مهندسی صنایع و مدیریت شریف
دوره‌ی ۱-۲۸، شماره‌ی ۲، ص. ۶۷-۷۷

Original Article

مدل‌سازی دینامیکی سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهری در کلان‌شهر تهران

محمدعلی افشارکاظمی (دانشیار)
دانشکده‌ی مدیریت دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز
لیلا افتخار* (کارشناس ارشد)
گروه مدیریت،دانشگاه آزاد اسلامی واحد برند

سیستم‌های اجتماعی از تعامل روابط بین انسان‌ها شکل می‌گیرند، و تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی ــ نظیر پسماند ــ محصول فعالیت‌های مختلف در این سیستم‌هاست. مدیریت صحیح پسماند به‌عنوان یکی از معضلات عصر حاضر به‌شمار می‌آید. گرچه مدیریت پسماندهای شهر تهران در پژوهش‌های مختلف، و از جنبه‌های زیست‌محیطی و مدیریتی مورد بررسی قرارگرفته، امّا در تحقیقِ حاضر مدل‌سازی دینامیکی سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران برمبنای پیشینه‌ی تحقیقات انجام‌شده و با توجه به نگرش سیستمی انجام شده است. براساس نتایج حاصل از اجرای شبیه‌سازی، رفتار متغیرهای کلیدی در یک افق زمانی ۱۴ ساله پیش‌بینی شده و پس از حصول اطمینان از اعتبار مدل، از آن برای سیاست‌گذاری و ارائه‌ی سناریوی بهبودِ مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران استفاده شده است.

واژگان کلیدی: مدیریت پسماند جامد، شهر تهران، پسماند خشک ارزشمند، مدل‌سازی پویا.

dr.mafshar@gmail.com
eftekharl@yahoo.com

۱. مقدمه

توسعه‌ی صنایع، رشد جمعیت، افزایش درآمد سرانه و تغییر الگوی مصرف موجبات تولید روزافزون زباله‌های شهری، صنعتی و روستایی را به وجود آورده است. از سوی دیگر لزوم توجه به توسعه‌ی پایدار در همه‌ی ارکان زندگی، ایجاد قوانین منسجم زیست‌محیطی و افزایش آگاهی و حساسیت جامعه‌ی جهانی نسبت به محیط زیست و بهداشت عمومی بیانگر لزوم توجه هرچه بیشتر مسئولین و پژوهش‌گران به مسائل مرتبط با محیط زیست شهری است. تصمیم‌گیری مؤثر و یادگیری در محیطی آکنده از پیچیدگی پویا، مدیران و مسئولان را وادار می‌سازد تا با استفاده از ابزاری منسجم و توان‌مند مرزها و محدوده‌های مدل ذهنی[1] را گسترش داده و پیامدها و اثرات تصمیم‌های خود را قبل از وقوع پیش‌بینی کنند. پیچیدگی طبیعت سیستم‌های شهری و ازجمله سیستم مدیریت مواد زاید جامد همراه با تعاملات داخلی و روابط غیرخطی المان‌های آن، پژوهش‌گر را به بهره‌گیری از متدولوژی پویایی‌های سیستم برای شبیه‌سازی مدل ترغیب کرد. با استفاده از این روش محققین قادرخواهند بود تا با درک درست روابط و تحلیل دقیق از سیستم به پیشنهاد سناریوهای بهبود بپردازند.

میزان تولید زباله در شهر تهران به‌مرور زمان و با توجه به افزایش جمعیت در حال گسترش است، درحالی که روش اصلی انهدام[2] کماکان مشابه سایر کشورهای در حال توسعه «دفن نیمه‌بهداشتی» است. با توجه به ضرورت کاهش استفاده از زمین (به‌عنوان مهم‌ترین منبع) در سایت‌های دفن، لزوم تغییر اساسی در مدیریت مواد زاید جامد در شهر تهران احساس می‌شود. در پژوهش پیش رو سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهری در شهر تهران با در نظرگرفتن داده‌های مربوط به سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۷ مورد بررسی قرارگرفته است. اطلاعات جمعیت شهر از سرشماری سال‌های ۱۳۷۵ و ۱۳۸۵ مرکز آمار ایران[۱] و داده‌های مربوط به پسماندهای جامد شهری از پایگاه سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری تهران،[۲] آمارها و مستندات موجود در این سازمان،[۳-۵] مصاحبه با کارشناسان ذی‌ربط و طرح جامع مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران، مصوب شورای اسلامی شهر[۶] اتخاذ شده است. طبق آمار سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری تهران، از میزان ۲۵۴۷۵۹۴ تن زباله‌ی جامد تولیدی شهروندان در سال ۱۳۸۶ تنها ۹۵۲۹۱ تن پسماند خشک باارزش در مبدأ جمع‌آوری شده که معادل ۴٪ کل زباله‌ی تولیدی است، این درحالی است که ۹۰ درصد پسماندها به‌صورت دفن در زمین انهدام یافته‌اند و بازیابی و استحصال انرژی صفر درصد بوده است.[۲و۳]

با توجه به داده‌های فوق، سؤالات پژوهش را می‌توان چنین مطرح کرد:

۱. چه متغیرهایی در تولید زباله‌ی جامد در شهر تهران مؤثرند؟
۲. درصد پسماندهای خشک و تر در مبدأ تولید در شهر تهران چقدر است؟
۳. چه درصدی از پسماندهای تولیدی شهر تهران به‌عنوان پسماند خشک ارزش‌مند در مبدأ تولید تفکیک شده و وارد چرخه‌ی بازیافت می‌شوند؟

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۴/۶، اصلاحیه ۱۳۸۹/۸/۸، پذیرش ۱۳۸۹/۱۰/۴.

۴. چه درصدی از زباله‌ی تولیدی شهر توسط گزینه‌ی دفن در زمین انهدام می‌یابند؟

۵. آیا در حال حاضر از پسماندهای خشک بی‌ارزش، سوخت جایگزین (RDF) تهیه می‌شود؟

هدف از انجام این پژوهش، ارائه‌ی مدل جامع شبیه‌سازی سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران است، تا بتوان با استفاده از آن برآوردی از میزان تولید پسماند و ظرفیت‌های جمع‌آوری، پردازش، بازیافت و دفع در افق شبیه‌سازی ارائه و بهترین سناریو برای مدیریت سیستم را طراحی کرد. قطعاً دست‌یابی به این اهداف جز با شناخت کامل عناصر سیستم و روابط متقابل بین آن‌ها میسر نخواهد شد.[۷]

۲. ادبیات و پیشینه‌ی تحقیق

در این بخش از مقاله ابتدا عناصر و المان‌های سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهری و ابزار مدل‌سازی پویای سیستم معرفی و سپس پیشینه‌ی پژوهش‌های انجام‌شده درخصوص مدل‌سازی دینامیکی سیستم‌های مدیریت مواد زاید جامد شهری در جهان ارائه می‌شود. در خاتمه نمودار مفهومی سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران در قالب نمودار زیرسیستم‌ها نشان داده می‌شود.

۱.۲. سیستم مدیریت پسماندهای جامد

ماده (۲) قانون مدیریت پسماندها، پسماند را چنین تعریف می‌کند:

«به مواد جامد، مایع و گاز (غیر از فاضلاب) گفته می‌شود که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم حاصلِ فعالیت انسان است و از نظر تولیدکننده زاید تلقی می‌شود». طبق این قانون پسماندها به پنج گروه تقسیم می‌شوند.[۸]

«مواد زاید جامد شهری (پسماند شهری)، مخلوطی از مواد زاید خانگی و تجاری هستند که در یک منطقه‌ی شهری تولید می‌شوند. جمع‌آوری و مدیریت این مواد بنا بر قانون مدیریت پسماندها به‌عهده‌ی شهرداری‌هاست.»[۹]

مدیریت مواد زاید جامد عبارت است از: «کنترل نظام‌مند و هدف‌دار عناصر موظف تولید، ذخیره در محل، جمع‌آوری، حمل‌ونقل، پردازش و بازیافت و دفن، مشتمل بر مدیریت مواد زاید جامد از نقطه‌ی تولید تا محل دفع نهایی.»[۹]

عناصر موظف سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهری عبارت‌اند از: تولید، ذخیره‌سازی، جمع‌آوری، حمل‌ونقل، تبدیل، بازیافت و دفع. همچنین عناصر و اجزای پشتیبان مدیریت پسماندها شامل فعالیت‌هایی است که برای تحقق اهداف سیستم مدیریت پسماندها باید انجام گیرد. این عناصر شامل سازمان‌دهی و تشکیلات، امور مالی، آموزش، روابط عمومی و غیره است. جمع عناصر موظف و پشتیبان، سیستم مدیریت پسماندها را تشکیل می‌دهد.[۱۰]

در قاعده‌ی هرم سلسله‌مراتب مدیریت جامع پسماندها، کاهش تولید قرار داشته و سپس به‌ترتیب استفاده‌ی مجدد، بازچرخش، زباله‌سوزی با بازیافت انرژی، زباله‌سوزی و در آخرین مرحله دفن در زمین به‌عنوان اولویت گزینه‌های دفع مطرح می‌شوند. با توجه به سلسله‌مراتب مدیریت جامع مواد زاید جامد، لزوم تأکید مدیران شهری بر کاهش تولید پسماندها در مبدأ و دفع نهایی آن‌ها در زمین آشکار می‌شود.[۹]

۲.۲. پویایی‌های سیستم

جی فارستر[۳] اولین توسعه‌دهنده‌ی مفاهیمی است که امروزه با عنوان پویایی‌های سیستمی یا سیستم دینامیک شناخته می‌شود. مسائل مدیریتی و نظام‌های اجتماعی از ماهیت غیرعقلایی برخوردارند، یعنی در بستر زمان رفتارهای غیرمنتظره‌یی از خود بروز می‌دهند. در این سیستم‌ها، درجه‌ی بالایی از روابط غیرخطی همراه با پیچیدگی وجود داشته و متغیرها از خود رفتاری پویا نشان می‌دهند. بنابراین، اتخاذ تصمیم درباره‌ی این سیستم‌ها آن هم تنها با تکیه بر شهود و درک مدیریتی ممکن است نتایج غیر قابل انتظاری به همراه داشته باشد.[۱۱]

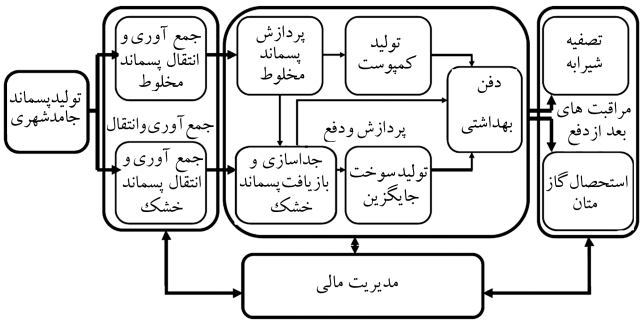
متدولوژی پویایی‌های سیستم از شش گام برای حل مسئله استفاده می‌کند که عبارت‌اند از: شناسایی و بیان مسئله، مفهوم‌سازی سیستم، صورت‌بندی مدل، شبیه‌سازی، اعتبارسنجی مدل، تحلیل و بهبود سیاست، اجرای سیاست.[۱۱] در رابطه با به‌کارگیری متدولوژی پویایی‌های سیستم در مدل‌سازی سیستم‌های مدیریت پسماندهای جامد شهری، در سال ۱۹۹۳ تحقیقی درخصوص کاربرد متدولوژی سیستم پویا برای مدل‌سازی سیستم‌های مدیریت پسماند جامد شهری در ایالت نیویورک آمریکا انجام گرفت.[۱۲] در آن پژوهش سه سیاست مختلف در مدل مورد بررسی قرارگرفت و در انتها نتیجه‌گیری شد که اجرای هر سه سیاست نشان می‌دهد دردست بودن منابع مالی مورد نیاز سیستم پسماند جامد باعث کاهش هزینه‌های بلندمدت می‌شود.

در سال ۱۹۹۷، یک مدل پویا برای درک طبیعت پویای تعاملات بین عناصر سیستم مدیریت مواد زاید جامد شهری در یک نمونه‌ی مادرشهر در کشور هندوستان ارائه شد.[۱۳] مدل ارائه‌شده شامل سه زیرسیستم اصلی و شاخص‌های پایداری سیستم است و در آن آزمون تقابل گزینه‌های خط‌مشی و ساختار انجام شده است. پژوهش‌گران با بررسی سیاست‌های مختلف، ساختار HE[۴] (سخت ـ متعادل) را به‌عنوان بهترین گزینه پیشنهاد کردند. این گزینه شاخص ترکیبی کم‌تری به‌همراه دارد که نشان‌دهنده‌ی سطح بهداشت عمومی بالاتر است، در حالی که نیازمند سرمایه‌گذاری کم‌تر بوده و تعداد بیشتری از زباله‌گردها را پشتیبانی می‌کند.

در سال ۲۰۰۲ از رویکرد سیستم پویا و منطق فازی برای مدل‌سازی سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهری در شهر برلین استفاده شد.[۱۴] در این مطالعه رفتار مدل تحت دو سیاست مختلف شبیه‌سازی شد؛ با اجرای سیاست اول مشخص شد چنانچه هزینه‌های پردازش پسماند از یک حد بحرانی بیشتر شود، آگاهی[۵] به یاری طلبیده می‌شود که خود بهبود رفتار را فعال می‌کند و منجر به کاهش تولید پسماند می‌شود. در سیاست دوم تغییرات در رفتار زیست‌محیطی به تنظیمات در پارامتر بازیافت منتج می‌شود.

در سال ۲۰۰۵ مدل‌های پویای سیستم برای پیش‌بینی میزان تولید پسماند جامد در یک سکونت‌گاه شهری (شهر سن‌آنتونیو ایالت تگزاس) با پتانسیل زیاد رشد اقتصادی تدوین شد.[۱۵] پیش‌بینی تولید پسماندهای جامد شهری برمبنای فاکتورهای مؤثری از قبیل رشد جمعیت، درآمد خانوار، جمعیت هرخانوار و فعالیت اقتصادی برآورد شده است. در این پژوهش پسماند تولیدی برآورد شده برای هر مرکز خدماتی شهر با استفاده از پنج مدل شبیه‌سازی شد و هر مدل تولید مواد زاید جامد را (برحسب تن در سال) به‌عنوان تابعی از فاکتورهای ذکرشده شبیه‌سازی کرده است.

در سال ۲۰۰۷ در پژوهشی نظام مدیریت پسماندهای جامد شهری مدل‌سازی شد.[۱۶] این مدل میزان تولید زباله‌ی جامد، ظرفیت جمع‌آوری و پتانسیل تولید انرژی الکتریکی از پسماند جامد در شهر داکا را پیش‌بینی کرد. با اجرای این مدل پژوهش‌گران دریافتند میزان تولید پسماند با افزایش جمعیت، تولید ناخالص ملی (GDP)[۶] و سرانه‌ی درآمد فزونی می‌یابد ــ اگرچه پتانسیل تولید انرژی الکتریکی از پسماندهای جامد هم بیشتر می‌شود. در ادامه‌ی مطالعه، پژوهشگران دو سیاست مختلف را در مدل بررسی، و نتیجه گرفتند که تولید پسماند جامد، ظرفیت جمع‌آوری و پتانسیل تولید برق از زباله در شهر داکا به‌مرور در حال افزایش است. همچنین



شکل ۱. نمودار زیرسیستم‌های مدل سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران.[۵و۷]

دریافتند که با ادامه‌ی روند جاریِ تخصیص بودجه به مدیریت پسماندهای جامد شهری در شهر داکا، مدیریت صحیح زباله امکان‌پذیر نبوده و لازم است بودجه‌ی تخصیصی برای جمع‌آوری و پردازش پسماندها به‌طور هم زمان افزایش یابد.

پس از آشنایی با ادبیات و پیشینه‌ی تحقیق، فرضیات پژوهش طرح می‌شود. یادآور می‌شود هر رابطه‌ی علّی و به‌تبع آن، هر معادله‌ی ریاضی در مدل یک فرضیه است، امّا با توجه به لزوم جلوگیری از طولانی‌شدن بحث و تأکید بر ساده‌سازی فقط به ذکر فرضیات پایه‌ی مدل بسنده می‌شود.

فرضیه‌ی ۱: متغیرهای مؤثر در نرخ تولید پسماند جامد عبارت‌اند از: جمعیت، سرانه‌ی تولید پسماند، درآمد سرانه، بُعد خانوار، رشد اقتصادی شهر، و الگوی مصرف شهروندان.

فرضیه‌ی ۲: بخش اعظم زباله‌ی تولیدی شهر تهران در مبدأ تولید توسط پسماندهای تر تشکیل شده و مابقی پسماندهای خشک و دفنی هستند.

فرضیه‌ی ۳: درصد کمی از زباله‌ی تولیدی شهروندان به‌عنوان پسماند خشک ارزش‌مند در مبدأ تولید جمع‌آوری می‌شود.

فرضیه‌ی ۴: بیشتر زباله‌ی تولیدی شهروندان با دفن در زمین منهدم می‌شود.

فرضیه‌ی ۵: درمجتمع پردازش و دفع آرادکوه تولید سوخت جایگزین از پسماندهای خشک بی‌ارزش وجود ندارد.

مدل مفهومی سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران با استفاده از نمودار زیرسیستم‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران دارای پنج زیرسیستم اصلی است: تولید پسماند جامد شهری، جمع‌آوری و انتقال، پردازش و دفع، مراقبت‌های بعد از دفع، و مدیریت مالی. هرکدام از این زیرسیستم‌ها خود از بخش‌های دیگری تشکیل شده‌اند که با هم در تعامل‌اند و کارکرد آن‌ها با یکدیگر عمکرد کلّی سیستم را نمایش می‌دهد.[۷]

۳. روش تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش به‌دلیل به‌کارگیری تفکر سیستمی در تحلیل نظام مدیریت پسماندهای جامد شهری از جنبه‌ی هدف کاربردی است، و به‌لحاظ روش اجرا ــ با توجه به توصیف شرایط و پدیده‌ها ــ پژوهشی توصیفی ـ محتوایی است. از سوی دیگر به‌دلیل بررسی روابط علّت و معلولی از نوع تحقیقات علّی است. با این رویکرد در مقاله از ابزار مدل‌سازی پویای سیستم برای توصیف، بررسی، تحلیل و پیش‌بینی مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران استفاده شده است. در انتها نیز با دانش برخاسته از وضعیت کنونی سیستم و پیش‌بینی آینده، سناریوی بهبود ارائه شده است.

چنان‌که بیان شد نخستین گام در متدولوژی مدل‌سازی پویایی سیستم «شناسایی و تعریف مسئله» است. برای شناسایی مسئله نخست به بیان و تعریف آن می‌پردازیم و سپس توسط الگوهای مرجع[۷] رفتار متغیرهای کلیدی در یک افق زمانی مناسب تشریح می‌شود. یک الگوی مرجع نشان‌دهنده‌ی رفتار مسئله طی زمان است.

۱.۳. بیان مسئله

میزان تولید زباله در شهر تهران با افزایش جمعیت در حال فزونی است در حالی که آمارها نشان می‌دهد بیشتر پسماندهای تولیدی شهر به‌صورت دفن در زمین منهدم می‌شوند. همچنین درصد کمی از پسماندهای خشک در مبدأ تولید تفکیک شده و بازیابی انرژی از پسماندها انجام نمی‌گیرد. در جدول ۱ متغیرهای کلیدی سیستم ــ همان متغیرهای سطح یا انباشت مدل ــ تشریح شده‌اند. همچنین افق زمانی در پژوهش حاضر، سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۹ است. سال مبنا در مدل سال ۱۳۸۶ در نظرگرفته شده است. در این پژوهش الگوهای مرجع برای متغیرهای کلیدی با توجه به داده‌های موجود در سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری تهران برای سال‌های ۸۴ تا ۸۷ رسم شده‌است. در موارد اندکی که اطلاعات از سال ۷۵ موجود بوده مقیاس زمانی سال‌های ۷۵ تا ۸۷ در نظرگرفته شده است. الگوی مرجع رفتار متغیر پسماند جامد شهری در نمودار ۱ نشان داده شده است. چنان که ملاحظه می‌شود، تولید پسماند جامد شهری از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۷ رفتاری نمایی داشته و میزان آن از حدود دو میلیون تن در سال به سه میلیون تن افزایش یافته است.

۲.۳. تدوین مدل

برای مفهوم‌سازی سیستم از نمودار حلقه‌ی علّی استفاده شده است که از آن به‌منظور نشان‌دادن روابط علّی بین متغیرها و ساختار بازخوری سیستم استفاده می‌شود. در شکل ۲ نمودار حلقه‌ی علّی مدل سیستم مدیریت پسماند جامد شهر تهران ارائه شده است. متغیرهای تأثیرگذار در نرخ تولید زباله‌ی جامد شهری: جمعیت شهر، سرانه‌ی تولید پسماند، درآمد سرانه‌ی شهروندان، متوسط تعداد افراد خانوار، رشد اقتصادی شهر و الگوی مصرف‌شهروندان است. در مدل پویای سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران برای سهولت بررسی و ساده‌سازی مدل، متغیرهای مؤثر در تولید پسماند جامد شهری را جمعیت شهر و سرانه تولید پسماند در نظرگرفته‌ایم.[۷]

مدل شبیه‌سازی پویای سیستم در محیط Vensim PLE تدوین شده است.[۱۷] این مدل دارای بیست متغیر سطح (انباشت) و ۸۳ معادله‌ی ریاضی است. مدل در

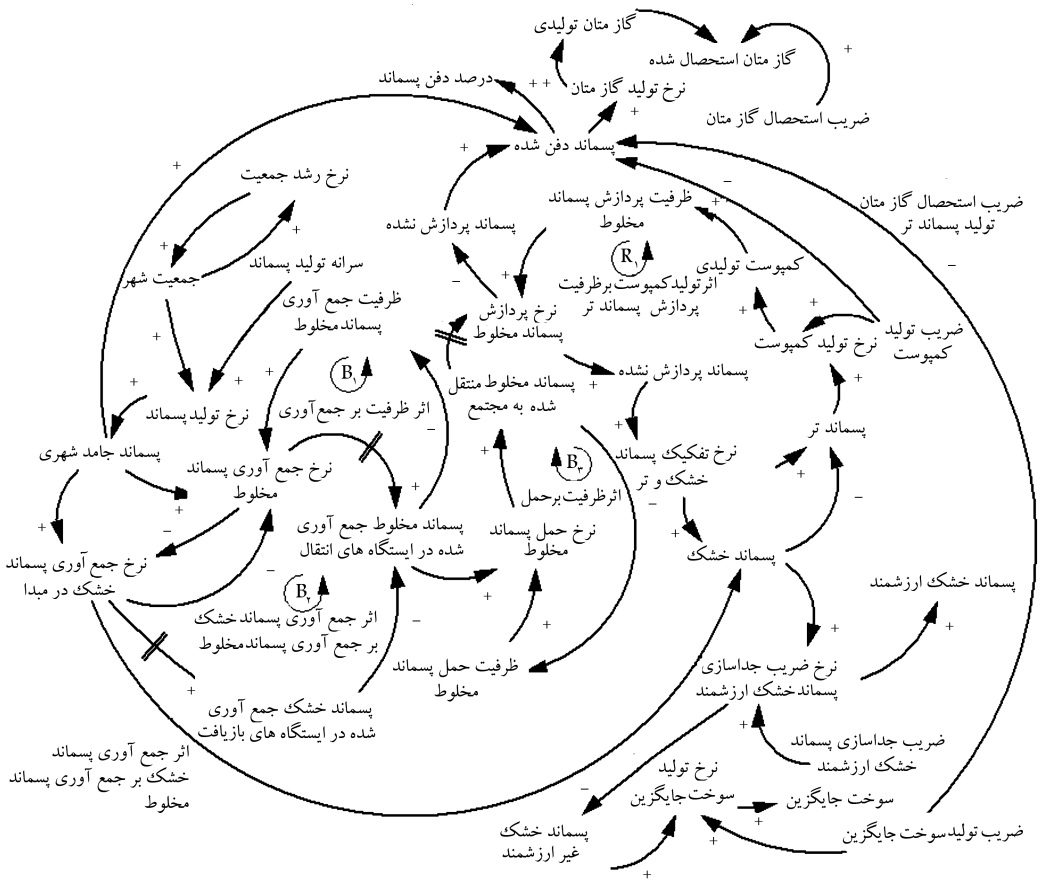
نمودار ۱. الگوی مرجع متغیر پسماند جامد شهری.[۷]

جدول ۱. متغیرهای کلیدی مدل سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران.[۷]

نام متغیر	واحد	تعریف
جمعیت شهر	نفر	میزان جمعیت شهر در سال.
پسماند جامد شهری	تن	مجموع پسماندهای مخلوط خانگی و پسماندهای خشک جمع‌آوری شده در طرح تفکیک در مبدأ.
پسماند خشک جمع‌آوری شده در ایستگاه‌ها	تن	زباله خشک ارزشمند جمع‌آوری شده در ایستگاه‌های انتقال پسماند خشک ۲۲ گانه.
پسماند مخلوط جمع‌آوری شده در ایستگاه‌ها	تن	مجموع اوزان زباله باسکول شده در ۱۱ ایستگاه انتقال.
پسماند مخلوط منتقل شده	تن	پسماند مخلوط شهری منتقل شده به مجتمع پردازش و دفع آرادکوه.
پسماند پردازش شده	تن	پسماندهای مخلوط منتقل شده به مجتمع که وارد خطوط پردازش می‌شوند.
پسماندهای خشک ارزشمند	تن	زباله خشک بازیافت شده است که در مجتمع پردازش و دفع آرادکوه توسط فرآیند پردازش از پسماند مخلوط منتقل شده تفکیک می‌شود.
کود کمپوست	تن	نشان دهنده کمپوست تولیدی است که از پسماندهای تر تولید می‌شود.
سوخت جایگزین تولیدی	تن	میزان تولید سوخت جایگزینی است که از پسماندهای خشک بی‌ارزش که قابل بازیافت نیستند تهیه می‌شود.
پسماند دفن شده	تن	نشان دهنده پسماند شهری است که در دفنگاه مدفون می‌شود.
درصد دفن پسماند از کل زباله تولیدی	درصد	نشان دهنده درصد پسماند دفن شده در زمین نسبت به کل پسماند تولیدی در سال است.
گاز متان استحصال شده	متر مکعب	میزان جمع‌آوری گاز متان تولیدی ناشی از فعل و انفعالات شیمیایی زباله‌های مدفون را نشان می‌دهد.
ظرفیت جمع‌آوری پسماند مخلوط	تن	نشان دهنده ظرفیت و توان سیستم در جمع‌آوری پسماندهای شهری است که شهروندان روزانه در سطل‌های زباله قرار می‌دهند.
ظرفیت انتقال پسماند	تن	نشان دهنده توانایی سیستم در حمل زباله‌های جمع شده در ایستگاه‌های انتقال به مجتمع پردازش و دفع آرادکوه است.
ظرفیت پردازش پسماند	تن	نشان دهنده توان سیستم در پردازش پسماندهای منتقل شده به مجتمع پردازش و دفع آرادکوه است.

سه نما[۸] ارائه شده است. نمای یک اختصاص به زیرسیستم‌های تولید، جمع‌آوری و انتقال پسماندهای خشک و تر دارد. در دومین نما، زیرسیستم‌های پردازش پسماند مخلوط و تولید کمپوست از زباله‌ی تر ارائه شده است. در نمای سوم نیز زیرسیستم‌های پردازش پسماند خشک، دفع نهایی و مراقبت‌های بعد از دفع مدل‌سازی شده‌اند. در این مقاله به‌اختصار سومین نما در شکل ۳ ارائه شده است. یادآور می‌شود مشابه هر سیستم دیگر در این مدل نیز تأخیرهای زمانی ــ از قبیل تأخیر در جمع‌آوری پسماندهای مخلوط (به‌طور متوسط نیم‌روز)، تأخیر در پردازش و تأخیر چهارهفته‌یی در سایت تخمیر برای فرآوری کمپوست وجود دارد. امّا به‌دلیل کوچکی این زمان‌ها نسبت به واحد زمانی (سال)، و متعاقباً صفرشدن ارقام زباله‌ی تولیدی با لحاظ کردن آن‌ها در مدل ــ در معادلات ریاضی در نظر گرفته نشده‌اند. پیش از آن که مدلی برای سیاست‌گذاری و پیش‌بینی سیستم در آینده به‌کار گرفته شود، لازم است اعتبار آن مورد بررسی قرار گیرد. هدف نهایی فرایند اعتبارسنجی اطمینان از صحت رفتار ساختاری مدل در عین توجه به فرایند مدل‌سازی است. آزمون‌های مرتبط با مدل‌های پویایی سیستم را می‌توان در قالب آزمون‌های ساختار مدل، رفتار مدل و مضامین سیاست‌های مدل دسته‌بندی کرد. درخصوص مدل پویای سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران آزمون‌های اعتبارسنجی از قبیل تأیید ساختار، کفایت مرز، سازگاری ابعادی، شرایط حدّی، تأیید پارامترها، بازتولید رفتار، رفتار نامتعارف، عضو خانواده، رفتار غافل‌گیرکننده، پیش‌بینی رفتار، پیش‌بینی رفتار تغییریافته و بهبود سیستم انجام گرفته است. در این مجال مختصر آزمون شرایط حدّی بررسی می‌شود.

مدل باید در شرایط حدّی محکم و مقاوم باشد، یعنی در این شرایط مدل باید رفتار واقعی داشته باشد. آزمون شرایط حدّی می‌پرسد که آیا مدل در زمانی که ورودی‌ها مقادیر حدّی خود یعنی صفر یا بی‌نهایت را می‌پذیرند رفتار مناسبی دارد یا خیر؟[۱۸] در این آزمون مقادیر حدّی برخی از پارامترهای مدل تعیین شده و سپس رفتار تولیدشده توسط مدل با رفتار مشاهده‌شده از سیستمِ واقعی مقایسه می‌شود. در واقع در نقاط حدّی مدل نباید رفتار غیرمعمولی از خود بُروز دهد.[۱۱] به‌طور مثال، در مدل مورد نظر با قراردادن مقدار صفر به‌جای ۰٫۰۹ برای پارامتر درصد جداسازی پسماند خشک ارزش‌مند در مجتمع آرادکوه، مقدار پسماند خشک ارزش‌مند جداسازی شده



شکل ۲. نمودار حلقه‌ی علّی مدل.[۷]

به صفر رسیده و متعاقب آن میزان پسماند خشک غیر ارزشمند افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی رفتار معمولی مدل در شرایط حدّی است.[۷]

۳.۳. اجرای مدل (شبیه‌سازی مدل مبنا)

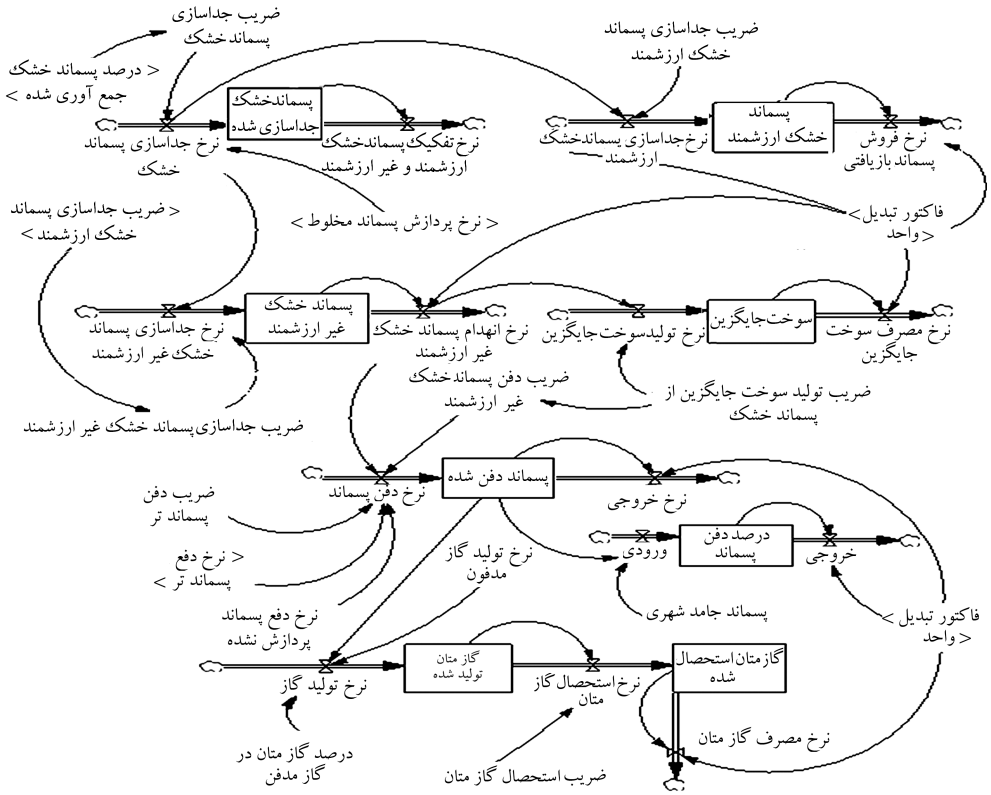
مدل پویای سیستم مدیریت پسماند جامد شهر تهران در افق زمانی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۹ شبیه‌سازی شده است. در ادامه نتایج اجرای شبیه‌سازی ۱۰ متغیر انباشت در مدل مبنا ارائه شده است.[۷] در نمودار ۲ الگوی رفتار پنج متغیر در اجرای مدل مبنا ارائه شده است. پسماند جامد شهری از ۲۵۴۷۵۹۴ تن در سال ۱۳۸۶ به ۳۰۵۲۱۴۰ تن در سال ۱۳۹۹ می‌رسد که رشدی افزایشی دارد (فرضیه‌ی ۱). همچنین عملکرد طرح تفکیک در مبدأ در حال بهبود است. درصد تفکیک پسماندهای خشک از کل پسماند جامد شهری از ۴ درصد در سال ۱۳۸۶ به ۲۲ درصد در سال ۱۳۹۹ می‌رسد و همین امر باعث کاهش میزان متغیر پسماند مخلوط می‌شود (فرضیه‌ی ۳). درصد پسماند مخلوط از کل پسماند جامد شهر تهران از ۹۶ درصد در سال ۱۳۸۶ به ۷۷٫۵ درصد در سال ۱۳۹۹ کاهش داشته که نشان‌دهنده‌ی بهبود عملکرد طرح تفکیک پسماندهای خشک در مبدأ است (فرضیه‌ی ۲). ظرفیت جمع‌آوری پسماند مخلوط با شیب کم در حال افزایش است.

در سال ۱۳۸۶ مجموع ظرفیت پردازش پسماند مخلوط ۳۹۴۹۳۰ تن، در سال ۱۳۸۷ ظرفیت پردازش پسماند ۸۸۲۵۷۰ تن بوده که در سال ۱۳۸۸ به میزان ۷۳۰۰۰۰ تن در سال به آن افزوده شده است. با در نظرگرفتن ضریب استهلاک تجهیزات پردازش پسماند به‌صورت ۱۰ درصد سالیانه، از سال ۱۳۸۹ روند کاهش در ظرفیت آغاز می‌شود. هرچند بخشی از استهلاک تجهیزات با تعمیر و نگه‌داری قابل بازگشت است امّا به‌تدریج ظرفیت پردازش کاهش می‌یابد.[۷]

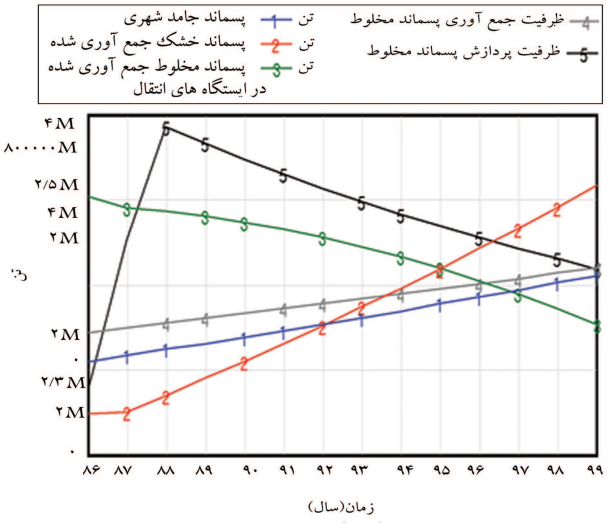
در نمودار ۳ رفتار متغیرهای کمپوست تولیدی، پسماند خشک ارزش‌مند تفکیک‌شده در مجتمع، درصد دفن از کل پسماند، RDF تولیدی و گاز متان به‌دست آمده ارائه شده است. تولید کمپوست از پسماندهای تر بهترین گزینه‌ی دفع در مدیریت پسماندهای جامد شهری است. الگوی رفتار متغیر کمپوست تولیدی مشابه رفتار پسماند پردازش شده است. در سال ۱۳۸۶ درصد جداسازی پسماندهای خشک ارزشمند از کل پسماندهای خشک پردازش‌شده در مجتمع آرادکوه ۹ درصد بوده است. با فرض ثابت‌بودن درصد جداسازی، میزان این متغیر از ۷۳۷۷ تن در سال مبنا به ۱۱۳۶۸ تن در سال ۱۳۹۹ خواهد رسید.[۷]

با افزایش ظرفیت پردازش پسماند و به‌دنبال آن کاهش میزان پسماند دفن‌شده، درصد دفن پسماند از کل پسماند جامد شهری که در سال مبنا ۹۰ درصد است در انتهای افق شبیه‌سازی به ۷۴ درصد کاهش می‌یابد (فرضیه‌ی ۴). همچنین میزان تولید RDF از پسماندهای خشک غیر ارزشمند (فرضیه‌ی ۵) و استحصال گاز متان از مدفن‌ها با درنظرگرفتن سیاست‌های فعلی مدیریت پسماند در افق شبیه‌سازی صفر بوده است.[۷]

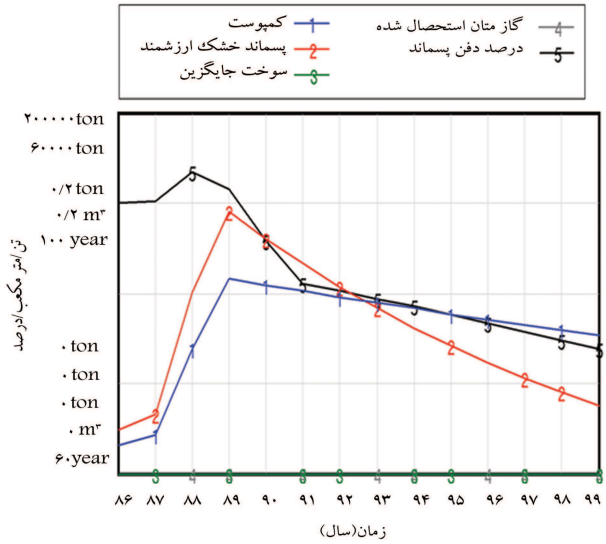
مدل‌های پویای سیستم با گذر از مراحل مختلف مفهوم‌سازی، صورت‌بندی، آزمایش، مفهوم‌سازی مجدد و اصلاح و پالایش به‌صورت رفت و برگشتی ایجاد می‌شود. پس از کسب مدلی رضایت‌بخش، و بررسی و تعیین اعتبار آن با استفاده



شکل ۳. نقشه‌ی انباشت ـ جریان زیرسیستم‌های پردازش پسماند خشک، دفع و مراقبت‌های بعد از دفع.[۷]



نمودار ۲. الگوی شبیه‌سازی‌شده‌ی رفتار متغیرهای پسماند جامد شهری، پسماند خشک و مخلوط، ظرفیت‌های جمع‌آوری و پردازش در اجرای مبنا.[۷]



نمودار ۳. الگوی شبیه‌سازی شده‌ی رفتار پنج متغیر مدل در اجرای مبنا.[۷]

از آزمون‌های مختلف، باید مدل را در معرض تحلیل حساسیت و سیاست[۹] ــ که آخرین هدف مدل‌سازی است ــ قرار داد.[۱۱]

۴.۳. تحلیل حساسیت مدل

«تحلیل حساسیت» سازوکاری برای ایجاد یقین در تحلیل‌های مبتنی بر مدل و سیاست‌های پیشنهادی است و طی آن به این سؤال که «مدل تا چه حد نسبت به تغییر در مقادیر پارامترها و تغییرات جزیی آشکار در ساختار مدل حساسیت دارد؟» پاسخ داده می‌شود.[۱۱] در پژوهش حاضر دو تحلیل حساسیت در مورد متغیرهای مدل انجام گرفته است.

الف) بررسی متغیر سطح پسماند خشک جمع‌آوری‌شده در مبدأ تولید با تغییر مقادیر پارامترهای مؤثر بر آن. متغیرهای تأثیرگذار عبارت‌اند از: نرخ رشد جمعیت، سرانه‌ی تولید پسماند، درصد جمع‌آوری پسماند خشک در مبدأ. از آنجا که مدیریت

پسماند شهری در تغییر پارامتر درصد جمع‌آوری پسماند خشک در مبدأ بیشترین نقش را دارد، لذا حساسیت متغیر سطح پسماند خشک جمع‌آوری‌شده در مبدأ نسبت به تغییرات این پارامتر در دامنه‌ی موجه خود بررسی می‌شود. دو متغیر بر درصد جمع‌آوری پسماند خشک در مبدأ مؤثرند: درصد پایه‌ی جمع‌آوری پسماند خشک، و ضریب افزایش سالیانه‌ی آن.

ابتدا حساسیت متغیر با تغییر پارامتر درصد پایه‌ی جمع‌آوری پسماند خشک تحلیل می‌شود. در مدل مقدار این پارامتر ۰٫۰۴ در نظر گرفته شده است. با توجه به گزارشات سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری تهران درصد پسماندهای غیر تر (خشک و دفنی) در مبدأ تولید ۳۹ درصد کل پسماند تولیدی است.[۴] با در نظر گرفتن ۷ درصد برای پسماندهای دفنی و بی‌ارزش، می‌توان ۰٫۳۲ را به‌عنوان ضریب بیشینه‌ی تفکیک پسماندهای خشک ارزش‌مند در مبدأ در نظر گرفت. لذا دامنه‌ی پارامتر درصد پایه‌ی جمع‌آوری پسماند خشک در قالب طرح تفکیک ــ با فرض ثابت‌بودن ضریب افزایش سالیانه (تابع RAMP با شیب ۰٫۳۵۵) ــ می‌تواند بین صفر تا ۰٫۰۵۷ باشد. با در نظرگرفتن عدد ۰٫۰۵۷ برای این پارامتر مقدار متغیر درصد پسماند خشک[۱۰] در انتهای افق شبیه‌سازی به ۰٫۳۲ می‌رسد؛ یعنی در سال ۱۳۹۹، کلیه‌ی پسماندهای خشک ارزشمند در مبدأ تولید جمع‌آوری می‌شود. ابتدا مقدار پارامتر به ۰٫۰۲ کاهش و سپس به ۰٫۰۵۷ افزایش داده می‌شود و اثر آن بر متغیر سطح تحلیل می‌شود. در اجرای مدل مبنا میزان انباشت پسماند خشک جمع‌آوری‌شده در سال ۱۳۹۹ معادل ۶۳۳۳۰۷ تن است. با کاهش درصد پایه‌ی جمع‌آوری پسماند خشک به ۲ درصد، میزان کل پسماند خشک جمع‌آوری‌شده در سال ۱۳۹۹ به ۳۱۶۶۵۳ تن نزول می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش پارامتر مورد نظر به ۰٫۰۵۷، میزان انباشت پسماند خشک به ۹۰۲۴۶۲ تن در سال ۱۳۹۹ می‌رسد.[۷]

در مرحله‌ی بعد میزان متغیر سطح پسماند خشک جمع‌آوری شده در مبدأ با تغییر پارامتر ضریب افزایش سالیانه درصد تفکیک پسماند خشک تحلیل می‌شود. بدین‌منظور پارامتر درصد پایه جمع‌آوری پسماند خشک ثابت فرض شده و ضریب افزایش سالیانه‌ی درصد تفکیک پسماند خشک با تغییر شیب تابع RAMP تنظیم می‌شود. ابتدا شیب تابع از مقدار پایه ۰٫۳۵۵ به ۰٫۱ کاهش می‌یابد و نتیجه مشاهده می‌شود. سپس شیب به میزان ۰٫۵۴ افزایش می‌یابد. رفتار متغیر پسماند خشک تفکیک‌شده با تغییر شیب تابع افزایش سالیانه مشابه الگوی آن در شبیه‌سازی تغییر پارامتر درصد پایه جمع‌آوری پسماند خشک است.[۷]

ب) بررسی حساسیت دو متغیر پسماند پردازش‌شده و پسماند پردازش‌نشده با تغییر مقدار آغازین متغیر ظرفیت پردازش پسماند. ابتدا مقدار آغازین متغیر ظرفیت پردازش از ۳۹۴۹۳۰ تن در سال به ۱۰۰۰۰۰ تن کاهش و سپس به ۷۵۰۰۰۰ تن افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی متغیرهای پسماند پردازش‌شده و پسماند پردازش‌نشده نشان می‌دهد که الگوی رفتار متغیرها تغییری نداشته است. با کاهش ظرفیت پردازش پسماند نمودار پسماند پردازش‌شده به پایین نمودار مبنا تنزل یافته و با افزایش میزان ظرفیت، به بالا منتقل شده است. عکس این تغییر درمورد پسماند پردازش‌نشده صادق است.[۷]

۵.۳. تحلیل سیاست مدل

هدف نهایی اکثر فعالیت‌های مدل‌سازی پویایی‌های سیستم، تحقیق در مورد علّت تأثیرگذاری سیاست‌های مشخص بر رفتار سیستم و نیز شناسایی سیاست‌های مناسب برای بهبود رفتار سیستم واقعی از طریق تحلیل سیاستِ مبتنی بر مدل است. این کار نیازمند مهارت‌های فنی است تا بتوان سیاست‌های جایگزین در سیستم واقعی را به تغییرات لازم در مدل ترجمه کرد و بالعکس.[۱۱] در مدل پویای سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران دو تحلیل سیاست انجام گرفته است.

الف) **تحلیل سیاست با تغییرات پارامتری:** تغییر درصد جداسازی پسماند خشک ارزش‌مند در مجتمع پردازش آرادکوه.

درصد جداسازی پسماند خشک در مجتمع آرادکوه یکی از پارامترهای حساس سیاستی در مدل است که مدیران پسماند می‌توانند بر آن اعمال نظر کنند. در خطوط پردازش پسماند با تغییر درجه‌ی مِش صافی در ادوات تفکیک پسماند می‌توان درصد تفکیک پسماندهای خشک ارزشمند را تغییر داد.

مقدار این پارامتر در مدل مبنا ۰٫۰۹ در نظرگرفته شده است. مقدار پارامتر به ۰٫۳ افزایش یافته و اثر این تغییر سیاست بر متغیرهای سطح پسماند خشک ارزشمند، پسماند خشک بی‌ارزش، پسماند دفن‌شده و درصد دفن پسماند از کل پسماند جامد شهری در شبیه‌سازی اجرای مدل بررسی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این تغییر در پارامتر سیاستی حساس منجر به یک سیاست بهبودیافته می‌شود، چرا که میزان پسماندِ خشک ارزشمندِ جداسازی‌شده را افزایش می‌دهد و موجب درآمدزایی برای مدیریت پسماند می‌شود. همچنین میزان پسماند دفن شده و درصد دفن از کل پسماند تولیدی در این سیاست کاهش می‌یابد. با اجرای سیاست مبنا درصد دفن از کل پسماند تولیدی که در سال ۱۳۹۹ معادل ۷۴ درصد بوده، به ۷۲٫۵ درصد کاهش می‌یابد.[۷]

ب) **تحلیل سیاست با تغییرات ساختاری:** اثر تغییر سیاست در تولید سوخت جایگزین (RDF).

فلسفه‌ی اساسی متدولوژی پویایی‌های سیستم مبتنی بر این پیش‌فرض است که «بین ساختار حاکم بر سیستم و رفتار آن ارتباط متقابل و تنگاتنگی وجود دارد».[۱۸] بنابراین مطالعات مرتبط با بهبود سیستم‌ها، اغلب با تغییرات ساختاری در مدل درگیرند. در مدل پویای سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران اثر تغییر سیاست در تولید سوخت جایگزین (RDF) بررسی شده است. در حال حاضر در مجتمع آرادکوه تولید RDF وجود ندارد. لذا ضریب تولید در مدل برابر صفر قرار داده شده است. پارامتر با استفاده از تابع STEP تغییر داده می‌شود. فرض بر این است که برای سال ۱۳۹۱ مدیریت پسماند شهر تهران تصمیم بگیرد که ۳۰ درصد پسماندهای خشک بی‌ارزش با ارزش حرارتی بالا را تبدیل به RDF کند. لذا معادله‌ی پارامتر به‌صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\text{ضریب تولید سوخت جایگزین از پسماند خشک} = 0 + (STEP(0.3, 90))$$

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مقدار متغیر انباشت RDF در سال ۱۳۹۱ با تغییر ساختاری پارامتر از صفر به ۱۱۸۵۱۳ تن رسیده است. همچنین نمودار درصد دفن نیز به پایین منتقل شده است. به نظر می‌رسد این تغییر پارامتر سیاستی حساس منجر به سیاستی بهبود یافته شود.[۷]

۴. تدوین سناریو

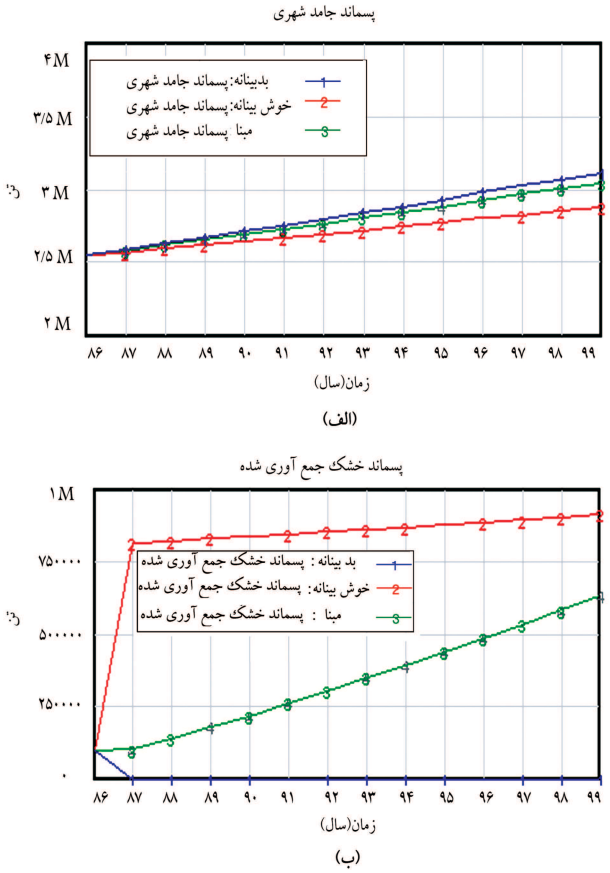
در این بخش با توجه به نتایج حاصل از تحلیل حساسیت و سیاست مدل، سناریوی بهبود تدوین می‌شود. پس از آن که با انجام تحلیل حساسیت و سیاست، مدلی معتبر با ساختار سیاستی بهبودیافته به دست آمد، می‌توان از آن برای تدوین انواع سناریوهای مورد نظر برای آینده استفاده کرد. در این پژوهش دو سناریوی خوش‌بینانه[۱۱] و

جدول ۲. مقایسه‌ی پارامترهای مدل در سه سناریو.[۷]

سناریو / پارامتر	مبنا	خوش بینانه	بدبینانه
رشد خالص جمعیت (درصد سالیانه)	۱٫۴	۱٫۴	۱٫۴
سرانه‌ی تولید پسماند (تن)	۰٫۳۲۲	۰٫۲۱۵	۰٫۳۶۵
درصد جمع‌آوری پسماند خشک در مبدأ	۴	۳۲	صفر
ضریب افزایش سالیانه درصد جمع‌آوری پسماند خشک در مبدأ	تابع Ramp با شیب ۰٫۳۵۵	صفر	صفر
ضریب تولید کمپوست (درصد)	۱۵	۳۵	۵
ضریب جداسازی پسماند خشک ارزشمند در مجتمع آرادکوه (درصد)	۹	صفر	صفر
ضریب تولید سوخت جایگزین از پسماند خشک بی‌ارزش	صفر	۰٫۵	صفر
ضریب استحصال گاز متان از مدفن	صفر	۱	صفر

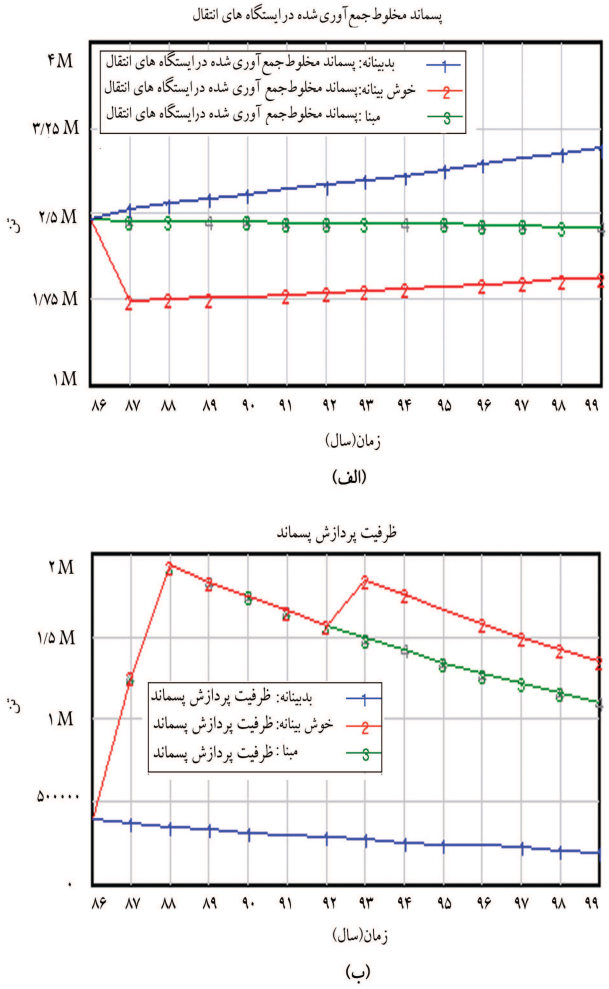
بدبینانه[۱۲] با تغییر پارامترها در دامنه‌ی موجه و با استفاده از نتایج تحلیل حساسیت ارائه شد. نتایج این دو سناریو با سناریوی مبنا مقایسه شده است. مقادیر پارامترها در سه سناریو در جدول ۲ ارائه شده است. از آنجا که تغییر فاکتور نرخ رشد جمعیت شهر خارج از حیطه‌ی مدیریت پسماند است، در هر سه سناریو رشد خالص جمعیت شهر ۱٫۴ درصد سالیانه در نظرگرفته شده است. بیشترین ضریب جمع‌آوری پسماند خشک در مبدأ تولید با توجه به ترکیب زباله‌ی شهر تهران ۳۲ درصداست. با این فرض که در سناریوی خوش‌بینانه در قالب طرح تفکیک در مبدأ کلیه‌ی پسماندهای خشک باارزش جمع‌آوری شوند و با در نظرگرفتن ۷ درصد برای پسماندهای دفنی و بی‌ارزش، ضریب جمع‌آوری پسماندهای خشک در مبدأ مدل برابر ۰٫۳۲ قرار داده می‌شود. از آنجا که این ضریب از ابتدای دوره‌ی شبیه‌سازی اِعمال می‌شود، ضریب افزایش سالیانه صفر در نظرگرفته شده است. با توجه به این که کلیه‌ی پسماندهای خشک باارزش در طرح تفکیک جمع‌آوری شده‌اند، درصد تفکیک پسماندهای خشک باارزش در مجتمع برابر صفر است. از سوی دیگر از آنجا که در سناریوی بدبینانه هیچ تفکیکی در مبدأ انجام نمی‌گیرد، درصد جمع‌آوری پسماند خشک در مبدأ و ضریب افزایش سالیانه‌ی آن صفر در نظرگرفته شده است.[۷]

درخصوص انباشت ظرفیت پردازش پسماند در سناریوی خوش‌بینانه به‌منظور جبران کاهش ظرفیت ناشی از استهلاک تجهیزات، برای سال ۱۳۹۲ که در میانه افق برنامه‌ریزی قرار دارد میزان ۳۵۰۰۰۰ تن افزایش ظرفیت ایجاد شده است. این رقم معادل اختلاف ظرفیت پردازش در سال ۱۳۸۸ (بیشترین) و سال ۱۳۹۲ است. از سوی دیگر سناریوی بدبینانه ــ با فرض بدترین شرایط ــ حاصل می‌شود. در این سناریو فرض بر این است که پارامترهای سیستم بدترین مقادیر ممکن را به خود اختصاص داده‌اند. در این حالت، ظرفیت پردازش پسماند مخلوط به میزان ۳۹۴۹۳۰ تن در سال (میزان مبنا در سال ۱۳۸۶) ثابت نگه داشته شده و افزایش سال‌های ۸۷ و ۸۸ اضافه نشده است. ضرایب تولید کمپوست از پسماندهای تر و سوخت جایگزین (RDF) از پسماندهای خشک بی‌ارزش در سناریوی خوش‌بینانه برمبنای مقادیر بیشینه‌ی نظری آن‌ها تعیین شده است.[۷] سپس پارامترهای هر سناریو در مدل وارد و اثر تغییر پارامتر بر متغیرهای کلیدی بررسی شده است. در نمودار ۴ الگوی شبیه‌سازی رفتار متغیرهای پسماند جامد شهری (۴الف) و پسماند خشک جمع‌آوری شده در مبدأ (۴ب) نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود با تغییر سرانه‌ی تولید پسماند نمودار پسماند تولیدی در شهر تهران به سمت بالا (افزایش) یا پایین (کاهش) انتقال یافته است. در نمودار ۴ب که نشان‌دهنده‌ی میزان پسماند خشک جمع‌آوری شده در مبدأ است، علت شیب کم افزایشی نمودار در سناریوی



نمودار ۴. رفتار متغیرهای پسماند جامد شهری و پسماند خشک جمع‌آوری شده در سه سناریو.[۷]

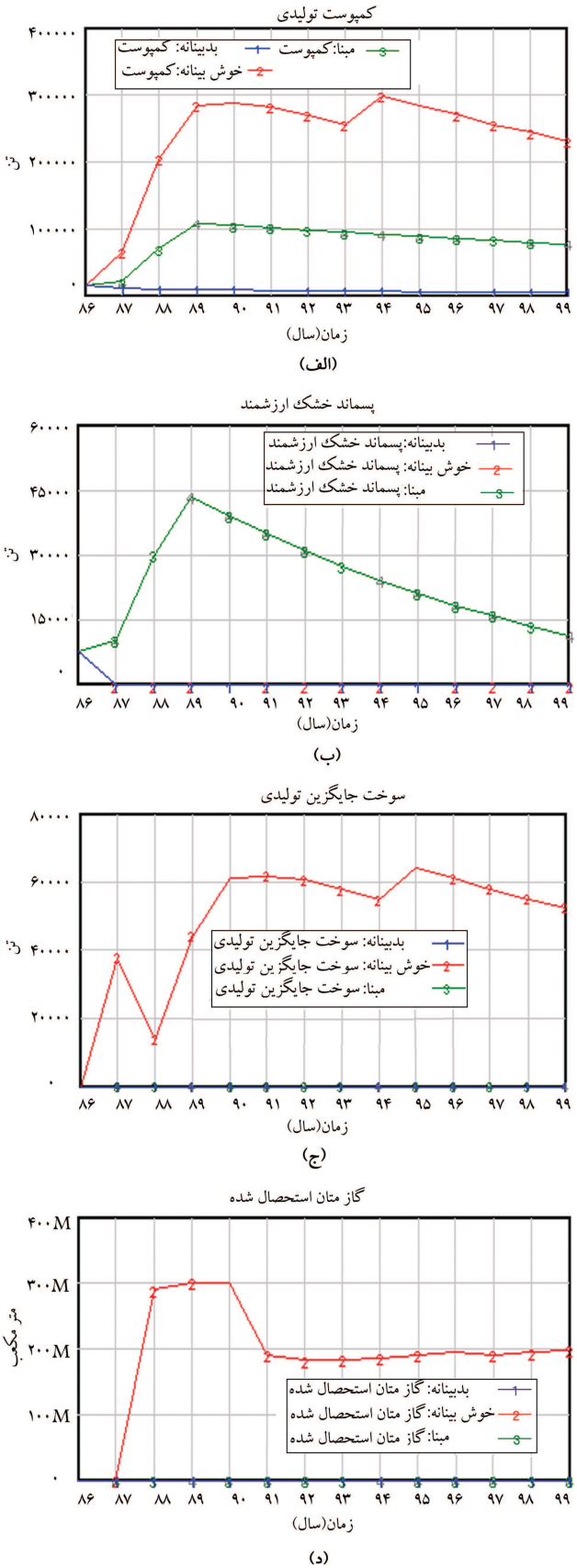
خوش‌بینانه‌ی آن است که در این سناریو از ابتدای دوره‌ی شبیه‌سازی مقدار پارامتر «درصد جمع‌آوری پسماند خشک در مبدأ» در بهترین حالت خود (۰٫۳۲) قرار دارد. با مقایسه‌ی سه منحنی در نمودار ۴ب مشخص می‌شود که در حالت مبنا میزان پسماند خشک جمع‌آوری‌شده در مبدأ در سال ۱۳۹۹ (پایان شبیه‌سازی) برابر ۶۳۳۳۰۷ تن بوده‌که در حالت بدبینانه به صفر و در حالت خوش‌بینانه به ۹۱۴۰۳۲ تن رسیده است.



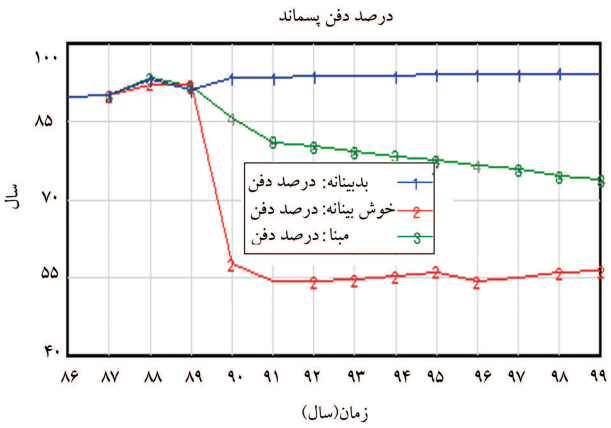
نمودار ۵. رفتار متغیرهای پسماند مخلوط و ظرفیت پردازش در سه سناریو.[۷]

در نمودار ۵ الگوی شبیه‌سازی رفتار متغیرهای پسماند مخلوط جمع‌آوری‌شده در ایستگاه‌های انتقال و ظرفیت پردازش پسماند نشان داده شده است. با بهترشدن سیستم، پسماند مخلوطِ جمع‌آوری شده کاهش یافته است (نمودار ۵الف). چنان که در نمودار ۵ب مشاهده می‌شود، افزایش ظرفیت در میانه‌ی راه شبیه‌سازی باعث انتقال نمودار به بالا در حالت خوش‌بینانه شده است.

در نمودار ۶ الگوی شبیه‌سازی رفتار متغیرهای کمپوست تولیدی (۶الف)، پسماند خشک ارزش‌مند (۶ب)، سوخت جایگزین تولیدی (۶ج) و گاز متان استحصال شده (۶د) در سه سناریو ارائه شده است. رفتار متغیر کمپوست تولیدی (۶الف) مشابه متغیر ظرفیت پردازش پسماند در نمودار ۵ب است. در دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه مقدار پسماند خشک ارزش‌مند تفکیکی در مجتمع صفر است (نمودار ۶ب). علت آن است که در سناریوی خوش‌بینانه تمامی پسماندهای خشک ارزش‌مند در مبدأ جمع‌آوری می‌شوند و در سناریوی بدبینانه اصلاً تفکیکی در مجتمع وجود ندارد. چنان که در نمودارهای ۶ج و ۶د مشاهده می‌شود، تولید سوخت جایگزین از پسماندهای خشک بی‌ارزش و استحصال گاز متان از مدفن تنها در سناریوی خوش‌بینانه وجود دارد. در حال حاضر در مرکز دفن کهریزک با نصب چاهک‌هایی گاز متان سوزانده می‌شود تا جلوی انفجار آن گرفته شده و در عمل استحصال گاز انجام نمی‌گیرد.[۷]



نمودار ۶. رفتارمتغیرهای کمپوست، پسماند خشک ارزشمند، سوخت جایگزین و گاز متان استحصال شده در سه سناریو.[۷]



نمودار۷. الگوی شبیه‌سازی رفتار متغیر درصد دفن در سه سناریو.[۷]

بهترین شاخص برای بررسی عملکرد سناریوها را می‌توان میزان انباشت درصد دفن پسماند در نظرگرفت. نتیجه‌ی شبیه‌سازی اجرای سناریوها درمورد این متغیر در نمودار ۷ نشان داده شده است. در سناریوی مبنا میزان درصد دفن پسماند از کل پسماند جامد تولیدی در سال ۱۳۸۶ (مبنا) برابر با ۹۰٪ بوده که در سال انتهایی شبیه‌سازی به ۷۴٪ کاهش یافته است. در سناریوی خوش‌بینانه میزان ۹۰٪ در سال مبنا به ۵۶٪ در سال ۹۹ تنزل داشته است و این نشان‌گر بهینه‌سازی مطلوب در سیستم است. در سناریوی بدبینانه عدد ۹۰ درصدی سال مبنا در انتهای افق شبیه‌سازی به ۹۴٪ افزایش داشته است.[۷]

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش شده تا با استفاده از ابزار مدل‌سازی پویا، مدلی جامع از وضعیت سیستم مدیریت پسماند در شهر تهران ارائه و با بررسی نتایج حاصل از تحلیل سیاست و حساسیت مدل سناریوی بهبود تدوین شود. بهترین گزینه برای مدیریت سیستم پسماندهای جامد شهری در کلان‌شهر تهران حرکت براساس هرم سلسله‌مراتب مدیریت جامع زایدات برمبنای پارامترهای سناریوی خوش‌بینانه است. اجرای هرچه‌کامل‌تر سناریوی خوش‌بینانه ما را در دسترسی سریع‌تر به وضعیت بهتر در سیستم یاری می‌دهد.

به‌عنوان مثال با افزایش درصد جمع‌آوری پسماندهای خشک در مبدأ تا حداکثر آن (یعنی ۳۲٪)، علاوه برکاهش دفن پسماند در زمین، از آلودگی پسماندهای بازیافتی در چرخه‌ی دفع جلوگیری شده و با بازگرداندن آن‌ها به چرخه‌ی تولید در مصرف منابع تجدیدناپذیر صرفه‌جویی می‌شود. همچنین با افزایش درصد تولید کمپوست از پسماندهای آلی، علاوه بر استفاده‌ی مجدد از آن‌ها به‌عنوان کود، با دفن کم‌تر پسماند مواجه می‌شویم. متأسفانه هم‌اکنون درصد بازیابی انرژی از پسماندهای شهری در تهران صفر است. بحث بازیابی انرژی شامل مواردی از قبیل زباله‌سوزی، تولید سوخت جایگزین (RDF) و بیوگاز است. تولید سوخت جایگزین از پسماندهای خشک بی‌ارزش علاوه بر استفاده از آن‌ها به‌عنوان منبع انرژی، کاهش درصد دفن پسماند در زمین را نیز در پی دارد. همچنین با استحصال گاز متان از مدفن زباله، علاوه بر دست‌یابی به منبع انرژی جایگزین گاز طبیعی، از آلودگی محیط زیست و انتشار گازهای گلخانه‌یی جلوگیری می‌شود.[۷]

مدل پویای ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند با تغییر پارامترهای سیستم به‌عنوان الگویی برای پیش‌بینی رفتار عناصر سیستم مدیریت مواد زاید جامد شهری در سایر شهرهای کشور ملاک عمل کارشناسان قرارگیرد.

یادآور می‌شود در این پژوهش بر جریان مواد در مدل دینامیکی تأکید شده و جریان اطلاعات در مدل پویای سیستم در نظرگرفته نشده است. به‌دلیل ساده‌سازی مدل، محدودیت زمان و امکانات پژوهش، چهار متغیر تأثیرگذار در نرخ تولید پسماند جامد شهری (درآمد سرانه، متوسط تعداد افراد خانوار، رشد اقتصادی شهر و الگوی مناسب مصرف شهروندان) در مدل دینامیکی لحاظ نشده‌اند. مبحث درآمد ـ هزینه‌ی سیستم و نظارت و کنترل زیست‌محیطی در مدل لحاظ نشده است. در ضمن زیرسیستم غیررسمی جمع‌آوری و بازیافت پسماند خشک (توسط زباله گردها) در مدل دیده نشده و بازیافت انرژی از پسماندهای جامد شهری به‌اختصار بیان شده است، که هریک از موارد فوق می‌تواند پیش‌زمینه‌یی برای تحقیقات آتی باشد.

همچنین مباحث بررسی کیفیت محصولات بازیافتی (پسماند خشک وکمپوست) از زباله‌های شهر تهران، امکان‌سنجی فنی و اقتصادی صنایع بازیافت با توجه به شرایط و امکانات شهر و ترکیب زباله‌ی آن و وضعیت دفن پسماندها از لحاظ بهداشتی و مهندسی می‌تواند دست‌مایه‌ی پژوهشی دیگر به‌منظور مطالعات جدید قرارگیرد.

منابع (References)

1. "The nation-wide census of 1375 and 1385": Retrieved September 12, 2009, from http://www.sci.org ir/portal/faces/public/sci26(In Persian).
2. "Information and statistics of Tehran waste managment organization" : .Retrieved September 14, 2009 from. http :bazyaf Tehran.ir /Default.aspx? tabid =22998 (In Persian).
3. "1386 Annual performance report"Tehran waste management organization(In Persian)(1387).
4. Mahdipour,E."Comparative review of waste manage-

پانوشت‌ها

1. mental model
2. disposal
3. Jay W. Forrester
4. hard-equivalent
5. awareness
6. gross domestic production
7. reference modes
8. view
9. policy & sensitivity analysis
10. dry waste percentage
11. best
12. worst

ment statistics",Tehran,Tehran waste management organization(In Persian)(1388).

5. "Tehran solid wastes management in the year of 1387",Tehran ,the brochure of Tehran waste management organization in specialized exhibition of environment(In Persian)(1387).
6. The Master Plan of Solid Wastes Management in Tehran city,Tehran,Islamic Council of Tehran city(In Persian)(1388).
7. Eftekhar,L."Dynamic modeling of municipal solid wastes management system in metropolitan city of Tehran",Urban Management dissertation(M.A.),Islamic Azad University,Science and Research Branch(In Persian)(1388).
8. Abedini,K."Subject index of wastes management law and detailed regulations of wastes management law",Tehran,Tehran Waste Management Organization to Cooperate with Ghazvin University Crusade(In Persian)(1385).
9. Abduli, M.A. "Municipal solid waste recovery", Tehran, University of Tehran Press (In Persian) (1387).
10. Abasvand,M."Municipal wastes management (The Case of Golestan Province),Urbanization dissertation(M.Sc.),Islamic Azad University,Tehran Center Branch(In Persian)(1385).
11. SUSHIL"System dynamics:A Practical Approach for Managerial Problems",Translated by:Teymouri, E. Nourali, A. Valizadeh, N. Tehran, Publication center of Iran University of Science and Technology (In Persian)(1387).
12. Mashayekhi, A.N. "Transition in the New York state solid waste system: A dynamic analysis", *System Dynamics Review,* **9**(1), pp. 23-47 (1993).
13. Sudhir, V.; Srinivasan, G. and Muraleed haran, V.R. "Planning for sustainable solid waste management in urban India", *System Dynamics Review,* **13**(3), pp. 223-246 (1997).
14. Karavezyris, V.; Timpe, K. and Marzi, R. "Application of system dynamics and fuzzy logic to forecasting of municipal solid waste", *Mathematics and Computers in Simulation,* (60), pp. 149-158 (2002).
15. Dyson, B. and Chang, N. "Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling", *Waste Management,* (25), pp. 669-679 (2005).
16. Sufian, M.A. and Bala, B.K. "Modeling of urban solid waste management system: The case of Dhaka city", *Waste Management,* (27), pp.858-868 (2007).
17. "Vensim PLE", Retrievd Augest 15, 2009 from http://www.vensim.com/freedownload.html
18. Sterman, J.D., *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, London, McGraw-Hill (2000).