مقاله پژوهشی

مدل بهینه‌سازی استوار برای مکان‌یابی محل دفن زباله‌های شهری

محمدمهدی نصیری [1*]، سمانه کرلو [2]

دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸

چکیده

یکی از مسائلی که جوامع شهری با آن روبه‌رو هستند مدیریت زباله است. در این مقاله، مکان‌های دفن زباله‌ها، ظرفیت این مکان‌ها، مکان ایستگاه‌های انتقال، ظرفیت آن‌ها و مکان محل‌های بازیافت زباله را به‌گونه‌ای تعیین می‌کنیم که کل هزینه (شامل هزینه‌های احداث مراکز، حمل‌ونقل زباله از محل تولید تا محل پالایش، دفن و بازیافت) حداقل شود. هم‌چنین، برای رعایت محدودیت‌های زیست‌محیطی با تعریف کردن حداکثر مجاز آلودگی برای هر مرکز جمعیت، میزان آلودگی را کنترل می‌کنیم. در این پژوهش، مسئله به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته فرمول‌بندی شده است. سپس ظرفیت محل دفن و ظرفیت محل پالایش غیرقطعی در نظر گرفته‌شده و مدل به‌صورت بهینه‌سازی استوار توسعه‌یافته است. همچنین برای اعتبارسنجی مدل، یک مسئله نمونه حل‌شده و نتایج محاسباتی به ازای سطوح متفاوتی از محافظه‌کاری ارائه گردیده است. تصمیم‌گیرنده می‌تواند از این نتایج برای انتخاب سطح محافظه‌کاری مناسب استفاده نماید.

واژه‌های کلیدی: مدیریت زباله شهری، مکان‌یابی محل دفن زباله، بهینه‌سازی استوار، برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته

۱- مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت شهرها، دفع زباله با در نظر گرفتن ملاحظات بهداشتی، به یکی از معضلات جوامع شهری تبدیل‌شده است. متداول‌ترین روش دفع زباله‌ها، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین آلاینده‌های محیط‌زیست، دفن بهداشتی آن می‌باشد که عبارت است از انتقال مواد زائد جامد به محل از قبل تعیین‌شده و دفن آن‌ها در دل خاک به‌نحوی‌که به محیط‌زیست آسیبی وارد نشود [۱]. به‌عنوان اولین قدم برای مدیریت پسماند، شناخت روش‌های دفع زباله بسیار مهم است. روش‌های دفع زباله شامل دفن زباله، سوزاندن، بازیافت و کمپوست می‌باشد. عوامل زیادی در انتخاب روش دفع زباله ازجمله سطح فناوری، توسعه جامعه، موقعیت جغرافیایی، زمین موردنیاز و جمعیت جامعه موردمطالعه تأثیر دارد. در بین روش‌های دفع زباله، دفن زباله اساسی‌ترین روش دفع زباله در کشورهای مختلف بوده است و هنوز هم حتی در کشورهای توسعه‌یافته مورداستفاده قرار می‌گیرد [۲].

موضوع موردبررسی این مقاله، زباله‌ی شهری است؛ یعنی زباله تولیدشده در خانه‌ها، مؤسسات تجاری و کسب‌وکار که شامل کاغذ باطله، باقی‌مانده مواد غذایی، قوطی‌ها. بطری‌های دور ریخته شده، خاک باغچه‌ها و ... است. زباله فرآیندهای صنعتی، ضایعات کشاورزی، زباله‌های معدنی و فاضلاب‌ها جزء زباله شهری محسوب نمی‌شوند. دفن بهداشتی زباله‌های شهری به حوزه‌ی کاری مدیریت پسماند شهری مربوط می‌شود و در حال تبدیل‌شدن به یک امر مهم و پیچیده اجتماعی، اقتصادی و سیاسی در ارتباط با شهرداری‌هاست [۳, ۴]. اهمیت اجتماعی این موضوع، به

۱*- دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران پست الکترونیکی:mmnasiri@ut.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

پست الکترونیکی:s.korlou@ut.ac.ir

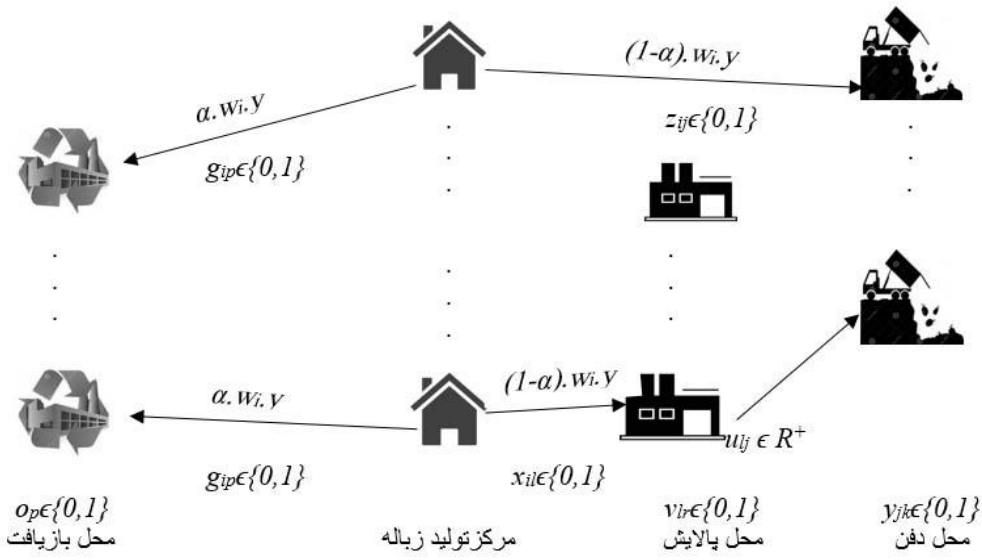
علت افزایش نگرانی عمومی در رابطه با حفظ محیط‌زیست می‌باشد و اهمیت اقتصادی آن در رابطه با حجم عظیمی از منابع است که برای مدیریت پسماند شهری موردنیاز است[۵]. مدیریت پسماند شهری شامل فعالیت‌های گوناگونی است که می‌تواند به چهار مرحله تقسیم شود: (۱) تولید زباله، (۲) جمع‌آوری زباله، (۳) انتقال زباله و (۴) دفع زباله [۴]. مراحل مدیریت پسماند شهری را در اغلب پژوهش‌ها به‌صورت شکل (۱) نشان داده‌اند. شهروندان زباله تولید می‌کنند، درصدی از زباله تولیدشده در محل تولید تفکیک‌شده و با توجه به هزینه به محل‌های بازیافت منتقل می‌شوند. در مورد بخش تفکیک نشده با توجه به هزینه‌ها تصمیم‌گیری می‌شود که آیا به‌طور مستقیم به محل دفن و یا به ایستگاه فشرده‌سازی منتقل شود. سپس زباله‌های منتقل‌شده به مراکز فشرده‌سازی یا همان پالایش زباله، پس از تغییر به محل‌های دفن منتقل می‌شوند [۶].

با توجه به این‌که در چند دهه گذشته تعداد محل‌های دفن زباله کاهش پیداکرده، ظرفیت محل‌های دفن و فاصله آن‌ها از مناطق مسکونی افزایش‌یافته و مسیرهای حمل‌ونقل نیز طولانی‌تر شده است. این دلایل سبب شده تا به‌منظور کاهش اثرات ثانویه آلودگی مراکز پالایش زباله تأسیس گردند. در این مراکز، زباله‌ها فشرده و به‌صورت بهینه و کم‌خطر دوباره در کامیون‌های انتقال بارگذاری می‌شوند. در مسئله مکان‌یابی برای دفن زباله چالش‌های متناقض اجتماعی وجود دارد که باید به آن‌ها توجه کرد. به‌طور مثال، با توجه به اینکه مردم مالیات پرداخت می‌کنند، نمی‌خواهند با دور شدن محل دفن زباله‌ها از محل زندگی آن‌ها هزینه‌ها زیاد شود. از طرفی، چون علاقه‌ای به آثار آلودگی ندارند دوست دارند محل دفن زباله‌ها از محل زندگی آن‌ها دور باشد پس باید در انتخاب محل دفن به این دو موردتوجه کرد [۷].

پژوهش‌ها در مدیریت پسماند شهری، در چهار مرحله‌ی ذکرشده در بالا از سال ۱۹۷۰ شروع‌شده است. ازآنجاکه هدف این مقاله مکان‌یابی محل‌های دفن زباله است، در ادامه، به تعدادی از مطالعات انجام‌شده درزمینه مدیریت پسماند شهری به‌خصوص مرحله دفن اشاره می‌کنیم.

در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ اغلب مدل‌سازی‌ها مدل ریاضی معمولی ازجمله بهینه‌سازی عدد صحیح آمیخته تک هدفه بوده است. در اوایل دهه‌ی ۹۰ میلادی این رویکرد تغییر کرد و محققان و برنامه‌ریزان از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره ازجمله تحلیل سلسه‌مراتبی استفاده می‌کردند. سال‌های بعد، از بهینه‌سازی برداری که مهم‌ترین آن‌ها سیستم اطلاعات جغرافیایی بود استفاده شد. درنهایت امروزه بیشتر از برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن عدم قطعیت که راه مناسب‌تری برای ارزیابی و تجزیه‌وتحلیل است برای مدل‌سازی استفاده می‌شود [۶].

در سال ۱۹۷۰ محققان متوجه شدند که همه‌ی تسهیلات مناسب مشتری نیستند برخی از این تسهیلات برای مشتری‌ها مضر بوده و باید از آن‌ها دور باشند [۸]. در پژوهش‌های انجام‌شده توسط مقاله [۹] مقدمه‌ای از مفهوم مکان‌یابی تسهیلات مضر معرفی‌شده است. بررسی‌های بعدی نشان داد که هیچ‌یک از تسهیلات به‌طور کامل نامطلوب یا مطلوب نیستند برای مثال یک سوپرمارکت برای افرادی که در نزدیکی آن زندگی می‌کنند مفید است اما برای آن‌ها که در نزدیکی آن نیستند هنگام اقدام افراد برای خرید سبب انواع آلودگی‌ها می‌شود نتیجه این پژوهش‌ها این بود که همه‌ی تسهیلات مضر شبیه هم نیستند و از لفظ تسهیلات ناخوش آیند استفاده کردند به‌عنوان‌مثال یک نیروگاه هسته‌ای و یک محل بارگیری کامیون جز تسهیلات ناخوش آیند هستند اکثر مردم نمی‌خواهند این تسهیلات نزدیک محل زندگی آن‌ها باشند اما می‌دانیم این دو ازنظر ریسک (خطر) ناشی از آن‌ها با یکدیگر متفاوت‌اند.



شکل (۱) مسیر انتقال زباله از مبدأ تا مقصد

در پژوهشی دیگر، تصمیم‌گیرندگان، مکان سطل‌های زباله‌ی تفکیک نشده در یک شهر مسکونی و هم‌چنین ظرفیت سطل‌های جمع‌آوری زباله را تعیین می‌کنند؛ برای این مسئله، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح پیشنهادشده است. شهروندان زباله‌های خود را به یک مکان تعیین‌شده می‌برند و نزدیک درب منازل نمی‌گذارند. این مقاله در حوزه مدیریت پسماند شهری مربوط به مرحله جمع‌آوری است. برای حل، یک روش ابتکاری دومرحله‌ای پیشنهادشده است که مدت‌زمان حل را به‌شدت کاهش می‌دهد و سبب کاهش ۷۳ درصدی سطل‌های زباله شده است. نتایج نشان می‌دهد هر دو روش دقیق و ابتکاری پیشنهادی بهتر از روش در حال اجراست و سبب کاهش محل‌های جمع‌آوری زباله و تعداد کمتر سطل شده است [۱۰]. همچنین، در پژوهشی دیگر مسائل اصلی در مکان‌یابی تسهیلات موجود در مدیریت مواد زائد جامد شهری بررسی‌شده است. سپس کلاس‌های مختلفی از مدل تصمیم‌گیری مطرح می‌شود و یک مدل عمومی به‌منظور حداقل کردن هزینه‌ها فرمول‌بندی می‌شود. در این مقاله چند مدل تصمیم‌گیری چند معیاره برای تعیین مکان‌های محل دفع زباله موردبررسی قرارگرفته شده است [۶]. در مقاله‌ای دیگر محققان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته برای مدیریت مواد زائد شهری برای یکی از شهرهای مصر ارائه داده‌اند. هدف مدل پیشنهادی آن‌ها کمینه کردن هزینه‌های مدیریت زباله‌های شهری از طریق انتخاب بهترین مکان جمع‌آوری زباله از میان نقاط کاندید است [۱۱]. درزمینه‌ی مدل‌های چندهدفه نیز در پژوهشی، محققان برای حل مسئله تخصیص-مکان‌یابی تسهیلات مربوط به مدیریت مواد زائد شهری در کشور یونان یک مدل چندهدفه عدد صحیح مختلط ارائه داده‌اند [۱۲].

در ادامه یک بررسی جامع در مورد مقالات چند سال اخیر در حوزه مدیریت پسماند شهری ارائه‌شده است پژوهش‌هایی که در ادامه به آن‌ها می‌پردازیم غالباً با استفاده از مدل‌سازی ریاضی یا روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با مسئله مدیریت پسماند شهری برخورد کرده‌اند. مدل‌های ریاضی در مقالات موردبررسی، شامل تعیین موقعیت مکانی مراکز دفن، بازیافت، ایستگاه‌های پالایش زباله، مراکز جمع‌آوری اولیه و مسیریابی وسایل نقلیه برای جمع‌آوری زباله است.

در برخی پژوهش‌ها با استفاده از انواع روش‌های ترکیبی مانند تصمیم‌گیری چند معیاره همراه سیستم اطلاعات جغرافیایی یا مدل‌سازی ریاضی اقدام به تصمیم‌گیری در رابطه با راه‌اندازی تسهیلات مرتبط با مدیریت پسماند شهری می‌کنند [۱۳-۱۷]. در این پژوهش‌ها ابتدا داده‌های موجود در یک سیستم اطلاعات جغرافیایی سازماندهی و نقشه‌برداری شده، سپس با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره نقاط بالقوه برای تأسیس ایستگاه‌های پالایش زباله یا محل دفن تعیین می‌شوند [۱۳-۱۵]. همچنین، دو مقاله با استفاده از یک مدل یکپارچه سیستم اطلاعات جغرافیایی همراه با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و مدل‌سازی ریاضی شبکه

حمل‌ونقل زباله جامد شهری را بهینه کرده‌اند [۱۶, ۱۷]. علاوه‌براین، برخی از پژوهش‌ها با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب محل مناسب برای تسهیلات دفن پسماند شهری در محیطی غیرقطعی انجام‌شده است[۱۴, ۱۸]. برای حل مدل، از رویکرد فازی تعاملی استفاده‌شده است. با توجه به پژوهش‌های چند سال اخیر متوجه می‌شویم پژوهش‌هایی که از مدل‌سازی ریاضی در مدیریت پسماند شهری استفاده کرده‌اند اغلب به دنبال یافتن بهترین مکان برای تسهیلات مرتبط با مدیریت پسماند شهری بوده‌اند. برای مثال، در مدل پیشنهادی توسط جبارزاده و همکاران [۱۹]، مکان مناسب برای پالایش زباله در شهر تهران باهدف کاهش هزینه‌های راه‌اندازی و کاهش آثار مخرب زیست‌محیطی مرتبط با پسماند شهری تعیین می‌شود. برای حل مدل از رویکرد فازی تعاملی استفاده‌شده است. در پژوهش انجام‌شده توسط ویدویچ و همکاران [۲۰]، مکان مناسب برای تأسیس پالایش زباله در کشور صربستان با استفاده از مدل‌سازی ریاضی به دست می‌آید. ازجمله پژوهش‌های مشابه می‌توان به مدل ریاضی پیشنهادی برای تعیین مکان پالایش زباله باهدف کاهش هزینه‌ها، به کار تحقیقاتی [۲۱] که با استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری جواب بهینه را تعیین کرده‌اند اشاره کرد. در پژوهشی دیگر یک مدل ریاضی در راستای به حداقل رساندن هزینه‌های ایجاد تأسیسات دفن زباله و پالایش آن و حداقل کردن آثار آلودگی محیط فازی موردبررسی قرارگرفته است. از پژوهش‌های دیگری که در راستای تعیین بهترین مکان برای پالایش در محیط غیرقطعی باهدف کاهش هزینه‌های راه‌اندازی یا کاهش آثار مخرب زیست‌محیطی یا اجتماعی انجام‌شده است می‌توان به پژوهش‌های [۲۲-۲۷] اشاره کرد.

در پژوهش [۲۶]، همزمان با تعیین بهترین مکان دفن،پالایش و بازیافت زباله و انتخاب بهترین فناوری و ظرفیت مورداستفاده در این تسهیلات هزینه‌های تأسیس آثار مخرب زیست‌محیطی و تبعات اجتماعی در محیطی غیرقطعی انجام‌شده است نحوه برخورد با عدم قطعیت در این مسئله استفاده از روش بهینه‌سازی استوار سناریو محور می‌باشد. در پژوهش انجام‌شده توسط وانگ و همکاران [۲۸]، از مدل ارزیابی خطرات بهداشتی محیط‌زیست مرتبط با آلودگی آب زیرزمینی بر اساس روش ارزیابی ریسک سلامت آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات‌متحده در محیطی فازی استفاده‌شده است تا بهترین مکان از میان دو مکان برای دفن زباله در شمال غربی کشور چین تعیین شود. از دیگر پژوهش‌ها که محیطی قطعی باهدف کاهش هزینه‌های تأسیس تسهیلات مرتبط با مدیریت پسماند شهری و کاهش آثار مخرب زیست‌محیطی مرتبط با دفن و حمل زباله انجام‌شده است می‌توان به پژوهش‌های[۲۹-۳۱] اشاره کرد. با بررسی مقالات مذکور می‌توان مشاهده کرد اکثر مقالات سال‌های اخیر برای یک منطقه واقعی انجام‌شده‌اند ولی برخی مانند پژوهش‌های[۲۵, ۳۲] در محیطی شبیه‌سازی‌شده بررسی‌شده‌اند. همین‌طور می‌توان مشاهده کرد برخی پژوهش‌ها موضوع تفکیک زباله یا انواع زباله در مدل خود جای‌داده‌اند . هم‌چنین کمتر مقاله‌ای به‌طور اختصاصی به موضوع مسیریابی [۳۲] برای جمع‌آوری زباله پرداخته است.

پژوهش‌های منتشرشده در رابطه با مدیریت پسماند شهری در سال‌های اخیر همراه با مفروضات و محدودیت‌های در نظر گرفته‌شده در جدول (۱) خلاصه‌شده است.

جدول (۱) پژوهش‌های منتشرشده در رابطه با مدیریت پسماند شهری

	سال	۲۰۱۶	۲۰۱۸	۲۰۱۸	۲۰۱۸	۲۰۱۷	۲۰۲۰	۲۰۱۹	۲۰۱۹	۲۰۱۶	۲۰۲۰	۲۰۱۷	۲۰۱۹	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۱۷	
	نویسنده	[19]	[16]	[20]	[21]	[27]	[22]	[17]	[18]	[13]	[14]	[32]	[25]	[15]	[28]	[29]	[23]	[30]	[24]	[31]	[26]	تحقیق حاضر
متغیرها یا محدودیت‌های در نظر گرفته‌شده	مکان‌یابی محل دفن		•		•	•			•		•			•	•	•					•	•
	مکان یابی محل بازیافت																			•	•	•
	مکان یابی محل پالایش یا جمع‌آوری	•		•	•	•	•	•		•			•				•	•	•	•	•	•
	ظرفیت محل دفن																					•
	ظرفیت محل پالایش			•															•			•
	ظرفیت محل بازیافت																					
	فناوری پالایش زباله	•															•			•	•	
	نوع زباله یا تفکیک آن					•	•	•				•								•		
	مکان‌یابی سطل زباله											•										
	تعداد و نوع وسائل حمل‌ونقل	•															•	•		•	•	
	حجم زباله حمل شده	•				•	•	•									•					•

سال		۲۰۱۶	۲۰۱۸	۲۰۱۸	۲۰۱۸	۲۰۱۷	۲۰۲۰	۲۰۱۹	۲۰۱۹	۲۰۱۶	۲۰۲۰	۲۰۱۹	۲۰۱۷	۲۰۱۹	۲۰۱۸	۲۰۱۸	۲۰۱۷	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۱۷	
نویسنده		[19]	[16]	[20]	[21]	[27]	[22]	[17]	[18]	[13]	[14]	[32]	[25]	[15]	[28]	[29]	[23]	[30]	[24]	[31]	[26]	تحقیق حاضر
	مسیریابی											•						•				
	مطالعه موردی	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•	•	•	•		•	•	•	
مدل ریاضی	خطی	•		•	•	•	•	•				•	•			•	•	•	•	•	•	•
	غیرخطی		•																			
پارامتر	قطعی		•	•	•			•				•				•		•		•		
	غیرقطعی	•				•	•		•		•				•		•		•		•	•
اهداف یا معیارهای تصمیم‌گیری	اقتصادی	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•
	اجتماعی		•						•	•	•			•							•	
	زیست‌محیطی و انرژی	•	•			•	•		•	•	•			•	•	•	•	•		•	•	•
عدم قطعیت	فازی	•				•			•		•		•		•		•					
	رباست						•														•	•
	احتمالی																		•			
روش حل	هیوریستیک یا متاهیوریستیک				•							•						•				
	سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)							•		•	•			•								
	روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره		•						•	•	•			•								
	حل دقیق			•		•	•	•								•	•		•	•	•	•

با بررسی این مقالات می‌توان مشاهده کرد مقاله‌ای که همزمان مکان‌یابی محل دفن، محل پالایش، محل بازیافت همراه با تصمیم‌گیری در رابطه با ظرفیت تأسیس این تسهیلات با در نظر گرفتن آثار مخرب زیست‌محیطی در شرایطی که محیط مطالعه غیرقطعی باشد و از روش بهینه‌سازی استوار برتسیماس و سیم [۳۳] استفاده شود وجود ندارد.

برای داشتن مسئله‌ای کاراتر و نزدیک‌تر به دنیای واقعی، در نظر گرفتن عدم قطعیت نیز به‌عنوان عنصری کلیدی موردتوجه است.

عدم قطعیت به‌طور سنتی، در مسئله مکان‌یابی، به‌وسیله ایجاد یک برنامه تصادفی مبتنی بر سناریو به‌کارگیری شده است. عدم قطعیت را می‌توان در تقاضا، زمان، ظرفیت و ... در نظر گرفت. یکی از رویکردهایی که در سال‌های اخیر برای مقابله با عدم قطعیت داده‌ها بسط داده‌شده، بهینه‌سازی استوار است که در آن عدم قطعیت حالت احتمالی ندارد، بلکه در یک مجموعه تعریف می‌شود. در این نوع بهینه‌سازی، تصمیم‌گیرنده آن رویکردی را انتخاب می‌کند که در هر حالتی از فضای عدم قطعیت که اتفاق بیفتد، جواب نهایی حاصل از روش، شدنی باقی بماند؛ رویکرد ما در مقاله حاضر نیز بهینه‌سازی استوار است.

در این مقاله، با استفاده از مدل‌سازی ریاضی به دنبال تعیین محل مناسب دفن، پالایش زباله و محل بازیافت هستیم به‌طوری‌که تمرکز اصلی دفن زباله است تا بازیافت آن. برای نزدیک شدن به واقعیت، درصدی از زباله‌های تولیدی را به‌عنوان زباله‌های قابل بازیافت از زباله‌هایی که قرار است دفن شوند، جدا می‌کنیم. در این پژوهش هم چندین ظرفیت محل‌های دفن و ایستگاه‌های فشرده‌سازی را تعیین خواهیم کرد. با توجه به این‌که ظرفیت‌های برنامه‌ریزی‌شده برای تأسیس اسمی هستند این ظرفیت‌ها را غیرقطعی در نظر می‌گیریم تا جواب ما به واقعیت نزدیک باشد. در مدل ریاضی که در این مقاله ارائه خواهیم داد مسئله آلودگی مجاز برای انسان را نیز در نظرخواهیم گرفت. هدف ما حداقل کردن هزینه‌هایی است که مکان‌یابی محل دفن با آن‌ها روبه‌رو است. در ادامه، ابتدا به معرفی مختصر رویکرد بهینه‌سازی استوار برتسیماس و سیم و سپس به ارائه مدل قطعی و استوار می‌پردازیم. در آخر نتایج محاسباتی مربوطه را ارائه می‌دهیم.

۲- مدل استوار برتسیماس و سیم:

مسئله بهینه‌سازی عدد صحیح آمیخته را با در نظر گرفتن غیرقطعی بودن ضرایب محدودیت‌ها و سمت راست به‌صورت کلی در نظر می‌گیریم:

$$\max \sum_m c_m x_m + \sum_k d_k y_k$$

s.t.

$$\sum_m \tilde{a}_{im} x_m + \sum_k \tilde{b}_{ik} y_k \le \tilde{p}_i \qquad \forall i \qquad (۱)$$

بازه‌های عدم قطعیت به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

هرکدام از ضرایب محدودیت‌ها $a_{im}\ m \in N\{1,...,m\}$ (ضرایب متغیرهای پیوسته)، b_{ik} ، $k \in K\{1,...,k\}$ (ضرایب متغیرهای صحیح) و p_i (مقادیر سمت راست) به‌صورت یک متغیر تصادفی مستقل، با توزیع متقارن ولی ناشناخته مدل می‌شوند که به ترتیب در $[a_{im} - \hat{a}_{im}, a_{im} + \hat{a}_{im}]$، $[b_{ik} - \hat{b}_{ik}, b_{ik} + \hat{b}_{ik}]$ و $[p_i - \hat{p}_i, p_i + \hat{p}_i]$ مقدار می‌گیرند که $\hat{a}_{im}$ ، $\hat{b}_{ik}$ و $\hat{p}_i$ به ترتیب نشان‌دهنده انحراف از ضریب اسمی a_{im}، b_{ik} و p_i است که مقدار آن‌ها درصدی از مقادیر اسمی‌شان می‌باشد.

مدل استوار و همتای استوار به‌دست‌آمده توسط برتسیماس و سیم برای یک محدودیت به‌صورت زیر است:

$$\sum_m a_{im} x_m + \sum_k b_{ik} y_k + z_i \Gamma_i + \sum_{m \in M_i} w_{im} + \sum_{k \in K_i} w_{ik} + w_{i0} \le p_i$$

$$z_i + w_{im} \ge \hat{a}_{im} |x_m| \quad \forall m \in M_i$$
$$z_i + w_{ik} \ge \hat{b}_{ik} |y_k| \quad \forall k \in K_i$$
$$z_i + w_{i0} \ge \hat{p}_i \qquad (۲)$$

برای فرمول‌بندی همتای استوار مسئله Γ_i به این صورت تعریف می‌شود که در محدودیت iام مسئله؛ K_i را به‌صورت مجموعه ضرایب غیرقطعی متغیرهای صحیح در سطر i و M_i را به‌صورت مجموعه ضرایب غیرقطعی متغیرهای پیوسته در سطر i تعریف می‌شود. برای هر سطر پارامتر Γ_i که لزوماً عدد صحیح نیست را تعریف می‌کنیم که نقش Γ_iها در محدودیت‌ها تنظیم نمودن میزان استواری درروش پیشنهادی درواقع سطح محافظه‌کاری جواب است.

z_i ، w_{im} ، w_{ik} و w_{i0} متغیرهای کمکی در ارتباط با محدودیت، ضرایب متغیرهای صحیح و پیوسته و مقادیر سمت راست هستند که با توجه به رویکرد بهینه‌سازی استوار برتسیماس و سیم [۳۳] به‌دست‌آمده است [۳۴].

۳- مدل‌سازی:

مدل قطعی این مقاله مدل توسعه‌یافته مقاله [۷]است که برای ایستگاه‌های فشرده‌سازی ظرفیت محدود تعریف‌شده و درصدی از زباله‌های تولیدشده به‌عنوان زباله قابل بازیافت از زباله‌هایی که قرار است دفن شود جدا می‌شود.

مجموعه‌ها

$i=\{1,\ldots,I\}$ مراکز جمعیت

$j=\{1,\ldots,J\}$ مکان‌های کاندید برای محل دفن زباله

$l=\{1,\ldots,L\}$ مکان‌های کاندید برای محل‌های پالایش زباله

$k=\{1,\ldots,K\}$ ظرفیت‌های قابل تأسیس برای محل‌های دفن

$r=\{1,\ldots,R\}$ ظرفیت‌های قابل تأسیس برای محل‌های پالایش زباله

$p=\{1,\ldots,P\}$ مکان‌های کاندید برای مراکز بازیافت زباله

پارامترها

w_i تعداد جمعیت قرارگرفته در مکان i ام

y زباله تولیدشده در هرسال توسط هر مشتری (تن)

q_{jk} ظرفیت (تن) محل دفن زباله j ام با ظرفیت k

q_{lr} ظرفیت (تن) محل پالایش l ام با ظرفیت r

α درصدی از زباله تولید شده است که برای بازیافت به مراکز بازیافت فرستاده می‌شود.

f_j^L هزینه ثابت سالیانه برای راه‌اندازی و اداره کردن یک محل دفن زباله در مکان j

Δf_{jk}^L هزینه سالیانه وابسته به ظرفیت (تن/ ریال) برای ایجاد و اداره کردن محل دفن زباله با سطح ظرفیت k در مکانj

tcl_{jk} کل هزینه برای تأسیس محل دفن زباله j با ظرفیت k

$$tcl_{jk} = f_j^L + \Delta f_{jk}^L \times q_{jk} \qquad (۳)$$

f_l^T هزینه ثابت سالیانه برای راه‌اندازی و اداره کردن یک ایستگاه فشرده‌سازی در مکان l

Δf_{lr}^T هزینه سالیانه وابسته به ظرفیت (تن/ ریال) برای ایجاد و اداره کردن ایستگاه فشرده‌سازی با ظرفیت r در مکان l

tcl_{lr} کل هزینه برای تأسیس محل پالایش زباله l با ظرفیت r

$$tcl_{lr} = f_l^T + \Delta f_{lr}^T \times q_{lr} \qquad (۴)$$

f_p^R هزینه ثابت سالیانه برای راه‌اندازی و اداره کردن یک محل بازیافت در مکان p

Δf_p^R هزینه سالیانه وابسته به حجم بازیافت (تن/ ریال) برای ایجاد و اداره کردن محل بازیافت در مکان p

π_L فاکتور آلودگی برای محل دفن زباله (تن/km2)

π_T فاکتور آلودگی برای محل پالایش (تن/km2)

π_R فاکتور آلودگی برای محل بازیافت (تن/km2)

P ماکزیمم آلودگی مجاز در هر مرکز جمعیت

t_{il} هزینه حمل و نقل هر واحد (تن/ ریال) از مشتری i به‌طور مستقیم به محل پالایش l در طول مسیر از پیش تعیین‌شده این هزینه وهزینه های حمل ونقل بعدی برای واحد، باید مشابه با هر واحد مسافت باشند.

t_{ij} هزینه حمل و نقل هر واحد (تن/ ریال) از مشتری i به‌طور مستقیم به محل دفن j در طول مسیر از پیش تعیین‌شده

t_{ip} هزینه حمل و نقل هر واحد (تن/ ریال) از مشتری i به‌طور مستقیم به محل بازیافت p در طول مسیر از پیش تعیین‌شده

$\hat{t}_{lj}$ هزینه حمل و نقل هر واحد توسط کامیون (تن/ ریال) بین محل پالایش l و محل دفن j

d_{ij} فاصله اقلیدسی مابین مشتری i و محل دفن j، توجه کنید که این فاصله و فاصله های بعد برای محاسبه‌ی هزینه استفاده نمی‌شود اما برای برآورد ارزیابی آلودگی تک‌تک مکان‌های جمعیت استفاده می‌شود.

d_{il} فاصله اقلیدسی مابین مشتری i و محل پالایش l

d_{ip} فاصله اقلیدسی مابین مشتری i و محل بازیافت p

متغیرهای تصمیم:

y_{jk} زمانی ۱ می‌شود که محل دفن در مکان j با ظرفیت k باز شود، در غیر این صورت ۰ است

v_{lr} زمانی ۱ می‌شود که محل پالایش در مکان l با ظرفیت r باز شود، در غیر این صورت ۰ است

o_p زمانی ۱ می‌شود که محل پالایش در مکان p باز شود، در غیر این صورت ۰ است

z_{ij} زمانی ۱ می‌شود که همه زباله‌های تفکیک نشده مشتری i به‌طور مستقیم به محل دفن زباله j حمل شود، در غیر این صورت ۰ است

x_{il} زمانی ۱ می‌شود که همه زباله‌های تفکیک نشده مشتری i به‌طور مستقیم به محل پالایش l حمل شود، در غیر این صورت ۰ است

g_{ip} زمانی ۱ می‌شود که همه زباله‌های تفکیک شده مشتری i به‌طور مستقیم به محل بازیافت p حمل شود، در غیر این صورت ۰ است

u_{lj} این متغیر پیوسته هست و مقدار زباله (تن) که از محل پالایش l به محل دفن زباله j حمل می‌شود

تابع هدف

$$Min\ Z_c = \sum_j \sum_k tcl_{jk} y_{jk} + \sum_l \sum_r tct_{lr} y_{lr} + \sum_i \sum_l (1-\alpha) t_{il} yw_i x_{il} + \sum_i \sum_j (1-\alpha) t_{ij} yw_i z_{ij} + \sum_l \sum_j \hat{t}_{lj} u_{lj} + \sum_p \left(f_p^R o_p + \sum_i \alpha \times \Delta f_p^R yw_i g_{ip} \right) + \sum_i \sum_p \alpha\, t_{ip} yw_i\, g_{ip} \quad (۵)$$

تابع هدف هزینه‌های راه‌اندازی، اداره و حمل و نقل را کمینه می‌کند؛ که به ترتیب از چپ به راست اجزای آن در زیر تشریح می‌شود:

- هزینه‌های سالیانه برای احداث و اداره کردن محل دفن زباله j با ظرفیت k.
- هزینه‌های سالیانه برای احداث و اداره کردن ایستگاه فشرده‌سازی l با ظرفیت r.
- هزینه‌های حمل و نقل از مشتری‌ها در i ام به ایستگاه‌های انتقال l ام.
- هزینه‌های حمل و نقل برای حمل زباله ها مابین مشتری‌ها و محل‌های دفن زباله از طریق کامیون.
- هزینه‌های حمل و نقل زباله فشرده‌شده مابین همه ایستگاه‌های انتقال l و محل‌های دفن زباله j.
- هزینه‌های سالیانه برای احداث و اداره کردن محل بازیافت زباله p.

هزینه‌های حمل و نقل برای حمل زباله ها مابین مشتری‌ها و محل‌های بازیافت از طریق کامیون.

محدودیت‌ها

محدودیت شماره ۶ بدین منظور است تا تضمین کنیم که هیچ مشتری در بیش از یک منطقه ممنوعه که توسط محل دفن یا سایت فشرده‌سازی ایجادشده است قرار نگیرد. طبق مطالعات انجام شده هر ظرفیت مربوط به محل دفن زباله و هر سایت فشرده‌سازی محیط اطراف خود را تا شعاع مشخصی تحت تأثیر قرار می‌دهد و آلوده می‌کند از طرفی طبق قانون هر مرکز جمعیت حداکثر باید در یک شعاع آلودگی قرار بگیرد.

N_i^l = مجموعه‌ای که شامل همه‌ی جفت‌های (محل دفنi، ظرفیت k)که مشتری i را بیشتر از حد مجاز آلوده می‌کنند.

N_i^T = مجموعه‌ای که شامل همه‌ی جفت‌هایی (سایت فشرده‌سازی l با ظرفیت r) که به‌طور جداگانه مشتری i را بیشتر از حد مجاز آلوده می‌کنند.

N_i^R = مجموعه‌ای که شامل همه‌ی محل های بازیافت p که مشتری i را بیشتر از حد مجاز آلوده می‌کنند.

$$\sum_{(j,k)\in N_i^I} y_{jk} + \sum_{(l,r)\in N_i^T} v_{lr} + \sum_{p\in N_i^R} o_p \le 1 \qquad \forall i \quad (۶)$$

محدودیت ۷، محدود کردن حداکثر آلودگی در هر مرکز جمعیت است. طبق قانون هر مرکز جمعیتی بدون در نظر گرفتن تعداد جمعیت حاضر می‌تواند تحت تأثیر مقدار معینی از آلودگی قرار گیرد. سمت چپ این محدودیت کل آلودگی که یک مرکز جمعیت مشخص را تحت تأثیر قرار می‌دهد را بیان می‌کند که اجزای آن به شرح زیر است:

$$\sum_j \frac{\pi_L\left(\sum_i (1-\alpha) yw_i z_{ij} + \sum_l u_{ij}\right)}{\left(d_{ij}+\varepsilon\right)^2} + \sum_l \frac{\pi_T\left(\sum_i (1-\alpha) yw_i x_{il}\right)}{\left(d_{il}+\varepsilon\right)^2} + \sum_p \frac{\pi_R\left(\sum_i \alpha yw_i g_{ip}\right)}{\left(d_{ip}+\varepsilon\right)^2} \le P \quad (۷)$$

$\sum_i (1-\alpha) yw_i z_{ij} + \sum_l u_{ij}$: جریان کلی زباله به محل دفن jام.

$\sum_j \frac{\pi_L\left(\sum_i (1-\alpha) yw_i z_{ij} + \sum_l u_{ij}\right)}{\left(d_{ij}+\varepsilon\right)^2}$: آلودگی ایجاد شده توسط محل دفن زباله j که مشتری در مکان i را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

$\sum_l \frac{\pi_T\left(\sum_i (1-\alpha) yw_i x_{il}\right)}{\left(d_{il}+\varepsilon\right)^2}$: آلودگی ایجاد شده توسط همه محل های دفن زباله که مشتری در مکان i را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

$\sum_i (1-\alpha) yw_i x_{il}$: میزان زباله تفکیک نشده فرآوری شده در ایستگاه فشرده‌سازی l.

$\frac{\pi_T\left(\sum_i (1-\alpha) yw_i x_{il}\right)}{\left(d_{il}+\varepsilon\right)^2}$: آلودگی ایجاد شده توسط محل پالایش زباله l که مشتری در مکان i را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

$\sum_l \frac{\pi_T\left(\sum_i (1-\alpha) yw_i x_{il}\right)}{\left(d_{il}+\varepsilon\right)^2}$: آلودگی ایجاد شده توسط محل های پالایش زباله که مشتری در مکان i را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

$\sum_i \alpha yw_i g_{ip}$: میزان زباله تفکیک شده در محل بازیافت p.

$\frac{\pi_R\left(\sum_i \alpha yw_i g_{ip}\right)}{\left(d_{ip}+\varepsilon\right)^2}$: آلودگی ایجاد شده توسط محل بازیافت زباله p که مشتری در مکان i را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

$\sum_p \frac{\pi_R\left(\sum_i \alpha yw_i g_{ip}\right)}{\left(d_{ip}+\varepsilon\right)^2}$: آلودگی ایجاد شده توسط همه محل های بازیافت زباله که مشتری در مکان i را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

مشتری در مرکز جمعیت i فقط می‌تواند یک مسیر مستقیم به محل دفن زباله انتخاب کند پس باید در محل j محل دفنی با هر ظرفیتی وجود داشته باشد:

$$z_{ij} \le \sum_k y_{jk} \qquad \forall i, j \quad (۸)$$

مشتری در مرکز جمعیت i فقط می‌تواند یک مسیر مستقیم به سایت فشرده‌سازی انتخاب کند پس باید در محل l سایت فشرده‌سازی با هر ظرفیتی وجود داشته باشد:

$$x_{il} \le \sum_r v_{lr} \qquad \forall i, l \quad (۹)$$

اگر بخواهیم زباله های تفکیک شده مشتری را به یک محل بازیافت بفرستیم باید در آن مکان محل بازیافتی وجود داشته باشد:

$$g_{ip} \le o_p \qquad \forall i, p \quad (۱۰)$$

یکی از فرض‌های مهم مسئله این است که مشتری در سایت i فقط می‌تواند یک مسیر مستقیم به سایت فشرده‌سازی انتخاب کند نمی‌تواند زباله این مشتری بین ایستگاه‌های فشرده‌سازی و یا محل‌های دفن تقسیم شود. از مشتری i به‌طور دقیق یک مسیر انتخاب می‌شود یا به یک سایت فشرده‌سازی یا به‌طور مستقیم به یک محل دفن زباله:

$$\sum_j z_{ij} + \sum_l x_{il} = 1 \qquad \forall i \quad (۱۱)$$

جریان از ایستگاه فشرده‌سازی l به همه‌ی محل‌های دفن (دست چپ)برابر با مقدار جریان از همه‌ی مشتری‌ها به ایستگاه انتقال l است:

$$\sum_j u_{lj} = \sum_i (1-\alpha) yw_i x_{il} \qquad \forall l \quad (۱۲)$$

تمامی جریان‌ها به مکان دفن زباله j ام نباید از ظرفیت تأسیسی در این محل بیشتر باشد:

$$\sum_i (1-\alpha) yw_i z_{ij} + \sum_l u_{lj} \le \sum_k q_{jk} y_{jk} \qquad \forall j \quad (۱۳)$$

تمامی جریان‌ها به ایستگاه فشرده‌سازی l ام نباید از ظرفیت تأسیسی در این محل بیشتر باشد:

$$\sum_i (1-\alpha) yw_i x_{il} \le \sum_r q_{lr} v_{lr} \qquad \forall l \quad (۱۴)$$

این محدودیت تضمین می‌کند که اگر قرار است محل دفن زباله‌ای در مکان j تأسیس شود دارای یکی از ظرفیت‌های تعریف شده باشد:

$$\sum_k y_{jk} \le 1 \qquad \forall j \quad (۱۵)$$

این محدودیت، تضمین می‌کند که اگر قرار است ایستگاه فشرده‌سازی در یک مکان تأسیس شود دارای یکی از ظرفیت‌های r باشد:

$$\sum_r v_{lr} \le 1 \qquad \forall l \quad (۱۶)$$

برای انتقال زباله های تفکیک شده به یک مسیر تا مکان بازیافت زباله نیاز داریم:

$$\sum_p g_{ip} = 1 \qquad \forall i \quad (۱۷)$$

$$y_{jk}, v_{lr}, z_{ij}, x_{il}, o_p, g_{ip} \in \{0,1\} \qquad \forall i, j, k, l, r, p$$
$$u_{lj} \ge 0 \qquad \forall i, j, k, l, r, p$$

۳-۲- مدل استوار:

در این حالت از مدل‌سازی ظرفیت یک محل دفن یعنی q_{jk} و ظرفیت یک ایستگاه فشرده‌سازی یعنی q_{lr} غیرقطعی فرض می‌شوند.

$\hat{q}_{jk}$ برابر αq_{jk} و $\hat{q}_{lr}$ برابر αq_{lr} در نظر گرفته می‌شوند. میدانیم که q_{jk} و q_{lr} در محدودیت حضور دارند.

با توجه به رویکرد برتسیماس و سیم که در بخش سوم ارائه شد، مدل و همتای استوار برای هر یک از محدودیت‌های ۱۲و۱۳ به ترتیب به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\sum_i yw_i z_{ij} + \sum_l u_{lj} + z_j^1 \Gamma_j^1 + \sum_k AU_{jk}^1 \le \sum_k q_{jk} y_{jk} \qquad \forall j$$

$$z_j^1 + AU_{jk}^1 \ge q_{jk} y_{jk} \qquad \forall j,k \quad (۱۸)$$

$$\sum_i yw_i x_{il} + z_l^2 \Gamma_l^2 + \sum_r AU_{lr}^2 \le \sum_r q_{lr} v_{lr}$$

$$z_l^2 + AU_{lr}^2 \ge q_{lr} v_{lr} \qquad \forall l,r \quad (۱۹)$$

۴- نتایج محاسباتی:

با توجه به دسترس نبودن داده‌های پژوهش [۷] مسئله‌ی نمونه‌ای را طراحی کرده‌ایم و صحت مدل پیشنهادی با داده‌های مسئله طراحی‌شده آزمایش شد ولی برای داده‌هایی چون تولید روزانه زباله توسط هر شخص، هزینه حمل‌ونقل از مشتری به محل دفن، هزینه حمل‌ونقل از مشتری به محل پالایش زباله، هزینه حمل‌ونقل مابین محل پالایش زباله و محل دفن، هزینه ثابت سالیانه برای احداث محل دفن و محل پالایش زباله، فاکتورهای آلودگی محل دفن و محل پالایش زباله و حداکثر مجاز آلودگی برای هر مرکز جمعیت از مقاله [۷] استفاده شده است.

منطقه فرضی شکل ۲ را در نظر می‌گیریم که دارای ۲۵ مرکز جمعیت، ۳ نقطه کاندید برای انتخاب شدن به‌عنوان محل دفن که هرکدام دارای ۲۰ ظرفیت کاندید برای انتخاب شدن هستند و ۱۲ نقطه کاندید با ۴ ظرفیت کاندید برای انتخاب شدن به‌عنوان مراکز فشرده‌سازی و ۲ نقطه‌ی کاندید برای محل بازیافت هستند.

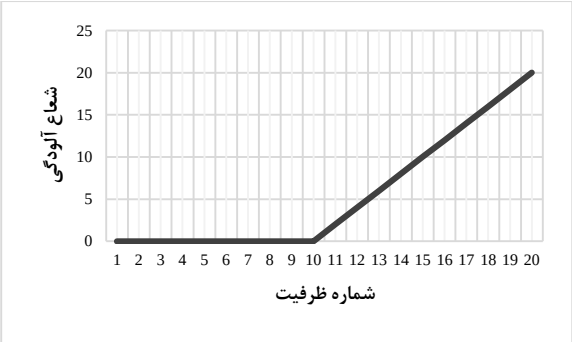
کل جمعیت تحت بررسی ۳۳۶۱۸۵ نفر است که هرکدام سالیانه نیم تن زباله تولید می‌کنند هزینه ثابت تأسیس هر محل دفن ۳۰۰۰۰۰ تومان در سال، هزینه تأسیس هر ایستگاه فشرده‌سازی ۱۰۰۰۰۰ تومان در سال، هزینه تأسیس هر محل بازیافت ۱۰۰۰۰۰ تومان در سال هزینه متغیر تأسیس هر محل دفن از فرمول زیر به دست می‌آید[۷].

$$\Delta f_{jk}^L = 586.38 q_k^{-0.209} \quad (۲۰)$$

و هزینه متغیر تأسیس هر ایستگاه فشرده‌سازی ۱۰۰ تومان به ازای هر تن در سال، هزینه متغیر تأسیس هر محل بازیافت ۵ تومان به ازای هر تن در سال، هزینه انتقال هر تن زباله از مشتری به ایستگاه فشرده‌سازی در سال و هزینه انتقال هر تن زباله از مشتری به محل دفن در هرسال، هزینه انتقال هر تن زباله از ایستگاه فشرده‌سازی به محل دفن در سال و هزینه انتقال هر تن زباله از مشتری به محل بازیافت در سال به ترتیب برابر است با: ۰,۴۲۸۶، ۰,۴۲۸۶، ۰,۱۴۲۹ و ۰,۱۲ تومان است.

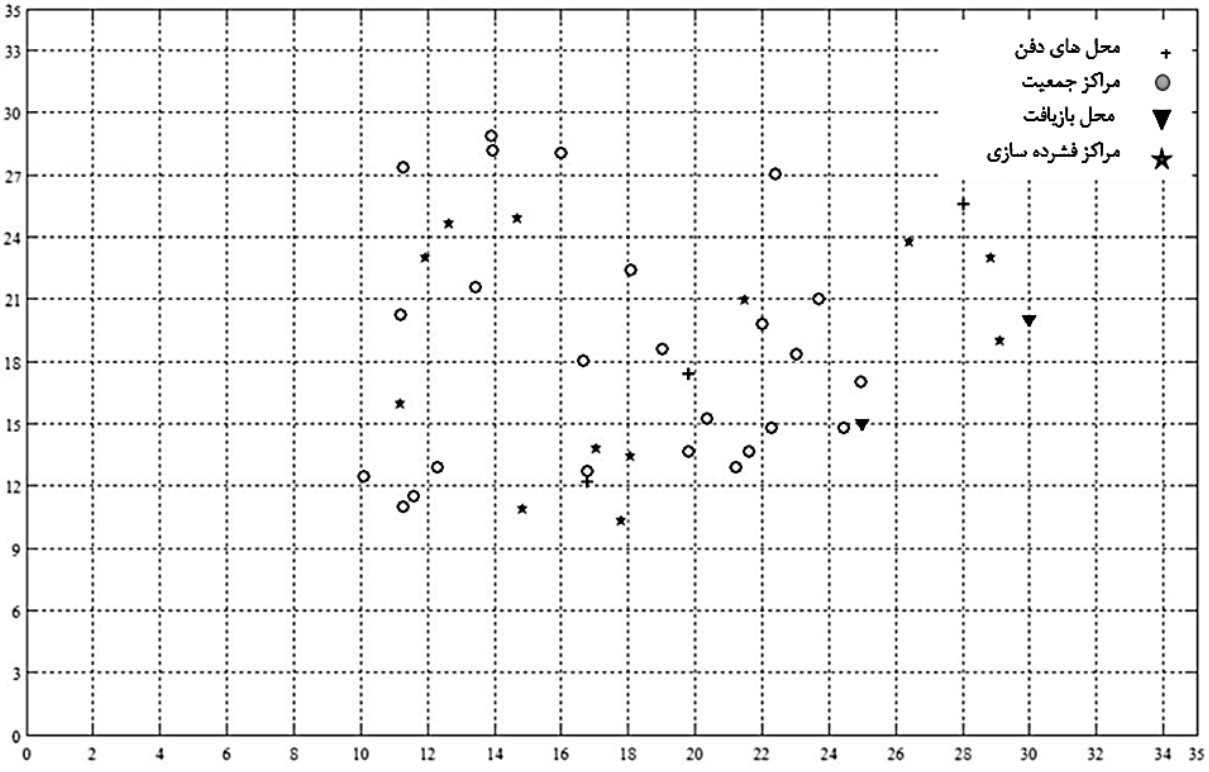
ظرفیت‌های کاندید قابل تأسیس برای هر محل دفن ۲۰ عدد در بازه‌ی ۱۰۰۰۰۰ تن در سال تا ۳۳۰۰۰۰ تن در سال در نظر گرفته‌شده است که هرکدام شعاع مربوط به منطقه ممنوعه خود را دارد که با توجه به شکل ۲ به دست می‌آیند. شعاع آلودگی تا ظرفیت ۱۰ ثابت و قابل صرف‌نظر کردن است ولی از ظرفیت شماره ۱۰ به بعد، با افزایش ظرفیت، شعاع منطقه‌ها افزایش پیدا می‌کند.

برای ظرفیت‌های کاندید قابل تأسیس برای هر مرکز فشرده‌سازی نیز ۴ عدد در بازه‌ی ۸۰۰۰۰ تن در سال تا ۱۳۰۰۰۰ تن در سال است در نظر گرفته‌شده است؛ که این مقدار آلودگی‌ها نیز شعاع آلودگی مشابه شکل ۲ دارند.



شکل ۲. شعاع آلودگی ناشی از هر یک از مقادیر ظرفیت

درنهایت فاکتور های آلودگی برای محل دفن، ایستگاه انتقال و محل بازیافت به ترتیب ۰,۱، ۰,۰۲۵ و ۰,۰۱ (km^2/ton) و ماکزیمم مجاز آلودگی در هر مرکز جمعیت ۱۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است. با توجه به مسئله طراحی شده و مدلی که در بخش قبل ارائه شد و با کمک نرم‌افزار GAMS نسخه 24.1.2 مسئله را یک‌بار مدل قطعی و بار دیگر مدل غیرقطعی را حل کردیم که در بخش بعد نتایج را ارائه می‌دهیم. شکل ۳ مختصات شهرها، محل‌های کاندید برای دفن، مراکز فشرده‌سازی و محل‌های بازیافت را ارائه می‌کند.



شکل ۳. مختصات شهرها، محل‌های کاندید برای دفن، مراکز فشرده‌سازی و محل‌های بازیافت

۴-۱- نتایج و تفسیر مدل قطعی:

مدل ارائه‌شده در این مقاله با استفاده از داده‌های در دسترس اجرا شد که نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد در حالت بهینه تنها محل دفن شماره ۱ با ظرفیت ۶ یعنی ۱۶۰ هزار تن در سال راه‌اندازی شده و همچنین محل بازیافت شماره ۱ نیز تأسیس گردد. هزینه بهینه‌ای که با این تصمیم‌گیری طی یک سال متحمل می‌شویم برابر ۸۱۳۵۳۳۰,۱۱۰ تومان خواهد بود.

برای تفسیر این نتایج این‌گونه می‌توان بیان کرد که اگر هر نفر سالیانه نیم تن زباله تولید کند کل زباله تولیدی ۱۶۸۰۹۲,۵ تن در سال خواهد بود که از این مقدار حدود ۰,۹ آن زباله تفکیک نشده است که باید دفن شود یعنی ۱۵۱۲۸۳,۲۵ تن. با توجه به توضیحاتی که قبلاً در مورد محدودیت‌ها دادیم جواب نهایی به‌گونه‌ای است که محل‌های دفنی انتخاب می‌شوند که حتی‌الامکان از مراکز جمعیت دور باشند و ظرفیت بیشتری داشته باشند. در میان ظرفیت‌ها، ظرفیت قابل تأسیس ۱۶۰ هزار تن در سال را داریم که مقداری بیش‌تر از زباله تولیدی را پوشش می‌دهد؛ محل دفن شماره ۷ با چنین ظرفیتی تأسیس می‌شود. این‌گونه می‌توان نتیجه گرفت که داشتن یک محل دفن با ظرفیت بالا و در محل دورتر بهتر از داشتن محل‌های دفن با ظرفیت‌های پایین و نزدیک به مراکز جمعیت است.

۴-۲- نتایج و تفسیر بهینه‌سازی استوار:

می‌دانیم که ظرفیت تعریف‌شده برای تأسیس هر مرکز صنعتی یک ظرفیت اسمی است؛ لزوماً بعد از تأسیس نمی‌توان به همان اندازه از آن بهره‌برداری کرد و عمدتاً ظرفیت واقعی به میزانی با ظرفیت اسمی تفاوت خواهد داشت که به همین منظور ظرفیت‌های تعریف‌شده برای هر محل دفن و مراکز فشرده‌سازی را غیرقطعی در نظر می‌گیریم.

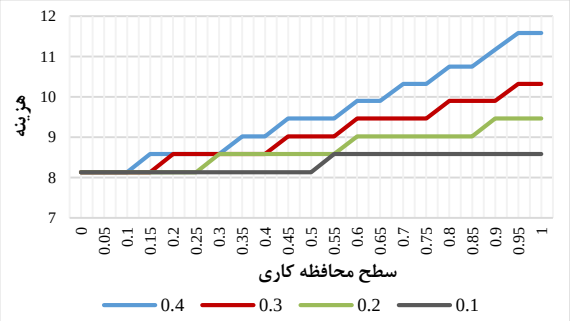
ابتدا بازه تغییرات را برای پارامتر غیرقطعی تعریف می‌کنیم (ستون‌های جدول ۲) همان‌طور که می‌دانیم این بازه تابعی از مقدار اسمی (α) به‌صورت $\hat{\alpha}=\alpha\times\overline{\alpha}$ است که برای کران بالا و پایین در نظر می‌گیرد سپس در آن بازه به ازای مقادیر مختلف Γ(سطرهای جدول ۲) مدل خود را حل می‌کنیم درواقع هر بار محافظه‌کاری خود را افزایش می‌دهیم. مقدار Γ ای که هر بار در نظر می‌گیریم برابر با $\Gamma=\omega\times\Gamma^{max}$ است. طبق مدل برتسیماس و سیم می‌دانیم Γ^{max} برای هر محدودیت برابر تعداد پارامترهای غیرقطعی آن محدودیت است.

با بررسی‌های انجام‌شده متوجه شدیم با افزایش سطح محافظه کاری و در بازه‌های مختلف ظرفیت، مقدار تابع هدف بدتر می‌شود؛ و گزینه‌ها برای تأسیس متفاوت از حالت قطعی خواهد شد برای نمونه برای ظرفیت با تغییرات ۰,۴ در جدول ۳ نشان داده‌شده است که به دلیل انتخاب نشدن محل پالایش در جواب بهینه اطلاعات مرتبط محل پالایش در جدول آورده نشده است. با دقت بیشتر متوجه می‌شویم در بعضی مواردی که مقدار تابع هدف یکسان دارند جواب بهینه متفاوتی به دست می‌آید. با بررسی تمامی حالت‌های ممکن می‌توان به این نتیجه رسید تأسیس یک محل دفن با ظرفیت بالا بهتر از تأسیس چند محل دفن کوچک همراه با محل‌های فشرده‌سازی است.

جدول ۲. تغییرات تابع هدف (10^6*)به ازای مقادیر مختلف محافظه‌کاری (Γ_{max}%) و بازه‌های تغییرات پارامتر غیرقطعی (α)

Γ \ $\hat{\alpha}$	۰,۱	۰,۲	۰,۳	۰,۴
۰	۸,۱۳	۸,۱۳	۸,۱۳	۸,۱۳
۰,۰۵	۸,۱۳	۸,۱۳	۸,۱۳	۸,۱۳
۰,۱	۸,۱۳	۸,۱۳	۸,۱۳	۸,۱۳
۰,۱۵	۸,۱۳	۸,۱۳	۸,۱۳	۸,۵۸
۰,۲	۸,۱۳	۸,۱۳	۸,۵۸	۸,۵۸
۰,۲۵	۸,۱۳	۸,۱۳	۸,۵۸	۸,۵۸
۰,۳	۸,۱۳	۸,۵۸	۸,۵۸	۸,۵۸
۰,۳۵	۸,۱۳	۸,۵۸	۸,۵۸	۹,۰۲
۰,۴	۸,۱۳	۸,۵۸	۸,۵۸	۹,۰۲
۰,۴۵	۸,۱۳	۸,۵۸	۹,۰۲	۹,۴۶
۰,۵	۸,۱۳	۸,۵۸	۹,۰۲	۹,۴۶
۰,۵۵	۸,۵۸	۸,۵۸	۹,۰۲	۹,۴۶
۰,۶	۸,۵۸	۹,۰۲	۹,۴۶	۹,۹۰
۰,۶۵	۸,۵۸	۹,۰۲	۹,۴۶	۹,۹۰
۰,۷	۸,۵۸	۹,۰۲	۹,۴۶	۱۰,۳۲
۰,۷۵	۸,۵۸	۹,۰۲	۹,۴۶	۱۰,۳۲
۰,۸	۸,۵۸	۹,۰۲	۹,۹۰	۱۰,۷۵
۰,۸۵	۸,۵۸	۹,۰۲	۹,۹۰	۱۰,۷۵
۰,۹	۸,۵۸	۹,۴۶	۹,۹۰	۱۱,۱۷
۰,۹۵	۸,۵۸	۹,۴۶	۱۰,۳۲	۱۱,۵۸
۱	۸,۵۸	۹,۴۶	۱۰,۳۲	۱۱,۵۸

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج جدول ۲ در شکل ۴ منعکس‌شده است. می‌توان نتیجه گرفت که تصمیم معقول تأسیس یک محل دفن با ظرفیتی بیش از کل زباله‌ی تولیدی در یک سال است.

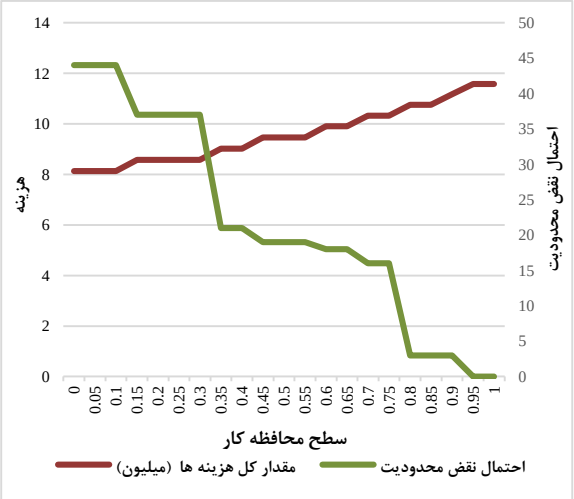


شکل ۴. تابع هدف به ازای تغییرات در محافظه‌کاری و دامنه تغییرات پارامتر غیرقطعی

جدول ۳. تغییرات تابع هدف (10^6*) و جواب بهینه به ازای مقادیر مختلف محافظه‌کاری (Γ_{max}%) و $\alpha = 0.4$

مقدار کل هزینه‌ها (میلیون)	جواب بهینه			Γ
	شماره محل بازیافت	شماره ظرفیت محل دفن	شماره محل دفن	
۸,۱۳	۱	۶	۲	۰
۸,۱۳	۱	۶	۳	۰,۰۵
۸,۱۳	۱	۶	۱	۰,۱
۸,۵۸	۱	۷	۳	۰,۱۵
۸,۵۸	۱	۷	۳	۰,۲
۸,۵۸	۱	۷	۱	۰,۲۵
۸,۵۸	۱	۷	۲	۰,۳
۹,۰۲	۱	۸	۲	۰,۳۵
۹,۰۲	۱	۸	۲	۰,۴
۹,۴۶	۱	۹	۱	۰,۴۵
۹,۴۶	۱	۹	۱	۰,۵
۹,۴۶	۱	۹	۱	۰,۵۵
۹,۹۰	۱	۱۰	۳	۰,۶
۹,۹۰	۱	۱۰	۲	۰,۶۵
۱۰,۳۲	۱	۱۱	۳	۰,۷
۱۰,۳۲	۱	۱۱	۱	۰,۷۵
۱۰,۷۵	۱	۱۲	۲	۰,۸
۱۰,۷۵	۱	۱۲	۳	۰,۸۵
۱۱,۱۷	۱	۱۳	۲	۰,۹
۱۱,۵۸	۱	۱۴	۳	۰,۹۵
۱۱,۵۸	۱	۱۴	۳	۱

در ادامه به‌منظور نزدیک شدن به شرایط غیرقطعی حاکم بر دنیای واقعی با اجرای مدل در ۱۰۰ تکرار نتایجی حاصل شد که برای نمونه، نتایج مرتبط با $\alpha = 0.4$ در شکل ۵ و جدول ۴ آورده شده است. همانطور که انتظار می‌رفت، احتمال شدنی بودن با افزایش سطح محافظه‌کاری افزایش می‌یابد و انحراف معیار کمی در هر سطح داریم. با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده و موازنه‌ای که بین احتمال شدنی بودن جواب و هزینه ناشی از انتخاب جواب وجود دارد، تصمیم‌گیرنده می‌تواند با توجه به میزان ریسک‌پذیری خود، سطح محافظه‌کاری مناسب خود را انتخاب نماید.



شکل ۵. تغییرات تابع هدف و درصد شدنی بودن به ازای مقادیر مختلف محافظه‌کاری و $\alpha = 0.4$

جدول ۴. تغییرات تابع هدف، درصد شدنی بودن و انحراف معیار به ازای مقادیر مختلف محافظه‌کاری و $\alpha = 0.4$

انحراف معیار	احتمال شدنی بودن (٪)	مقدار کل هزینه‌ها (میلیون)	Γ
۰,۲۶۵	۵۶	۸,۱۳	۰
۰,۲۶۵	۵۶	۸,۱۳	۰,۰۵
۰,۲۶۵	۵۶	۸,۱۳	۰,۱
۰,۳۳۱	۶۳	۸,۵۸	۰,۱۵
۰,۳۳۱	۶۳	۸,۵۸	۰,۲
۰,۳۳۱	۶۳	۸,۵۸	۰,۲۵
۰,۳۳۱	۶۳	۸,۵۸	۰,۳
۰,۴۶۸	۷۹	۹,۰۲	۰,۳۵
۰,۴۶۸	۷۹	۹,۰۲	۰,۴

Γ	مقدار کل هزینه‌ها (میلیون)	احتمال شدنی بودن (٪)	انحراف معیار
۰,۴۵	۹,۴۶	۸۱	۰,۴۶۸
۰,۵	۹,۴۶	۸۱	۰,۴۶۸
۰,۵۵	۹,۴۶	۸۱	۰,۴۶۸
۰,۶	۹,۹۰	۸۲	۰,۵۳۰
۰,۶۵	۹,۹۰	۸۲	۰,۵۳۰
۰,۷	۱۰,۳۲	۸۴	۰,۳۷۵
۰,۷۵	۱۰,۳۲	۸۴	۰,۳۷۵
۰,۸	۱۰,۷۵	۹۷	-
۰,۸۵	۱۰,۷۵	۹۷	-
۰,۹	۱۱,۱۷	۹۶	-
۰,۹۵	۱۱,۵۸	۱۰۰	۰,۴۸۴
۱	۱۱,۵۸	۱۰۰	۰,۴۸۴

۵-نتیجه‌گیری:

خسارات زیست‌محیطی زباله‌ها و هزینه‌های بالای جمع‌آوری و دفن زباله‌ها موجب آن شده است تصمیم‌گیری در این مسئله به‌صورت یک ضرورت پژوهشی همواره موردتوجه قرار گیرد. در این مقاله باهدف حداقل کردن هزینه‌های موجود در مسئله مکان‌یابی محل دفن، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته برای مکان‌یابی محل دفن، پالایش زباله. محل بازیافت توسعه داده‌شده است برای محل‌های دفن و مراکز فشرده‌سازی ظرفیت‌های کاندید نیز در نظر گرفته‌شده است و با تعریف محدودیت‌هایی قوانین مربوط به حداکثر مجاز آلودگی را رعایت شده است. به‌منظور رسیدن به نتایج نزدیک به واقعیت با غیرقطعی فرض کردن ظرفیت‌های مدل، مدل‌سازی شده است و با مقایسه حالات مختلف نتیجه گرفته می شود، داشتن یک محل دفن با ظرفیت بالا و در محل دورتر بهتر از داشتن محل‌های دفن با ظرفیت‌های پایین و نزدیک به مراکز جمعیت است.

برای گسترش مدل می‌توان پیشنهاد داد نوع زباله از زباله شهری به صنعتی یا بیمارستانی تبدیل شود که محدودیت‌های جدیدی به مدل اضافه می‌کند.

۶- منابع و مآخذ

[1] Hatami, H., et al., Comprehensive book of public health. Tehran: Arjemand Publications, 2007: p. 45-*7*.

[2] Abdel-Shafy, H.I. and M.S. Mansour, Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. Egyptian journal of petroleum

[3] Farrell, M. and D. Jones, Critical evaluation of municipal solid waste composting and potential compost markets. Bioresource technology, 2009. 100(19): p. 4301-4310.Review

[4] Pichtel, J., Waste management practices: municipal, hazardous, and industrial. 2005: CRC press.

[5] Esakku, S., et al. Municipal solid waste management in Chennai city, India. in Proceedings Sardinia. 2007. Citeseer

[6] Eiselt, H.A. and V. Marianov, Location modeling for municipal solid waste facilities. Computers & Operations Research, 2015. 62: p. 305-315

[7] Eiselt, H.A. and V. Marianov, A bi-objective model for the location of landfills for municipal solid waste. European Journal of Operational Research, 2014. 235(1): p. 187-194.

[8] Church, R.L. and R.S. Garfinkel, Locating an obnoxious facility on a network. Transportation science, 1978. 12(2): p. 107-118

[9] Erkut, E. and S. Neuman, Analytical models for locating undesirable facilities. European Journal of Operational Research,

1989. 40(3): p. 275-291

[10] Ghiani, G., et al., Capacitated location of collection sites in an urban waste management system. Waste management, 2012. 32(7): p. 1291-1296.

[11] Badran, M. and S. El-Haggar, Optimization of municipal solid waste management in Port Said–Egypt. Waste Management, 2006. 26(5): p. 534-545.

[12] Erkut, E., et al., A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece. European journal of operational research, 2008. 187(3): p. 1402-1421.

[13] Bosompem, C., E. Stemn, and B. Fei-Baffoe, Multi-criteria GIS-based siting of transfer station for municipal solid waste: The case of Kumasi Metropolitan Area, Ghana. Waste Management & Research, 2016. 34(10): p. 1054-1063

[14] Rahimi, S., et al., Sustainable landfill site selection for municipal solid waste based on a hybrid decision-making approach: Fuzzy group BWM-MULTIMOORA-GIS. Journal of Cleaner Production, 2020. 248: p. 119186.

[15] Amiri, F. and T. Tabatabaie, Application of Geographic Information System and Analytic Hierarchy Process for Municipal Solid Waste Landfill Site Selection: A Case Study of Bushehr City, Iran. Iranian Journal of Applied Ecology, 2019. 7(4): p. 59-76.

[16] Spigolon, L.M., et al., Landfill siting based on optimisation, multiple decision analysis, and geographic information system analyses. Waste Management & Research, 2018. 36(7): p. 606-615.

[17] Rathore, P. and S. Sarmah, Modeling transfer station locations considering source separation of solid waste in urban centers: A case study of Bilaspur city, India. Journal of cleaner production, 2019. 211: p. 44-60

[18] Karasan, A., E. Ilbahar, and C. Kahraman, A novel pythagorean fuzzy AHP and its application to landfill site selection problem. Soft Computing, 2019. 23(21): p. 10953-10968.

[19] Vidovic, m., et al. an approach to locating transfer stations in waste management systems. in XIII Balkan conference on operational research proceedings. 2018. FON.

[20] Hrabeca, D., et al., A HEURISTIC approach to the facility location problem for waste management: a case study.

[21] Tirkolaee, E.B., et al., A robust green location-allocation-inventory problem to design an urban waste management system under uncertainty. Waste Management, 2020. 102: p. 340-350

[22] Tirkolaee, E.B., et al., A robust green location-allocation-inventory problem to design an urban waste management system under uncertainty. Waste Management, 2020. 102: p. 340-350

[23] Nasiri, M.M., et al. Robust Possibilistic Programming Approach for the Design of Tehran Municipal Solid Waste Management System. in 13th International Conference on Industrial Engineering (IIEC 2017), Mazandaran, Iran. 2017.

[24] Kůdela, J., et al., Robust waste transfer station planning by stochastic programming. Chemical Engineering Transactions, 2018. 70: p. 889-894.

[25] Yadav, V., et al., A facility location model for municipal solid waste

management system under uncertain environment. Science of the Total Environment, 2017. 603: p. 760-771

[26] Habibi, F., 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, 2017. 166: p. 816-834.

[27] Karagoz, S., N. Aydin, and E. Isikli, Decision making in solid waste management under fuzzy environment, in Intelligence Systems in Environmental Management: Theory and Applications. 2017, Springer. p. 91-115.

[28] Wang, Y., et al., Site selection for municipal solid waste landfill considering environmental health risks. Resources, Conservation and Recycling, 2018. 138: p. 40-46.

[29] Dimitrijević, B., B. Ratković, and M. Šelmić, a multi-objective model for undesirable facility location. 2017.

[30] Rabbani, M., M. Mokhtarzadeh, and H. Farrokhi-Asl, A New Mathematical Model for Designing a Municipal Solid Waste System Considering Environmentally Issues. International Journal of Supply and Operations Management, 2018. 5(3): p. 234-255.

[31] Yousefloo, A. and R. Babazadeh, Designing an integrated municipal solid waste management network: A case study. Journal of Cleaner Production, 2020. 244: p. 118824.

[32] Barrena, E., et al., optimizing container location for selective collection of urban solid waste. Waste Management and the Environment IX, 2019. 231: p. 1.

[33] Bertsimas, D. and M. Sim, The price of robustness. Operations research, 2004. 52(1): p. 35-53