طراحی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین لجستیک معکوس پسماند جامد شهری مطالعهٔ موردی: شهر شیراز

یاسمن اسمعیل‌زاده[۱]، هادی صاحبی[۲،*]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۳۰.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۲

واژگان کلیدی:
طراحی زنجیرهٔ تأمین،
لجستیک معکوس،
پسماندهای جامد شهری،
تحلیل پوششی داده‌ها،
روش محدودیت اپسیلون.

چکیده

در سال‌های اخیر، عمدتاً به دلیل افزایش نگرانی‌های اجتماعی دربارهٔ محیط‌زیست، عبارت لجستیک معکوس، ارتباط زیادی با مدیریت پسماند پیدا کرده است. در واقع، مدیریت پسماندهای جامد شهری می‌تواند به‌عنوان یکی از مسائل لجستیک معکوس در مدیریت زنجیرهٔ تأمین در نظر گرفته شود. در این پژوهش، مدلی برای طراحی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین لجستیک معکوس پسماند جامد شهری ارائه شده است که با استفاده از دو تابع هدف سود و مسائل زیستی سعی شده دو بعد از توسعهٔ پایدار در نظر گرفته شود. تابع هدف اقتصادی به بررسی بیشینه‌سازی سود و تابع هدف زیست‌محیطی به بررسی کمینه‌سازی میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از حمل زباله و نگهداری آن در محل دفن می‌پردازد. مدل پیشنهادی، قادر به تعیین تعداد و مکان بهینه تسهیلات و جریان مواد بین گره‌ها در سطوح مختلف شبکه به‌منظور دستیابی هم‌زمان به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی است. برای حل مدل چندهدفه از روش محدودیت اپسیلون استفاده شده است. همچنین به‌منظور کاهش فضای جواب مسئله و پایش مکان‌های بالقوه تسهیلات شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین موردمطالعه روش مؤثر رتبه‌بندی تحلیل پوششی داده‌ها ارائه شده است. پژوهش حاضر، به‌عنوان پژوهش کاربردی، از داده‌های واقعی سازمان مدیریت پسماند شهرداری شیراز استفاده کرده و مدل پیشنهادی در نرم‌افزار GAMS حل شده است. . با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مکان‌هایی انتخاب شده‌اند که هم دارای اولویت بالاتری در روش تحلیل پوششی داده‌ها نسبت به دیگر مکان‌ها هستند و هم هزینهٔ احداث و تأثیرات زیست‌محیطی کمتری دارند. پیشنهاد می‌شود بررسی و تأیید نهایی محل با توجه به نظر مسئولان صورت گیرد.

۱- مقدمه

لجستیک معکوس، به دلیل توانایی بازیابی ارزش از محصولات برگشتی و استفاده‌شده، بسیار مورد توجه قرار گرفته و به عنصری کلیدی در زنجیرهٔ تأمین تبدیل شده است. الزامات قانونی، مسئولیت‌های اجتماعی، نگرانی‌های زیست‌محیطی، منافع اقتصادی و آگاهی مشتریان، تولیدکنندگان را نه‌تنها به تولید محصولات سازگار با محیط‌زیست، بلکه به پس گرفتن و جمع‌آوری محصولات برگشتی و استفاده‌شده وادار کرده است [۱]. از این رو بخش‌های مختلف صنعتی برای رویارویی با این چالش‌ها مستلزم بهبود ساختارها و فعالیت‌هایشان هستند. از آنجا که به دلایل مختلف، جریان مواد و محصولات در جهت عکس زنجیرهٔ تأمین، موضوعی اجتناب‌ناپذیر است، طراحی شبکهٔ لجستیک معکوس، امری ضروری است [۲ و ۳].

در طول دهه‌های اخیر، موضوعی که توجه محققان را به خود جلب کرده، بحث پسماند محصولات، مزایا و سود ناشی از بازیافت آن‌ها است [۴]. پسماند خانگی همواره مسئله‌ای پیچیده در مدیریت شهرها بوده است. به علت دامنهٔ گستردهٔ مواد موجود در این پسماند (شیشه، فلز، کاغذ، پلاستیک، مواد آلی و ...) و اختلاط کامل این مواد، مشکلات

*. پست الکترونیک نویسنده مسئول: hadi_sahebi@iust.ac.ir
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

متعددی در مدیریت آن‌ها بروز می‌کند. همچنین ترکیب پسماند در فصل‌های گوناگون، در مناطق جغرافیایی مختلف و از کشوری به کشور دیگر و از شهری به شهر دیگر تغییر می‌کند و همین عوامل، مانع از آن هستند که نسخه‌ای واحد برای تمام شهرها پیچیده شود. پسماند تجاری و صنعتی معمولاً یکنواخت‌تر و در مقادیر بالاتر تولید می‌شود؛ بنابراین سیستم مدیریتی که بتواند پسماند خانگی را مدیریت کند، قطعاً توانایی مدیریت پسماند از منابع دیگر را نیز دارد [۱]. به پسماند خانگی و تجاری، در مجموع، پسماند شهری گفته می‌شود که معمولاً کمتر از ۱۰ درصد کل جریان پسماند را شامل می‌شود و ۹۰ درصد دیگر عبارت است از پسماند کشاورزی، پسماند معدن‌کاوی، پسماند صنعتی و تولیدی، پسماند تولید انرژی، پسماند تصفیه آب و پسماند ساخت‌وساز و تخریب [۵].

از لحاظ تاریخی، مهم‌ترین ضرورت‌ها در رابطه با پسماند، سلامت و ایمنی بوده است. پسماند باید به نحوی مدیریت شود که حداقل خطر را برای سلامت انسان داشته باشد؛ اما جوامع امروزی نیازهای گسترده‌تری را مطرح کردند که پایداری زیست‌محیطی (چرخهٔ بازگشت مواد به طبیعت) از طریق بازیافت و استفادهٔ مجدد آن و بازده اقتصادی از اهم آن است [۵].

سلسله‌مراتب مدیریت مواد زائد جامد، چشم‌اندازی روشن برای طراحی مدیریت مواد زائد جامد ایجاد می‌کند که این سلسله‌مراتب، مدیریت استراتژی و گزینه‌های متفاوت را به ترتیب اهمیت مشخص می‌سازد. هدف از این موضوع، ایجاد بهترین روش علمی ممکن برای مدیریت مواد زائد جامد است، به ترتیبی که میزان پسماندها به حداقل برسد. اجتناب، کاهش، استفادهٔ مجدد، بازیافت و استحصال، استراتژی‌های پیشگیرانه و گزینه‌هایی مناسب بوده، از بیشترین ارجحیت برخوردارند؛ در حالی که تصفیه و دفن در مراکز زباله، استراتژی‌های کنترلی است و کمترین ارجحیت را دارند [۲].

مدیریت جامع پسماند، سیستمی است که جریان پسماند، جمع‌آوری پسماند و روش‌های پردازش و دفع آن را در تعامل با یکدیگر مدیریت می‌کند؛ به نحوی که اهداف محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی مطلوب در یک منطقه مشخص به دست آید [۵].

ادامهٔ پژوهش به شرح زیر است: در بخش ۲ خلاصه‌ای از تحقیقات انجام‌شده در حوزهٔ پژوهش آورده شده است. در بخش ۳ مدل ریاضی برای طراحی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین لجستیک معکوس پسماند جامد شهری ارائه و در بخش ۴ نتایج عددی حاصل از این مدل آمده است. در نهایت در بخش ۵ نتایج و پیشنهادهای آتی آورده شده است.

۲- مرور ادبیات

در این قسمت به‌منظور آشنایی بیشتر با تحقیقات انجام‌شده در حوزهٔ زنجیرهٔ تأمین لجستیک معکوس پسماند شهری، تعدادی از مقالات ارائه‌شده در سال‌های اخیر مرور شده‌اند. با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، کاهش منابع و کاهش ظرفیت دفن زباله در بسیاری از کشورها، لجستیک معکوس در دهه‌های گذشته توجه بیشتری را به خود جلب کرده است [۶]. طراحی شبکه‌های بازیابی محصول، یکی از مسائل مهم و چالش‌برانگیز در محیط لجستیک معکوس است. نمونه‌هایی از تحقیقات انجام‌شده در این حوزه، در ادامه ذکر شده است.

پیشوایی و همکاران در سال ۲۰۱۰ مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای حداقل کردن هزینه حمل‌ونقل و هزینهٔ ثابت راه‌اندازی در شبکه لجستیک معکوس چندمرحله‌ای توسعه دادند. این شبکه شامل مراحل مشتری، جمع‌آوری/ بازرسی، بازیافت و دفع است و برای یک نوع محصول طراحی شده است [۷]. در سال ۲۰۱۴، سوال-ان و نورسل اوزترک، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس حلقه باز چندمرحله‌ای و چنددوره‌ای ارائه کردند که با مجموعه مسائل مختلف تأیید شده و نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهندهٔ کارایی و بهره‌وری مدل است. مدل ارائه‌شده در این مقاله، یک ابزار تصمیم‌گیری استراتژیک برای طراحی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین معکوس است [۸]. کاردوسو و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک مدل خطی مختلط برای طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین با جریان‌های معکوس ارائه کردند. مدل ارائه‌شده، فعالیت‌های لجستیک معکوس، توزیع و تولید را به‌صورت هم‌زمان در نظر می‌گیرد. عدم اطمینان در تقاضای مشتریان نیز از طریق رویکرد درخت سناریو در مدل آورده شده است [۹]. دی روزا و همکاران در سال ۲۰۱۳ مسئله مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات ظرفیت‌دار را در زنجیره دارای هر دو جریان مستقیم و معکوس مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مدل ظرفیت تسهیلات به صورت پویا تخصیص داده می‌شود و مدل برای حالتی که داده‌ها

دارای عدم اطمینان هستند نیز توسعه داده شده است [۱۰]. قیانی و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای مکان‌یابی محفظه‌های جمع‌آوری پسماند تفکیک‌نشده در شهر و همچنین برای تعیین ظرفیت هرکدام از محفظه‌ها واقع در هر مرکز جمع‌آوری، ارائه کردند [۱۱]. کیم و لی در سال ۲۰۱۳ یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح پویا برای تعیین مکان مراکز جمع‌آوری و همچنین تخصیص نقاط تقاضا به این مراکز ارائه کردند. آن‌ها دو روش ابتکاری نیز پیشنهاد دادند [۱۲]. سانتیبانز - آگولار و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط چندهدفه ارائه کردند که نوع فناوری‌های پردازش، مکان مراکز پردازش را انتخاب می‌کند و نحوهٔ توزیع پسماند از شهرها و همچنین توزیع محصولات به بازارها را نیز مشخص می‌سازد [۱۳]. توسوو الم در سال ۲۰۱۴ مدل‌هایی را جهت برنامه‌ریزی مکان‌یابی مراکز دسته‌بندی در یک شهر با جمعیت متوسط در برزیل در دوره‌ای چهارساله مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها نسخهٔ قطعی مسئله کلاسیک مکان‌یابی تسهیلات ظرفیت‌دار، مدل دومرحله‌ای و همچنین مدل‌های ریسک‌گریز را در شرایط عدم اطمینان ارائه کرده‌اند [۱۴]. لی و همکاران در سال ۲۰۱۶ یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای مدیریت پسماند جامد شهری هنگ‌کنگ توسعه دادند. آن‌ها از آنالیز حساسیت برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف استفاده کردند [۱۵]. گویندان و سلیمانی در سال ۲۰۱۷، ۸۳ مقاله پذیرفته‌شده تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۴ را انتخاب و بررسی کردند. آنان مقالات را بر اساس محتوای آن‌ها و مقوله‌های توسعه‌یافته مورد بررسی قرار دادند. یکی از نتایج آن‌ها در این تحقیق این بود که از بین مقالات بررسی‌شده تنها در ۴ مقاله (۴/۸٪) به بهینه‌سازی ریاضی پرداخته شده که حداکثرسازی سود یا حداقل کردن هزینه را در نظر گرفته است [۱۶]. مهدی سلطانی تهرانی و همکاران در سال ۱۳۹۴ یک زنجیرهٔ تأمین بسته طراحی کردند که به‌صورت چندهدفه، چندمحصولی و چنددوره‌ای است. توابع هدف شامل حداقل‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل بین مراکز و هزینه پردازش داخل مراکز و مراکز ساخته‌شده و همچنین حداقل‌سازی کربن‌دی‌اکسید منتشرشده در داخل مراکز و کربن‌دی‌اکسید منتشرشده در اثر حمل‌ونقل بین مراکز است. برای این منظور، آن‌ها از یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط استفاده کردند [۱۷]. پینتو - وارلا و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی مختلط برای طراحی زنجیرهٔ تأمین دارای جریان‌های معکوس معرفی کردند که جنبه‌های زیست‌محیطی در آن لحاظ شده است [۱۸]. ماکویی و همکاران در سال ۱۳۹۵یک مدل چندهدفه برای طراحی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین با اهداف هزینه، میزان مصرف آب و همچنین تأثیرات اجتماعی ارائه کردند [۱۹].

یکی از تصمیمات مهم در هر مدل طراحی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین، تعیین مکان بهینه تسهیلاتی است که قرار است مکان‌یابی شوند. از بررسی مقالات، این نتیجه حاصل می‌شود که غالباً به مکان‌یابی تسهیلات دفن پرداخته‌اند و کمتر مطالعه‌ای به مکان‌یابی ایستگاه‌های انتقال و مراکز بازیافت پرداخته است. در تعیین نقاط بهینه تسهیلات معمولاً محققان با نظرخواهی از افراد خبره به تعریف این نقاط می‌پردازند که در این صورت ممکن است بخشی از فضای جواب به دلیل عدم استفاده از روش علمی و ریاضی از بین برود. البته مدل‌هایی هم وجود دارد که از روش سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی استفاده کرده‌اند؛ اما در استفاده از ابزاری قدرتمند به نام تحلیل پوششی داده‌ها شکاف پژوهشی بزرگی وجود دارد. اکثر مقالات روش‌های حل ابتکاری یا فرا ابتکاری را در نظر گرفته‌اند و در استفاده از روش حل دقیق شکاف پژوهشی زیادی وجود دارد. توابع هدف در نظر گرفته شده در بیشتر مقالات در زمینهٔ کاهش هزینه است و جای در نظر گرفتن توابع هدفی که به بررسی هم‌زمان توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی همانند حداکثر کردن سود و حداقل کردن میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بپردازد، در ادبیات خالی است.

در این پژوهش، مدلی برای طراحی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین لجستیک معکوس پسماند جامد شهری ارائه شده است که هم‌زمان به بررسی دو هدف بیشینه‌سازی سود و کمینه‌سازی میزان انتشار گاز CO_2 می‌پردازد. به‌منظور کاهش سایز مسئله و توانایی استفاده از روش حل دقیق و در نظر گرفتن فاکتورهای تأثیرگذار بر مکان‌یابی تسهیلات، مانند بعد اجتماعی توسعه پایدار که نمی‌توان آن‌ها را وارد مدل ریاضی کرد، از روش تحلیل پوششی داده‌ها استفاده و بخشی از تعیین مجموعه بالقوه به‌وسیله این روش انجام شده است. در نهایت، برنامه‌ریزی چندهدفه و روش محدودیت اپسیلون برای حل توابع چندهدفه با استفاده از نرم‌افزار GAMS مطرح شده است.

۳- بیان مسئله

شبکهٔ لجستیک معکوس پسماند جامد شهری ارائه‌شده در این پژوهش شامل چهار سطح است. در سطح اول، پسماند تولید می‌شود، سپس به‌صورت مخلوط جمع‌آوری شده، به مرحله دوم فرستاده می‌شود. سطح دوم شامل ایستگاه‌های انتقال موقت است که زباله‌ها به آنجا فرستاده شده، سپس مواد زائد از این ایستگاه‌ها به سایت دفن نهایی ارسال می‌شود. در سایت دفن نهایی، خطوط تفکیک صنعتی وجود دارد که زباله‌ها در این خطوط، وارد و تفکیک شده، هرکدام به قسمت مربوطه ارسال می‌شود و مقدار باقیمانده هم به‌عنوان reject دفن می‌گردد. در این سایت یک خط تفکیک جداگانه برای تهیه ورمی کمپوست وجود دارد که زباله‌هایی که از میوه‌فروشی‌ها، گل‌فروشی‌ها و سبزی‌فروشی ها به‌صورت جداگانه و با وسیله نقلیه جداگانه جمع‌آوری شده، به این خط، وارد و برای تهیهٔ ورمی کمپوست آماده می‌شود.

۳-۱- مفروضات مدل

- شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین مورد نظر شامل چهار سطح مراکز تولید پسماند، مراکز جمع‌آوری، مراکز تفکیک و جداسازی و مراکز بازیافت است.
- ایستگاه‌های انتقال موقت، شامل ایستگاه‌های انتقال موقت بالقوه و بالفعل هستند که ایستگاه‌های بالقوه باید مکان‌یابی شوند.
- سایت دفن نهایی نیز شامل مکان‌های بالقوه و بالفعل است که برای مکان‌های بالقوه باید مکان‌یابی را انجام داد که در نهایت منجر به مکان‌یابی خطوط تفکیک صنعتی، کارخانه بیوکمپوست، بازیافت و محل دفن می‌شود.
- پسماندها به‌صورت مخلوط جمع‌آوری و در سایت دفن نهایی تفکیک می‌شوند.
- ظرفیت تمامی تسهیلات موجود در شبکه، ثابت و مشخص است.
- تمامی هزینه‌های موجود در شبکه، مشخص است.

در شکل (۱) شمای کلی از زنجیرهٔ تأمین مورد مطالعه آورده شده است.

۳-۲- مجموعه‌ها

I: مجموعه مکان‌های تولید زباله

I': مجموعه مکان‌های تولید زباله برای تهیه ورمی کمپوست (سبزی‌فروشی‌ها، میوه‌فروشی‌ها، گل‌فروشی‌ها)

J: مجموعه مکان‌های ایستگاه‌های انتقال موقت زباله

K: مجموعه مکان‌های خط تفکیک صنعتی در سایت دفن نهایی

K': مجموعه مکان‌های خط تفکیک صنعتی ورمی کمپوست

l_1: مجموعه مکان‌های کارخانه بیوکمپوست

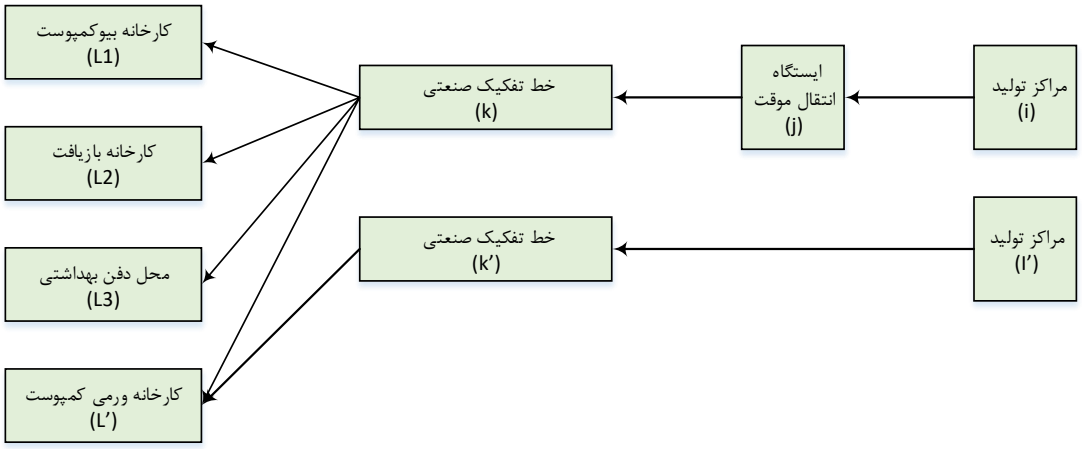
l_2: مجموعه مکان‌های کارخانه بازیافت

l_3: مجموعه مکان‌های دفن بهداشتی زباله

L': مجموعه مکان‌های کارخانه ورمی کمپوست

T:دوره زمانی (روزانه)

P: اجزای تشکیل‌دهنده پسماند (پلاستیک، آلومینیوم، کاغذ، پت، شیشه و...)



شکل ۱: ساختار کلی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین مدل

۳-۳- پارامترها

Q: مقدار کل زباله جمع‌آوری‌شده از مراکز تولید زباله

Q': مقدار کل زباله جمع‌آوری‌شده از میوه‌فروشی‌ها، سبزی‌فروشی‌ها و گل‌فروشی‌ها

CT_{ij}: هزینه حمل هر واحد زباله از مکان تولید زباله i به ایستگاه انتقال موقت j

CT_{jk}: هزینه حمل هر واحد زباله از ایستگاه انتقال موقت j به خط تفکیک صنعتی k

CT_{kl}: هزینه حمل هر واحد زباله از خط تفکیک صنعتی k به کارخانه‌های بیوکمپوست و بازیافت و محل دفن ($l \in l_1, l_2, l_3$)

$CT_{kl'}$:هزینه حمل هر واحد زباله از خط تفکیک صنعتی k به کارخانه ورمی کمپوست l'

$CT_{k'l'}$: هزینه حمل هر واحد زباله از خط تفکیک صنعتی k' به کارخانه ورمی کمپوست l'

$CT_{i'k'}$: هزینه حمل هر واحد زباله از مکان تولید i' به خط تفکیک صنعتی k'

FC_{l_3}: هزینه دفن هر واحد زباله در محل دفن بهداشتی l_3

FI_j: هزینه احداث ایستگاه انتقال موقت j

FI_k: هزینه احداث خط تفکیک صنعتی k

FI_{l_1}: هزینه احداث کارخانه بیوکمپوست l_1

FI_{l_2}: هزینه احداث کارخانه بازیافت l_2

FI_{l_3}: هزینه احداث محل دفن بهداشتی زباله l_3

cap_j: ظرفیت ایستگاه انتقال موقت j

cap_k: ظرفیت خط تفکیک صنعتی k

$cap_{k'}$: ظرفیت خط تفکیک صنعتی k'

cap_{l_1}: ظرفیت کارخانه بیوکمپوست

cap_{l_2}: ظرفیت کارخانه بازیافت

cap_{l_3}: ظرفیت محل دفن بهداشتی زباله

$cap_{l'}$: ظرفیت کارخانه ورمی کمپوست

ET_{ij}: میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از حمل هر واحد زباله از محل تولید زباله i به ایستگاه انتقال موقت j

ET_{jk}: میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از حمل هر واحد زباله از ایستگاه انتقال موقت j به خط تفکیک صنعتی k

ET_{kl_1}: میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از حمل هر واحد زباله از خط تفکیک صنعتی k به کارخانه بیوکمپوست l_1

ET_{kl_2}: میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از حمل هر واحد زباله از خط تفکیک صنعتی k به کارخانه بازیافت l_2

ET_{kl_3}: میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از حمل هر واحد زباله از خط تفکیک صنعتی k به محل دفن بهداشتی l_3

$ET_{i'k'}$: میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از حمل هر واحد زباله از محل تولید زباله i' به خط تفکیک صنعتی k'

$ET_{k'l'}$: میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از حمل هر واحد زباله از خط تفکیک صنعتی k' به کارخانه ورمی کمپوست l'

$ET_{kl'}$: میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از حمل هر واحد زباله از خط تفکیک صنعتی k به کارخانه ورمی کمپوست l'

EH_{l_3}: میزان انتشار گاز CO_2 ناشی از نگهداری هر واحد زباله در محل دفن بهداشتی l_3

α: مقدار متوسط زباله آلی (درصد)

β: مقدار متوسط زباله قابل بازیافت (درصد)

γ: مقدار متوسط زباله قابل دفن (درصد)

τ: مقدار متوسط زباله برای ورمی کمپوست (درصد)

SP_{l_1}: قیمت فروش کود آلی

SP_{l_2}: قیمت فروش مواد بازیافتی

d_j: کارایی مکان بالقوه ایستگاه انتقال موقت j حاصل از خروجی مدل تحلیل پوششی داده‌ها

۴-۳- متغیرها

Q^{p}_{ijt}: مقدار زباله انتقال داده‌شده از محل تولید زباله i به ایستگاه انتقال موقت j در دوره زمانی t

Q^{p}_{jkt}: مقدار زباله انتقال داده‌شده از ایستگاه انتقال موقت j به خط تفکیک صنعتی k در دوره زمانی t

$Q^{p_1}_{kl_1t}$: مقدار زباله انتقال داده‌شده از خط تفکیک صنعتی k به کارخانه بیوکمپوست l_1 در دوره زمانی t

$Q^{p_2}_{kl_2t}$: مقدار زباله انتقال داده‌شده از خط تفکیک صنعتی k به کارخانه بازیافت l_2 در دوره زمانی t

$Q^{p_3}_{kl_3t}$: مقدار زباله انتقال داده‌شده از خط تفکیک صنعتی k به محل دفن بهداشتی l_3 در دوره زمانی t

$Q^{p_4}_{i'k't}$: مقدار زباله انتقال داده‌شده از محل تولید زباله i' به خط تفکیک صنعتی k' در دوره زمانی t

$Q^{p_4}_{k'l't}$: مقدار زباله انتقال داده‌شده از خط تفکیک صنعتی k' به کارخانه ورمی کپوست l' در دوره زمانی t

$Q^{p_4}_{kl't}$: مقدار زباله انتقال داده‌شده از خط تفکیک صنعتی k به کارخانه ورمی کمپوست l' در دوره زمانی t

$Q'^{p_1}_{kl_1t}$: کل مواد اولیه برای تولید کمپوست

$Q'^{p_2}_{kl_2t}$: کل مواد اولیه برای تولید محصولات بازیافتی

$Q'^{p_3}_{kl_3t}$: کل مواد اولیه برای دفن

$Q'^{p_4}_{kl't}$: کل مواد اولیه برای تولید ورمی کمپوست

X_j: اگر ایستگاه انتقال موقت j انتخاب شود، مساوی ۱ و در غیر این صورت مساوی صفر است

Y_k: اگر خط تفکیک صنعتی k انتخاب شود، مساوی ۱ و در غیر این صورت مساوی صفر است

Z_{l_1}: اگر کارخانه بیوکمپوست l_1 انتخاب شود، مساوی ۱ و در غیر این صورت مساوی صفر است

Z_{l_2}: اگر کارخانه بازیافت l_2 انتخاب شود، مساوی ۱ و در غیر این صورت مساوی صفر است

Z_{l_3}: اگر محل دفن بهداشتی l_3 انتخاب شود، مساوی ۱ و در غیر این صورت مساوی صفر است

تابع هدف:

$$\max f_1 = \sum_k \sum_{l_1} \sum_t \sum_{p_1} SP_{l_1} * Q^{p_1}_{kl_1t} + \sum_k \sum_{l_2} \sum_t \sum_{p_2} SP_{l_2} * Q^{p_2}_{kl_2t} - \left(\sum_j \frac{1}{d_j} (FI_j)(X_j) + \sum_k (FI_k)(Y_k) + \sum_{l_1} (FI_{l1})(Z_{l1}) + \sum_{l_2} (FI_{l2})(Z_{l2}) + \sum_{l_3} (FI_{l3})(Z_{l3}) \right) - \left(\sum_i \sum_j \sum_t \sum_p CT_{ij} * Q^p_{ijt} + \sum_j \sum_k \sum_t \sum_p CT_{jk} * Q^p_{jkt} + \sum_k \sum_{l_1} \sum_t \sum_{p_1} CT_{kl} * Q^{p_1}_{kl_1t} + \sum_k \sum_{l_2} \sum_t \sum_{p_2} CT_{kl} * Q^{p_2}_{kl_2t} + \sum_k \sum_{l_3} \sum_t \sum_{p_3} CT_{kl} * Q^{p_3}_{kl_3t} + \sum_{i'} \sum_{k'} \sum_t \sum_{p_4} CT_{i'k'} * Q^{p_4}_{i'k't} + \sum_{k'} \sum_{l'} \sum_t \sum_{p_4} CT_{k'l'} * Q^{p_4}_{k'l't} + \sum_k \sum_{l'} \sum_t \sum_{p_4} CT_{kl'} * Q^{p_4}_{kl't} - \sum_k \sum_{l_3} \sum_t \sum_{p_3} FC_{l_3} * Q^{p_3}_{kl_3t} \right) \qquad l \in l_1, l_2, l_3$$

$$\min f_2 = \sum_i \sum_j \sum_t ET_{ij} * Q^p_{ijt} + \sum_j \sum_k \sum_t ET_{jk} * Q^p_{jkt} + \sum_k \sum_{l_1} \sum_t ET_{kl_1} * Q^{p_1}_{kl_1t} + \sum_k \sum_{l_2} \sum_t ET_{kl_2} * Q^{p_2}_{kl_2t} + \sum_k \sum_{l_3} \sum_t ET_{kl_3} * Q^{p_3}_{kl_3t} + \sum_{i'} \sum_{k'} \sum_t ET_{i'k'} * Q^{p_4}_{i'k't} + \sum_{k'} \sum_{l'} \sum_t ET_{k'l'} * Q^{p_4}_{k'l't} + \sum_k \sum_{l'} \sum_t ET_{kl'} * Q^{p_4}_{kl't} + \sum_k \sum_{l_3} \sum_t \gamma * EH_{l_3} * Q^{p_3}_{kl_3t}$$

محدودیت‌ها:

$$\sum_i Q^p_{ijt} = \sum_k Q^p_{jkt} \qquad \forall j, t, p \qquad (۱)$$

$$\sum_j \sum_p Q^p_{jkt} = \sum_{l_1} \sum_{p_1} Q^{p_1}_{kl_1t} + \sum_{l_2} \sum_{p_2} Q^{p_2}_{kl_2t} + \sum_{l_3} \sum_{p_3} Q^{p_3}_{kl_3t} + \sum_{l'} \sum_{p_4} Q^{p_4}_{kl't} \qquad \forall k, t \qquad (۲)$$

$$\sum_{i'} Q^{p_4}_{i'k't} = \sum_{l'} Q^{p_4}_{k'l't} \qquad \forall k', t, p_4 \qquad (۳)$$

$$\sum_i Q^p_{ijt} \le cap_j * X_j \qquad \forall j, t, p \qquad (۴)$$

$$\sum_j Q^p_{jkt} \le cap_k * Y_k \qquad \forall k, t, p \qquad (۵)$$

$$\sum_k Q^{p_1}_{kl_1t} \le cap_{l_1} * Z_{l_1} \qquad \forall l_1, t, p_1 \qquad (۶)$$

$$\sum_k Q^{p_2}_{kl_2t} \le cap_{l_2} * Z_{l_2} \qquad \forall l_2, t, p_2 \qquad (۷)$$

$$\sum_k Q^{p_3}_{kl_3t} \le cap_{l_3} * Z_{l_3} \qquad \forall l_3, t, p_3 \qquad (۸)$$

$$\sum_{i'} Q^{p_4}_{i'k'lt} \le cap_{k'} \qquad \forall k', t, p_4 \qquad (۹)$$

$$\sum_{k} Q^{p_4}_{kl'lt} + \sum_{k'} Q^{p_4}_{k'l'lt} \le cap_{l'} \qquad \forall l', t, p_4 \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{l_1}\sum_{p_1} Q'^{p_1}_{kl_1t} \ge \alpha \sum_{j}\sum_{p} Q^{p}_{jkt} \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{l_2}\sum_{p_2} Q'^{p_2}_{kl_2t} \ge \beta \sum_{j}\sum_{p} Q^{p}_{jkt} \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{l_3}\sum_{p_3} Q'^{p_3}_{kl_3t} \ge \gamma \sum_{j}\sum_{p} Q^{p}_{jkt} \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{l'}\sum_{p_4} Q'^{p_4}_{kl't} \ge \tau\left(\sum_{j}\sum_{p} Q^{p}_{jkt} + \sum_{i'}\sum_{p_4} Q^{p_4}_{i'k't}\right) \qquad (۱۴)$$

$$Q^{p_4}_{kl't} \le Q'^{p_4}_{kl't} \qquad (۱۵)$$

$$Q^{p_1}_{kl_1t} \le Q'^{p_1}_{kl_1t} \qquad (۱۶)$$

$$Q^{p_2}_{kl_2t} \le Q'^{p_2}_{kl_2t} \qquad (۱۷)$$

$$Q^{p_3}_{kl_3t} \le Q'^{p_3}_{kl_3t} \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{j} X_{jt} \ge 1 \qquad \forall t \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{k} Y_{kt} \ge 1 \qquad \forall t \qquad (۲۰)$$

$$\sum_{l_1} Z_{l_1t} \ge 1 \qquad \forall t \qquad (۲۱)$$

$$\sum_{l_2} Z_{l_2t} \ge 1 \qquad \forall t \qquad (۲۲)$$

$$\sum_{l_3} Z_{l_3t} \ge 1 \qquad \forall t \qquad (۲۳)$$

$$\alpha + \beta + \gamma + \tau = 1 \qquad (۲۴)$$

$$\sum_{i}\sum_{j} Q^{p}_{ijt} = Q \qquad \forall p, t \qquad (۲۵)$$

$$\sum_{i'}\sum_{k'} Q^{p_4}_{i'k't} = Q' \qquad \forall p_4, t \qquad (۲۶)$$

$$X_j, Y_k, Z_{l_1}, Z_{l_2}, Z_{l_3} \in \{0,1\} \qquad (۲۷)$$

$$Q^{p}_{ijt}, Q^{p}_{jkt}, Q^{p_1}_{kl_1t}, Q^{p_2}_{kl_2t}, Q^{p_3}_{kl_3t}, Q^{p_4}_{i'k't}, Q^{p_4}_{k'l't}, Q^{p_4}_{kl't}, Q'^{p_1}_{kl_1t}, Q'^{p_2}_{kl_2t}, Q'^{p_3}_{kl_3t}, Q'^{p_4}_{kl't} \ge 0 \qquad (۲۸)$$

تابع هدف ۱ مجموع سود به‌دست‌آمده از کل زنجیره را محاسبه می‌کند که عبارت است از درآمد منهای هزینه. عبارت اول درآمد ناشی از فروش کود آلی و عبارت دوم درآمد ناشی از فروش محصولات بازیافتی را نشان می‌دهد. عبارت سوم تا هفتم، هزینهٔ ثابت احداث را نشان می‌دهد که به‌ترتیب شامل هزینهٔ ثابت احداث ایستگاه انتقال موقت، خط تفکیک صنعتی، کارخانه بیوکمپوست، کارخانهٔ بازیافت و محل دفن زباله است. عبارت هشتم تا پانزدهم برای به دست آوردن هزینه حمل‌ونقل ناشی از انتقال زباله در هر یک از سطوح در مدل آورده شده است و در نهایت، عبارت آخر نیز هزینهٔ دفن در نظر گرفته شده برای هر واحد زباله دفن‌شده در محل دفن بهداشتی را محاسبه می‌کند. تابع هدف ۲ که همان تابع هدف زیستی است، شامل کمینه‌سازی کل میزان کربن‌دی‌اکسید منتشرشده در اثر حمل‌ونقل زباله بین سطوح مختلف در شبکه و میزان کربن‌دی‌اکسید منتشرشده ناشی از نگهداری زباله در محل دفن است. محدودیت‌های ۱، ۲ و ۳، محدودیت‌های تعادلی هستند که تعادل در هر گره را نشان می‌دهند. برای هر یک از ایستگاه‌های انتقال موقت، خطوط تفکیک صنعتی، کارخانهٔ بیوکمپوست، کارخانهٔ بازیافت، محل دفن بهداشتی زباله و کارخانهٔ ورمی کمپوست، ظرفیتی تعریف شده است که نباید مقدار زباله واردشده به این مراکز از ظرفیت آن‌ها بیشتر باشد. این موضوع به‌ترتیب در محدودیت‌های ۴ تا ۱۰ نشان داده شده است. علاوه بر این، محدودیت‌ها تضمین می‌کنند تا زمانی که این مراکز و کارخانه‌ها تأسیس نشده‌اند، زباله‌ای به آن‌ها وارد نشود. محدودیت‌های ۱۱ تا ۱۴ به‌ترتیب نشان می‌دهد از مقدار زباله‌ای که وارد خط تفکیک صنعتی می‌شود، چند درصد آن برای تهیهٔ کود آلی، بازیافت، دفن و ورمی کمپوست استفاده می‌شود. محدودیت ۱۵ نشان می‌دهد مقدار زبالهٔ انتقال داده شده از خط تفکیک صنعتی به کارخانهٔ ورمی کمپوست نباید از کل مواد اولیه برای تهیهٔ ورمی کمپوست بیشتر باشد. محدودیت ۱۶ نشان می‌دهد مقدار زبالهٔ انتقال داده شده از خط تفکیک صنعتی به کارخانهٔ بیوکمپوست نباید از کل مواد اولیه برای تهیهٔ کمپوست بیشتر باشد. محدودیت ۱۷ نشانگر آن است که مقدار زبالهٔ انتقال داده شده از خط تفکیک صنعتی به کارخانهٔ بازیافت نباید از کل مواد اولیه برای بازیافت بیشتر باشد. محدودیت ۱۸ نشان می‌دهد مقدار زبالهٔ انتقال داده شده از خط تفکیک صنعتی به محل دفن زباله نباید از کل مواد اولیه برای دفن بیشتر باشد. محدودیت‌های ۱۹ تا ۲۳

بیانگر آن است که به‌ترتیب در هر دوره حداقل یکی از ایستگاه‌های انتقال موقت، خط تفکیک صنعتی، کارخانهٔ بیوکمپوست، کارخانهٔ بازیافت و محل دفن انتخاب شوند. محدودیت ۲۴ نشان می‌دهد درصد زبالهٔ آلی، زبالهٔ قابل بازیافت، زبالهٔ قابل دفن و زباله برای ورمی کمپوست، برابر یک است. محدودیت‌های ۲۵ و ۲۶ تضمین می‌کند کل زبالهٔ تولیدشده از مراکز تولید زباله جمع‌آوری می‌شود. محدودیت ۲۷ نشان‌دهندهٔ متغیرهای باینری مسئله است. محدودیت ۲۸ نشان می‌دهد متغیرهای مسئله، مثبت هستند.

۴- نتایج عددی

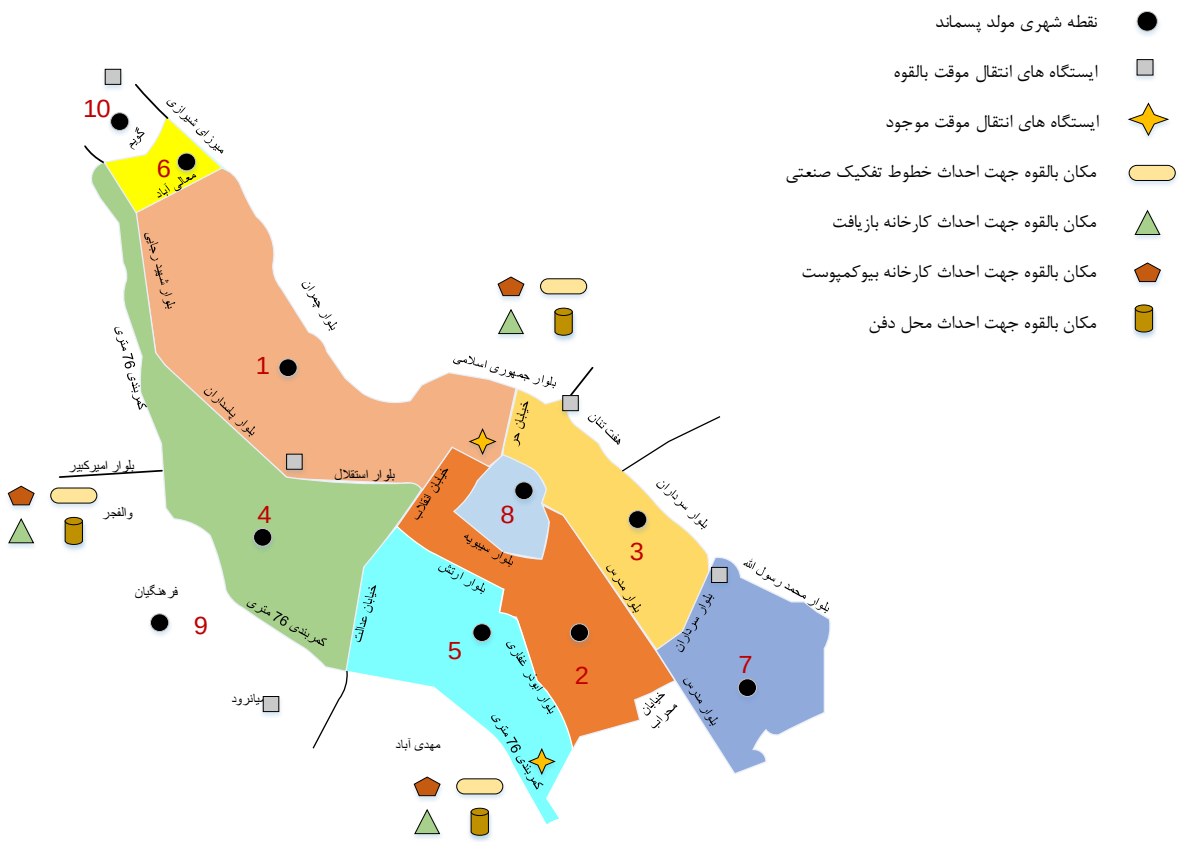
به‌منظور اعتبارسنجی و صحت مدل ارائه‌شده در بخش قبل، شبکهٔ جمع‌آوری پسماند شهر شیراز در نظر گرفته شده است. شهر شیراز با وسعتی بالغ بر ۰۰۰ ۱۵ هکتار و جمعیتی بالغ بر ۱۳۵۰۰۰۰ نفر، بر اساس تقسیمات شهری، شامل ۱۰ منطقه است. ناوگان جمع‌آوری و حمل پسماندها با ۱۴۰ خودروی کاملاً مکانیزه مجهز به سیستم AVL است که بعد از جمع‌آوری روزانه حدود ۱۰۵۰ تن پسماند از سطح مناطق ده‌گانه، به دو ایستگاه میانی حمل شده، در نهایت به‌وسیله ۱۳ دستگاه سمی تریلر به محل پردازش و دفن مهندسی انتقال می‌یابد.

در این پژوهش هر یک از مناطق ده‌گانه شهر شیراز به‌عنوان یک نقطه تولید پسماند در نظر گرفته شده است. فرض می‌کنیم محل جمع‌آوری در هر ناحیه در مرکز آن قرار دارد. در حال حاضر تعداد دو ایستگاه انتقال موقت پسماند در شهر فعال است و با در نظر گرفتن شرایط و معیارهای مختلف (استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها برای انتخاب مکان مناسب) پنج مکان برای احداث ایستگاه‌های انتقال موقت جدید در نظر گرفته شده است. تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)، یک روش برنامه‌ریزی ریاضی برای ارزیابی واحدهای تصمیم‌گیری است که چندین ورودی را برای تولید چندین خروجی مورد استفاده قرار می‌دهد [۲۰]. متغیرهای ورودی و خروجی در نظر گرفته شده برای تعیین مکان مناسب ایستگاه‌های انتقال موقت در روش تحلیل پوششی داده‌ها، قیمت زمین، فاصله تا سایت دفن نهایی، فاصله تا منطقه تاریخی، مساحت منطقهٔ مورد نظر، میزان تولید پسماند و جمعیت منطقه است که متغیرهای قیمت زمین و فاصله تا سایت دفن نهایی به‌عنوان متغیرهای ورودی و بقیه به‌عنوان متغیرهای خروجی در نظر گرفته شده است. در نهایت با استفاده از این روش، مکان ایستگاه‌های انتقال موقت بر مبنای معیارهای تعریف‌شده اولویت‌بندی شده، از آن به‌عنوان فضای جواب مسئله استفاده می‌شود؛ ضمن اینکه کارایی هر مکان به‌صورت ضریبی در تابع هدف مدل و در انتخاب نقطهٔ بهینه اثرگذار است. در این پژوهش ۴۲ مکان برای ایستگاه انتقال موقت پیشنهاد شده که با توجه به ورودی‌ها و خروجی‌های ذکرشده برای هر مکان، کارایی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار deap محاسبه و در نهایت پنج مکان که کارایی بالای ۰/۹ داشتند، انتخاب شده است. یک سایت دفن نهایی در ۱۸ کیلومتری شهر شیراز موجود است، متشکل از دو خط تفکیک صنعتی، یک کارخانهٔ بیوکمپوست، یک کارخانهٔ بازیافت و یک محل دفن بهداشتی زباله است. در این سایت همچنین یک خط تفکیک صنعتی برای زباله‌هایی وجود دارد که از میوه‌فروشی‌ها، گل‌فروشی‌ها و سبزی‌فروشی‌ها جمع‌آوری می‌شوند. این زباله‌ها برای تهیهٔ ورمی کمپوست به کارخانهٔ ورمی کمپوست ارسال می‌شوند. با در نظر گرفتن شرایط گوناگون برای انتخاب مکان مناسب سایت دفن نهایی زباله، سه مکان برای احداث سایت در نظر گرفته شده که هرکدام شامل دو خط تفکیک صنعتی، یک کارخانهٔ بیوکمپوست، یک کارخانهٔ بازیافت و یک محل دفن بهداشتی زباله است. مکان‌های بهینه تسهیلات مورد نظر به کمک مدل‌سازی انجام‌شده از بین نقاط بالقوه موجود با هدف افزایش سود و کاهش آثار زیست‌محیطی انتخاب خواهند شد.

در شکل (۲) مکان‌های تولید زباله و نقاط بالقوه برای احداث ایستگاه انتقال موقت و سایت دفن نهایی، نشان داده شده است.

با بهره‌گیری از آمار ارائه‌شده توسط سازمان مدیریت پسماند شهرداری شیراز و داده‌های جمع‌آوری‌شده از این سازمان، پارامترهای به‌کاررفته در مدل به‌صورت تقریبی تخمین زده شده است.

روش محدودیت اپسیلون، یکی از رویکردهای شناخته‌شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه است. در این روش یکی از توابع هدف به‌عنوان تابع هدف اصلی انتخاب شده، سایر توابع هدف به شکل محدودیت در مسئله ظاهر خواهد شد [۲۱]. نتایج حاصل از حل مدل با استفاده از این روش در جدول ۱ آورده شده است.



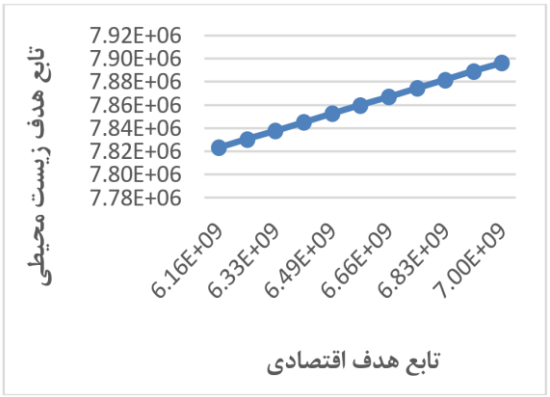
شکل ۲: نقاط بالقوه برای احداث تسهیلات در شبکهٔ جمع‌آوری پسماند شهر شیراز

جدول ۱: مقادیر بهینه حل مسئله

تکرار	مقدار تابع هدف اقتصادی	مقدار تابع هدف زیست‌محیطی
۱	۶/۱۶E+۰۹	۷/۸۲E+۰۶
۲	۶/۲۴E+۰۹	۷/۸۳E+۰۶
۳	۶/۳۳E+۰۹	۷/۸۴E+۰۶
۴	۶/۴۱E+۰۹	۷/۸۵E+۰۶
۵	۶/۴۹E+۰۹	۷/۸۵E+۰۶
۶	۶/۵۸E+۰۹	۷/۸۶E+۰۶
۷	۶/۶۶E+۰۹	۷/۸۷E+۰۶
۸	۶/۷۵E+۰۹	۷/۸۷E+۰۶
۹	۶/۸۳E+۰۹	۷/۸۸E+۰۶
۱۰	۶/۹۲E+۰۹	۷/۸۹E+۰۶
۱۱	۷/۰۰E+۰۹	۷/۹۰E+۰۶

جدول ۲: تعداد تسهیلات احداث‌شده در تکرارهای ۱ و ۱۱

تکرار	تابع هدف		تعداد تسهیلات احداث‌شده				
	سود	میزان انتشار CO_2	X	Y	Z_{L1}	Z_{L2}	Z_{L3}
۱	۶/۱۶E+۰۹	۷/۸۲E+۰۶	۳	۸	۱	۲	۲
۱۱	۷/۰۰E+۰۹	۷/۹۰E+۰۶	۳	۸	۱	۲	۱

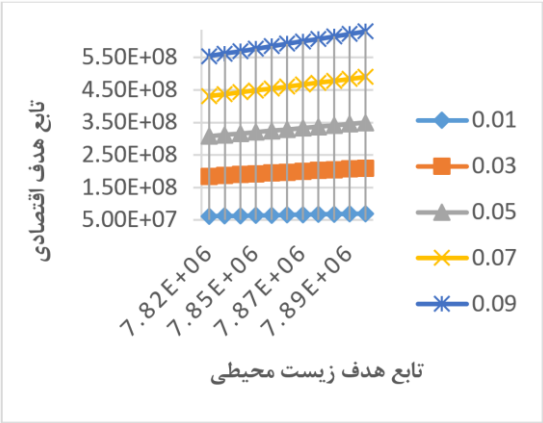


شکل ۳: مرز بهینه پارتو ناشی از حل مسئله

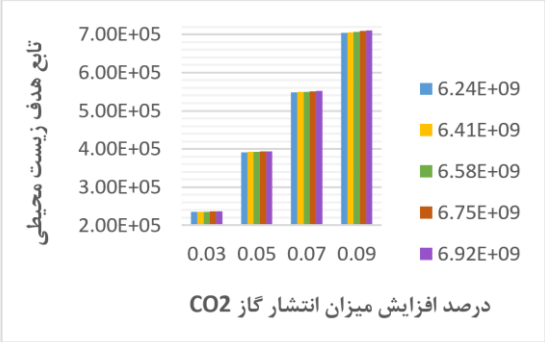
مرز بهینه پارتو که از حل مدل به دست‌آمده، مطابق شکل (۳) است.

از نکات مهمی که در برنامه‌ریزی چندهدفه اهمیت دارد، تناقض بین توابع هدف مختلف است؛ به این مفهوم که بهبود یک تابع هدف منجر به بدترشدن تابع هدف دیگر شود که این موضوع در نمودار پارتو که در شکل (۳) آورده شده، دیده می‌شود. همان طور که از این نمودار مشخص است، هرچه میزان تابع هدف اقتصادی بیشتر می‌شود، سود زنجیره بیشتر شده، مقدار تابع هدف زیست‌محیطی نیز بیشتر می‌شود. از آنجایی که تابع هدف زیست‌محیطی از نوع کمینه‌سازی است، افزایش آن به معنی بدتر شدن آن است.

در جدول ۲ تعداد تسهیلات احداث‌شده در تکرارهای ۱ و ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۴: نمودار پارتو مربوط به افزایش قیمت فروش



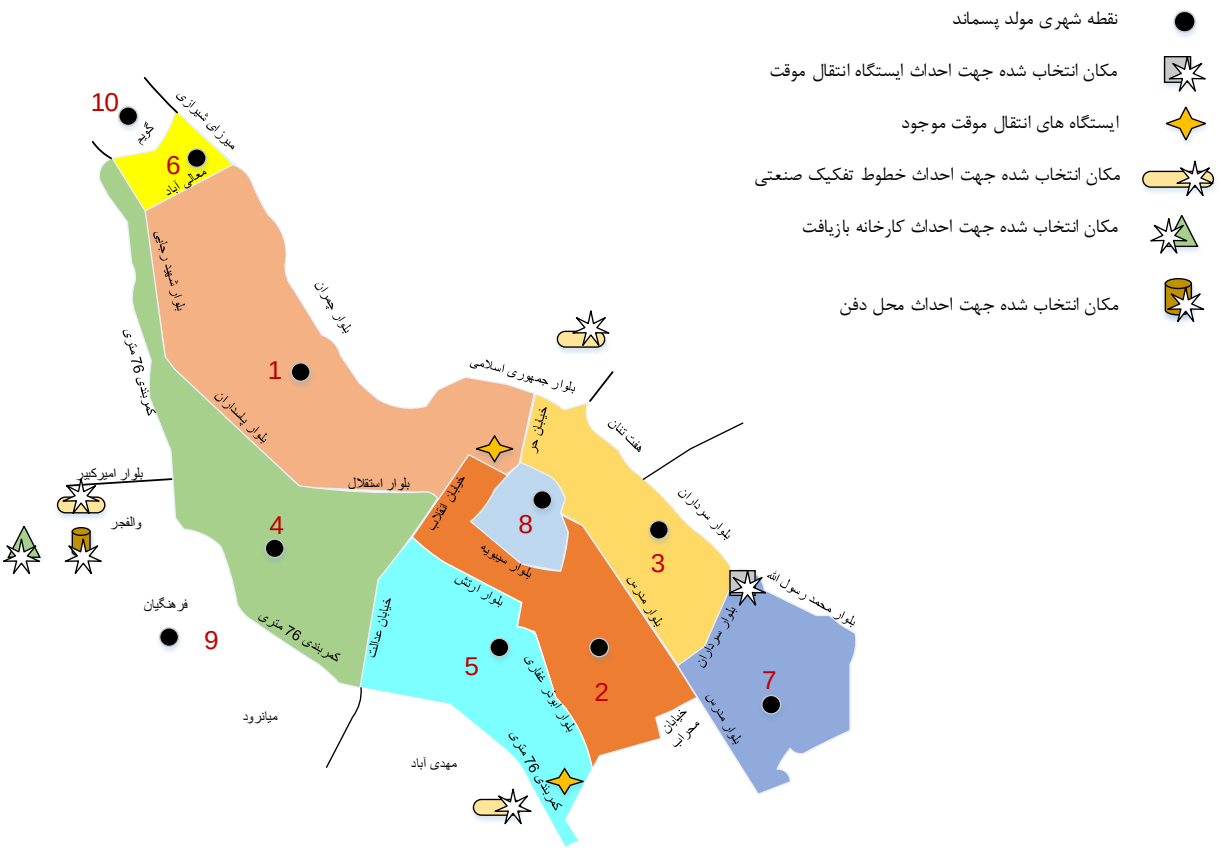
شکل ۵: نمودار میزان تغییرات تابع هدف زیست‌محیطی به ازای تغییر در میزان انتشار گاز CO_2

جدول ۳: تغییرات مقدار تابع هدف اقتصادی به‌ازای تغییر در میزان قیمت فروش

تکرار	تابع هدف زیست‌محیطی	درصد افزایش قیمت فروش				
		۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۹
۱	۷/۸۲E+۰۶	۶/۱۶E+۰۷	۱/۸۵E+۰۸	۳/۰۸E+۰۸	۴/۳۱E+۰۸	۵/۵۴E+۰۸
۲	۷/۸۳E+۰۶	۶/۲۴E+۰۷	۱/۸۷E+۰۸	۳/۱۲E+۰۸	۴/۳۷E+۰۸	۵/۶۲E+۰۸
۳	۷/۸۴E+۰۶	۶/۳۳E+۰۷	۱/۹۰E+۰۸	۳/۱۶E+۰۸	۴/۴۳E+۰۸	۵/۶۹E+۰۸
۴	۷/۸۵E+۰۶	۶/۴۱E+۰۷	۱/۹۲E+۰۸	۳/۲۱E+۰۸	۴/۴۹E+۰۸	۵/۷۷E+۰۸
۵	۷/۸۵E+۰۶	۶/۴۹E+۰۷	۱/۹۵E+۰۸	۳/۲۵E+۰۸	۴/۵۵E+۰۸	۵/۸۵E+۰۸
۶	۷/۸۶E+۰۶	۶/۵۸E+۰۷	۱/۹۷E+۰۸	۳/۲۹E+۰۸	۴/۶۱E+۰۸	۵/۹۲E+۰۸
۷	۷/۸۷E+۰۶	۶/۶۶E+۰۷	۲/۰۰E+۰۸	۳/۳۳E+۰۸	۴/۶۶E+۰۸	۶/۰۰E+۰۸
۸	۷/۸۷E+۰۶	۶/۷۵E+۰۷	۲/۰۲E+۰۸	۳/۳۷E+۰۸	۴/۷۲E+۰۸	۶/۰۷E+۰۸
۹	۷/۸۸E+۰۶	۶/۸۳E+۰۷	۲/۰۵E+۰۸	۳/۴۲E+۰۸	۴/۷۸E+۰۸	۶/۱۵E+۰۸
۱۰	۷/۸۹E+۰۶	۶/۹۲E+۰۷	۲/۰۷E+۰۸	۳/۴۶E+۰۸	۴/۸۴E+۰۸	۶/۲۲E+۰۸
۱۱	۷/۹۰E+۰۶	۷/۰۰E+۰۷	۲/۱۰E+۰۸	۳/۵۰E+۰۸	۴/۹۰E+۰۸	۶/۳۰E+۰۸

جدول ۴: تغییرات مقدار تابع هدف زیست‌محیطی به‌ازای تغییر در میزان انتشار گاز CO_2

تکرار	تابع هدف اقتصادی	درصد افزایش میزان انتشار گاز CO_2				
		۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۹
۱	۶/۱۶E+۰۹	۷/۸۲E+۰۴	۲/۳۵E+۰۵	۳/۹۱E+۰۵	۵/۴۸E+۰۵	۷/۰۴E+۰۵
۲	۶/۲۴E+۰۹	۷/۸۳E+۰۴	۲/۳۵E+۰۵	۳/۹۲E+۰۵	۵/۴۸E+۰۵	۷/۰۵E+۰۵
۳	۶/۳۳E+۰۹	۷/۸۴E+۰۴	۲/۳۵E+۰۵	۳/۹۲E+۰۵	۵/۴۹E+۰۵	۷/۰۵E+۰۵
۴	۶/۴۱E+۰۹	۷/۸۵E+۰۴	۲/۳۵E+۰۵	۳/۹۲E+۰۵	۵/۴۹E+۰۵	۷/۰۶E+۰۵
۵	۶/۴۹E+۰۹	۷/۸۵E+۰۴	۲/۳۶E+۰۵	۳/۹۳E+۰۵	۵/۵۰E+۰۵	۷/۰۷E+۰۵
۶	۶/۵۸E+۰۹	۷/۸۶E+۰۴	۲/۳۶E+۰۵	۳/۹۳E+۰۵	۵/۵۰E+۰۵	۷/۰۷E+۰۵
۷	۶/۶۶E+۰۹	۷/۸۷E+۰۴	۲/۳۶E+۰۵	۳/۹۳E+۰۵	۵/۵۱E+۰۵	۷/۰۸E+۰۵
۸	۶/۷۵E+۰۹	۷/۸۷E+۰۴	۲/۳۶E+۰۵	۳/۹۴E+۰۵	۵/۵۱E+۰۵	۷/۰۹E+۰۵
۹	۶/۸۳E+۰۹	۷/۸۸E+۰۴	۲/۳۶E+۰۵	۳/۹۴E+۰۵	۵/۵۲E+۰۵	۷/۰۹E+۰۵
۱۰	۶/۹۲E+۰۹	۷/۸۹E+۰۴	۲/۳۷E+۰۵	۳/۹۴E+۰۵	۵/۵۲E+۰۵	۷/۱۰E+۰۵
۱۱	۷/۰۰E+۰۹	۷/۹۰E+۰۴	۲/۳۷E+۰۵	۳/۹۵E+۰۵	۵/۵۳E+۰۵	۷/۱۱E+۰۵



شکل ۶: مکان‌های بهینهٔ قرارگیری تسهیلات در شبکهٔ جمع‌آوری پسماند برای حل مدل پیشنهادی

در انتخاب مکان مناسب ایستگاه انتقال موقت، دو عامل مهم تأثیرگذارند که عبارت‌اند از هزینهٔ احداث و همچنین وزن آن ایستگاه که از خروجی مدل DEA حاصل شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده ایستگاه در نظر گرفته شده در منطقه ۷ انتخاب شده که دارای اولویت بالاتری نسبت به دیگر ایستگاه‌ها است و همچنین هزینهٔ احداث آن نسبت به بقیه کمتر است. در ادامه، در شکل (۶) مکان‌های بهینهٔ قرارگیری تسهیلات در شبکهٔ جمع‌آوری پسماند شهر

شیراز برای حل مدل پیشنهادی نشان داده شده است.

۴-۱- تحلیل حساسیت

تغییرات مدل با افزایش مقدار دو پارامتر قیمت فروش و میزان انتشار گاز CO_2 از ۱ تا ۱۰ درصد مورد تحلیل قرار گرفته که نتایج این بررسی در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است.

نمودار پارتو مسئله در حالت افزایش قیمت فروش مواد آلی و مواد بازیافتی در شکل (۴) نشان داده شده است.

همان طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، با افزایش قیمت فروش، مقدار تابع هدف اقتصادی نیز افزایش می‌یابد.

نمودار میزان تغییرات تابع هدف زیست‌محیطی به‌ازای تغییر در میزان انتشار گاز CO_2 در شکل (۵) نشان داده شده است.

۵- جمع‌بندی و پیشنهادها

زندگی در محیطی سالم و پاکیزه، یکی از عمده‌ترین نیازهای انسانی است. از این رو در اغلب جوامع، مسائل زیست‌محیطی از اهمیتی خاص برخوردار است. یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی، جمع‌آوری و دفع بهداشتی زباله‌های شهری است. مدیریت جامع پسماند، سیستمی است که جریان پسماند، جمع‌آوری پسماند و روش‌های پردازش و دفع آن را در تعامل با یکدیگر مدیریت می‌کند؛ به نحوی که اهداف محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی مطلوب در یک منطقه مشخص به دست آید. اجرای هر یک از مراحل فوق، نیازمند برنامه‌ریزی و طراحی دقیق است. در این پژوهش به‌منظور مکان‌یابی تسهیلات دفن و ایستگاه‌های انتقال، به مطالعهٔ وضعیت شبکهٔ جمع‌آوری پسماند شهر شیراز پرداخته شده است. در رویکرد جدید این پژوهش برای مکان‌یابی تسهیلات دفن و ایستگاه‌های انتقال، علاوه بر هدف بیشینه‌سازی سود، کمینه‌سازی میزان انتشار گاز CO_2 نیز لحاظ شده و عوامل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به‌عنوان متغیرهای مدل تحلیل پوششی داده‌ها برای انتخاب مکان بهینه ایستگاه انتقال در نظر گرفته شده است. برای حل مدل دوهدفه اقتصادی - زیستی، از روش اپسیلون محدودیت استفاده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مکان‌هایی انتخاب شده‌اند که هم دارای اولویت بالاتری در روش تحلیل پوششی داده‌ها نسبت به دیگر مکان‌ها هستند و هم هزینهٔ احداث و تأثیرات زیست‌محیطی کمتری دارند. پیشنهاد می‌شود بررسی و تأیید نهایی محل با توجه به نظر مسئولان صورت گیرد و مواردی دیگر که در انتخاب مکان تسهیلات با توجه به هر دو هدف مدّنظر، تأثیرگذارند و در این پژوهش در نظر گرفته نشده‌اند، با نظر متخصصان اعمال شود.

به‌منظور تحقیقات آتی می‌توان مدل را به‌منظور جمع‌آوری انواع دیگر پسماندها نظیر پسماندهای خطرناک توسعه داد و مباحث استحصال انرژی از زباله‌های جامد شهری را به مدل اضافه کرد. همچنین می‌توان در مدل ارائه‌شده عدم قطعیت را در نظر گرفت و از روش‌های فرا ابتکاری برای حل مدل بهره برد.

۶- مراجع

[1] Akshay Mutha and S. Pokharel, "Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules", Computers & Industrial Engineering, Vol. 56, 2009, pp. 334-346.

[2] R. Cruz-Rivera and J. Ertel, "Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico", European Journal of Operational Research, Vol. 196, 2009, pp. 930-939.

[3] G. Kannan, "Fuzzy approach for the selection of third party reverse logistics provider", Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics, Vol. 21, No. 3, 2009, pp. 397-416.

[۴] محمدرضا فضلی خلف، سید کمال چهارسوقی و میرسامان پیشوایی، «طراحی پایای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت: مطالعه موردی یک تولیدکننده باتری اسیدی»، مجلهٔ مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۹، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۶۰-۴۵.

[۵] علی‌رضا نورپور، هادی افراسیابی و سید مجید داودی، بررسی فرایند مدیریت پسماند در جهان و ایران، ۱۳۹۲.

[6] N.Ö. Demirel and H. Gökçen, "A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, journal article Vol. 39, No. 11, December 2008, pp. 1197-1206.

[7] M.S. Pishvaee, R.Z. Farahani and W. Dullaert, "A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design", Computers & Operations Research, Vol. 37, No. 6, Jun 2010, pp. 1100-1112.

[8] Seval Ene and N. Öztürk, "Open loop reverse supply chain network design", Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 109, 2014, pp. 1110-1115.

[9] S.R. Cardoso, A.P.F. Barbosa-Póvoa and S. Relvas, "Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty", European Journal of Operational Research, Vol. 226, No. 3, 2013, pp. 436-451.

[10] V. De Rosa, M. Gebhard, E. Hartmann and J. Wollenweber, "Robust sustainable bi-directional logistics network design under uncertainty", International Journal of Production Economics, Vol. 145, No. 1, September 2013, pp. 184-198.

[11] G. Ghiani, D. Laganà, E. Manni and C. Triki, "Capacitated location of collection sites in an urban waste management system", Waste Management, Vol. 32, No. 7, July 2012, pp. 1291-1296.

[12] J.-S. Kim and D.-H. Lee, "A restricted dynamic model for refuse collection network design in reverse logistics", Computers & Industrial Engineering, Vol. 66, No. 4, 2013, pp. 1131-1137.

[13] J.E. Santibañez-Aguilar, J.M. Ponce-Ortega, J.B. González-Campos, M. Serna-González and M.M. El-Halwagi, "Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste", Waste management, Vol. 33, No. 12, 2013, pp. 2607-2622.

[14] E.A.V. Toso and D. Alem, "Effective location models for sorting recyclables in public management", European Journal of Operational Research, Vol. 234, No. 3, May 2014, pp. 839-860.

[15] C.K.M. Lee, C.L. Yeung, Z.R. Xiong and S.H. Chung, "A mathematical model for municipal solid waste management – A case study in Hong Kong", Waste Management, Vol. 58, December 2016, pp. 430-441.

[16] K. Govindan and H. Soleimani, "A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus", Journal of Cleaner Production, Vol. 142, Part 1, January 2017, pp. 371-384.

[۱۷] مهدی سلطانی تهرانی، حسین‌علی حسن‌پور و سعید رمضانی، «مدل بهینه سازی دو هدفه هزینه و کربن‌دی‌اکسید در زنجیره تأمین حلقه بسته»، مجلهٔ پژوهش‌های مدیریت در ایران، دورهٔ ۱۹، شمارهٔ ۱، ۱۳۹۴، صفحهٔ ۱۸۹-۱۶۹.

[18] T. Pinto-Varela, A.P.F.D. Barbosa-Póvoa and A.Q. Novais, "Bi-objective optimization approach to the design and planning of supply chains: Economic versus environmental performances", Computers & Chemical Engineering, Vol. 35, No. 8, August 2011, pp. 1454-1468.

[۱۹] احمد ماکوئی، حمید صفاری، میرسامان پیشوایی و وحید محمودیان، «یک مدل چندهدفه استوار برای طراحی زنجیره تأمین با درنظرگیری جریان رو به جلو و عقب و مسئولیت‌پذیری اجتماعی»، مجلهٔ مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۸۵-۱۷۱.

[۲۰] طاهره علی حیدری بیوکی و حسن خادمی زارع، «توسعه روش تحلیل پوششی داده‌ها به منظور خوشه‌بندی مشتریان اعتباری بانک‌ها»، مجلهٔ مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۷۴-۵۹.

[21] G. Mavrotas and K. Florios, "An improved version of the augmented ε-constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems", Applied Mathematics and Computation, Vol. 219, No. 18, 2013, pp. 9652-9669.