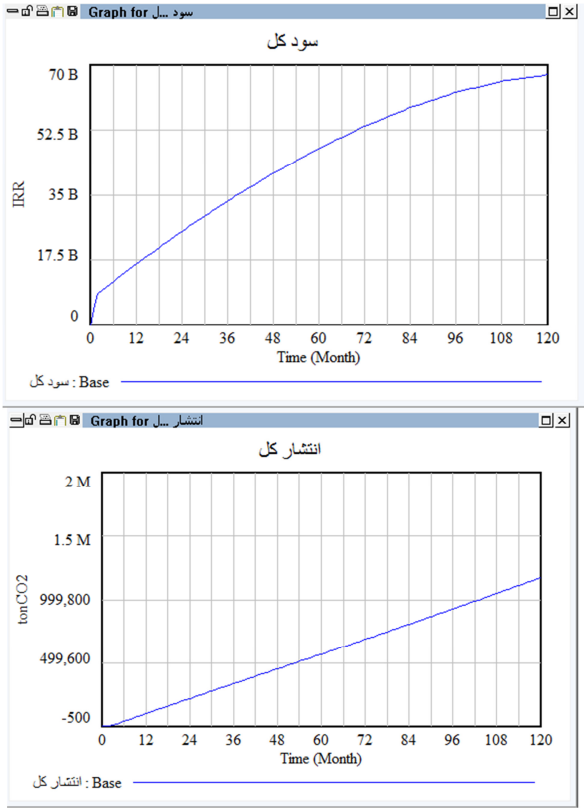
$$RMPSE = \sqrt{1/n \sum_{t=1}^{n} \left(\frac{St-At}{At}\right)^2}$$

جدول ۴ محاسبه شاخص RMSPE

سال	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱٤۰۰	۱٤۰۱
رفتار مرجع	۳٤۵۸۱٦	۳٤٦۹٤٤	۳٤۸۰٤۸	۳٤۹۱۵۲	۳۵۰۲۳۲
شبیه‌سازی	۳٦۵۷۱۱	۳٦٦۸٦۷	۳٦۸۵۷٦	۳۷۰٦۵۸	۳۷۳۵۱۲
$\left(\frac{St-At}{At}\right)^2$	۰,۰۰۳۳۰	۰,۰۰۳۲۸	۰,۰۰۳٤۷	۰,۰۰۳۷۹	۰,۰۰٤٤۱

با توجه به محاسبات انجام شده مقدار شاخصRMSPE در این شبیه‌سازی ۰,۰۶۰۴۸ بدست آمده که مقداری کمتر از ۰,۱ دارد و اعتبار رفتاری مدل را تایید می‌کند.

نمودار تغییرات رفتار متغیرهای هدف یعنی "سودکل" و "انتشار کل" در شکل ٤ با عنوان سناریوی مبنا ارایه شده است.



شکل ۴ رفتار متغیرهای سود کل و انتشار کل با حفظ روند موجود در سیستم

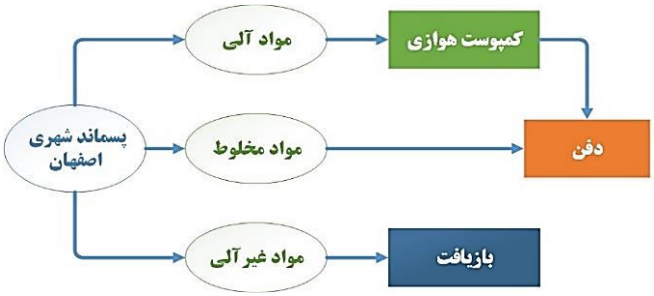
متغیر سود کل را می‌توان مهم‌ترین خروجی سیستم از دیدگاه مدیران سازمان مدیریت

پسماند دانست. این متغیر نشان‌گر وضعیت سوددهی و یا زیان‌دهی فرآیندهای پردازش و دفع پسماند است و می‌تواند معیار تصمیم‌های آتی در زمینه اصلاح سیستم قرار گیرد. با دقت در رفتار شبیه‌سازی شده برای متغیر سود کل و با در نظر گرفتن سیستم‌های خدمات شهری که عمدتاً هزینه‌بر هستند، می‌توان وضعیت فعلی سیستم از لحاظ اقتصادی را مثبت ارزیابی کرد. در ماه‌های اول شبیه سازی و پیش از رسیدن به تعادل، عایدی سیستم با شیب ثابت افزایش می‌یابد ولی به مرور زمان منحنی شیب کاهشی به خود گرفته و در اواخر بازه شبیه‌سازی با رفتاری از نوع رشد هدفجو روبه‌رو خواهیم بود که نشان از غلبه تدریجی هزینه‌های سیستم بر درآمدهاست.

میزان گازهای گلخانه‌ای ناشی از پسماند، دیگر مؤلفه کلیدی ارزیابی عملکرد سیستم مدیریت پسماند است. این متغیر برآیند گازهای گلخانه‌ای منتشر شده از دفنگاه و گازهای گلخانه‌ای اجتناب شده توسط فرآیندهای کمپوست و بازیافت است. با شروع زمان شبیه‌سازی این متغیر روندی افزایشی دارد که این به‌معنای تجمیع گازهای گلخانه‌ای ناشی از دوره‌های زمانی پیاپی خواهد بود. بر خلاف عملکرد مالی قابل قبول این سیستم در شبیه سازی اولیه، وضعیت زیست محیطی سیستم شرایط مناسبی از خود بروز نمی‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که کل گازهای گلخانه‌ای گسیل شده از محل دفن زباله بیشتر از گازهای گلخانه‌ای اجتناب شده توسط بازیافت و کمپوست زباله‌ها بوده است. بر اساس همین نمودار میزان کل گازهای گلخانه‌ای منتشر شده از سیستم پیش از رسیدن به سال پنجم شبیه‌سازی به ۵۰۰ هزار تن و در سال آخر به رقمی بیش از یک میلیون تن معادل کربن‌دی‌اکسید خواهد رسید و با توجه به این‌که قسمت عمده گازهای گلخانه‌ای مرتبط با پسماند را گاز متان تشکیل می‌دهد، باید به منظور کنترل و بهبود شرایط موجود تغییراتی در سیستم اعمال شود.

اصفهان ۱۴۰۰، شهری بدون دفن پسماند: سیستم پردازش و دفع پسماند در شهر اصفهان در مواجه با اکثریت پسماندهای تولید شده به روش سنتی عمل می‌کند. بدین صورت از ۱۰۰۰ تن پسماند تر ورودی به کارخانه پس از تفکیک، فقط ۱۵ تن مواد غیرآلی به منظور بازیافت به صنایع تبدیلی فروخته شده و ۶۰۰ تن مواد آلی جهت تبدیل به کود از روش هوازی به کارخانه کمپوست ارسال می‌شوند که ماحصل انجام فرآیند کمپوست تنها ۱۸۰ تن کود آلی و مقدار قابل توجهی شیرابه و ضایعات کمپوست است. ضعف دیگری که این سیستم با آن روبه‌روست دفن

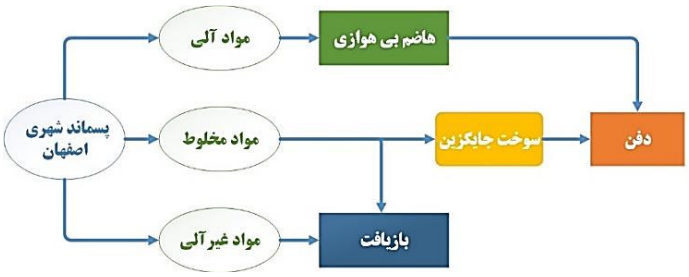
مستقیم حدود ٤٠٠ تن پسماند بدون انجام هیچگونه فرآیند پردازشی و اصلاحی است که علاوه بر هزینه‌های نگهداری و حمل و نقل مخاطرات زیست محیطی فراوانی را به همراه دارد. در شکل ٥ فرآیند فعلی دفع و پردازش پسماند در شهر اصفهان به تصویر کشیده شده است.



شکل ٥ فرایند فعلی پردازش و دفع پسماند اصفهان

رویکرد اصفهان بر اساس برنامه اصفهان ١٤٠٠، شهر بدون دفن مستقیم پسماند است و در این زمینه اصلاح خطوط پردازش پسماند و تولید انرژی از پسماند از سیاست‌های شهرداری اصفهان است. طی دو سال اخیر مطالعات جامع و فراگیر در این خصوص توسط سازمان مدیریت پسماند انجام گرفته و پروژه هاضم بی‌هوازی برای بخش آلی پسماند و تولید سوخت صنعت سیمان از پسماند برای بخش غیرآلی پسماند در دستور کار شهرداری اصفهان قرار گرفته است که پیش‌نیاز اجرای هر دو طرح، ارتقای دقت تفکیک پسماندهای آلی از غیرآلی است. در ادامه با هریک از این سیاست‌ها آشنا خواهیم شد. برنامه اصفهان ١٤٠٠ بصورت شماتیک در شکل ٦ ارایه شده است.

پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری ـــ



شکل ۶ فرایند پردازش و دفع پسماند اصفهان در برنامه اصفهان ۱۴۰۰

۱- **اصلاح خطوط پردازش پسماند:** پسماند جمع‌آوری شده از سطح شهر توسط خودروهای تریلر با ظرفیت زیاد، از سکوهای انتقال پسماند تر شهری، وارد کارخانه می‌گردد و پس از توزین، به سوله‌ای با نام سالن دریافت، جهت تخلیه و معرفی به فرآیند پردازش تحویل می‌شوند. این زباله‌ها در سالن دریافت پسماند به وسیله لودر، روی تجهیز اسلت ریخته می‌شود. اسلت وظیفه تغذیه خوراک ورودی(کیسه زباله پسماند تر) سه خط پردازش اصلی و همچنین یک خط پردازش کمکی را دارد. پسماند ریخته شده روی این خطوط ابتدا توسط دستگاه مگنت آهن‌زدایی می‌شوند و در ادامه با ورود به سرند دوار، بر اساس سایز به دو نوع زیر سرندی (مواد ریز) و رو سرندی (مواد درشت) تقسیم می‌شوند. مواد زیر سرندی که عمدتاً مواد آلی هستند به منظور انجام مراحل بعدی به بخش کمپوست کارخانه انتقال می‌یابند. اما مواد رو سرندی روی نوار نقاله دیگری ریخته شده و وارد سالن جداسازی دستی می‌شوند. در سالن جداسازی دستی، مواد قابل بازیافت شامل آلومینیوم، پت، لاک، نایلون و ... به روش دستی توسط اپراتورها از روی نوار نقاله برداشته شده و فلزات آهنی باقیمانده توسط مگنت متحرک جدا می گردند. درنهایت مواد باقی‌مانده روی نوار نقاله که ریجکت کارخانه نامیده می‌شوند توسط تریلرها بارگیری شده و به محل دفن زباله اصفهان واقع در منطقه سجزی منتقل می‌شوند. تا این‌جا فرآیند فعلی خطوط پردازش پسماند معرفی شدند. از نقاط ضعف خطوط پردازش فعلی می‌توان به طول کم نوارهای نقاله، سرعت بالای عبور مواد و کمبود دقت جداسازی، کمبود تجهیزات خودکار جداسازی و همچین استهلاک نوارها و ماشین‌آلات اشاره کرد. همین امر موجب شده تا مدیران سازمان مدیریت پسماند به عنوان گام ابتدایی تبدیل

فرآیند پردازش از حالت سنتی به مدرن، در صدد ارتقای این خطوط و افزودن یک خط پردازش جدید برآیند. اجرای این پروژه به سرمایه ای در حدود ۸ میلیارد تومان نیازمند است و طول مدت اجرا تا تکمیل پروژه ۹ ماه برآورد شده است. با بهره‌برداری از این پروژه انتظار می‌رود مواد بازیافتی جدا شده از خطوط به ۲۵ تن در روز افزایش یافته و با تخصیص مواد آلی بیشتر به فرآیند کمپوست، شاهد کاهش دفن پسماند نیز باشیم.

۲- **تولید سوخت مشتق از پسماند**: یکی از راه‌کارهای مدیریت بخش غیرآلی پسماند، تولید سوخت مشتق از پسماند [۷۱] (RDF) است که در بعضی کشورها در هرم مدیریت پسماند در رده بازیافت قرار می‌گیرد. سوخت مشتق از پسماند، پسماندی است که با پردازش‌های انجام شده، تمامی مقررات، اصول و مشخصات مورد نظر صنعت را تایید کند و ارزش حرارتی بالایی داشته باشد. در کشورهای اروپایی RDF معمولا از ضایعات خطوط پردازش پسماند جامد شهری که ارزش حرارتی بالایی دارد تهیه می‌شود. در این کشورها به واسطه توجه جدی به مقوله مدیریت پسماند، تولید این سوخت جایگاه ویژه‌ای دارد. صنعت سیمان به واسطه داشتن کوره آماده با دمای بالا و بخشی از سیستم رفع آلایندگی، مناسب‌ترین گزینه جهت استفاده از RDF به عنوان سوخت کمکی است. پس از آماده‌سازی RDF تغییراتی نیز باید در کارخانه تولید سیمان صورت گیرد. با توجه به مطالعات انجام شده، استقرار این سیستم شش ماه به طول می‌انجامد و نیازمند سرمایه‌ای بالغ بر ۱۰ میلیارد تومان است. اجرای این طرح می-تواند گامی مهم در جهت امحای صحیح بخش غیر آلی پسماند شهری و کاهش مصرف سوخت در صنعت سیمان کشور باشد. با تزریق روزانه ۲۰۰ تن RDF حاصل از خط پردازش اصفهان، می‌توان سالیانه بیش از ۲۷ میلیون متر مکعب در مصرف گاز طبیعی واحدهای سیمان صرفه جویی کرد.

۳- **احداث کارخانه هاضم بی‌هوازی**: فرآیند تجزیه منابع زیست توده توسط باکتری‌ها در محیطی خالی از اکسیژن را هضم بی‌هوازی[۷۲] می‌نامند که در آن متان و محصولات جانبی، با ارزش حرارتی متوسط(بیوگاز) تولید می‌شود. این گاز شامل دو جزء عمده متان و دی‌اکسید کربن به همراه مقادیر جزئی ناخالصی نظیر H_2S، بخارآب، N_2O و غیره است. این مخلوط گازی دارای ارزش حرارتی ۱۵ الی ۲۵ مگاژول به ازای هر مترمکعب یعنی ٤٠ تا ۷۰ در صد گاز

طبیعی است و در صورت استفاده از موتورهای بیوگازسوز می‌توان تا ۲ کیلووات ساعت برق از هر مترمکعب آن بدست آورد. پسماندهای آلی یکی از منابع بالقوه جهت استحصال بیوگاز به روش هاضم بی‌هوازی به شمار می‌روند. در روش هضم بی‌هوازی، بسته به نوع روش انتخابی(تر یا خشک) پسماندهای آلی پس از عبور از فرآیند پیش‌تصفیه و خالص سازی، وارد مخزن هاضم می‌شوند که در آن فرآیند تخمیر صورت می‌پذیرد. به منظور انجام کامل فرِند تخمیر و تولید بیوگاز بایستی شرایط کنترل شده‌ای برای مواد آلی درون هاضم ایجاد شود. عامل اصلی تولید بیوگاز باکتری‌های متنوعی هستند که ابتدا مواد آلی موجود را تخمیر کرده و سپس عملیات اسید و استات سازی را انجام می‌دهند. در نهایت هم باکتری‌های متان‌ساز، محلول موجود را به متان و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌کنند. این بیوگاز تولید شده از بالای مخزن جمع‌آوری می‌شود و پس از سولفور زدایی، وارد موتورهای CHP شده و برای تولید حرارت و الکتریسیته مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماده جامد هضم شده باقی‌مانده در کف مخزن نیز جمع‌آوری شده و پس از آب‌گیری و خشک کردن، هوادهی می‌شود و کود آلی با کیفیت بالایی بدست خواهد آمد. همچنین آب مازاد حاصل از فرآیند به دلیل وجود مواد مغذی، می‌تواند به عنوان کودآبه مورد استفاده قرار گیرد. پیرو انتخاب روش هاضم بی‌هوازی جهت مدیریت بخش آلی پسماندهای شهری، قرارداد طراحی پایه امکان سنجی اولیه شهر اصفهان با یک شرکت دانمارکی در ابتدای سال ۹٤ منعقد شد که در آن فازهای پیش‌طراحی و طراحی پایه صورت گرفت. پس از پایان مطالعات مربوط، شرکت‌های برتر ارائه دهنده هاضم بی‌هوازی برای پسماند شهری انتخاب و جهت برقراری ارتباط معرفی شدند.

چکیده سیاست‌های تعریف شده در جدول ۵ مشخص شده‌اند.

جدول ۵ سیاست های تعریف شده برای اجرا در مدل

کد سیاست	عنوان سیاست	تغییرات اعمال شده در مدل		
		متغیر تغییر یافته یا اضافه شده	مقدار فعلی	مقدار آتی
PL01	**اصلاح خطوط پردازش پسماند** هزینه پروژه: ۸ میلیارد تومان	درصد بازیافت	۰,۰۱۵	۰,۰۲۵
		درصد مواد قابل کمپوست	۰,٦۰۵	۰,٦۷۵

	طول مدت پروژه : ۹ ماه	درصد ریجکت	۰٫۳۸	۰٫۳۰
PL02	**احداث خط تولید سوخت جایگزین** هزینه پروژه: ۱۰ میلیارد تومان طول مدت پروژه: ٦ ماه	درصد تبدیل به سوخت جایگزین	۰	۰٫۵۳
		درصد رطوبت زدایی	۰	۰٫۲٦
		درصد ریجکت به محل دفن زباله	۱	۰٫۲۱
		سود واحد سوخت جایگزین	۰	۱۷۰۰۰۰
		نرخ کاهش انتشار توسط سوخت جایگزین	۰	−۰٫۰۳
PL03	**احداث کارخانه هاضم بی‌هوازی** سهم سازمان از هزینه پروژه: ۲۰ میلیارد تومان طول مدت پروژه: ۱۸ ماه	درصد تبدیل به کود	۰٫۲۹۷۵۲	۰٫٤۱۵
		درصد شیرابه	۰٫۵۱۷۳٦	۰٫۵۱۵
		درصد تبدیل به ضایعات	۰٫۱۸۵۱۲٤	۰٫۰۷
		هزینه واحد کود	۳۱۵۰۰۰	۰
		سود واحد کود	۰	۵۰۰۰۰۰
		نرخ کاهش انتشار توسط کمپوست	−۰٫۰۱۲	−۰٫۰۵۸

تغییرات اعمال شده در مدل تحت سیاست PL01: زمان پیش‌بینی شده برای آغاز پروژه اصلاح خطوط پردازش فروردین ۱۳۹۸ مصادف با دوره ۱۲ام شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است که با توجه به طول مدت نه ماهه پروژه، زمان بهره‌برداری از خطوط جدید ماه ۲۱ام شبیه‌سازی خواهد بود. تغییرات ایجاد شده در مدل در نتیجه اعمال این سیاست عبارتند از:

- درصد بازیافت =۰٫۰۱۵+$STEP$(۰٫۰۱ ،۲۱)
- درصد قابل کمپوست =۰٫٦۱۵+ (درصد تفکیک مبدا − ۰.۱۲) + $STEP$(۰٫۰۷ ،۲۱)
- درصد ریجکت =۰٫۳۸+ (درصد تفکیک مبدا − ۰.۱۲) − $STEP$(۰٫۰۸ ،۲۱)
- هزینه اصلاح خطوط پردازش =۸۸۸۰۰۰۰۰۰۰× $PULSE$(۹، ۱۲)

تغییرات اعمال شده در مدل تحت سیاست PL02: زمان نهایی شدن قرارداد و شروع پروژه احداث خط تولید RDF در ابتدای ماه ۱۲ ام شبیه‌سازی فرض شده است و پیش‌بینی می‌شود که بهره‌برداری از این پروژه شش ماه به طول بیانجامد. با احداث خط تولید سوخت جایگزین ریجکت جمع‌آوری شده از خطوط مورد پردازش دقیق‌تری قرار گرفته و پس از آن بین سه جریان "نرخ سوخت جایگزین" ، "نرخ رطوبت زدایی" و "نرخ ریجکت به محل دفن

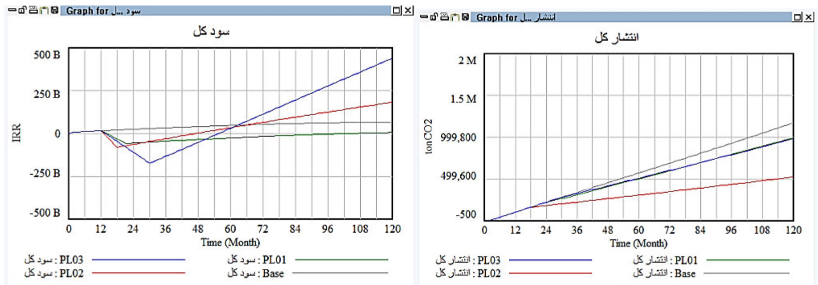
زباله" تقسیم خواهند شد. از آن زمان به بعد دیگر پسماندی بصورت مستقیم به دفن‌گاه نخواهد رفت. برخی روابط تغییر یافته یا اضافه شده در این مدل به شرح زیر هستند:

- درصد تبدیل به سوخت جایگزین $= STEP(۰,۵۳ ،۱۸)$
- درصد رطوبت زدایی $= STEP(۰,۲۶ ،۱۸)$
- درصد ریجکت به محل دفن زباله $= 1 - STEP(۰,۷۹ ،۱۸)$
- هزینه احداث خط تولید سوخت جایگزین $= ۱۶۷۰۰۰۰۰۰۰۰ \times PULSE(۱۲ ،۶)$

تغییرات اعمال شده در مدل تحت سیاست PL03: طبق اعلام سازمان مدیریت پسماند پروژه احداث کارخانه تولید کمپوست به روش هضم بی‌هوازی برای نیمه دوم سال ۹۵ برنامه-ریزی شده بود که بنا بر مشکلات در عقد قرارداد و تامین اعتبار تا به امروز به تعویق افتاده است. همانگونه که پیش‌تر بیان شد این پروژه با همکاری شرکت مپنا اجرا خواهد شد و این شرکت در ازای بهره‌برداری از برق و کود تولید شده توسط هاضم، ملزم به پرداخت ۷۰ درصد از هزینه‌های طرح خواهد بود و تامین اعتبار ۳۰ درصد باقیمانده (رقمی در حدود ۲۰ میلیارد تومان)، باید توسط سازمان مدیریت پسماند و شهرداری اصفهان صورت پذیرد.

- درصد تبدیل به کود $= ۰,۲۹۷۵۲ + STEP(۰,۱۱۷۴۸ ،۳۰)$
- درص شیرابه $= ۰,۵۱۷۳۵۶ + STEP(۰,۰۰۲۳۵۶ ،۳۰)$
- درصد تبدیل به ضایعات $= ۰,۱۸۵۱۲۴ + STEP(۰,۱۱۵۱۲۴ ،۳۰)$
- نرخ کاهش انتشار توسط کمپوست بی‌هوازی $= -۰,۰۱۲ - STEP(۰,۰۴۶ ،۳۰)$
- سود واحد کود $= ۳۱۵۰۰۰ - STEP(۸۱۵۰۰۰ ،۳۰)$
- هزینه احداث کارخانه هاضم $= ۱۱۱۱۰۰۰۰۰۰۰ \times PULSE(۱۲ ،۱۸)$

شکل ۷ رفتار متغیرهای سود و انتشار کل در نتیجه اجرای سیاست‌های مختلف را نشان می‌دهد.



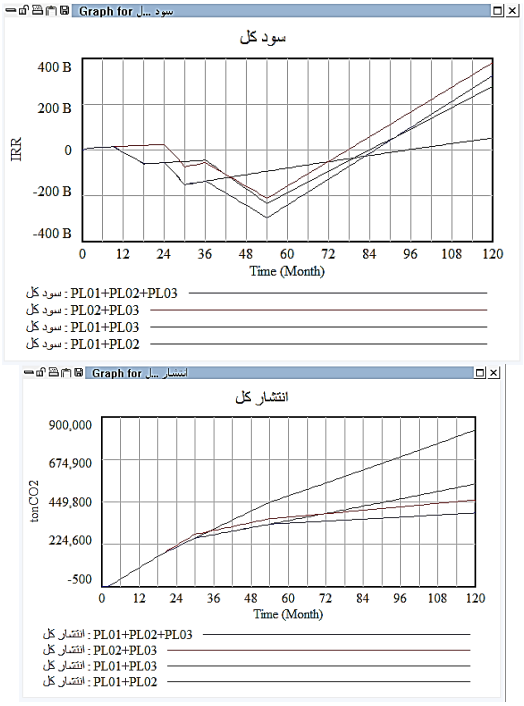
شکل ۷ تحلیل رفتار متغیر "سود کل" و "انتشار کل"با اجرای سیاست ها

بر اساس نمودار شکل ۷ با سرمایه‌گذاری در هریک از سه طرح پیشنهادی، وضعیت مالی سیستم در زمان اجرای پروژه‌ها زیان‌ده خواهد بود و پس از پایان آن شیب منحنی سود نسبت به حالت پایه افزایش خواهد یافت. تحلیل این افزایش شیب بدین صورت است که با بهره‌برداری هریک از این طرح‌ها هزینه فرآیند بخشی از سیستم پردازش و دفع پسماند نسبت به وضعیت فعلی کاهش یافته و یا درآمد زایی آن افزایش می‌یابد. در پی این امر سود ماهیانه که تغذیه کننده متغیر سود کل است به نسبت حالت فعلی بهبود خواهد یافت و در نهایت سود کل با سرعت بیشتری انباشته خواهد شد. حال این سؤال مطرح است که این افزایش در شیب منحنی سود کل به اندازه‌ای خواهد بود که هزینه سرمایه‌گذاری در این سیاست‌ها را جبران نماید و در پایان دوره شبیه‌سازی عایدی بیشتری نسبت به حال پایه نصیب سازمان کند. پاسخ این پرسش برای سیاست‌های PL02 و PL03 مثبت است ولی در مورد سیاست PL01 نمی‌توان انتظار جبران هزینه‌های این پروژه را در دوره ۱۰ ساله شبیه‌سازی داشت. شاید عاملی که باعث ایجاد این برتری در طرح‌های ۲ و ۳ شده ارزش افزوده حاصل از تولید محصولی جدید از زباله‌های ظاهراً بی‌ارزش است. در سیاست ۲، سازمان این قابلیت را پیدا می‌کند که از ریجکت خطوط پردازش، سوخت کوره کارخانه سیمان تولید کند و در سیاست ۳ با استقرار تکنولوژی هضم بی‌هوازی امکان تولید کود آلی مرغوب‌تری نسبت به حالت پایه بوجود خواهد آمد. نکته جالب توجه دیگر این است که سیاستی بهترین نتیجه را از منظر اقتصادی کسب کرده که بیشترین هزینه سرمایه‌گذاری را در میان سه طرح مذکور داشته و همچنین دیرتر از دو

طرح دیگر به بهره‌برداری رسیده است. سود کل سیستم تحت سیاست PL03 ، تنها در مدت ۳۳ ماه پس از بهره‌برداری از حالت پایه پیشی گرفته و در ماه ٦٣ ام شبیه‌سازی از سیاست PL02 نیز عبور کرده و به بهترین عملکرد مالی دست خواهد یافت.

رفتار متغیر انتشار کل تحت تاثیر اجرای هر یک از سیاست‌های معرفی شده، وضعیت مطلوب‌تری نسبت به حالت پایه از خود بروز داده است. به این دلیل که هر طرح با ارتقای عملکرد بخشی از سیستم پردازش و دفع موجب کاهش گازهای گلخانه‌ای منتشر شده از دفنگاه و یا افزایش گازهای گلخانه‌ای اجتناب شده به‌واسطه جایگزینی زباله‌های بازیابی شده با مواد دست اول، شده است. در این میان سیاست PL02 که تولید سوخت جایگزین از ریجکت خطوط را دنبال می‌کرد بهترین عملکرد را از آن خود کرده است. بر اساس این طرح با شروع بهره-برداری از خط تولید RDF ، دفن مستقیم زباله‌ها به صفر خواهد رسید و تولید سوخت کوره سیمان جایگزین آن خواهد شد. تاثیر این جایگزینی برکاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به وضوح از ماه هجدهم شبیه‌سازی قابل مشاهده است. در مورد دو سیاست دیگر نتایج به دست آمده بسیار به هم نزدیک هستند. در سیاست PL01 کاهش شیب بسیار کمی به‌واسطه افزایش بازیافت از ماه ۲۱ام در نمودار پدیدار شده و تا پایان شبیه‌سازی ادامه می‌یابد. در طرف مقابل اجرای سیاست PL02 از اواسط دوره شبیه‌سازی شروع به کاهش قابل قبولی در انتشارات ماهانه می‌کند ولی به خاطر بهره‌برداری دیرتر نمی‌تواند برتری چشمگیری نسبت به PL01 ایجاد کند.

اجرای سیاست‌ها بصورت ترکیبی: به‌منظور بررسی دقیق‌تر تاثیر اعمال سیاست‌ها بر عملکرد سیستم و همچنین کمک به تعیین نقشه راه سازمان در چشم‌انداز ۱۰ ساله، بار دیگر شبیه‌سازی تحت اعمال همزمان چند سیاست اجرا شده است. به دلیل محدودیت در تامین سرمایه لازم برای اجرای پروژه‌ها امکان پیش‌بردن آن‌ها بصورت همزمان وجود ندارد، باید آن‌ها را بصورت متوالی برنامه‌ریزی کرد. بر این اساس سیاست PL01 از ماه نه ام، سیاست PL02 از ماه بیست وچهارم و در نهایت سیاست PL03 از ماه سی و ششم کلید خواهند خورد. رفتار متغیرهای سود و انتشار کل در شکل ۸ ارائه شده‌اند.



شکل ۸ نتایج حاصل از اجرای ترکیبی سیاست‌ها

طبق نتایج بدست آمده از اجرای ترکیبی سیاست‌ها می‌توان گفت که در صورت تامین ۳۸۰ میلیارد ریال سرمایه به منظور اجرای هر سه سیاست، علاوه بر جایگزینی کامل سیستم پردازش و دفع سنتی با مدرن، عملکرد زیست محیطی سیستم نیز به طرز چشم‌گیری بهبود خواهد یافت. درغیراین‌صورت بهترین گزینه اجرای متوالی طرح‌های خط تولید سوخت جایگزین و هاضم بی‌هوازی است. با این کار علاوه بر کسب بیشترین سود می‌توان نتایج قابل قبولی از لحاظ سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز به دست آورد. در مورد سایر سیاست‌های ترکیبی به نظر می‌رسد که اجرای متوالی آن‌ها نه از لحاظ اقتصادی و نه از لحاظ زیست محیطی نسبت به سیاست‌های انفرادی برتر، توجیه‌پذیر نیست. جدول ٦ حاوی اطلاعات کلیدی در راستای

مقایسه سیاست‌های ترکیبی است.

جدول ۶ مقایسه متغیرهای کلیدی سیستم با اجرای ترکیبی سیاست‌ها

کد سیاست	سود کل مورد انتظار در پایان دوره (میلیارد ریال)	انتشار کل مورد انتظار در پایان دوره (میلیون تن معادل کربن دی اکسید)	امتیاز نرمال شده عملکرد کل در دو بعد مالی و زیست محیطی
PL01+PL02	۵۲	۰,۵٤٤	۰,۳٦۹
PL01+PL03	۲۷۸	۰,۸۳۰	۰,٦۲٦
PL02+PL03	۳۸۱	۰,٤٦۰	۰,٦۷۲
PL01+PL02+PL03	۳۲٤	۰,۳۹۱	۰,۹۱۰

انتخاب بهترین سیاست: پس از اجرای سیاست‌های انفرادی و ترکیبی، نوبت به مقایسه و انتخاب بهترین استراتژی به منظور ارتقای سیستم پردازش و دفع پسماند اصفهان می‌رسد. طبق آن‌چه که از مقایسه سیاست‌ها برمی‌آید می‌توان گفت هیچ‌یک از طرح‌های پیشنهادی نمی‌تواند به‌طور مطلق در هر دو جنبه ذکر شده موفق ظاهر شود. برای مثال اگرچه سیاست PL03 بهترین عملکرد مالی را از خود نشان داده اما از لحاظ انتشار گازهای گلخانه‌ای نتایج مناسبی به ارمغان نخواهد آورد. همین‌طور اجرای هر سه سیاست بطور متوالی علی‌رغم بهترین شرایط زیست‌محیطی، به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری گزاف نمی‌تواند سود آوری چشم‌گیری داشته باشد. با این تفاصیل باید در انتخاب بهترین سیاست پردازش و دفع به منظور ایجاد موازنه بین میزان سوددهی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، گزینه‌ای معرفی شود که در هر دو جنبه نتایج قابل قبولی رقم زده باشد. بدین منظور با توجه به وزن عملکرد مالی (۰,٦) و وزن عملکرد محیطی (۰,٤)، مجموع امتیاز نرمال شده هر یک از راه‌کارها محاسبه شده است (ستون اول از سمت چپ در جدول ٦). با توجه به نتایج عملکرد کل، سیاست اجرای متوالی طرح‌های خط تولید سوخت جایگزین و هاضم بی‌هوازی(PL02+PL03) بیشترین امتیاز عملکرد کل را داراست. بدین‌صورت که با تأمین سرمایه ۳۰ میلیارد تومانی اجرای هر دو پروژه، در پایان دوره ۱۰ ساله می‌توان انتظار داشت که علاوه‌بر جبران هزینه‌ها، به سود ۳۸ میلیارد تومانی دست یافت

و از انتشار ۷۰۰ هزار تن گاز گلخانه‌ای ناشی از پردازش و دفع پسماند جلوگیری کرد.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش به مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم دفع زباله و پسماند شهری شهر اصفهان با استفاده از روش پویایی‌سناسی سیستم پرداخته شد. سازمان مدیریت پسماند اصفهان با تدوین برنامه‌ای تحت عنوان "اصفهان ۱٤۰۰ شهری بدون دفن پسماند" سعی بر تبدیل تدریجی سیستم فعلی به یک سیستم مدرن مبتنی بر تولید انرژی و مواد با ارزش از زباله‌ها دارد. بدین‌منظور سه - راه‌کار پیش روی متخصصان این سازمان در نتیجه تحلیل‌های صورت گرفته وجود دارد. در این پژوهش تلاش شد تا اثرات هر یک از راه‌کارهای پیشنهادی با توجه به تأثیر بلندمدت این راه‌کارها بر متغیرهای هدف سیستم شامل شاخص‌های مالی و زیست‌محیطی و با مد نظر قرار دادن هزینه اجرای هر پروژه مورد ارزیابی قرار گیرند و در نهایت بهترین راه‌کار مشخص شود. با توجه به نتایج حاصل از منظر اقتصادی احداث کارخانه هاضم بی‌هوازی، از منظر کاهش انتشار آلاینده‌ها اجرای ترکیبی هر سه سیاست ذکر شده و در مجموع احداث خط تولید سوخت جایگزین و کارخانه هاضم بی‌هوازی بطور ترکیبی به‌عنوان بهترین راه‌کارها شناخته شده‌اند.

در این پژوهش به دلیل کمبود مطالعات زیست محیطی مرتبط با اثر گلخانه‌ای حاصل از پسماند در کشور، به منظور استخراج فاکتور انتشار گازهای گلخانه‌ای فرآیندهای مختلف پردازش و دفع، داده‌های استاندارد بین المللی طبق مشاوره از متخصصان سازمان مدیریت پسماند و با توجه به ترکیب درصد پسماند اصفهان بومی‌سازی شده‌اند. انجام تحقیقات میدانی در زمینه استخراج فاکتور انتشار گازهای گلخانه‌ای فرآیندهای مدیریت پسماند بصورت بومی در کشور در تحقیقات آتی نتایج دقیق‌تری را در اختیار متخصصان این حوزه قرار خواهد داد. از طرفی، از آن‌جا که این پژوهش تنها به بررسی راه‌کارهای پیشنهادی سازمان مدیریت پسماند پرداخته، راه‌کارهای اجتماعی که از مباحث مهم در تحقیقات حوزه مدیریت پسماند است را در آزمون سیاست‌های پیشنهادی مورد توجه قرار نداده است. البته متغیرهای مرتبط با نگرش اجتماعی شهروندان و رفتارهای تفکیک در مبدأ در مدل مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این‌حال، با توجه به اهداف توسعه پایدار توجه بیشتر به مباحث و راه‌کارهای اجتماعی ضروری به نظر می‌رسد و پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی بعد سوم توسعه پایدار یعنی بعد اجتماعی

در مدل مورد تأکید بیشتری قرار گیرد.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model (Warm)
2. Root Mean Square Percentage Error
3. Refuse Derived Fuel
4. Anaerobic digestion

۷- منابع

[1] World Energy Resource 2016, World Energy Council, https://www.worldenergy.org/.../2016/.../World-Energy-Resources-Full-report-2016.

[2] Yay, A.S.E. Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya, *Journal of Cleaner Production*, 94, 2015, 284-293.

[3] Abduli, M. A., Tavakolli, H., & Azari, A. Alternatives for solid waste management in Isfahan, Iran: a case study. *Waste Management & Research*, 31(5), 2013, 532–537.

[4] Hassanvand, M. sadegh, Nabizadeh, R., & Heidari, M. Municipal solid waste analysis in Iran. *Iranian Journal of Health and Environment*, 1(1), 2008, 9-18.

[5] Road map of waste management organization of Isfahan municipality, 2017.

[6] Zhao, X., Jiang, G., Li, A., & Wang, L. Economic analysis of waste-to-energy industry in China. *Waste Management*, 48, 2016, 604–618.

[7] Cremiato, R., Mastellone, M. L., Tagliaferri, C., Zaccariello, L., & Lettieri, P. Environmental impact of municipal solid waste management using Life Cycle Assessment: The effect of anaerobic digestion, materials recovery and secondary fuels production. *Renewable Energy*, 124, 2018, 180–188.

[8] Nizami, A. S., Shahzad, K., Rehan, M., Ouda, O. K. M., Khan, M. Z., Ismail, I. M. I., … Demirbas, A. Developing waste biorefinery in Makkah: A way forward to convert urban waste into renewable energy. *Applied Energy*, 186, 2017, 189–196.

[9] Singh, A., Managing the uncertainty problems of municipal solid waste disposal, *Journal of Environmental Management*, 240, 2019, 259-265.

[10] Mashayekhi, A.N., Transition in the New York State solid waste system: a dynamic analysis. *System Dynamic Review*. 9 (1), 1993, 23–47.

[11] Afshar Kazemi, M.A., Eftekhar, L., Omrani, G.A., The use of system dynamics methodology for analysis of generation, collection and transport systems of municipal solid waste (the use of metropolitan city of Tehran), *Journal of Environmental Science and Technology*, 18(2), 2016, 107-126.

[12] Ebrahimi, A., Ehrampoush, M.H., Hashemi, H., Dehvari, M. Predicting Municipal Solid Waste Generation through Time Series Method (ARMA Technique) and System Dynamics Modeling (Vensim Software), *Iranian Journal of Health and Environment*, 9(1), 2016, 57-68.

[13] Zare Mehrjerdi , Y., Faramarzinejad, M. A system dynamics modeling approach to evaluation public participation in the management of municipal solid waste, *Industrial Engineering & Management*, 35.1 (1.1), 2019, 149-156.

[14] Shafiei, I., Eshtehardian, E., Azizi, M. Management of waste generated by construction and demolish in construction industry projects using the dynamics of systems approach, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2019, 10.22065/JSCE.2019.190757.1886.

[15] Sukholthaman, P., & Sharp, A. A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand, *Waste Management*, 52, 2016, 50–61.

[16] Guo, H., Hobbs, B. F., Lasater, M. E., Parker, C. L., & Winch, P. J., System dynamics-based evaluation of interventions to promote appropriate waste disposal behaviors in low-income urban areas: A Baltimore case study. *Waste Management*, 56, 2016, 547–560.

[17] Ding, Z., Yi, G., Tam, V., & Huang, T., A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China.

Waste Management, 51, 2016, 130-141.

[18] Di Nola, M.F., Escapa, M., & Ansah, J.P., Modelling solid waste management solutions: The case of Campania, Italy, *Waste Management*, 78, 2018, 717–729.

[19] Mak, T.M.W, Chen, P.C., Wang, L., Tsang, D.C.W., Hsu, S.C., & Poon, C.S. A system dynamics approach to determine construction waste disposal charge in Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 241, 2019, 118309.

[20] Xiao, S., Dong, H., Geng, Y., Tian, X., Liu, C., & Li, H. Policy impacts on Municipal Solid Waste management in Shanghai: Asystem dynamics model analysis. *Journal of Cleaner Production*, 262, 2020 121366.

[21] Bigdeli, E., Motadel, M., Developing a dynamic model of business and information technology alignment with an agile approach, *Modern Researches in Decision Making*, 4(4), 2020, 147-175.

[22] Morshedi, A., Nezafati, N., Amirkhani, T., Zolfiaghdam. Dynamic Simulation of Motivational Policies Impacts on Employees Knowledge Sharing: Case of Bandar Imam Petrochemical Company, *Management Research in Iran*, 22(3), 2018, 29-48.

[23] Haji Gholam Saryazdi, A., Manteghi, M. Systematic Evaluation of Group Model Building in Qualitative System Dynamics Approach, *Management Research in Iran*, 22 (4), 2019, 203-224.

[24] Rabieh, M., Karami, M.M., Ziaee, S.M., Yasoubi, A., Salari, H. Dynamic Analysis of Traffic-Injury Problem in Iran: System Dynamics approach, *Modern Researches in Decision Making*, 1(4), 2016, 71-99.

[25] Road Map of the Waste Disposal Organization of Isfahan, Waste Disposal Organization of Isfahan Organization. Confidential documents.

[26] Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model (Warm), https://www.epa.gov/warm/documentation-chapters-greenhouse-gas-emission-energy-and-economic-factors-used-waste-reduction.