مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۹)
دوره‌ی ۱-۳۶، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۴۱-۵۰

Original Article

مدل ریاضی دوهدفه برای مسئله‌ی مکان‌یابی ـ تخصیص پسماند جامد شهری (مطالعه‌ی موردی: شهر تهران)

مریم نیلی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
محمد سعید جبل عاملی * (استاد)
فاطمه صبوحی (دانشجوی دکتری)
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

علاوه بر جمع‌آوری و حمل‌ونقل پسماند جامد شهری، تولید انرژی و روش‌های دفع آنها نیز موضوع مهمی است. مطالعات اندکی در پژوهش‌ها به بررسی این مسائل به طور یکپارچه پرداخته‌اند. در این مقاله، یک شبکه‌ی سه‌سطحی متشکل از نواحی تولیدکننده‌ی زباله، ایستگاه‌های انتقال، و تسهیلات دفع زباله (مراکز بازیافت، پوسال، زباله‌سوز و دفن بهداشتی) در نظر گرفته شده و یک مدل ریاضی دوهدفه برای مسئله‌ی مکان‌یابی و تخصیص پسماند جامد شهری ارائه شده است. اهداف مدل پیشنهادی شامل کمینه کردن هزینه‌های دفع زباله و انتشار گازهای گلخانه‌یی است. همچنین، انواع محصولات حاصل از بازیافت زباله و انتقال آنها به نواحی فروش این محصولات و محدودیت تعداد و ظرفیت برای ایستگاه‌های انتقال و تسهیلات دفع زباله لحاظ شده است. برای نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی، مناطقی از تهران به عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب و نتایج حاصل از اجرای مدل بر روی آن گزارش شده است.

واژگان کلیدی: مدیریت پسماند جامد شهری، مکان‌یابی تسهیلات، تخصیص، بهینه‌سازی دوهدفه، ایستگاه‌های انتقال.

maryam_nili@ind.iust.ac.ir
jabal@iust.ac.ir
sabouhi@ind.iust.ac.ir

۱. مقدمه

یکی از معضلات عمده‌ی جوامع شهری، رشد روزافزون جمعیت و به دنبال آن تولید زباله است. افزایش حجم پسماند از یک‌سو و تنوع و گوناگونی آنها از سوی دیگر، بر پیچیدگی نحوه‌ی جداسازی و دفع آنها می‌افزاید.[۱] مسائل مربوط به دفع زباله همواره از اهمیت ویژه‌یی برخوردار بوده است؛ زیرا اگر دفع زباله به درستی انجام نگیرد خطرات زیست‌محیطی فراوانی را در پی خواهد داشت.[۲] مدیران و مسئولان در کشورهای صنعتی از عواقب ناشی از دفع نامناسب زباله‌ها اطلاعات کافی را به دست آورده‌اند و در این خصوص، سعی در پیاده‌سازی روش‌های قابل قبول از لحاظ محیط زیستی و اقتصادی دارند. از جمله روش‌های دفع زباله می‌توان به بازیافت، سوزاندن، دفن بهداشتی و تهیه‌ی پوسال (کمپوست) با استفاده از روش‌های سنتی، نیمه‌سنتی، مدل‌های پیشرفته‌ی هوازی و غیر هوازی اشاره کرد.[۳] در ادامه به توضیح کارایی هر یک از این تسهیلات می‌پردازیم.

پوسال (تهیه‌ی کود از زباله) عبارت است از تجزیه‌ی مواد آلی موجود در زباله‌ها در شرایطی خاص و کنترل شده و در درجه حرارت و رطوبت مناسب، به وسیله‌ی قارچ‌ها، باکتری‌ها، کپک‌ها و ریزسازواره‌های (میکرو ارگانیسم‌های) هوازی و غیرهوازی. پوسال خود نوعی بازیافت مواد آلی از زباله است و از کودی که از این طریق به دست می‌آید، برای بهبود حاصل‌خیزی زمین‌های کشاورزی استفاده می‌شود و جایگزین مناسبی برای کودهای شیمیایی است. بازیافت به معنای آماده‌سازی مواد استفاده شده برای بهره‌برداری دوباره است. مواد بازیافت‌پذیر عبارت‌اند از: قراضه‌های آهن، آهن‌آلات، شیشه، کاغذ، مقوا، پلاستیک و برخی از مواد شیمیایی. بازیافت از هدر رفتن منابع سودمند ملی جلوگیری می‌کند و باعث کاهش مصرف مواد خام و انرژی می‌شود.

استفاده از فنّاوری سوزاندن زباله‌ها برای نابودی ضایعات، مزایای بسیار زیادی دارد؛ اما اگر طراحی زباله‌سوزها به درستی صورت نگیرد، به دلیل احتراق ناقص، آلاینده‌های زیادی وارد محیط‌زیست می‌شود. سوزاندن زباله‌ها ترکیبات سمی و بیماری‌زای موجود در آنها را نابود می‌کند و حجم و جرم زباله‌ها را برای دفع نهایی کاهش می‌دهد.

دفن بهداشتی زباله (لندفیل) عبارت است از انتقال پسماندهای جامد به محل ویژه‌ی دفن آنها در خاک، به طوری که کمترین خطر را برای محیط زیست داشته باشد. روش دفن بهداشتی، متداول‌ترین روش دفع زباله محسوب می‌شود.

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۹/۷، اصلاحیه ۱۳۹۸/۳/۱۱، پذیرش ۱۳۹۸/۴/۱۲.
DOI:10/24200./J65.2019.51068.1892

طراحی زنجیره‌ی تأمین برای مدیریت زباله‌های جامد شهری را می‌توان به دو دسته‌ی اصلی زنجیره‌ی تأمین مستقیم و زنجیره‌ی تأمین معکوس تقسیم کرد. در زنجیره‌ی تأمین مستقیم، فرایند کار به این صورت است که زباله‌ها بدون این‌که به مراکز بازیافت، پوسال، زباله‌سوز، یا سایر تسهیلات دفع زباله بروند به طور مستقیم، وارد محل دفن بهداشتی می‌شوند. اما در مورد زنجیره‌ی تأمین معکوس، زباله‌ها پس از جداسازی به مرکز بازیافت، پوسال و مراکز تولید انرژی از زباله می‌روند و این بدان معناست که زباله‌ها دوباره به محصول تبدیل می‌شوند و مورد استفاده‌ی مجدد قرار می‌گیرند. زنجیره‌ی تأمین حلقه‌بسته نیز از ترکیب زنجیره‌ی تأمین مستقیم و معکوس ایجاد می‌شود که در آن محصولات حاصل از بازیافت زباله‌ها به مصرف‌کنندگان اولیه‌ی این محصولات بازمی‌گردند. در این قسمت به بررسی مطالعات پیشین می‌پردازیم و مطالعات را براساس نوع تسهیلات دفع زباله به چندین دسته‌ی اصلی تقسیم‌بندی می‌کنیم.

دسته‌ی اول، مقالاتی هستند که برای دفع زباله‌ها فقط محل دفن بهداشتی را در نظر گرفته‌اند؛ مانند آیزلت و ماریانوف[۴] که مدلی تک‌هدفه برای مکان‌یابی محل دفن زباله‌ها با کمینه‌سازی هزینه‌ها ارائه دادند. آنها در مدل خود ایستگاه‌های انتقال را نیز در نظر گرفته بودند.

دسته‌ی دوم، مقالاتی هستند که برای دفع زباله‌ها فقط مراکز بازیافت را در نظر گرفته‌اند؛ مانند یی و همکاران[۵] که یک مدل مکان‌یابی چندهدفه با اهداف کمینه‌سازی تعداد مراکز بازیافت زباله و کمینه‌سازی فاصله‌ی بین انبارهای جمع‌آوری زباله و مراکز بازیافت ارائه دادند. شی و همکاران[۶] مدلی چندهدفه با در نظر گرفتن مراکز جمع‌آوری زباله ارائه کردند. اهداف این مدل پیشنهادی شامل کمینه‌سازی هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی حاصل از طراحی این زنجیره‌ی تأمین است.

دسته‌ی سوم، مقالاتی هستند که برای دفع زباله، هم مراکز بازیافت و هم محل دفن بهداشتی را در نظر گرفته‌اند. در این زمینه، یو و سولوانگ[۷] مدلی چندهدفه با اهداف کمینه‌سازی کل هزینه‌های مدیریت زباله و کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌یی و اثرات زیست‌محیطی ارائه دادند و در مدل خود ایستگاه‌های انتقال و محل دفن نهایی را نیز در نظر گرفتند. همچنین، حبیبی و همکاران[۸] برای مکان‌یابی تسهیلات دفع زباله از جمله کارخانه‌ی بازیافت و محل دفن بهداشتی، مدلی پیشنهاد دادند که اهداف آن کمینه‌سازی هزینه‌ها، انتشار گازهای گلخانه‌یی و کمینه‌سازی آلودگی‌های سمعی و بصری بود. آنها نیز در سطوح شبکه‌ی خود ایستگاه‌های انتقال را در نظر گرفته بودند. آصفی و همکاران[۹] یک مدل مکان‌یابی ـ مسیریابی با در نظر گرفتن ایستگاه‌های انتقال پیشنهاد دادند و هدف آنها کمینه‌سازی هزینه‌ها بود. آنها زباله‌ها را به دو دسته‌ی کلی خطرناک و غیرخطرناک دسته‌بندی کردند و برای هرکدام، محل دفنی جدا در نظر گرفتند.

دستهٔ چهارم، مقالاتی هستند که از مراکز پوسال و دفن زباله به طور هم‌زمان استفاده کردند؛ مثلاً یاداو و همکاران[۱۰] یک مدل خطی تحت عدم قطعیت از نوع فازی برای مکان‌یابی تسهیلات دفع زباله با در نظر گرفتن ایستگاه‌های انتقال ارائه دادند و هدف مدل آنها، کمینه‌سازی هزینه‌های مدیریت زباله بود.

دسته‌ی پنجم، مقالاتی هستند که برای دفع زباله، هم مراکز دفن بهداشتی و هم زباله‌سوز را در نظر گرفته‌اند. در این زمینه وو و همکاران[۱۱] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی تصادفی با در نظر گرفتن محدودیت میزان انتشار گازهای گلخانه‌یی و محدودیت ظرفیت برای تسهیلات دفع زباله ارائه دادند.

دسته‌ی ششم، مقالاتی هستند که تسهیلاتی نظیر مراکز پوسال، زباله‌سوز و محل دفن را با هم در نظر گرفتند؛ مانند سو و همکاران[۱۲] که مدلی برای مکان‌یابی تأسیسات دفع زباله با در نظر گرفتن ایستگاه‌های انتقال ارائه دادند. مدل مکان‌یابی آنها چنددوره‌یی با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ها (هزینه‌های عملیاتی، حمل‌ونقل و هزینه‌های مدیریت زباله‌ها) بود.

دسته‌ی هفتم، مقالاتی هستند که تسهیلاتی همانند مراکز بازیافت، زباله‌سوز و محل دفن را با هم در نظر گرفتند که در این زمینه، ربانی و همکاران[۱۳] یک مدل مکان‌یابی ـ مسیریابی چندهدفه برای تسهیلات دفع زباله‌های خطرناک ارائه دادند و آن را با روش فراابتکاری حل کردند.

دستهٔ هشتم، مقالاتی است که برای دفع زباله، هر چهار تسهیل مراکز بازیافت، مراکز پوسال، زباله‌سوز و مرکز دفن را در نظر می‌گیرند؛ در این زمینه، زی و همکاران[۱۴] یک مدل ریاضی برای مکان‌یابی تسهیلات دفع زباله با در نظر گرفتن ایستگاه‌های انتقال ارائه دادند. هدف مدل آنها کمینه‌سازی هزینه‌های ناشی از مدیریت زباله‌ها بود. مینگلو و کمیلیس[۱۵] یک مدل غیرخطی چندهدفه برای مکان‌یابی تسهیلات دفع زباله پیشنهاد دادند که هدف آنها کمینه‌سازی هزینه‌ها و انتشار گازهای گلخانه‌یی بود. تن و همکاران[۱۶] یک مدل ریاضی برای تخصیص زباله‌ها به تسهیلات بازیافت زباله ارائه دادند. هدف از این مدل چنددوره‌یی، بیشینه‌سازی منافع حاصل از بازیافت بود. یاداو و همکاران[۱۷] مدلی تک‌هدفه با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های استقرار و حمل‌ونقل ارائه دادند. لی و همکاران[۱۸] مدلی برای مکان‌یابی تسهیلات دفع زباله پیشنهاد کرده‌اند و در مدل خود برای حمل زباله‌ها، کامیون‌های جایگزین را نیز درنظر گرفتند. هو و همکاران[۱۹] برای مکان‌یابی تسهیلات دفع زباله، مدل خطی چندهدفه با در نظر گرفتن اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های سالانه‌ی مدیریت زباله و اثرات منفی زیست‌محیطی ارائه دادند. میردار هریجانی و همکاران[۲۰] برای مکان‌یابی تسهیلات دفع زباله، مدل خطی سه‌هدفه پیشنهاد دادند که اهداف مدل آنها بیشینه‌سازی منافع حاصل از بازیافت، کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌یی و بیشینه‌سازی رضایت اجتماعی است. آنها در مدل خود، ایستگاه‌های انتقال را در نظر نگرفتند و فرض کردند که زباله‌ها به طور مستقیم از مناطق تولیدکننده‌ی زباله به تسهیلات دفع زباله انتقال پیدا می‌کنند. لیم و همکاران[۲۱] برای مکان‌یابی تسهیلات دفع زباله، مدلی چندهدفه با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های کل، انتشار گازهای گلخانه‌یی و میزان زباله‌هایی که به محل دفن زباله‌ها می‌روند، ارائه دادند. آزاده و همکاران[۲۲] یک مدل ریاضی چهارهدفه با در نظر گرفتن ایستگاه‌های انتقال و مراکز جداسازی پیشنهاد دادند. اهداف مدل پیشنهادی شامل کمینه‌سازی آلودگی‌های ناشی از تسهیلات دفع زباله، کمینه‌سازی هزینه‌های ثابت و متغیر، کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی سامانه‌های جمع‌آوری زباله و بیشینه‌سازی سطح ایمنی هر یک از تسهیلات دفع زباله است. انور و همکاران[۲۳] مدلی تک‌هدفه مبتنی بر ۱۵ سناریوی حاصل از ترکیب ۵ تسهیل مختلف دفع زباله (جداسازی، بازیافت، تسهیلات حرارتی، دفن بهداشتی و پوسال) با سه روش متفاوت (متمرکز، غیرمتمرکز و خوشه‌یی) ارائه دادند. هدف این مدل کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری، عملیاتی و حمل‌ونقل است. محمدی و همکاران[۲۴] یک مدل چنددوره‌یی با در نظر گرفتن مراکز جمع‌آوری و جداسازی زباله پیشنهاد دادند. تابع هدف این مدل، بیشینه‌سازی منافع حاصل از فراورده‌های بازیافت است که هزینه‌های کل زنجیره‌ی تأمین از آن کاسته شده است. مقالات مرور شده در این بخش بر اساس معیارهای مهم دسته‌بندی شده و در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

بر اساس مطالعات انجام شده و مشاهده‌ی شکاف‌های تحقیقاتی، در این مقاله، یک شبکه‌ی سه‌سطحی متشکل از نواحی تولیدکننده‌ی زباله، ایستگاه‌های انتقال و تسهیلات دفع زباله (مراکز بازیافت، پوسال، زباله‌سوز و دفن بهداشتی) در نظر گرفته شده و یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط

جدول ۱. دسته‌بندی مقالات.

نویسندگان	تعداد تابع هدف		اجزای شبکه								نوع زنجیره تأمین		
	تک‌هدفه	چندهدفه	نقاط تولیدکننده زباله	انبارهای جمع‌آوری	ایستگاه‌های انتقال	مرکز بازیافت	مرکز پوسال	زباله سوز	دفن بهداشتی	مستقیم	معکوس	حلقه‌بسته
Xi etal.(۲۰۱۰)	*		*		*	*	*	*	*		*	
Su etal.(۲۰۱۰)	*				*		*	*	*		*	
Ye etal.(۲۰۱۱)		*		*		*					*	
Minoglou and Komilis(۲۰۱۳)		*			*	*	*	*	*		*	
Tan etal.(۲۰۱۴)		*	*			*	*	*	*		*	
Eiselt and Marianov(۲۰۱۵)	*		*		*				*	*		
Yadav etal.(۲۰۱۶)	*		*		*	*	*	*	*		*	
Lee etal.(۲۰۱۶)	*		*					*	*			
Lyeme etal.(۲۰۱۷)		*	*			*	*	*	*		*	
Yu and Solvang(۲۰۱۷)		*	*		*	*			*		*	
Habibi etal.(۲۰۱۷)		*	*		*	*			*			*
Yadav etal.(۲۰۱۷)	*		*		*		*		*		*	
Harijani etal.(۲۰۱۷)		*	*			*	*	*	*			*
Hu etal.(۲۰۱۷)		*	*					*	*		*	
Azadeh etal.(۲۰۱۸)		*			*	*	*	*	*		*	
Wu etal.(۲۰۱۸)	*		*					*	*	*		
Rabbani etal.(۲۰۱۸)		*	*			*		*	*		*	
Anwar etal.(۲۰۱۸)	*					*	*	*	*		*	
mohammadi etal.(۲۰۱۹)	*			*		*	*	*	*		*	
Shi etal.(۲۰۱۹)		*	*	*		*					*	
Asefi etal.(۲۰۱۹)	*		*		*	*		*	*		*	
این مطالعه		*	*		*	*	*	*	*			*

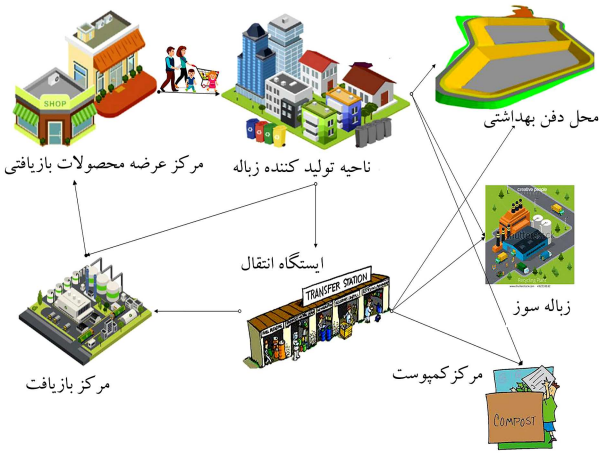
دوهدفه برای مسئله‌ی مکان‌یابی و تخصیص پسماند جامد شهری پیشنهاد شده است. اهداف مدل پیشنهادی شامل کمینه‌سازی هزینه‌های مدیریت زباله و انتشار گازهای گلخانه‌یی است. در مدل پیشنهادی، انواع محصولات حاصل از بازیافت زباله و انتقال آنها به نواحی فروش این محصولات درنظر گرفته شده است. همچنین برای نزدیک‌تر کردن مسئله به دنیای واقعی، برای تسهیلات دفع زباله و ایستگاه‌های انتقال، محدودیت تعداد و ظرفیت لحاظ شده است تا بتوان برنامه‌ریزی بهتری برای مکان‌یابی این تسهیلات انجام داد. ادامه‌ی ساختار مقاله به صورت زیر تنظیم شده است: در بخش دوم، به تشریح مسئله‌ی مورد بررسی پرداخته می‌شود. در بخش سوم، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله‌ی پیشنهادی ارائه می‌شود. در بخش چهارم، به تشریح مطالعه‌ی موردی پرداخته شده و روش و نتایج حل به ترتیب در بخش‌های پنجم و ششم ارائه شده است. در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی در بخش هفتم ارائه شده است.

۲. تشریح مسئله

برای بهره‌برداری از محصولات حاصل از بازیافت زباله‌ها از قبیل پلاستیک، شیشه، آهن‌آلات و . . . و همچنین بهره‌برداری از انرژی حاصل از سوزاندن زباله‌ها لازم است علاوه بر مکان‌یابی محل دفن زباله، برای انواع دیگر تسهیلات دفع زباله، از قبیل زباله‌سوز، مراکز بازیافت، و پوسال نیز به گونه‌یی برنامه‌ریزی شود که اولاً با کمترین هزینه‌ی ممکن این تسهیلات احداث شود، ثانیاً، بتوان انتشار گازهای گلخانه‌یی را به کمترین حد ممکن رساند.

مطابق شکل ۱، زباله‌ها می‌توانند از نواحی تولیدکننده‌ی زباله به طور مستقیم به محل‌های استقرار دفع زباله بروند یا از طریق ایستگاه‌های انتقال، منتقل شوند. بنابراین، زباله‌ها پس از بازیافت و تبدیل به محصول، دوباره به نواحی فروش این محصولات باز می‌گردند.

فرض‌های مدل عبارت‌اند از:



شکل ۱. شبکه‌یی از سامانه‌ی انتقال زباله‌ها از مناطق تولیدکننده‌ی زباله به مراکز دفع زباله.

- زباله‌ها می‌توانند به طور مستقیم به محل‌های استقرار تسهیلات دفع زباله بروند یا از طریق ایستگاه‌های انتقال به این تسهیلات منتقل شوند؛
- تعداد، ظرفیت و محل‌های ایستگاه‌های انتقال ثابت در نظرگرفته شده است و لزومی به مکان‌یابی ایستگاه انتقال جدید نیست؛
- محل‌های پیشنهادی برای استقرار تسهیلات از قبل مشخص شده است؛
- ظرفیت تسهیلات به کارگرفته شده در این مطالعه معلوم است؛
- تقاضای نواحی مختلف برای استفاده از محصولات بازیافتی، معلوم است.

۳. مدل‌سازی ریاضی

۱.۳. مجموعه‌ها و اندیس‌ها

مجموعه‌ها و اندیس‌های مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات دفع زباله عبات انداز:

I: انواع زباله‌ها $i \in I$؛

J: نواحی تولیدکننده‌ی زباله $j \in J$؛

K: نواحی کاندیدا $k \in K$؛

M: انواع آلودگی‌های ناشی از حمل و دفع زباله $m \in M$؛

L: انواع تسهیلات دفع زباله $l \in L$؛

O: انواع محصولات حاصل از بازیافت زباله‌ها $o \in O$؛

T: ایستگاه‌های انتقال $t \in T$.

۲.۳. پارامترها

p: بیشینه‌ی تعدادی که از هر تسهیل می تواند احداث شود؛

$et_{(t)}$: ظرفیت ایستگاه‌های انتقال؛

e_l: ظرفیت انواع تسهیلات؛

D_{jo}: تقاضای ناحیه‌ی j برای محصول حاصل از بازیافت o؛

R_{ij}: میزان تولید زباله‌های نوع i در ناحیه‌ی تولیدکننده‌ی زباله‌ی j؛

a_{io}: درصدی از زباله‌های نوع i که به محصول o تبدیل می‌شوند؛

d_{jt}: فاصله‌ی بین ناحیه‌ی تولیدکننده‌ی زباله‌ی j تا ایستگاه انتقال t؛

d_{jk}: فاصله‌ی بین ناحیه‌ی تولیدکننده‌ی زباله‌ی j و محل کاندیدا k؛

d_{ik}: فاصله‌ی بین ایستگاه انتقال t و محل کاندیدا k؛

C_{lk}: هزینه‌ی سرمایه‌گذاری برای احداث تسهیل l در محل کاندیدا k؛

CP_{il}: هزینه‌ی عملیاتی برای پردازش یک تن زباله i در تسهیل l؛

CS: هزینه‌ی تفکیک یک تن زباله در ایستگاه‌های انتقال؛

CT_o: هزینه‌ی حمل‌ونقل به ازای هرکیلومتر برای انتقال یک تن محصول؛

$CW_{۱jk}$: هزینه‌ی حمل‌ونقل به ازای هرکیلومتر برای انتقال یک تن زباله به طور مستقیم از ناحیه‌ی تولیدکننده‌ی زباله‌ی j به محل کاندیدا k؛

$CW_{۲jt}$: هزینه‌ی حمل‌ونقل به ازای هرکیلومتر برای انتقال یک تن زباله از ناحیه‌ی تولیدکننده‌ی زباله‌ی j به محل ایستگاه انتقال t؛

$CW_{۳tk}$: هزینه‌ی حمل‌ونقل به ازای هرکیلومتر برای انتقال یک تن زباله از ایستگاه انتقال t به محل کاندیدا k؛

EL_{ilm}: میزان انتشارگازگلخانه‌یی نوع m به دلیل پردازش زباله‌ی نوع i توسط تسهیل l؛

EP_{om}: میزان انتشارگازگلخانه‌یی نوع m به دلیل حمل محصول نوع o؛

$EW_{۱imjk}$: میزان انتشارگازگلخانه‌یی نوع m به ازای هرکیلومتر حمل زباله‌ی نوع i از منطقه‌ی تولیدکننده‌ی زباله‌ی j به محل کاندیدا k؛

$EW_{۲imjt}$: میزان انتشارگازگلخانه‌یی نوع m به ازای هرکیلومتر حمل زباله‌ی نوع i از منطقه‌ی تولیدکننده‌ی زباله‌ی j به ایستگاه انتقال t؛

$EW_{۳imtk}$: میزان انتشارگازگلخانه‌یی نوع m به ازای هرکیلومتر حمل زباله‌ی نوع i از ایستگاه انتقال t به محل کاندیدا k.

۳.۳. متغیرها

متغیرهای مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات دفع زباله عبارت‌اند از:

P_{ok}: میزان محصول تولیدشده‌ی نوع o در محل کاندیدا k؛

P_{okj}: میزان محصول تولیدشده‌ی نوع o که از محل کاندیدا k به ناحیه‌ی تولیدکننده‌ی زباله‌ی j بر می‌گردد؛

X_{ijk}: میزان زباله‌ی نوع i که از منطقه‌ی تولیدکننده‌ی زباله‌ی j به محل کاندیدا k می‌رود؛

X_{ilk}: میزان زباله‌ی نوع i که به تسهیل l در محل کاندیدا k تخصیص داده می‌شود؛

U_{ijt}: میزان زباله‌ی نوع i که از منطقه‌ی تولیدکننده‌ی زباله‌ی j به ایستگاه انتقال t می‌رود؛

Q_{itk}: میزان زباله‌ی نوع i که از ایستگاه انتقال t به محل کاندیدا k می‌رود؛

y_{lk}: برابر یک است اگر تسهیل l در محل کاندیدا k احداث شود، در غیر این صورت برابر صفر است؛

W_{jt}: برابر یک است اگر زباله‌های منطقه‌ی j به ایستگاه انتقال t بروند، در غیر این صورت برابر صفر است.

۴.۳. مدل ریاضی

$$\min Z_{۱} = \sum_{k\in K}\sum_{l\in L} C_{lk}\, Y_{lk}$$
$$+ \sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L} CP_{il}\, X_{ilk}$$
$$+ \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} CW_{۱jk}\, d_{jk} X_{ijk}$$

$$+\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{t\in T} CW_{۲jt}\, d_{jt}\, U_{ijt}$$
$$+\sum_{i\in I}\sum_{t\in T}\sum_{k\in K} CW_{۳tk}\, d_{tk}\, Q_{itk}$$
$$+\sum_{o\in O}\sum_{k\in K}\sum_{j\in J} CT_O\, d_{jk}\, P_{okj}$$
$$+\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{t\in T} U_{ijt}\, CS \qquad (۱)$$

$$\min Z_۲ = \sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L}\sum_{m\in M} X_{ilk}\, EL_{ilm}$$
$$+\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{m\in M} EW_{۱imjk}\, d_{jk}\, X_{ijk}$$
$$+\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{t\in T}\sum_{m\in M} EW_{۲imjt}\, d_{jt}\, U_{ijt}$$
$$+\sum_{i\in I}\sum_{t\in T}\sum_{k\in K}\sum_{m\in M} EW_{۳imtk}\, d_{tk}\, Q_{itk}$$
$$+\sum_{o\in O}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{m\in M} EP_{om}\, d_{jk}\, P_{okj} \qquad (۲)$$

$$R_{ij} = \sum_{k\in K} X_{ijk} + \sum_{t\in T} U_{ijt} \qquad \forall i,j \qquad (۳)$$

$$\sum_{l\in L} X_{ilk} = \sum_{j\in J} X_{ijk} + \sum_{t\in T} Q_{itk} \qquad \forall i,k \qquad (۴)$$

$$\sum_{j\in J} U_{ijt} = \sum_{k\in K} Q_{itk} \qquad \forall i,t \qquad (۵)$$

$$P_{ok} = \sum_{i\in I}\sum_{l\in L} a_{io}\, X_{ilk} \qquad \forall o,k \qquad (۶)$$

$$P_{ok} = \sum_{j\in J} P_{okj} \qquad \forall i,o,k \qquad (۷)$$

$$\sum_{k\in K} P_{okj} \geq D_{oj} \quad , \qquad \forall o,j \qquad (۸)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} U_{ijt} = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} W_{jt}\, et_{(t)} \qquad \forall t \qquad (۹)$$

$$\sum_{i\in I} X_{ilk} \leq Y_{lk}\, e_l \qquad \forall k,L \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{k\in K} y_{lk} \leq p \quad , \qquad \forall l \qquad (۱۱)$$

$$W_{jt} \in \{۰,۱\} \quad , \qquad \forall j\in J, t\in T \qquad (۱۲)$$

$$y_{lk} \in \{۰,۱\} \quad , \qquad \forall k\in K, l\in L \qquad (۱۳)$$

$$Q_{itk} \geq ۰ \quad , \qquad \forall i\in I, t\in T, k\in K \qquad (۱۴)$$

$$U_{ijt} \geq ۰ \quad , \qquad \forall i\in I, j\in J, t\in T \qquad (۱۵)$$

$$X_{ilk} \geq ۰ \quad , \qquad \forall i\in I, k\in K, l\in L \qquad (۱۶)$$

$$X_{ijk} \geq ۰ \quad , \qquad \forall i\in I, j\in J, k\in K \qquad (۱۷)$$

$$P_{okj} \geq ۰ \quad , \qquad \forall o\in O, k\in K, j\in J \qquad (۱۸)$$

$$P_{ok} \geq ۰ \qquad \forall o\in O, k\in K \qquad (۱۹)$$

تابع هدف ۱، کل هزینه‌ها شامل هزینه‌های حمل‌ونقل، عملیاتی و تفکیک زباله را کمینه می‌کند. تابع هدف ۲، کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌یی است که در اثر حمل زباله‌ها، پردازش آنها و حمل محصولات بازیافتی به وجود آمده است. محدودیت ۳ بیان می‌کند که مجموع زباله‌هایی که از نواحی تولیدکننده‌ی زباله به طور مستقیم به محل‌های کاندیدا می‌روند، به علاوه‌ی مجموع زباله‌هایی که از ناحیه‌ی تولیدکننده‌ی زباله به ایستگاه‌های انتقال می‌روند، باید با میزان زباله‌هایی که در ناحیه‌ی تولیدکننده‌ی زباله تولید می‌شوند، برابر باشند. محدودیت ۴ بیان می‌کند که میزان زباله‌هایی که در محل‌های کاندیدا توسط تسهیلات، پردازش می‌شوند، باید با مجموع زباله‌هایی که از نواحی تولیدکننده‌ی زباله به طور مستقیم به محل‌های کاندیدا می‌روند، به علاوه‌ی زباله‌هایی که از ایستگاه‌های انتقال به سمت محل‌های کاندیدا می‌روند، برابر باشد. محدودیت ۵ بیان می‌کند که میزان زباله‌هایی که از نواحی تولیدکننده‌ی زباله به ایستگاه انتقال می‌روند، باید با میزان زباله‌هایی که از ایستگاه‌های انتقال به سمت محل‌های کاندیدا می‌روند، برابر باشند. محدودیت ۶ بیان‌کننده‌ی این است که میزان محصولاتی که در محل‌های کاندیدا تولید می‌شوند، از حاصل‌ضرب درصدی از انواع زباله‌ها در میزان زباله‌هایی که توسط تسهیلات پردازش می‌شوند، به دست می‌آید. محدودیت ۷ بیان می‌کند که میزان محصولاتی که در محل‌های کاندیدا تولید می‌شوند، با میزان محصولاتی که از محل‌های کاندیدا به سمت نواحی تولیدکننده‌ی زباله‌ها می‌روند، برابر هستند. محدودیت ۸ بیان‌کننده‌ی این است که میزان محصولاتی که از محل‌های کاندیدا به سمت نواحی تقاضا می‌روند، باید بتوانند تقاضای نواحی از آن محصول را تأمین کنند. محدودیت‌های ۹ و ۱۰، ظرفیت ایستگاه‌های انتقال و تسهیلات پردازش را به ترتیب نشان می‌دهند و در انتها محدودیت ۱۱ بیان‌کننده‌ی این است که از هر تسهیل، حداکثر p عدد می‌تواند احداث شود. محدودیت‌های ۱۲ تا ۱۹ نوع متغیرهای به کارگرفته شده در مدل را نشان می‌دهند.

۴. مطالعه‌ی موردی

پس از بررسی‌های انجام شده درباره‌ی تسهیلات دفع زباله در شهر تهران، به این نتیجه رسیدیم که زباله‌های استان تهران توسط مجتمع پردازش و دفع آرادکوه، واقع در منطقه‌ی کهریزک سامان‌دهی می‌شوند که با توجه به استقرار این مجتمع در جنوب تهران، حمل زباله‌های مناطق شمالی تهران به این مجتمع، علاوه بر هزینه‌های زیاد حمل‌ونقل،اثرات زیست‌محیطی نامطلوبی را نیز به همراه خواهد داشت. در نتیجه، نیاز به استقرار انواع تسهیلات دفع زباله در مکان‌هایی مناسب و به دور از تراکم جمعیت، برای مناطق ۱ تا ۸ تهران و همچنین منطقه‌ی ۲۲ تهران احساس می‌شود. شکل ۲، نمایی از وضعیت فعلی دفع زباله‌های استان تهران را نشان می‌دهد.

در این مسئله، زباله‌ها به شش دسته‌ی پلاستیکی، شیشه‌یی، کاغذی، فلزی، طبیعی و آلی و غیره تقسیم‌بندی شده‌اند و نواحی تولیدکننده‌ی زباله، مناطق ۱ تا ۸ و منطقه‌ی ۲۲ تهران در نظرگرفته شده است. جدول ۲، میانگین روزانه‌ی تولید زباله در مناطق ذکرشده را نشان می‌دهد.

انتخاب محل‌های کاندیدا برای استقرار تسهیلات دفع زباله، بر اساس ضوابط زیست‌محیطی صورت گرفته است. این ضوابط عبارت‌اند از:

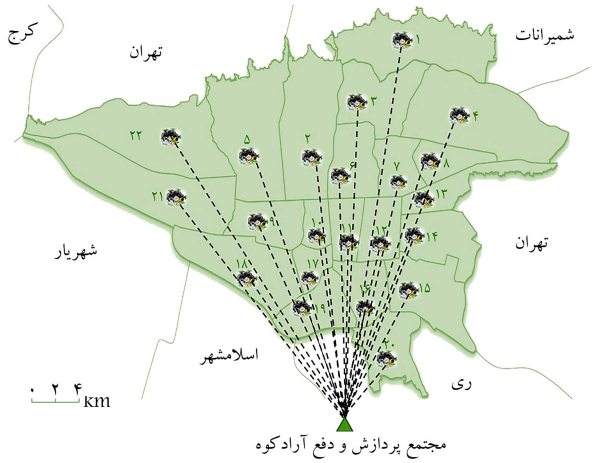
- محل‌های دفع، نباید در مسیر و حریم رودخانه‌های فصلی و دائمی، مسیل‌ها و آبراهه‌های منتهی به رودخانه‌ها واقع شوند؛
- محل دفع، باید حداقل یک کیلومتر با مناطق موجود یا توسعه‌ی آتی مسکونی، بیمارستانی، آموزشی، زیارتی، تجارتی و صنعتی فاصله داشته باشد؛

جدول ۲. میانگین روزانه‌ی تولید زباله (تن/روز)[۲۰].

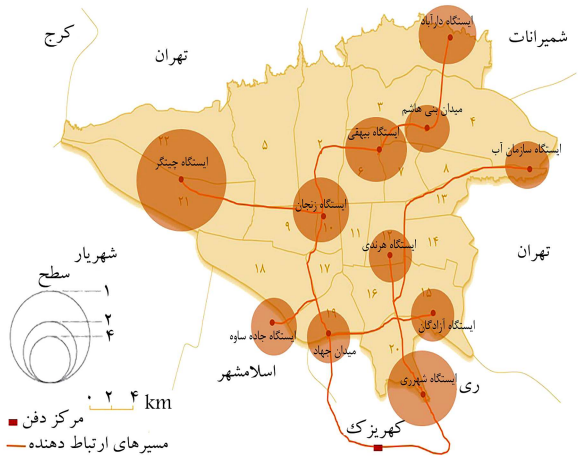
	پلاستیک	شیشه	کاغذ	فلزات	طبیعی و آلی	غیره
منطقه ۱	۲۳٫۷۵۸	۱۱٫۲۰۷	۷۵٫۷۵۷	۱۲٫۵۵۱	۲۷۱٫۶۴۸	۳۲٫۷۲۳
منطقه ۲	۲۲٫۷۰۳	۱۲٫۹	۷۴٫۳۰۲	۱۴٫۹۶۴	۳۰۸٫۰۴۴	۵۹٫۳۳۹
منطقه ۳	۱۵٫۲۴۱	۵٫۷۹۲	۵۰٫۹۰۵	۷٫۶۲۱	۱۷۵٫۵۷۶	۳۴٫۴۴۵
منطقه ۴	۲۵٫۳۰۵	۱۳٫۳۵۵	۸۴٫۳۵	۱۶٫۱۶۷	۴۴۹٫۸۶۸	۷۵٫۹۱۵
منطقه ۵	۲۲٫۴۱۵	۱۰٫۶۷۴	۶۷٫۲۴۶	۱۰٫۱۴	۳۴۸٫۵۰۶	۴۹٫۶۳۴
منطقه ۶	۱۱٫۹۵۹	۸٫۳۴۳	۵۵٫۶۲۲	۸٫۶۲۱	۱۴۳٫۲۲۷	۳۳٫۹۲۹
منطقه ۷	۱۲٫۲۱۴	۹٫۴۳۸	۳۳٫۸۶۶	۹٫۹۹۳	۱۶۵٫۱۶۸	۲۹٫۷.۳
منطقه ۸	۱۲٫۸۱۱	۴٫۶۳۴	۲۹٫۹۸۴	۵٫۴۵۲	۱۷۶٫۳۶	۲۷٫۸۰۳
منطقه ۲۲	۳٫۴۸۴	۲٫۰۹	۱۰٫۵۵۲	۲٫۹۸۶	۶۷٫۷۹۱	۷٫۹۶۴

جدول ۳. انواع آلودگی‌های ناشی از حمل و دفع زباله.

انواع آلودگی‌ها				
۱. کربن‌دی‌اکسید	۲. گوگرد دی‌اکسید	۳. اکسیدهای نیتروژن	۴. گازهای سنگین	۵. ترکیبات آلی فرار در هوا



شکل ۲. وضعیت فعلی دفع زباله‌های مناطق ۲۲ گانه تهران.



شکل ۳. مکان ایستگاه‌های انتقال[۲۵].

- محل دفع باید از حریم فرودگاه‌های بین المللی و محلی، به ترتیب ۸ و ۳ کیلومتر فاصله داشته باشند؛
- مراکز دفع باید از جاده‌ی اصلی، بزرگ‌راه‌ها و آزادراه‌ها، حداقل ۳۰۰ متر فاصله داشته باشد.

ابتدای جاده‌ی لشگرک، آرژانتین، حوالی پارکینگ بیهقی، کشاربالا، گرم‌دره، رحمان‌آباد، مرادآباد، حوالی زندان اوین و حوالی پارک علم‌وفنّاوری مدرس به عنوان محل‌های کاندیدا برای استقرار تسهیلات دفع زباله انتخاب شدند. جدول ۳، انواع آلودگی‌های ناشی از حمل و دفع زباله را نشان می‌دهد.

برای مناطق شمال تهران (مناطق ۱ تا ۸ و منطقه‌ی ۲۲) ایستگاه‌های انتقال چیتگر، زنجان، بیهقی، بنی‌هاشم، دارآباد و سازمان آب در نظر گرفته شده است. شکل ۳، محل‌های استقرار این ایستگاه‌های انتقال را نشان می‌دهد.

در این مطالعه، محصولات حاصل از بازیافت نیز محصولات پلاستیکی، محصولات شیشه‌یی، محصولات فلزی، طبیعی و آلی و الکتریسیته در نظر گرفته شده است.

۵. روش حل

در مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه، راه حل بهینه معمولاً به وضوح، قابل تعریف است؛ اما در بهینه‌سازی چندهدفه ما با اهدافی روبه‌رو هستیم که با هم در تعارض هستند و نمی‌توان فقط یک راه حل را به عنوان بهترین جواب مسئله انتخاب کرد. در این‌گونه مسائل باید مجموعه‌یی از جواب‌ها، که هریک از اهداف را در سطح قابل قبولی برآورده می‌سازند، به عنوان مجموعه‌ی جواب‌های بهینه‌ی پارتو یا کارای مسئله معرفی کرد. در این مقاله، مدل ریاضی پیشنهادی دوهدفه است؛ زیرا در حوزه‌ی مدیریت پسماند جامد شهری، کمینه کردن کل هزینه‌ها و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌یی هر دو از اهمیت بالایی برخوردار هستند و از طرفی این دو هدف با هم در تعارض‌اند.

روش‌های مختلفی برای حل مسائل چندهدفه وجود دارد. روش محدودیت اپسیلون، یکی از روش‌های شناخته شده برای حل مسائل چندهدفه است که در مقالات زیادی در حوزه‌های مختلف از جمله حوزه‌ی طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین پسماند جامد شهری، از این روش بهره گرفته شده است. مثلاً می‌توان به

جدول ۴. جواب‌های مدل به ازای تکرارهای مختلف روش اپسیلون.

شماره‌ی تکرار	تابع هدف اول (میلیارد تومان)	تابع هدف دوم (تن)
۱	۲۴۶٫۳	۷۴۳۵۲۹٫۳
۲	۲۱۴٫۸	۷۶۰۳۱۲٫۹
۳	۱۶۶٫۵	۷۷۴۵۱۲٫۳
۴	۱۴۴٫۷	۸۰۲۹۱۱٫۰
۵	۱۳۷٫۱	۸۱۷۱۱۰٫۳
۶	۱۳۰٫۱	۸۳۱۳۰۹٫۷
۷	۱۲۶٫۵	۸۴۵۵۰۹٫۰
۸	۱۲۳٫۹	۸۵۹۷۰۸٫۳
۹	۱۲۳٫۴	۸۷۳۹۰۷٫۷
۱۰	۱۱۸٫۹	۸۸۸۱۰۷٫۰

مقالات[۲۶-۲۸] اشاره کرد. مزیت اصلی این روش این است که می‌تواند ناحیه‌ی شدنی اصلی مسئله را تغییر دهد و علاوه بر یافتن حل نقاط گوشه‌یی، توانایی تولید جواب‌های کارای غیرحدی را نیز دارد. همچنین در این روش نیازی به مقیاس‌بندی توابع هدف نیست. به این گونه که یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و بقیه‌ی توابع هدف به محدودیت‌های مسئله اضافه و به حل مسئله پرداخته می‌شود.[۲۹]

اگر بخواهیم یک مدل دوهدفه‌ی کمینه‌سازی را به روش محدودیت اپسیلون حل کنیم و تابع هدف اول را به عنوان تابع هدف اصلی در نظر بگیریم، رابطه‌ی آن به صورت زیر خواهد بود:

$$MIN \quad f_1(x)$$
$$f_2(x) \leq \varepsilon$$

گام‌های روش محدودیت اپسیلون به شرح زیر است:

۱. یکی از توابع هدف را به عنوان تابع هدف اصلی در نظر می‌گیریم.

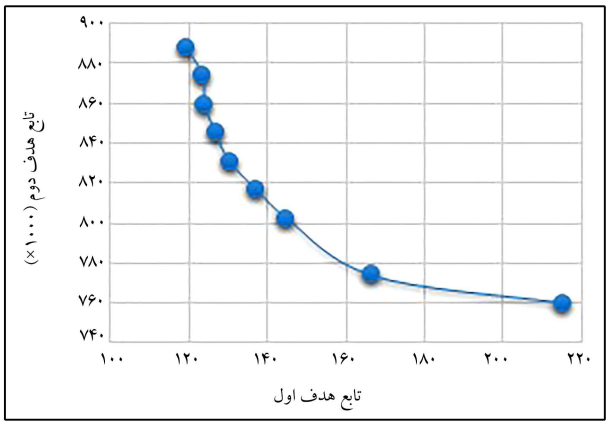
۲. هر بار یکی از توابع هدف را انتخاب می‌کنیم و مسئله را با توجه به تابع هدف منتخب حل می‌کنیم، مقدار بهینه‌ی هر تابع هدف را به دست می‌آوریم.

۳. بازه‌ی بین دو مقدار بهینه‌ی توابع هدف فرعی را به تعدادی که از قبل مشخص کرده‌ایم، تقسیم‌بندی می‌کنیم و جدول مقادیر برای ε تشکیل می‌دهیم.

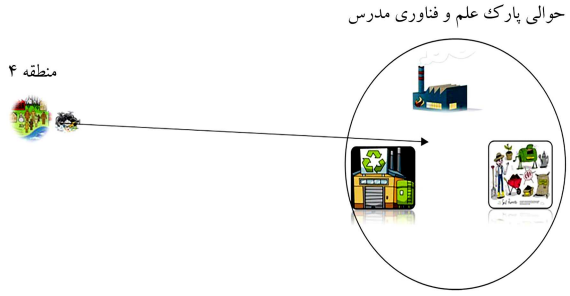
۴. هر بار مسئله را با تابع هدف اصلی و با هر یک از مقادیر ε حل می‌کنیم و جواب‌های پارتویی به دست آمده را گزارش می‌کنیم.

در این مقاله، با استفاده از روش محدودیت اپسیلون، تابع هدف اول را تابع هدف اصلی در نظرگرفته شده است؛ سپس تعداد ۱۰ شکست برای هر هدف در نظرگرفته شده و پس از پیاده‌سازی روش محدودیت اپسیلون در نرم افزار GAMS، نتایج در جدول ۴ و شکل ۴ نشان داده شده است.

با بررسی نمودار مرز پارتویی در شکل ۴، می‌توان مشاهده کرد که این نمودار، به خوبی تعارض بین اهداف را نمایش می‌دهد و بیانگر این است که هر چقدر هزینه‌ی بیشتری برای استقرار تسهیلات دفع زباله (مراکز بازیافت، پوسال، زباله‌سوز و دفن بهداشتی) در نظرگرفته شود، از انتشار گازهای گلخانه‌یی کاسته می‌شود.



شکل ۴. مرز پارتویی.



شکل ۵. نحوه‌ی تخصیص زباله‌های منطقه‌ی ۴ به منطقه‌ی پارک علم‌وفنّاوری مدرس.

۶. نتایج حل

به ازای دومین تکرار از حل اپسیلون، نحوه‌ی تخصیص زباله‌ها به ایستگاه‌های انتقال و همچنین تسهیلات دفع زباله به شرح زیر است:

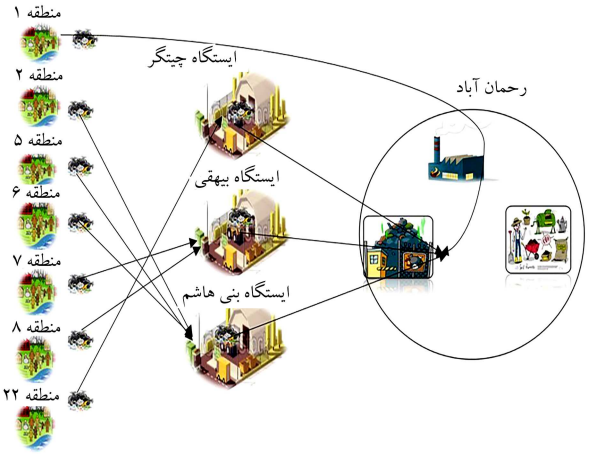
مکان‌های کاندیدا رحمان‌آباد، بیهقی، مرادآباد و حوزه‌ی پارک علم‌وفنّاوری مدرس فعال شدند. در ایستگاه رحمان‌آباد، تسهیلات دفن بهداشتی، مرکز پوسال و زباله‌سوز احداث شد. در ایستگاه بیهقی هر چهار تسهیل و در ایستگاه مرادآباد تسهیلات دفن بهداشتی و مرکز بازیافت احداث شد. در ایستگاه پارک علم‌وفنّاوری مدرس نیز سه تسهیل مرکز بازیافت، مرکز پوسال، و زباله‌سوز احداث شدند.

زباله‌های منطقه‌ی ۴ به طور مستقیم به محل کاندیدا حوالی پارک علم‌وفنّاوری مدرس می‌روند. شکل ۵، نحوه‌ی تخصیص زباله‌های منطقه‌ی ۴ را به منطقه پارک علم‌وفنّاوری مدرس نشان می‌دهد.

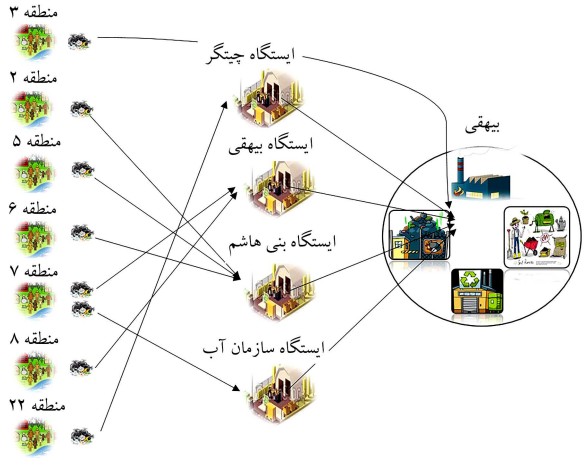
نحوه‌ی تخصیص زباله‌ها از مناطق تولیدکننده‌ی زباله به محل کاندیدا فعال شده‌ی رحمان‌آباد به شرح زیر است:

زباله‌های منطقه‌ی ۱ تهران به طور مستقیم به محل کاندیدا رحمان‌آباد هدایت می‌شوند. زباله‌های منطقه‌ی ۲۲، ابتدا به ایستگاه انتقال چیتگر و سپس به رحمان‌آباد می‌روند. زباله‌های مناطق ۷ و ۸، به ایستگاه انتقال بیهقی، زباله‌های مناطق ۵،۲ و ۶ به ایستگاه انتقال بنی‌هاشم می‌روند و سپس این زباله‌ها از این ایستگاه‌های انتقال به سمت رحمان‌آباد هدایت می‌شوند. شکل ۶، نحوه‌ی تخصیص زباله‌های مناطق ۸،۷،۶،۵،۲،۱ و ۲۲ را به منطقه‌ی رحمان‌آباد نشان می‌دهد.

نحوه‌ی تخصیص زباله‌ها از مناطق تولیدکننده‌ی زباله به محل‌های کاندیدا فعال شده‌ی بیهقی به شرح زیر است:



شکل ۶. نحوه‌ی تخصیص زباله‌های مناطق ۱، ۲، ۵، ۶، ۷ و ۸ به منطقه‌ی رحمان آباد.



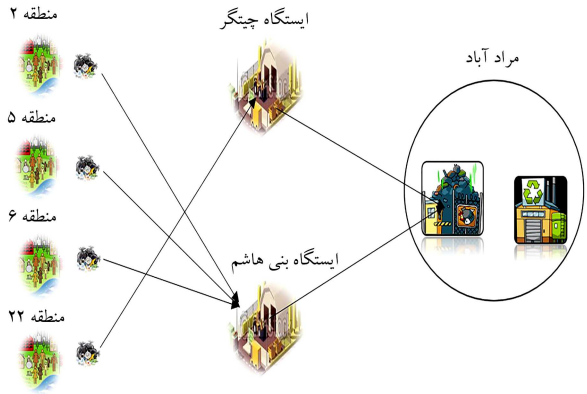
شکل ۷. نحوه‌ی تخصیص زباله‌های مناطق ۲، ۳، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۲۲ به منطقه‌ی بیهقی.

زباله‌های منطقه‌ی ۳ تهران، به طور مستقیم به محل کاندیدا بیهقی هدایت می‌شوند. زباله‌های منطقه‌ی ۲۲ ابتدا به ایستگاه انتقال چیتگر و سپس به بیهقی می‌روند. زباله‌های مناطق ۷ و ۸ به ایستگاه انتقال بیهقی، زباله‌های مناطق ۲، ۵ و ۶ به ایستگاه انتقال بنی‌هاشم و همچنین مقداری از زباله‌های منطقه‌ی ۷ نیز به ایستگاه انتقال سازمان آب حمل می‌شوند و سپس این زباله‌ها از این ایستگاه‌های انتقال به سمت محل کاندیدا بیهقی هدایت می‌شوند. شکل ۷، نحوه‌ی تخصیص زباله‌های مناطق ۲، ۳، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۲۲ را به منطقه‌ی بیهقی نشان می‌دهد.

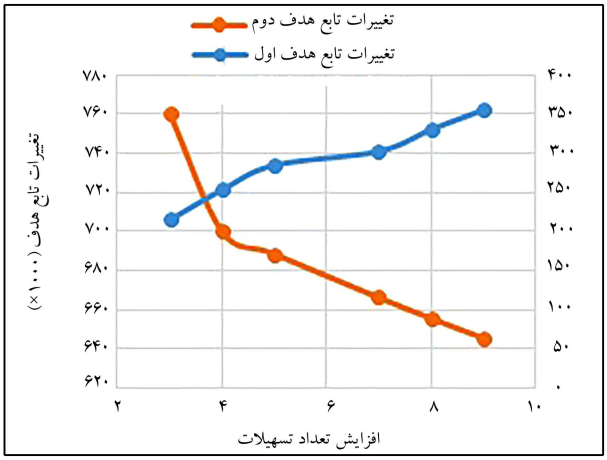
نحوه‌ی تخصیص زباله‌ها از مناطق تولیدکننده زباله به محل‌های کاندیدا فعال شده‌ی مرادآباد به شرح زیر است:

زباله‌های مناطق ۲، ۵ و ۶ به ایستگاه انتقال بنی‌هاشم و زباله‌های منطقه‌ی ۲۲ به ایستگاه چیتگر انتقال می‌یابند و سپس به محل کاندیدا مرادآباد منتقل می‌شوند. شکل ۸، نحوه‌ی تخصیص زباله‌های مناطق ۲، ۵، ۶ و ۲۲ را به منطقه‌ی مرادآباد نشان می‌دهد.

همان طور که در شکل ۹، مشاهده می‌شود هر چه‌قدر تعداد تسهیلات دفع زباله را افزایش می‌دهیم، هزینه‌ها افزایش خواهد یافت؛ اما به دلیل این که با افزایش تعداد تسهیلات، تعداد بیشتری مراکز بازیافت و پوسال که آلودگی کمتری نسبت به



شکل ۸. تخصیص زباله‌های مناطق ۲، ۵، ۶ و ۲۲ به منطقه‌ی مرادآباد.



شکل ۹. نمودار تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به افزایش تعداد تسهیلات.

زباله‌سوز دارند، فعال می‌شوند و زباله‌های بیشتری را در خود جای می‌دهند، پس میزان کل آلودگی‌ها کاهش پیدا می‌کند.

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای مطالعات آتی

در حال حاضر برای مدیریت مواد زاید جامد شهری، قسمت عمده‌ی منابع مالی و انسانی صرف جمع‌آوری و حمل‌ونقل می‌شود و در زمینه‌های تولید، ذخیره در محل، بازیافت و دفع، کار قابل‌توجهی صورت نمی‌گیرد. همان اندازه که جمع‌آوری و حمل‌ونقل مناسب در سامانه‌ی دفع مواد زاید جامد شهری مهم است، لزوم بهره‌برداری بهینه از زباله‌ها، تولید انرژی از آنها و روش‌های کارا برای دفع زباله نیز از اهمیت خاصی برخوردار است و لزوم توجه به استفاده‌ی بهینه از این طلای کثیف به منظور کمینه کردن انتشار آلودگی بسیار احساس می‌شود. مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات و مسائل مالی مرتبط با آن، تأثیر قابل توجهی بر ساختار زنجیره‌ی تأمین دارد.[۳۰] بیشتر مسائل مکان‌یابی، با در نظرگرفتن این پیش‌فرض بوده‌اند که فقط یک نوع تسهیل قرار است مکان‌یابی شود، در صورتی که در بیشتر مواقع مدیران قصد مکان‌یابی تسهیلات مختلفی را دارند که به یک یا چند طریق با هم مرتبط هستند.[۳۱] به همین منظور، در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای مکان‌یابی تسهیلات دفع زباله (مراکز بازیافت، پوسال، زباله‌سوز و دفن بهداشتی) و تخصیص پسماند جامد شهری پیشنهاد شد. اهداف مدل پیشنهادی،

کمینه‌سازی هزینه‌های ناشی از مدیریت زباله‌ها و همچنین آلودگی‌های حاصل از حمل و دفع زباله‌ها در نظرگرفته شدند. همچنین برای نزدیک‌ترکردن مسئله به دنیای واقعی، محدودیت تعداد و ظرفیت برای ایستگاه‌های انتقال و تسهیلات دفع زباله لحاظ شد و انواع محصولات حاصل از بازیافت زباله و انتقال آنها به نواحی فروش این محصولات مد نظر قرارگرفتند. سپس برای سنجش کارایی مدل، مناطق ۱ تا ۸ و منطقه‌ی ۲۲ تهران، به عنوان مطالعه موردی، بررسی شدند و پس از اجرای مدل، نتایج و تحلیل حساسیت‌های مربوط گزارش شدند.

با توجه به مصاحبه‌هایی که در زمینه‌ی نتایج حاصل از این مقاله با خبرگان شهرداری تهران و سازمان مدیریت پسماند انجام شد، افراد صاحب‌نظر و مدیران مربوط نیز با موارد پیشنهادی موافق هستند. در واقع می‌توان گفت صحه‌گذاری و اعتبارسنجی این مقاله با نظر لایه‌ی مدیریتی سازمان پسماند صورت پذیرفته است؛ اما مسئولان و کارشناسان ذیربط مواردی را برای بهبود پیشنهاد کرده‌اند که در قسمت پیشنهادها بیان شده است.

در حال حاضر، تنها مرکز فعال برای مدیریت پسماند جامد شهری در کهریزک واقع شده است. اما با توجه به نیاز به احداث مراکز در شمال شهر می‌توان این پروژه را به مرحله‌ی اجرا درآورد. نتایج از نظر اقتصادی، زیست‌محیطی و سایر ملاحظات بلامانع‌اند و کمک شایانی در این زمینه به شهر تهران خواهد کرد.

برای نزدیک‌ترکردن مدل به دنیای واقعی، پیشنهادهایی ارائه می‌شود از جمله:

۱. در نظرگرفتن سیستم GIS برای مکان‌یابی تسهیلات دفع زباله؛

۲. مکان‌یابی حوضچه‌های تصفیه‌ی شیرابه؛

۳. در نظرگرفتن فنّاوری‌های متفاوت برای حمل زباله‌ها؛

۴. غیرقطعی در نظرگرفتن مسئله.

منابع (References)

1. Salehi, M. and et al. "Meffect of SEfactors on household waste management using systemdynamics approach: TCof T", *Sharif Journal of Industrial Engineering & Management*, **1.33**(1.2), pp. 147-159 (2018). (In Persian)
2. Abedi-Varaki, M. and Davtalab, M. "Site selection for installing plasma incinerator reactor using the GIS in Rudsar county, Iran", *Environmental monitoring and assessment*, **188**(6), pp. 1-16 (2016).
3. Zare Mehrjerdi, Z. and Faregh, F. "UStochastic linear fractional programming for waste management (Cstudy: Ycity)", *Sharif Journal of Industrial Engineering & Management*, **1.33**(2.1), pp. 3-12 (2017). (In Persian)
4. Eiselt, H.A. and V. "Marianov, location modeling for municipal solid waste facilities", *Computers & Operations Research*, **62**, pp. 305-315 (2015).
5. Ye, L., Ye, C. and Chuang, Y.-F. "Location set covering for waste resource recycling centers in Taiwan", *Resources, Conservation and Recycling*, **55**(11), pp. 979-985 (2011).
6. Shi, Q. and et al. "Site selection of construction waste recycling plant", *Journal of Cleaner Production*, **227**, pp. 1-34 (2019).
7. Yu, H. and Solvang, W.D. "A multi-objective location-allocation optimization for sustainable management of municipal solid waste", *Environment Systems and Decisions*, **37**(3), pp. 289-308 (2017).
8. Habibi, F. and et al. "A multi-objective robust optimization model for site-selection and capacity allocation of municipal solid waste facilities: A case study in Tehran", *Journal of Cleaner Production*, **166**, pp. 816-834 (2017).
9. Asefi, H. and et al. "Mathematical modelling and heuristic approaches to the location-routing problem of a cost-effective integrated solid waste management", *Annals of Operations Research*, **273**(1-2), pp. 110-75 (2019).
10. Yadav, V. and et al. "A facility location model for municipal solid waste management system under uncertain environment", *Science of The Total Environment*, **603**, pp. 760-771(2017).
11. Wu, J. and et al. "Municipal solid waste management and greenhouse gas emission control through an inexact optimization model under interval and random uncertainties", *Engineering Optimization*, **50**(11), pp. 1963-1977 (2018).
12. Su, J. and et al. "Long-term panning of waste diversion under interval and probabilistic uncertainties", *Resources, Conservation and Recycling*, **54**(7), pp. 461-449 (2010).
13. Rabbani, M. and et al. "Using metaheuristic algorithms to solve a multi-objective industrial hazardous waste location-routing problem considering incompatible waste types", *Journal of Cleaner Production*, **170**, pp. 241-227 (2018).
14. Xi, B. and et al. "An integrated optimization approach and multi-criteria decision analysis for supporting the waste-management system of the City of Beijing, China", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **23**(4), pp. 631-620 (2010).
15. Minoglou, M. and Komilis, D. "Optimizing the treatment and disposal of municipal solid wastes using mathematical programming—a case study in a Greek region", *Resources, Conservation and Recycling*, **80**, pp. 57-46 (2013).
16. Tan, S.T. and et al. "Optimal process network for municipal solid waste management in Iskandar Malaysia", *Journal of Cleaner Production*, **71**, pp. 58-48 (2014).
17. Yadav, V. and et al. "A facility location model for MSW management systems under uncertainty: a case study of nashik city, India", *Procedia Environmental Sciences*, **35**, pp. 90-100 (2016).
18. Lee, C. and et al. "A mathematical model for municipal solid waste management–A case study in Hong Kong", *Waste management*, **58**, pp. 430-441 (2016).

19. Hu, C., Liu, X. Lu, J. "A bi-objective two-stage robust location model for waste-to-energy facilities under uncertainty", *Decision Support Systems*, **99**, pp. 37-50 (2017).

20. Mirdar Harijani, A., Mansour, S. and Karimi, B. "Multi-objective model for sustainable recycling of municipal solid waste", *Waste Management & Research*, **35**(4), pp. 387-399 (2017).

21. Lyeme, H.A., Mushi, A. and Nkansah-Gyekye, Y. "Multi-objective optimization model formulation for solid waste management in Dar es Salaam, Tanzania", *Asian Journal of Mathematics and Applications*, **2017**, pp. 15-1 (2017).

22. Azadeh, A., Ahmadzadeh, K. and Eslami, H. "Location optimization of municipal solid waste considering health, safety, environmental, and economic factors", *Journal of Environmental Planning and Management*, **62**(7), pp. 1-21 (2018).

23. Anwar, S. and et al., "Optimization of solid waste management in rural villages of developing countries", *Clean Technologies and Environmental Policy*, **20**(3), pp. 502-489 (2018).

24. Mohammadi, M.,Jämsä-Jounela, S.-L. and Harjunkoski, I. "Optimal planning of municipal solid waste management systems in an integrated supply chain network", *Computers & Chemical Engineering*, **123**, pp. 169-155 (2019).

25. http://atlas.tehran.ir/Default.aspx?tabid=132

26. Mavrotas, G. and et al. "A multi-objective programming model for assessment the GHG emissions in MSW management", *Waste Management*, **33**(9), pp. 1934-1949 (2013).

27. Ramos, T.R.P., Gomes, M.I. and Barbosa-Póvoa, A.P. Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns", *Omega*, **48**, pp 74-60.(2014).

28. Heidari, R., Yazdanparast, P. and Jabbarzadeh, A. "Sustainable design of a municipal solid waste management system considering waste separators: A real-world application", *Sustainable Cities and Society*, **47**, pp. 1-47 (2019).

29. Ehrgott, M. and Gandibleux, X. "Multiobjective combinatorial optimization—theory, methodology, and applications, in Multiple criteria optimization: State of the art annotated bibliographic surveys", Springer. pp. 369-444 (2003).

30. Nobil, A.H., Jalali, S. and Niaki, S.T.A. "Financially embedded facility location decisions on designing a supply chain structure: A case study", *Systems Engineering*, **21**(6), pp. 533-520 (2018).

31. Adibnia, M. and Pasandideh, S."Modeling a hierarchical facility location-allocation problem with queuing system and solving it using meta-heuristic algorithms", *Sharif Journal of Industrial Engineering & Management*, **35**(1), pp.31-41 (In Persian) (2020)