

## مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای طراحی شبکه مدیریت پسماندهای شهری تحت شرایط برگزاری مزایده

نسترن صادقیان شریف\*، میرسامان پیشوایی\*\*

### چکیده

در این پژوهش طراحی شبکه برای مدیریت پسماندهای شهری از دید یک سازمان که زباله‌های مختلف را جمع‌آوری کرده (مانند شهرداری) و در ازای دریافت زباله به مناطق تولید زباله پول پرداخت می‌کند، مطالعه شده است. تعیین مبلغ پرداختی برای دریافت زباله و همچنین تصمیم در مورد برون‌سپاری پس از دریافت زباله‌های تفکیک‌شده، موضوع‌هایی هستند که باید در مورد آن تصمیم‌گیری شود. در صورت برون‌سپاری، مزایده برگزار می‌شود و شرکت‌های بازیافتی و کمپوستی با ارائه قیمت در این مزایده شرکت می‌کنند. شرکت مناسب در صورت وجود انتخاب می‌شود و در صورتی که برون‌سپاری صرفه اقتصادی نداشته باشد، زباله‌ها توسط خود سازمان جمع‌آوری‌کننده پردازش می‌شوند و تصمیم‌های مربوطه برای تأسیس تسهیلات و مکان‌یابی و تخصیص آن‌ها به نقاط تولید زباله اخذ می‌شود. مسئله در قالب یک مدل دوسطحی مدل‌سازی شد که در سطح اول سازمان جمع‌آوری‌کننده به‌عنوان رهبر و در سطح دوم شرکت‌های داوطلب برای شرکت در مزایده در نقش پیرو با هم رقابت می‌کنند و تصمیم‌گیرنده هستند.

**کلیدواژه‌ها:** طراحی شبکه جمع‌آوری زباله و پسماند شهری؛ مدیریت پسماندهای شهری، برنامه‌ریزی دوسطحی، مزایده، قیمت‌گذاری.

---

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۷/۱۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۷.

\* دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

\*\* استادیار، دانشگاه علم و صنعت ایران (نویسنده مسئول).

## ۱. مقدمه

امروزه مدیریت پسماندهای جامد شهری در میان کشورهای آسیایی در حال بهبود است [۱۹]. شبکه مدیریت پسماند از لحظه‌ی جمع‌آوری زباله تا مرحله برخورد نهایی و دفع زباله را شامل می‌شود [۲۲]. از مهم‌ترین شاخص‌های زندگی بشر حفاظت از منابع تولید است و بشر دریافته است که تبعات و پیامدهای خسارت‌باری که پسماند به طبیعت وارد می‌کند بسیار زیاد است. مدیریت پسماند شهری مفاهیمی چون بازیافت، استفاده‌ی مجدد، پایداری و دوستی با محیط‌زیست را شامل می‌شود [۶]. مدیریت پسماند شهری نه تنها یک چالش اصلی برای جامعه محسوب می‌شود؛ بلکه زمینه‌ساز رشد بسیاری از مشاغل بالقوه است [۲۲]. امروزه با گسترش شهرنشینی مدیریت درست پسماندهای شهری به یک مسئله بزرگ برای شهرها تبدیل شده است. مدیریت پسماندهای شهری شامل تمامی مراحل انتقال و جمع‌آوری از محل تولید زباله تا بازیافت، دفع و یا هر برخورد دیگری با آن است [۱۷]. یک زنجیره جمع‌آوری زباله از اجزای مختلفی چون ایستگاه‌های جمع‌آوری زباله، ایستگاه‌های انتقال و تسهیلات دفع تشکیل شده است. هدف اصلی مدیریت پسماند جمع‌آوری و دفع صحیح زباله به گونه‌ای است که علاوه بر کمینه‌کردن هزینه سیستم، آلودگی‌های وارده بر محیط‌زیست نیز کمینه شود [۴۰]. به صورت کلی در برخورد با مواد برگشتی در طی یک زنجیره تأمین معکوس چهار راهکار عمومی وجود دارد: ۱. کاهش تولید زباله؛ ۲. استفاده مجدد از اقلام موردنیاز؛ ۳. جمع‌آوری و سپس جداسازی زباله‌ها و بازیافت زباله‌های قابل بازیافت؛ ۴. تولید انرژی<sup>۴</sup> (گرما، الکتریسیته). چون عملکرد نهایی سیستم جمع‌آوری پسماند از انتخاب روش‌های مناسب برخورد متأثر است، تعیین اینکه برای هر زباله از چه روشی باید استفاده کرد، بسیار مهم است. هرچند مدل‌های بسیار موفقی در زمینه برخورد با زباله ارائه شده است، بیشتر آن‌ها انواع روش‌های برخورد را به صورت ترکیبی در نظر نگرفته‌اند [۲۵، ۱۲، ۲۴، ۳۰]؛ درحالی‌است که در فضای رقابتی امروز استفاده حداکثری از انرژی ذخیره‌شده در هر یک از محصولات برگشتی بسیار تأثیرگذار است؛ همچنین برای کمینه‌سازی اثرات منفی وارده بر محیط‌زیست باید هر زباله به روش بهینه مختص خود مدیریت شود.

بحث تفکیک زباله‌ها مبحث مهمی در مدیریت پسماند محسوب می‌شود؛ زیرا بخش زیادی از انرژی و هزینه صرف‌شده را به خود اختصاص می‌دهد؛ بنابراین اگر بتوان این بخش را حذف و از زباله‌های تفکیک‌شده استفاده کرد، عملکرد سیستم بهبود خواهد یافت؛ از این رو امروزه بحث تفکیک زباله از مبدأ رواج یافته است. یکی از روش‌های ایجاد انگیزه در مردم برای جداسازی زباله‌ها در مبدأ قیمت‌گذاری مناسب برای دریافت زباله‌های تفکیک‌شده است. قیمت‌گذاری جزء

---

1. Reduce  
2. Reuse  
3. Recycle  
4. Recover

مهم مدل کسب‌وکار است و تصمیم در مورد آن تأثیرات زیادی بر سودآوری نهایی دارد. قیمت‌گذاری یکی از ابزارهای مهم در برنامه‌ریزی بلندمدت تخصیص کارای منابع است و سیاست‌های قیمت‌گذاری باید تمام ابعاد تأثیرگذار را در نظر بگیرد تا از ایجاد شوک‌های ناگهانی جلوگیری شود [۲۷]؛ بنابراین قیمت باید با توجه به کیفیت زباله و اینکه چقدر ارزش بازیافت و بازیابی دارد، مشخص شود.

در بازار رقابتی امروز بسیاری از شرکت‌ها با روی آوردن به برون‌سپاری فعالیت‌های مختلف به دنبال سودآوری بیشتر هستند. سود حاصل از برون‌سپاری تا حد بسیار زیادی به انتخاب یک شریک مناسب وابسته است. یکی از روش‌های برون‌سپاری فعالیت‌ها، برگزاری مزایده است. در برگزاری مزایده شرکت‌های شرکت‌کننده رقیب محسوب می‌شوند و برای ارائه قیمت به رقابت می‌پردازند. این رقابت بسته به نوع مزایده می‌تواند متفاوت باشد. عواملی چون تعداد دفعاتی که شرکت‌کنندگان می‌توانند قیمت پیشنهادی را تغییر دهند، خبرداشتن و نداشتن رقیب از تصمیم یکدیگر، عواملی که در تصمیم‌گیری شرکت‌کنندگان تأثیرگذار است، می‌تواند انواع مختلف مزایده را شکل دهد. با توجه به شدت رقابت که در نتیجه تعداد رقبای حاضر صورت می‌گیرد، سازمان‌ها روش‌های قیمت‌گذاری مختلفی به کار می‌گیرند [۲۳]. استفاده از نظریه بازی‌ها راه‌کاری مؤثر برای حل این مسائل، به دلیل رقابت میان شرکت‌کنندگان، است. در حوزه مدیریت زباله‌های شهری در شهر تهران، شهرداری به برگزاری مناقصات و مزایده‌های مختلف می‌پردازد. فعالیت‌های چون جمع‌آوری زباله‌ها، تفکیک زباله‌ها و پردازش آن‌ها به‌طور مجزا از طریق برگزاری مناقصات و مزایده‌ها به شرکت‌های پیمان‌کاری برون‌سپاری می‌شود. در این مقاله موضوع برون‌سپاری پردازش زباله‌ها از طریق برگزاری مزایده بررسی شده است؛ به عبارتی زباله‌های خام هر منطقه از طریق برگزاری مزایده به فروش می‌رسد. ابتدا ارزش تقریبی زباله‌های مناطق توسط کارشناسان شهرداری تخمین زده می‌شود و بعد از تعیین یک قیمت پایه و حداقلی شرکت‌ها به رقابت با یکدیگر می‌پردازند و با پیش‌بینی قیمت رقبا قیمت خود را ارائه می‌دهند. در نهایت قیمت بالاتر برنده مزایده خواهد بود.

هدف اصلی این مقاله ارائه یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی چند محصولی به‌منظور بهینه‌سازی سود شهرداری و نیز بیشینه‌کردن سود شرکت‌کنندگان در مزایده برای دریافت زباله است. این مدل دوسطحی شامل سطح اول که تصمیم‌های مربوط به شهرداری و سطح دوم که مربوط به تصمیم‌های شرکت‌کنندگان در مزایده است. در پژوهش حاضر در سطح اول شهرداری به‌عنوان رهبر به تصمیم‌های مربوط به طراحی شبکه، قیمت‌گذاری، اخذ تصمیم‌های مربوط به برون‌سپاری و عدم‌برون‌سپاری، برگزاری مزایده و انتخاب شرکت موردنظر می‌پردازد. در این بخش قیمت خرید زباله از مناطق تولید زباله متغیر تصمیم است و با توجه به حجم و

کیفیت زباله دریافتی از مناطق تولید زباله، توسط مدل تعیین می‌شود. در سطح دوم شرکت‌کنندگان در مزایده به‌عنوان پیرو تصمیم‌های مربوط به تعیین قیمت پیشنهادی برای شرکت در مزایده را اخذ می‌کنند.

ادامه پژوهش حاضر بدین ترتیب سازمان‌یافته است. در بخش ۲ مقاله، مروری بر مبانی نظری موضوع صورت می‌گیرد. در بخش ۳ به تعریف مسئله و بیان مفروضات، ارائه یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای طراحی شبکه مدیریت پسماندهای شهری تحت شرایط برگزاری مزایده و همچنین تشریح روش حل استفاده‌شده در پژوهش، پرداخته می‌شود. در بخش ۴ نتایج مدل، تحلیل و بررسی می‌شود؛ در نهایت بخش ۵ به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها اختصاص می‌یابد.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

نخستین بار مکان‌یابی در حوزه زباله‌های خطرناک در مورد مکان‌یابی مراکز دفن و مراکز برخورد مطرح شد. مکان‌یابی این مراکز در مبانی نظری عموماً با عنوان «مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب» مطرح شده است.

در زمینه مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب ارکوت و نومان (۲۰۰۳)، پژوهش‌های بسیاری انجام داده و مقاله‌های بسیاری در این زمینه منتشر کرده‌اند [۱۱].

در بحث عدم‌قطعیت، ژنگ و همکاران (۲۰۱۱)، یک مدل چندسطحی برای مدیریت زباله‌های شهری در شرایط عدم‌قطعیت ارائه دادند [۴۰]. طبق جدول ۱، پژوهشگران دیگری چون وحدانی و نادری بنی (۲۰۱۴)، برگلند و وان (۲۰۱۴) و سجادی و همکاران (۲۰۱۰)، در این زمینه کار کرده‌اند [۳۱، ۵، ۲۴]. مسئله‌ای چندمعیاره توسط تاواریس و همکاران (۲۰۱۱)، مطرح شد. در این مسئله مکان‌یابی کوره‌ها و مراکز سوزاندن زباله‌های شهری موردبررسی قرار گرفت و به‌طور هم‌زمان اهدافی چون کمینه‌کردن هزینه‌های اقتصادی، آسیب‌های زیست‌محیطی، آسیب‌های سلامتی و هزینه‌های اجتماعی دنبال شد [۲۹]. تعدادی از این اهداف در مدل آچیل‌اس و همکاران (۲۰۱۱) موردبررسی قرار گرفت؛ زیرا زباله‌های در نظر گرفته‌شده در این مسئله ترکیبی از زباله‌های الکترونیکی سمی و غیرسمی بود [۱]. اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در مقاله‌های پژوهشگرانی چون ازکویل و همکاران (۲۰۱۳)، قابل مشاهده است [۱۲]. با توجه به جدول ۱، نوع روش برخورد در میان مقاله‌ها متفاوت است. چندین روش متفاوت از جمله دفن، سوزاندن، کمپوست معمولی، کمپوست مکانیکی، کمپوست ورمی، عملیات شیمیایی، میکروبیو، اتوکلاو، بازیافت و چندین نوع روش دیگر در یک مدل چندسطحی برای مدیریت زباله‌های شهری توسط گوپتا و شارما (۲۰۱۱)، ارائه شد [۱۸]. پژوهش دیگری که روش‌های

متعددی برای برخورد در نظر گرفت پژوهش انجی و همکاران (۲۰۱۴)، است که استفاده مجدد، تبدیل حرارتی، تبدیل بیوشیمی، تولیدکننده گاز و هضم بی‌هوازی را نیز در نظر گرفتند [۲۱]. به و همکاران (۲۰۱۱)، مدلی برای مکان‌یابی مراکز بازیافت و تخصیص انبارها به آن‌ها مطرح کردند؛ مسئله‌ای دوهدفه که در نخستین گام تلاش شد تا تعداد مراکز بازیافت کاهش یابد و در گام دوم هدف کاهش حمل‌ونقل از طریق تخصیص کارآمد انبارها به مراکز بازیافت است [۳۸].

در بخش مدیریت زباله از آنجا که فاکتورهای دیگری جز هزینه موردتوجه هستند؛ بنابراین مسائل چندهدفه بسیاری تحلیل و بررسی شد. از جمله سامانلیوگلو (۲۰۱۳)، یک مسئله مکان‌یابی مسیریابی برای زباله‌های خطرناک و صنعتی ارائه کرد که تابع چندهدفه‌ای در آن لحاظ شده است. این پژوهشگر کمینه‌کردن هزینه‌های کل، کمینه‌کردن ریسک حمل‌ونقل و کمینه‌کردن ریسک تأسیس مراکز برخورد، دفع و جمع‌آوری که به‌اختصار به آن «ریسک سایت» گفته می‌شود را هدف قرار داد [۲۵]. ایسلت (۲۰۱۳)، جمعیت را عاملی مهمی برای مکان‌یابی زمین‌های دفن لحاظ کرد [۱۰]. کمینه‌کردن تغییرات اقلیمی، کمینه‌کردن اثرات مخرب انسانی، کمینه‌کردن استفاده از انرژی‌های فسیلی، کمینه‌کردن اثرات مخرب اکوسیستم، کمینه‌کردن استفاده از منابع معدنی، کمینه‌کردن انتشار آلودگی از جمله اهداف دیگری است که در پژوهش وادنیو (۲۰۱۴)، مطرح شد [۳۰]. دنگ و همکاران (۲۰۱۱)، یک مدل بهینه چندسطحی و چنددوره‌ای را برای بازیافت زباله‌های شهری مطرح کردند و زباله‌های غیرخطرناک را موردبررسی قرار دادند [۹]. داس و همکاران (۲۰۱۱)، محصولات را در سطوح متفاوت لحاظ کردند و بازارهای متفاوتی برای هر دسته در نظر گرفتند [۸]. در این مدل توزیع‌کننده (خرده‌فروش‌ها) به‌عنوان مرکز جمع‌آوری در نظر گرفته شده است. پس از آن مدل چندسطحی و چنددوره‌ای دیگری توسط ژنگ و همکاران (۲۰۱۴)، ارائه شد [۴۱]. به‌جز تسهیلات پردازش زباله و مراکز تولید زباله عناصر دیگری چون ایستگاه‌های انتقال در شبکه جمع‌آوری زباله می‌تواند در بهبود تابع هدف مؤثر باشد. آسفی و لیم (۲۰۱۵)، وجود این عنصر در شبکه جمع‌آوری زباله را بررسی کردند [۳].





در میان پژوهش‌های کارشده در این زمینه در حوزه برون‌سپاری پردازش زباله‌ها کمتر کار شده است و در هیچ پژوهشی از مزایده برای برون‌سپاری استفاده نشده است؛ درحالی‌که در دنیای امروز بسیاری از برون‌سپاری‌ها از طریق برگزاری مناقصات و مزایده‌ها انجام می‌شود. نکته دیگری که در میان پژوهش‌ها کمتر به چشم می‌خورد، موضوع خرید زباله از نقاط تولید زباله است. علی‌رغم اینکه در بسیاری از کشورها حتی در سطوح بین‌المللی زباله خرید و فروش می‌شود؛ اما تعیین قیمت خرید زباله کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در تعداد کمی از پژوهش‌ها که به موضوع خرید زباله اشاره شده است، در هیچ یک قیمت خرید، متغیر تصمیم در نظر نگرفته شده و همواره این مقدار یک پارامتر ثابت بوده است؛ درحالی‌که متغیر بودن قیمت به افزایش چشم‌گیر سود منجر خواهد شد؛ بنابراین در این پژوهش در راستای پرکردن شکاف مبانی نظری در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی ارائه شده است که قدرت تنظیم تصمیم‌ها و طراحی شبکه مدیریت پسماند شهری با توجه به تعادل قدرت بین سازمان جمع‌آوری‌کننده و شرکت‌هایی که عمدتاً به بازیافت زباله در قالب شرکت در مناقصات مربوطه می‌پردازند را دارد.

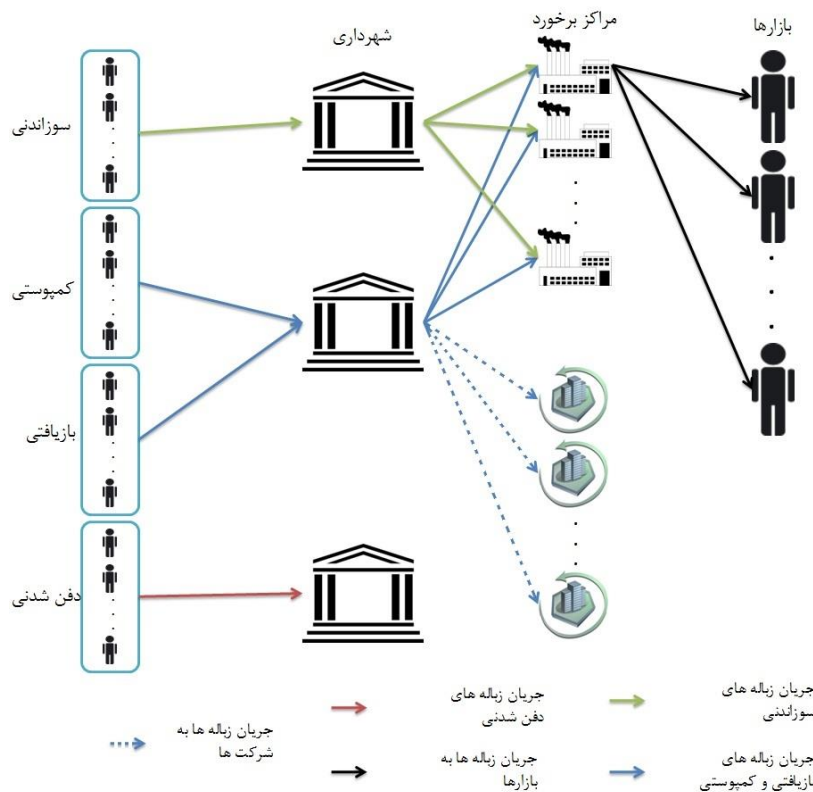
### ۳. روش‌شناسی پژوهش

مسئله مورد بررسی بخشی از شبکه مدیریت پسماند شهر تهران است و نمونه مورد مطالعه در این پژوهش مربوط به مناطق شرق تهران است. در تهران چهار دسته زباله توسط مناطق تولید زباله به شهرداری تهران تحویل داده می‌شود. این چهار دسته شامل زباله‌های بازیافتی، زباله‌های کمپوست‌شدنی، زباله‌های سوزاندنی و زباله‌های دفن‌شدنی هستند. نحوه دریافت زباله‌ها به این ترتیب است که در ارتباط با زباله‌های بازیافتی، کمپوستی و سوزاندنی شهرداری تهران به مناطق تولید زباله پول پرداخت می‌کند و درحقیقت زباله‌ها را از آن‌ها می‌خرد. قیمت خرید زباله‌ها توسط مدل تعیین شده و بسته به میزان زباله دریافتی از مناطق تولید زباله و البته کیفیت زباله‌ها می‌تواند متفاوت باشد. در ارتباط با دسته آخر زباله‌ها که زباله‌های دفن‌شدنی هستند، مناطق تولید زباله به شهرداری شهر تهران پول پرداخت می‌کنند؛ بنابراین در ارتباط با زباله‌های بازیافتی، کمپوستی و سوزاندنی، دریافت زباله از مناطق شهری و نیز پردازش این زباله‌ها هزینه محسوب می‌شود و فروش محصول حاصل از پردازش درآمد را تشکیل می‌دهد؛ درحالی‌که برای زباله‌های دفن‌شدنی دریافت زباله از مناطق شهری درآمد و دفن آن‌ها هزینه محسوب می‌شود.

پس از دریافت زباله‌ها از مناطق شهری برای دو دسته از زباله‌ها (زباله‌های بازیافتی و زباله‌های کمپوستی) شهرداری با دو گزینه روبه‌رو است: گزینه نخست برون‌سپاری پردازش و در عمل فروش زباله‌ها به صورت خام است که این عمل از طریق برگزاری مزایده صورت می‌گیرد. شرکت‌ها قیمت پیشنهادی خود را اعلام می‌کنند و شهرداری برای هر منطقه به صورت جداگانه،



تصمیم می‌گیرد که زباله‌ها را به کدام شرکت بفروشد. زباله‌ها به صورت یکجا به شرکت انتخابی فروخته شده و تقسیم نمی‌شود؛ گزینه دوم این است که زباله‌ها توسط خود شهرداری پردازش شوند که در این صورت تصمیم‌های مربوط به طراحی شبکه باید اخذ شود. بدین ترتیب شرکت‌های بازیافتی و کمپوستی با توجه به تجربه خود و پیش‌بینی قیمت رقبا حدود پایین و بالا برای قیمت ارائه‌شده در نظر می‌گیرند؛ سپس یک درجه عضویت (امکان برد در مزایده) برای قیمت ارائه‌شده در لحاظ می‌کنند که با ارائه قیمت بالاتر درجه عضویت آن نیز بیشتر است و بخشی از تابع هدف شرکت‌ها، بیشینه‌کردن این درجه عضویت است؛ از طرفی برای اینکه سود شرکت نیز بهینه شود، شرکت‌ها با در نظر گرفتن یک حد پایین برای سود خود و با تعریف متغیر تصمیم  $\alpha$  با توجه به روابط ۳۴ تا ۴۰ سعی می‌کنند بیشترین انحراف را از حداقل مقدار سود بگیرند. شهرداری نیز با در نظر گرفتن قیمت پیشنهادی همه شرکت‌های شرکت‌کننده در مزایده و همچنین سود ناشی از پردازش زباله‌ها توسط خود، با هدف بیشینه‌کردن سود نهایی، تصمیم می‌گیرد که زباله‌ها را خود پردازش کند و یا آن‌ها را بفروشد. در مواردی که تصمیم به برون‌سپاری گرفته شود، شرکت پیمان‌کار نیز انتخاب می‌شود. در ارتباط با دسته سوم و چهارم زباله‌ها (زباله‌های سوزاندنی و دفن‌شدنی) شهرداری خود پردازش آن‌ها را انجام می‌دهد؛ بنابراین مکان‌یابی مراکز برخورد و ظرفیت آن‌ها، تخصیص مناطق تولید زباله به مراکز برخورد موردسؤال است. به صورت خلاصه شبکه مدیریت زباله‌های شهری موردبررسی در زنجیره این مدل در شکل ۱، مشاهده می‌شود.



شکل ۱. شبکه مدیریت زباله شهری مورد مطالعه

مفروضات استفاده شده در مدل‌سازی مسئله به صورت زیر است:

- عملاً زباله‌های شهر تهران در مرکزی واقع در کهریزک جداسازی می‌شوند؛ اما در این مسئله فرض شده است که زباله‌ها به صورت تفکیک شده به دست شهرداری می‌رسد؛ بنابراین مرکزی به عنوان مرکز مرتب‌سازی در نظر گرفته نشده است. مشابه این فرض در مدل لم و همکاران (۲۰۱۴)، نیز در نظر گرفته شد [۲۱]:

- زباله‌هایی که به صورت تفکیک شده به دست شهرداری می‌رسد به چهار دسته تقسیم‌بندی شده است: دسته‌ی B، زباله‌های خشک و قابل بازیافت که باید بازیافت شوند؛ زباله‌های دسته‌ی C که زباله‌های کمپوستی هستند؛ زباله‌های دسته‌ی D که زباله‌های سوزاندنی را شامل می‌شوند و زباله‌های دسته‌ی E که زباله‌های دفن‌شدنی هستند. در انواع پژوهش‌ها زباله‌های مختلفی در دسته‌های مختلف در نظر گرفته شده‌اند.

- زباله‌های دسته‌ی B، C و D از مناطق تولید زباله خریداری می‌شوند و قیمت پرداختی به آنان یکی از متغیرهای تصمیم مسئله بوده و متناسب با میزان زباله دریافتی و نیز کیفیت زباله متفاوت

است؛ بدین ترتیب که برای هر دسته زباله یک رابطه تعیین شده است. در این رابطه یک حد بالا و حد پایین برای قیمت تعیین شده است و هر چقدر قیمت پیشنهادی شهرداری به مناطق تولید زباله بیشتر باشد (به حد بالای قیمت نزدیک‌تر باشد)، آن‌ها بیشترین زباله تولیدی خود را در اختیار شهرداری قرار می‌دهند و برعکس. این فرض در ارتباط با نوآوری به‌کاررفته در این مقاله برای این مطالعه به‌کار گرفته شده است.

در رابطه با زباله‌های دسته E که دفن‌شدنی هستند، مناطق تولید زباله به شهرداری پول پرداخت می‌کنند تا این زباله‌ها را از منطقه‌ی خود دور کنند. در اینجا نیز بر اساس رابطه‌ای، هرچقدر قیمتی که شهرداری به مناطق تولید زباله ارائه می‌دهد، کمتر باشد (به حد پایین نزدیک‌تر باشد) مناطق تولید زباله، زباله بیشتری را در اختیار شهرداری قرار می‌دهند و برعکس. با توجه به پژوهش موردبررسی این فرض در نظر گرفته شده است:

- خروجی حاصل از مراکز بازیافت، کمپوست و نیز انرژی حاصل از سوزاندن زباله قابل‌فروش است. این فرض مشابه فرض در نظر گرفته‌شده توسط سدهی و ریمر (۲۰۰۱) است [۲۶]؛

- زباله‌های بازیافتی و کمپوستی می‌توانند توسط خود شهرداری مدیریت شده و یا برون‌سپاری شوند. برون‌سپاری این دسته از زباله‌ها به‌نوعی فروش آن‌ها به‌صورت خام است و عملیات سوزاندن و دفن توسط خود شهرداری انجام می‌شود. این فرض با توجه به ویژگی پژوهش موردبررسی در این مقاله لحاظ شده است.

فروش زباله‌های خام بازیافتی و کمپوستی به شرکت‌ها از طریق برگزاری مزایده صورت می‌گیرد. شرکت‌ها با پیش‌بینی قیمت رقبا یک بار اجازه‌ی ارائه قیمت موردنظر خود را دارند و تا انتهای مزایده حق ندارند قیمت را تغییر دهند و از قیمت پیشنهادی رقبا نیز بی‌خبر هستند. در نظر گرفتن سیستم برگزاری مناقصات توسط شهرداری از این فرض استفاده شده است:

- در مورد فروش زباله‌های یک منطقه به شرکت‌ها تقسیم‌پذیری وجود ندارد؛ بنابراین در میان شرکت‌کنندگان در مزایده برای زباله‌های یک منطقه تمامی زباله‌های آن منطقه به شرکت برنده در مزایده تعلق می‌گیرد. با توجه به آنچه در برگزاری مزایده‌ها در تهران صورت می‌گیرد، این فرض لحاظ شده است.

با توجه به اینکه در این پژوهش دو گزینه برای برخورد با زباله‌های بازیافتی و کمپوستی در نظر گرفته شده است، این امکان وجود دارد که هیچ‌یک از شرکت‌ها در مزایده برنده نشوند و شهرداری خود مسئولیت پردازش زباله‌ها را بر عهده گیرد.

مدل به‌صورت دوسطحی است: سطح اول (رهبر) شهرداری و سطح دوم (پیرو) شرکت‌ها هستند و هدف هر دو سطح بیشینه‌کردن سود است.

مسئله چندکالایی است (چند نوع زباله در نظر گرفته شده است) و تجهیزات بدون هیچ‌گونه

اختلال به فرآیندهای خود ادامه می‌دهند. پژوهش‌های متعددی چندین نوع زباله را در نظر گرفته‌اند. از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به پژوهش سجادی و همکاران (۲۰۱۴) و ماوراتوس و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد [۲۰، ۲۴].

تصمیم‌هایی که در این مدل اخذ می‌شود شامل تصمیم‌هایی در ارتباط با میزان زباله دریافتی از مناطق تولید زباله، قیمت خرید زباله، مکان‌یابی مراکز برخورد، تخصیص مراکز تولید زباله به تسهیلات برخورد، تصمیم در مورد فروش و یا عدم‌فروش زباله‌های خام بازیافتی و کمپوستی به‌صورت خام به شرکت‌ها و تعیین شرکت موردنظر در مزایده است.

### فرموله بندی مسئله

#### اندیس‌ها

|      |                         |     |                         |
|------|-------------------------|-----|-------------------------|
| $i$  | اندیس مراکز تولید زباله | $n$ | اندیس مراکز دفن         |
| $l$  | اندیس مراکز سوزاندن     | $m$ | اندیس مراکز کمپوست      |
| $h$  | اندیس مراکز بازیافت     | $h$ | اندیس شرکت‌های بازیافتی |
| $h'$ | اندیس شرکت‌های کمپوستی  |     |                         |

بر اساس اندیس‌های تعریف شده پارامترهای سطح اول مطابق با جدول ۲ و نیز متغیرهای این سطح مطابق جدول ۳، تعریف می‌شوند.

جدول ۲. پارامترهای سطح اول

| توضیح پارامتر  | نوع زیاله | پارامتر      |
|--|-----------|--------------|
| هزینه ثابت تأسیس مرکز بازیافت $l$ ، مرکز سوزاندن $j$ ، مرکز کمپوست $m$ مرکز دفن $n$  | بازیافتی  | $FR_l$       |
|  | سوزاندنی  | $FI_j$       |
|  | کمپوستی   | $FC_m$       |
|  | دفن شدنی  | $FL_n$       |
| ظرفیت برای مرکز بازیافت $l$ ، مرکز سوزاندن $j$ ، مرکز کمپوست $m$ مرکز دفن $n$  | بازیافتی  | $RR_l$       |
|  | سوزاندنی  | $RI_j$       |
|  | کمپوستی   | $RC_m$       |
|  | دفن شدنی  | $RL_n$       |
| قیمت فروش کالاهای حاصل از بازیافت، کود حاصل از کمپوست و انرژی حاصل از سوزاندن زیاله‌ها به بازار  | بازیافتی  | $lb$         |
|  | سوزاندنی  | $ld$         |
|  | کمپوستی   | $lc$         |
| تقاضای بازار برای کالاهای بازیافتی، کود و برق حاصل از سوزاندن زیاله‌ها   | بازیافتی  | $db$         |
|  | سوزاندنی  | $dd$         |
| هزینه بازیافت هر واحد زیاله بازیافتی در مرکز $l$ ، زیاله سوزاندنی در مرکز $j$ ، زیاله کمپوستی در مرکز $m$ و دفن زیاله‌های دفن شدنی در مرکز $n$ | کمپوستی   | $dc$         |
|  | بازیافتی  | $CB_l$       |
|  | سوزاندنی  | $CI_j$       |
| بیشترین مقدار زیاله تولیدی در سطح کیفیت بازیافتی، سوزاندنی، کمپوستی و دفن شدنی توسط مرکز تولید زیاله $i$                                       | کمپوستی   | $CC_m$       |
|  | بازیافتی  | $QR_i^{max}$ |
|  | سوزاندنی  | $QI_i^{max}$ |
| کمترین مقدار زیاله تولیدی در سطح کیفیت بازیافتی، سوزاندنی، کمپوستی و دفن شدنی توسط مرکز تولید زیاله $i$  | کمپوستی   | $QC_i^{max}$ |
|  | دفن شدنی  | $QL_i^{max}$ |
|  | بازیافتی  | $QR_i^{min}$ |
| درصدی از کل زیاله‌های بازیافتی، سوزاندنی و کمپوستی که قابل بازیابی هستند.  | سوزاندنی  | $QI_i^{min}$ |
|  | کمپوستی   | $QC_i^{min}$ |
|  | دفن شدنی  | $QL_i^{min}$ |
| حد پایین قیمت پیشنهادی شرکت $h$<br>حد پایین قیمت پیشنهادی شرکت $h'$<br>حد بالای قیمت پیشنهادی شرکت $h$<br>حد بالای قیمت پیشنهادی شرکت $h'$     | بازیافتی  | $\alpha$     |
|  | سوزاندنی  | $\gamma$     |
|  | کمپوستی   | $\beta$      |
|  | بازیافتی  | $prmin_h$    |
| میانگین درآمد فروش زیاله‌های بازیافتی و کمپوستی برای مرکز تولید زیاله $i$  | کمپوستی   | $pcmin_{h'}$ |
|  | بازیافتی  | $prmax_h$    |
|  | کمپوستی   | $pcmax_{h'}$ |
|  | بازیافتی  | $\bar{pr}_i$ |
| بودجه شرکت برای تأسیس مراکز  | کمپوستی   | $\bar{pc}_i$ |
|  |           | $B$          |

جدول ۳. متغیرهای سطح اول

| متغیر      | نوع زیاله | توضیح متغیر  |
|------------|-----------|--|
| $x_i$      | بازیافتی  |  |
| $z_j$      | سوزاندنی  | اگر مرکز بازیافت $l$ ، مرکز سوزاندن $j$ ، مرکز کمپوست $m$ و مرکز دفن $n$ تأسیس شوند، برابر یک است و در غیر این صورت برابر صفر می‌شود.  |
| $y_m$      | کمپوستی   |  |
| $u_n$      | دفن‌شدنی  |  |
| $WB_i$     | بازیافتی  |  |
| $WD_i$     | سوزاندنی  | کل هزینه خرید زیاله‌های بازیافتی، سوزاندنی، کمپوستی و دفن‌شدنی از مرکز تولید زیاله $i$   |
| $WC_i$     | کمپوستی   |  |
| $WE_i$     | دفن‌شدنی  |  |
| $QR_{il}$  | بازیافتی  |  |
| $QI_{ij}$  | سوزاندنی  | میزان زیاله بازیافتی، سوزاندنی، کمپوستی و دفن‌شدنی که از مراکز تولید زیاله $i$ دریافت می‌شود و به مراکز بازیافت $l$ ، مراکز سوزاندن $j$ ، مراکز کمپوست $m$ و مراکز دفن $n$ ارسال می‌شود. |
| $QC_{im}$  | کمپوستی   |  |
| $QL_{in}$  | دفن‌شدنی  |  |
| $QRO_{ih}$ | بازیافتی  | میزان زیاله بازیافتی خریداری‌شده از مرکز تولید زیاله $i$ که به شرکت بازیافتی $h$ فروخته می‌شود.  |
| $QCO_{ih}$ | کمپوستی   | میزان زیاله کمپوستی خریداری‌شده از مرکز تولید زیاله $i$ که به شرکت کمپوستی $h$ فروخته می‌شود.  |
| $hr_{ih}$  | بازیافتی  | اگر زیاله‌های تولیدشده بازیافتی در مرکز تولید زیاله $i$ به شرکت بازیافتی $h$ فروخته شود، برابر یک است و در غیر این صورت برابر صفر می‌شود.  |
| $hc_{ih}$  | کمپوستی   | اگر زیاله‌های تولیدشده کمپوستی در مرکز تولید زیاله $i$ به شرکت کمپوستی $h$ فروخته شود، برابر یک است و در غیر این صورت برابر صفر می‌شود.  |

**تابع هدف و محدودیت‌های سطح اول.** سود حاصل عبارت است از: مجموع عواملی چون اختلاف سود حاصل از زیاله‌های بازیافتی (سود از طریق برون‌سپاری و یا سود ناشی از بازیافت زیاله توسط خود سیستم) و قیمت خرید زیاله‌های بازیافتی، اختلاف سود حاصل از زیاله‌های کمپوستی (سود از طریق برون‌سپاری و یا سود ناشی از کمپوست زیاله توسط خود سیستم) و قیمت خرید زیاله‌های کمپوستی، اختلاف سود حاصل از زیاله‌های سوزاندنی (اختلاف قیمت فروش و هزینه‌ی سوزاندن برای یک واحد زیاله‌ی سوزاندنی در مجموع زیاله‌های سوزاندنی دریافتی) و قیمت خرید زیاله‌های سوزاندنی، اختلاف میزان پول دریافتی در ازای دفع زیاله‌های دفن‌شدنی. هزینه دفن و نیز هزینه‌های تأسیس تسهیلات باید کسر شود.

$$z = \sum_i (\bar{p}r_i - wb_i) + \sum_i (\bar{p}c_i - wc_i) + \quad (1)$$

$$\sum_i \sum_j ((\gamma m_{ij} l d) - \gamma q_{ij} c_{ij} - wd_i) + \sum_i (we_i - \sum_n c_{ln} q_{lin})$$

$$\sum_l f r_l x_l - \sum_m f m_m y_m - \sum_n f l_n u_n - \sum_j f i_j z_j$$

$$\sum_l QR_{li} \leq QR_i^{max} p s_i \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_m QC_{mi} \leq QC_i^{max} p s'_i \quad \forall i \quad (3)$$

محدودیت‌های ۲ و ۳ علاوه بر رعایت حد بالای زباله‌های تولیدشده هر شهر، تضمین می‌کنند در صورتی که سیاست عدم‌برون‌سپاری انتخاب شد، زباله‌ها برای پردازش به مراکز برخورد ارسال شوند.

$$\sum_j QI_{ji} \leq QI_i^{max} \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_n QL_{ni} \leq QL_i^{max} \quad \forall i \quad (5)$$

محدودیت‌های ۴ و ۵ رعایت حد بالای میزان زباله تولیدشده در هر شهر را نشان می‌دهند.

$$QC_{mi} \leq y_m QC_i^{max} \quad \forall i, m \quad (6)$$

محدودیت ۶ برای تضمین اینکه زباله‌های هر شهر در صورت تأسیس آن مرکز، به آن نقطه ارسال شوند است.

$$QRO_i \leq QR_i^{max} \sum_h h r_{ih} \quad \forall i \quad (7)$$

$$QCO_i \leq QC_i^{max} \sum_{h'} h c_{ih'} \quad \forall i \quad (8)$$

محدودیت‌های ۷ و ۸، امکان برون‌سپاری زباله‌های هر شهر را تنها در صورتی مجاز می‌دارد که سیاست برون‌سپاری اتخاذ شده باشد.

$$wbmin_i \leq wb_i \leq wmax_i \quad \forall i \quad (۹)$$

$$wdmin_i \leq wd_i \leq wmax_i \quad \forall i \quad (۱۰)$$

$$wemin_i \leq we_i \leq wemax_i \quad \forall i \quad (۱۱)$$

$$wcm_i \leq wc_i \leq wcm_i \quad \forall i \quad (۱۲)$$

محدوده‌ی قیمت خرید زباله از مراکز تولید زباله توسط محدودیت‌های ۹ تا ۱۲ تعیین می‌شود.

$$\sum_j QI_{ji} = QI_i^{min} + \left( \frac{wd_i - wdmin_i}{wmax_i - wdmin_i} \right) (QI_i^{max} - QI_i^{min}) \quad \forall i \quad (۱۳)$$

$$\sum_l QL_{li} = QL_i^{min} + \left( \frac{we_i - wemin_i}{wemax_i - wemin_i} \right) (QL_i^{max} - QL_i^{min}) \quad \forall i \quad (۱۴)$$

$$QRO_i + \sum_l QR_{li} = QR_i^{min} + \left( \frac{wb_i - wbmin_i}{wmax_i - wbmin_i} \right) * (QR_i^{max} - QR_i^{min}) \quad \forall i \quad (۱۵)$$

$$QCO_i + \sum_m QC_{mi} = QC_i^{min} + \left( \frac{wc_i - wcm_i}{wmax_i - wcm_i} \right) * (QC_i^{max} - QC_i^{min}) \quad \forall i \quad (۱۶)$$

محدودیت‌های ۱۳ تا ۱۶ رابطه متناسب بین قیمت‌های تعیین شده برای خرید زباله و میزان زباله دریافتی از منطقه موردنظر را تعیین می‌کنند؛ به عبارتی از آنجا که کمترین قیمت پیشنهادی به هر منطقه شهری برابر با دریافت کمترین میزان زباله‌ی تولیدی آن شهر است؛ بنابراین میزان زباله دریافتی از هر منطقه تولید زباله حداقل به اندازه‌ی  $QR_i^{min}$  است؛ سپس به هر اندازه که قیمت پیشنهادی به حد بالای خود نزدیک‌تر باشد، میزان زباله بیشتری از آن منطقه تولید زباله دریافت می‌شود. به این ترتیب با پیشنهاد قیمت بالاتر میزان زباله بالاتری نیز دریافت می‌شود (قیمت پیشنهادی و میزان زباله‌ی دریافتی متغیرهای تصمیم هستند).

$$\bar{pr}_i = (pr_h hr_{ih}) + PS_i [\sum_l \sum_k \alpha QR_{il} (LB_k MB_{lk} - CB_L)] \quad \forall i \quad (۱۷)$$

$$\bar{pc}_i = (pc_h hc_{ih}) + PS'_i [\sum_m \sum_k \beta QC_{im} (LC_k MC_{mk} - CC_m)] \quad \forall i \quad (۱۸)$$



روابط ۱۷ و ۱۸ برای هر شهر کمک می‌کند تا شرکتی که بیشترین قیمت را در مزایده پیشنهاد داده است، برنده شود و در صورتی که قیمت‌های پیشنهادی سود موردنظر را نداشته باشند، برون‌سپاری انجام نمی‌شود.

$$ps_i = 1 - \sum_h hr_{ih} \quad \forall i \quad (19)$$

$$ps'_i = 1 - \sum_{h'} hc_{ih'} \quad \forall i \quad (20)$$

محدودیت‌های ۱۹ و ۲۰، تضمین می‌کنند که دو سیاست برون‌سپاری و عدم برون‌سپاری با هم اخذ نشوند.

$$\sum_i \sum_l \beta QR_{il} \leq db \quad (21)$$

$$\sum_i \sum_j \gamma QI_{ji} \leq dd \quad (22)$$

$$\sum_i \sum_m \alpha QC_{im} \leq dc \quad (23)$$

محدودیت‌های ۲۱-۲۳ مربوط به ارضای تقاضا هستند.

$$\sum_l fr_l x_l + \sum_m fm_m y_m + \sum_j fj_j z_j + \sum_n fn_n u_n \leq B \quad (24)$$

محدودیت ۲۴، مربوط به رعایت بودجه است.

$$\sum_i QR_{il} \leq rr_l x_l \quad \forall l \quad (25)$$

$$\sum_i QI_{ji} \leq ri_j z_j \quad \forall j \quad (26)$$

$$\sum_i QL_{ni} \leq rl_n u_n \quad \forall n \quad (27)$$

$$\sum_i QC_{mi} \leq rc_{m}y_m \quad \forall m \quad (28)$$

محدودیت‌های ۲۵-۲۸، مربوط به رعایت ظرفیت مراکز برخورد هستند.

### پارامترهای سطح دوم

$\pi_{ih}$ : حداقل سودی که شرکت  $h$  برای مزایده برای دریافت زباله‌های بازیافتی شهر  $i$  در نظر دارد.

$\tau_{ih}$ : سود بازیافت هر واحد زباله‌ی شهر  $i$  برای شرکت  $h$

$\pi'_{ih}$ : حداقل سودی که شرکت  $h'$  برای مزایده برای دریافت زباله‌های کمپوستی شهر  $i$  در نظر دارد.

$\tau'_{ih}$ : سود کمپوست هر واحد زباله‌ی شهر  $i$  برای شرکت  $h'$

### متغیرهای سطح دوم

$\alpha_{ih}$ : این متغیر نسبت افزایش سود نهایی از حداقل سود تعیین شده شرکت‌های بازیافتی است.

متغیرهای  $K.K.T$  برای شرکت‌های بازیافتی  $\lambda_{1ih}, \lambda_{2ih}, \lambda_{3ih}, \lambda_{4ih}$

این متغیر نسبت افزایش سود نهایی از حداقل سود تعیین شده‌ی شرکت‌های کمپوستی است.

متغیرهای  $K.K.T$  برای شرکت‌های کمپوستی  $\lambda'_{1ih}, \lambda'_{2ih}, \lambda'_{3ih}, \lambda'_{4ih}$

### تابع هدف و محدودیت‌های سطح دوم

$$Max \mu(PR_{ih}) + \alpha_{ih} \quad \forall i, h \quad (29)$$

این تابع هدف به دنبال بیشینه‌کردن درجه عضویت قیمت پیشنهادی و یا به عبارتی امکان برد در مزایده با ارائه قیمت پیشنهادی است. اگر تنها بیشینه‌کردن امکان برد مدنظر قرار گیرد، آنگاه مدل بدون در نظر گرفتن سود شرکت همواره بالاترین حد قیمت را ارائه می‌دهد تا امکان برد را به حداکثر برساند؛ بنابراین یک متغیر چون  $\alpha$  در نظر گرفته شده است که در اصل انحراف از حد پایین سود شرکت را مشخص می‌کند. با در نظر گرفتن این متغیر در تابع هدف می‌توان

بیشینه‌سازی سود شرکت را از طریق انحراف بیشتر از سود میانگین لحاظ کرد.

$$\mu(PR_{ih}) = \frac{PR_{ih} - PR_{ih}^{min}}{PR_{ih}^{max} - PR_{ih}^{min}} \quad \forall i, h \quad (30)$$

این محدودیت درجه عضویت قیمت پیشنهادی و یا امکان برد در مزایده را نشان می‌دهد. یک حد بالا و حد پایین برای قیمت تعیین می‌شود که شرکت باید با پیش‌بینی قیمت پیشنهادی رقبای آن‌ها را تعیین کند؛ سپس با در نظر گرفتن این حدود امکان برد مشخص می‌شود.

$$PR_{ih}^{min} \leq PR_{ih} \leq PR_{ih}^{max} \quad \forall i, h \quad (31)$$

قیمت پیشنهادی باید در محدوده قرار گیرد.

$$\pi_{ih} = QRO_{ih}\tau_{ih} - PR_{ih} \quad \forall i, h \quad (32)$$

محدودیت ۳۲، سود هر شرکت برای هر شهر را محاسبه می‌کند.

$$(1 + \alpha_{ih})\bar{\pi} \leq \pi_h \quad \forall i, h \quad (33)$$

محدودیت ۳۳، تضمین می‌کند که سود از حداقل سود تعیین شده توسط شرکت بیشتر باشد و حتی‌الامکان به میزان  $\alpha_{ih}$  از آن فاصله داشته باشد.

$$0 \leq \mu(PR_{ih}) \leq 1 \quad \forall i, h \quad (34)$$

$$0 \leq \alpha_{ih} \leq 1 \quad \forall i, h \quad (35)$$

**رویکرد حل مسائل دوسطحی.** مسائل دوسطحی از دو سطح تشکیل شده‌اند که سطح اول را رهبر و سطح دوم را پیرو می‌گویند و هر یک به دنبال بهینه‌کردن اهداف خود با محدودیت‌های مختص به خود هستند. در این مسائل رهبر ابتدا تصمیم می‌گیرد و پیرو بر پایه تصمیم رهبر تصمیم‌های خود را اخذ می‌کند. نخستین بار یک نمونه ساده از یک مسئله دوسطحی توسط استکلبرگ<sup>۱</sup> (۱۹۳۴) در اقتصاد مطرح شد؛ از این‌رو مسائل دوسطحی در دسته مسائل نظریه

1. Stackelberg

بازی‌ها به «بازی استکلبرگ» معروف است [۳۲]. این دسته از مسائل در ۲۰ سال اخیر بسیار مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین تفاوت بین مدل‌هایی که نظریه بازی‌ها را در نظر گرفتند، نوع بازی مورد استفاده است که به تفاوت در روش حل نیز منجر می‌شود. به صورت کلی مدل‌هایی که در حوزه‌ی نظریه بازی‌ها انجام گرفته‌اند را می‌توان بر اساس نوع بازی به سه دسته تقسیم کرد: بازی‌های ایستا، بازی‌های پویا و بازی‌های آینده‌نگر انواع بازی‌هایی هستند که در مدل‌ها به کار برده می‌شوند. مدل‌هایی از نوع بازی استکلبرگ در حوزه بازی‌های با افق آینده‌نگری قرار می‌گیرند. در این دسته مدل‌ها دو دسته بازیکن شامل رهبر و پیرو ایفای نقش کرده و در ابتدا رهبر تصمیم‌گیری می‌کند. بعد از حرکت رهبر پیرو عکس‌العمل نشان می‌دهد و دیگر قادر به تغییر این عکس‌العمل نخواهد بود. بازی‌های استکلبرگ اغلب به مدل‌های برنامه‌ریزی چندسطحی و یا دوسطحی منجر می‌شود که از نظر روش‌های محاسباتی بسیار مشکل هستند [۲۸].

برای حل مسائل دوسطحی، در شرایطی که مسئله پیرو محدب و محدود باشد، می‌توان با استفاده از اعمال شرایط  $K.K.T$  مسئله را به یک مسئله یک‌سطحی تبدیل کرد. استفاده از این روش یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای حل این دسته از مسائل است که در آن مسئله سطح پایین با استفاده از شرایط  $K.K.T$  در مسئله بالا جایگذاری شده و به این ترتیب مسئله به یک مسئله تک‌سطحی تبدیل می‌شود.

**روش  $K.K.T$ .** شرایط کرش - کاهن - تاکر که شرایط لازم بهینگی هستند به صورت زیر است:

$$\nabla f(x) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(x) \quad (36)$$

$$\lambda_i g_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (37)$$

$$g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (38)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (39)$$

محدودیت‌های زیر که شرایط  $K.K.T$  هستند باید به مدل اضافه شوند:

**خطی‌سازی.** از آنجاکه روابط ۱۷-۱۸، ۴۱-۴۷ و ۵۰ شامل متغیرهای غیرخطی هستند؛ بنابراین باید این روابط خطی شوند.

رابطه ۳۶ برای مسئله مورد نظر به شکل محدودیت ۴۰ درمی‌آید.

$$-\left(\frac{1}{pr_{max_{ih}} - pr_{min_{ih}}}\right) - \lambda_{1_{ih}} + \lambda_{2_{ih}} + \lambda_{3_{ih}} = 0 \quad \forall i, h \quad (40)$$

رابطه ۳۷ برای این مسئله به صورت محدودیت‌های ۴۱-۴۵، نوشته می‌شود.

$$-1 + \pi_{ih}\lambda_{3_{ih}} + \lambda_{4_{ih}} = 0 \quad \forall i, h \quad (41)$$

$$pr_{min_{ih}}\lambda_{1_{ih}} - pr_{ih}\lambda_{1_{ih}} = 0 \quad \forall i, h \quad (42)$$

$$pr_{ih}\lambda_{2_{ih}} - pr_{max_{ih}}\lambda_{2_{ih}} = 0 \quad \forall i, h \quad (43)$$

$$\pi_{ih}\lambda_{3_{ih}} + \alpha_{ih}\lambda_{3_{ih}}\pi_{ih} - \tau_{ih}\lambda_{3_{ih}}QRO_{ih} + pr_{ih}\lambda_{3_{ih}} - M\lambda_{3_{ih}}(1 - hr_{ih}) = 0 \quad \forall i, h \quad (44)$$

$$\alpha_{ih}\lambda_{4_{ih}} - \lambda_{4_{ih}} = 0 \quad \forall i, h \quad (45)$$

رابطه ۳۸ برای این مسئله به صورت محدودیت‌های ۴۶-۵۱، نوشته می‌شود.

$$\lambda_{3_{ih}}\alpha_{ih} \leq \lambda_{3_{ih}} \quad \forall i, h \quad (46)$$

$$\alpha_{ih}\lambda_{4_{ih}} \leq \lambda_{4_{ih}} \quad \forall i, h \quad (47)$$

$$pr_{min_{ih}} - pr_{ih} \leq 0 \quad \forall i, h \quad (48)$$

$$pr_{ih} - pr_{max_{ih}} \leq 0 \quad \forall i, h \quad (49)$$

$$\pi_{ih}(1 + \alpha_{ih}) - \tau_{ih}QRO_{ih} + pr_{ih} - M(1 - hr_{ih}) \leq 0 \quad \forall i, h \quad (50)$$

$$\alpha_{ih} \leq 1 \quad \forall i, h \quad (51)$$

با فرض اینکه  $x$  یک متغیر پیوسته و  $y$  یک متغیر صفر و یک است، در این صورت به جای حاصل ضرب این دو متغیر از متغیر  $\theta$  استفاده می‌شود و روابط ۵۲-۵۴ به مدل اضافه می‌شوند.

$$\theta = x.y$$

$$\theta \leq My \quad (52)$$

$$\theta \leq x \quad (53)$$

$$\theta \geq x - M(1 - y) \quad (54)$$

$\delta_{ih}$  و  $v_{ih}$ ،  $\varepsilon_i$ ،  $\xi_{ih}$  ضرب یک متغیر پیوسته در یک متغیر صفر و یک هستند.

$$\delta_{ih} = QRO_i hr_{ih} \quad \xi_{ih} = pr_{ih} hr_{ih} \quad v_{ih} = \lambda 3_{ih} hr_{ih} \quad \varepsilon_i = QR_i ps_i$$

روابط ۵۲-۵۴ برای متغیرهای  $\delta_{ih}$  و  $\varepsilon_i$ ،  $\xi_{ih}$  به شکل محدودیت‌های ۵۵-۶۶ به مدل اضافه می‌شود.

$$\delta_{ih} \leq Mhr_{ih} \quad \forall i, h \quad (55)$$

$$\delta_{ih} \leq QRO_i \quad \forall i, h \quad (56)$$

$$\delta_{ih} \geq QRO_i - M(1 - hr_{ih}) \quad \forall i, h \quad (57)$$

$$\varepsilon_i \leq Mps_i \quad \forall i \quad (58)$$

$$\varepsilon_i \leq QR_i \quad \forall i \quad (59)$$

$$\varepsilon_i \geq QR_i - M(1 - ps_i) \quad \forall i \quad (60)$$

$$\xi_{ih} \leq Mhr_{ih} \quad \forall i, h \quad (61)$$

$$\xi_{ih} \leq pr_{ih} \quad \forall i, h \quad (62)$$

$$\xi_{ih} \geq pr_{ih} - M(1 - hr_{ih}) \quad \forall i, h \quad (63)$$

$$v_{ih} \geq \lambda 3_{ih} - M(1 - hr_{ih}) \quad \forall i, h \quad (64)$$

$$(65)$$

$$v_{ih} \leq \lambda 3_{ih} \quad \forall i, h \quad (66)$$

$$v_{ih} \leq Mhr_{ih} \quad \forall i, h \quad (67)$$

اگر فرض شود  $z$  و  $u$  هر دو متغیری پیوسته باشند و برای  $u$  یک حد پایین و یک حد بالا وجود داشته باشد، در این صورت به جای حاصل ضرب این دو متغیر از متغیر  $\alpha$  استفاده می‌شود و رابطه ۶۸ به مدل اضافه می‌شود.

$$\alpha = z \cdot u$$

$$\underline{uz} \leq \alpha \leq \bar{uz} \quad (68)$$

رابطه‌های  $\varphi_{ih}$ ،  $Q_{ih}$ ،  $\phi_{ih}$ ،  $\rho_{ih}$ ،  $\sigma_{ih}$ ،  $\omega_{ih}$  و ضرب دو متغیر پیوسته هستند.

$$\omega_{ih} = pr_{ih}\lambda_{1ih} \quad \phi_{ih} = QRO_{ih}\lambda_{3ih}$$

$$\sigma_{ih} = \alpha_{ih}\lambda_{4ih} \quad \rho_{ih} = pr_{ih}\lambda_{2ih}$$

رابطه‌ی ۶۸ برای متغیرهای  $\varphi_{ih}$ ،  $Q_{ih}$ ،  $\phi_{ih}$ ،  $\rho_{ih}$ ،  $\sigma_{ih}$ ،  $\omega_{ih}$  به شکل محدودیت‌های ۶۹-۷۴ به مدل اضافه می‌شود.

$$pr_{min_{ih}}\lambda_{1ih} \leq \omega_{ih} \leq pr_{max_{ih}}\lambda_{1ih} \quad \forall i, h \quad (69)$$

$$pr_{min_{ih}}\lambda_{2ih} \leq \rho_{ih} \leq pr_{max_{ih}}\lambda_{2ih} \quad \forall i, h \quad (70)$$

$$pr_{min_{ih}}\lambda_{3ih} \leq Q_{ih} \leq pr_{max_{ih}}\lambda_{3ih} \quad \forall i, h \quad (71)$$

$$0 \leq Q_{ih} \leq \lambda_{3ih} \quad \forall i, h \quad (72)$$

$$0 \leq \sigma_{ih} \leq \lambda_{4ih} \quad \forall i, h \quad (73)$$

$$QRO_i^{min}\lambda_{3ih} \leq \phi_{ih} \leq QRO_i^{max}\lambda_{3ih} \quad \forall i, h \quad (74)$$

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

برای نمایش اعتبار مدل ارائه‌شده و روش حل به‌کاررفته، در این بخش یک مسئله نمونه حل می‌شود. ابعاد مسئله نمونه استفاده‌شده در جدول ۴، ارائه شده است. پارامترهای استفاده‌شده در مسئله نمونه، داده‌های لازم در ارتباط با مناطق شرق شهر تهران از «سازمان مدیریت پسماند شهر تهران» دریافت شد. مناطق شرق تهران مطابق شکل ۲، شامل مناطق ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۸ است. در شهر تهران ۱۱ ایستگاه انتقال وجود دارد که زباله‌های مناطق با توجه به موقعیت این ایستگاه‌ها به این مکان‌ها انتقال می‌یابند و پس از آن به‌صورت یکجا به ایستگاه‌های پردازش منتقل می‌شوند. از آنجا که زباله‌های مناطق ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به «ایستگاه انتقال آزادگان» منتقل می‌شود و زباله‌های منطقه‌ی ۸ به ایستگاه دیگری انتقال می‌یابد؛ بنابراین مناطق ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به‌عنوان مورد مطالعه انتخاب شده‌اند؛ به این ترتیب اطلاعات گردآوری‌شده دقیق‌تر به‌دست می‌آید. فرموله‌سازی مسئله تعداد زیادی پارامتر را شامل می‌شود؛ بنابراین نمایش تمامی این

پارامترها به واسطه محدودیت فضا امکان‌پذیر نیست؛ در نتیجه بعضی از پارامترهای مهم در جدول ۵، ارائه شده است. مقادیر و داده‌ها برای یک واحد زباله در نظر گرفته شده که این واحد در این مسئله معادل با یک تُن زباله است. مدل‌های ریاضی ارائه‌شده در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS کدنویسی و با حل‌کننده CPLEX حل شده‌اند. تمامی آزمایش‌های موردنیاز توسط یک رایانه پنج‌هسته‌ای با ۴ گیگابایت حافظه اجرا شد.

جدول ۴. ابعاد مسئله نمونه

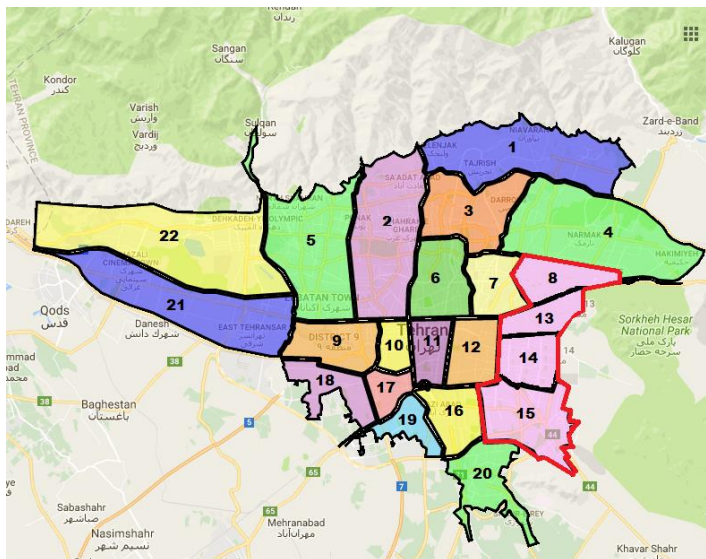
| تعداد مناطق شهری | تعداد شرکت‌های شرکت‌کننده در مزایده | تعداد تسهیلات بالقوه برای تأسیس مراکز برخورد |
|------------------|-------------------------------------|--|
| ۳                | ۴                                   | برای هر دسته زباله ۲ تسهیل                   |

جدول ۵. پارامترهای مهم

| زباله‌های کمیوستی | زباله‌های بازیافتی | میانگین قیمت‌های پیشنهادی شرکت‌ها برای شرکت در مزایده |
|-------------------|--------------------|---|
| ۸ میلیون تومان    | ۱۲ میلیون تومان    | منطقه ۱۳  |
| ۲۵ میلیون تومان   | ۳۶ میلیون تومان    | منطقه ۱۴  |
| ۴۳۰ میلیون تومان  | ۵۵۰ میلیون تومان   | منطقه ۱۵  |
| ۵۴۰۲۰ تُن         |                    | منطقه ۱۳  |
| ۱۱۲۰۵۵ تُن        |                    | منطقه ۱۴  |
| ۱۶۷۹۰۰ تُن        |                    | منطقه ۱۵  |
| ۲۲۴ هزار تومان    | زباله‌های بازیافتی | میزان زباله تولیدی مناطق                              |
| ۶۳ هزار تومان     | زباله‌های کمیوستی  |   |
| ۱۱۸ هزار تومان    | زباله‌های سوزاندنی |   |
| ۳۰ هزار تومان     | زباله‌های دفن شدنی |   |

مقایسه‌ی مدل در دو حالت مختلف برای قیمت خرید: همان‌طور که در جدول ۶، قابل‌مشاهده است، در نظر گرفتن قیمت خرید زباله از مناطق تولیدکننده‌ی زباله می‌تواند در تصمیم‌گیری بهینه و در نتیجه رسیدن به سود بالاتر سازمان را یاری دهد.



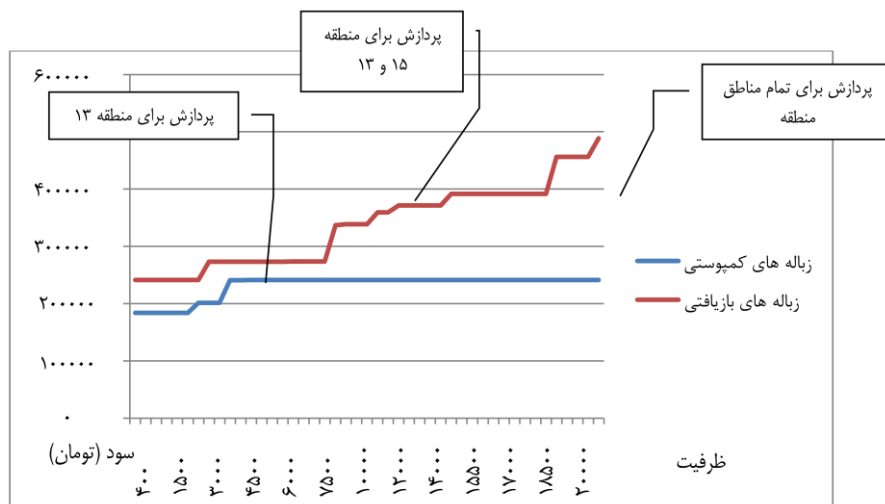


شکل ۲. مناطق شهری تهران

جدول ۶. مقایسه مدل در دو حالت مختلف برای قیمت خرید

| سیاست‌های برون‌سپاری  | سود نهایی        | قیمت خرید زباله از شهروندان |
|---|------------------|-----------------------------|
| برون‌سپاری همه زباله‌های بازیافتی و برون‌سپاری زباله‌های کمپوستی منطقه ۱۵ | ۲۴ میلیارد تومان | متغیر تصمیم                 |
| برون‌سپاری تمامی زباله‌های کمپوستی و بازیافتی مناطق                       | ۱ میلیارد تومان  | پارامتر (یک عدد ثابت)       |

تحلیل حساسیت بر چند پارامتر مهم ظرفیت: تغییرات این پارامتر را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. برای زباله‌های سوزاندنی و دفن‌شدنی که برون‌سپاری نمی‌شود، افزایش ظرفیت به کاهش تعداد تسهیلات لازم منجر می‌شود و سود افزایش می‌یابد. در ارتباط با زباله‌های کمپوستی و بازیافتی، بر اساس نمودار شکل ۲، افزایش ظرفیت برای زباله‌های کمپوستی تغییری در تصمیم نهایی ندارد و در نهایت زباله‌های منطقه ۱۵ برون‌سپاری خواهند شد؛ اما کاهش ظرفیت آن موجب افزایش تعداد تسهیلات لازم می‌شود و در نتیجه سود کاهش می‌یابد؛ اما در ارتباط با زباله‌های بازیافتی افزایش ظرفیت کارخانه‌های بازیافتی باعث می‌شود، برون‌سپاری مناطق متوقف شده و تا جایی که ممکن است پردازش توسط خود شهرداری انجام می‌گیرد و سود نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۳. نمودار تغییرات مدل با تغییرات ظرفیت

جدول ۷. مقادیر شبیه‌سازی شده برای ظرفیت مراکز بازیافت و کمیوست

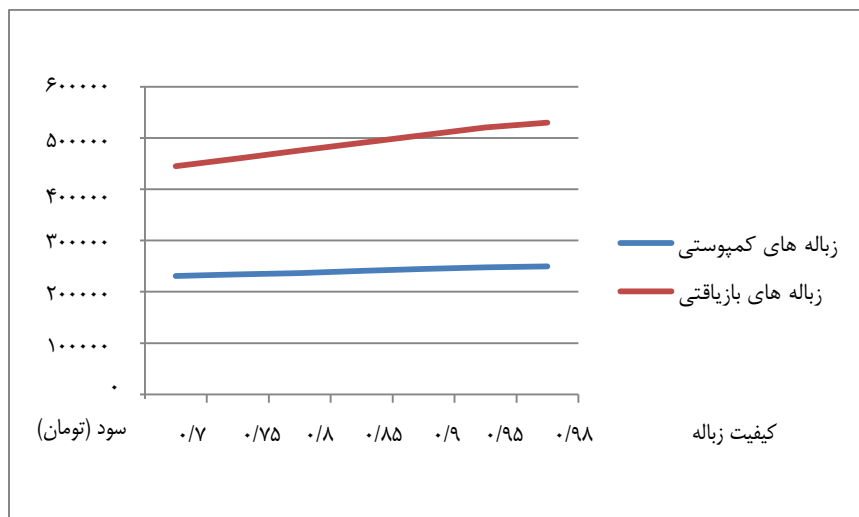
| ظرفیت مراکز بازیافت | سود نهایی          | تصمیم‌های برون‌سپاری | ظرفیت مراکز کمیوست | سود نهایی          | تصمیم‌های برون‌سپاری         |
|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| ۵۲۷                 | $2.41 \times 10^1$ | برون‌سپاری همه مناطق | ۱۰۲۱۱              | $1.83 \times 10^1$ | برون‌سپاری همه مناطق         |
| ۸۱۵                 | $2.41 \times 10^1$ | برون‌سپاری همه مناطق | ۱۶۲۵۹              | $1.83 \times 10^1$ | برون‌سپاری همه مناطق         |
| ۹۴۸                 | $2.41 \times 10^1$ | برون‌سپاری همه مناطق | ۱۸۳۰۶              | $2.02 \times 10^1$ | عدم برون‌سپاری منطقه ۱۳      |
| ۱۲۲۸                | $2.41 \times 10^1$ | برون‌سپاری همه مناطق | ۲۰۱۳۰              | $2.02 \times 10^1$ | عدم برون‌سپاری منطقه ۱۳      |
| ۱۳۶۲                | $2.41 \times 10^1$ | برون‌سپاری همه مناطق | ۲۴۶۲۷              | $2.02 \times 10^1$ | عدم برون‌سپاری منطقه ۱۳      |
| ۱۴۵۲                | $2.41 \times 10^1$ | برون‌سپاری همه مناطق | ۲۹۰۵۴              | $2.02 \times 10^1$ | عدم برون‌سپاری منطقه ۱۳      |
| ۱۷۷۰                | $2.41 \times 10^1$ | برون‌سپاری همه مناطق | ۳۲۸۹۴              | $2.02 \times 10^1$ | عدم برون‌سپاری منطقه ۱۳      |
| ۱۹۴۳                | $2.41 \times 10^1$ | برون‌سپاری همه مناطق | ۳۸۹۰۵              | $2.22 \times 10^1$ | عدم برون‌سپاری منطقه ۱۳      |
| ۲۰۰۶                | $2.41 \times 10^1$ | برون‌سپاری همه مناطق | ۴۳۶۹۱              | $2.22 \times 10^1$ | عدم برون‌سپاری منطقه ۱۳      |
| ۲۶۴۸                | $2.41 \times 10^1$ | برون‌سپاری همه مناطق | ۵۱۱۲۶              | $2.40 \times 10^1$ | عدم برون‌سپاری منطقه ۱۳ و ۱۴ |

|                                 |                    |        |                            |                    |      |
|---------------------------------|--------------------|--------|----------------------------|--------------------|------|
| عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ و ۱۴ | $2.40 \times 10^1$ | ۶۱۰۲۴  | برون‌سپاری همه<br>مناطق    | $2.41 \times 10^1$ | ۳۶۹۸ |
| عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ و ۱۴ | $2.40 \times 10^1$ | ۷۵۸۰۰  | برون‌سپاری همه<br>مناطق    | $2.41 \times 10^1$ | ۳۷۱۴ |
| عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ و ۱۴ | $2.41 \times 10^1$ | ۱۰۵۲۳۶ | برون‌سپاری همه<br>مناطق    | $2.41 \times 10^1$ | ۳۲۰۶ |
| عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ و ۱۴ | $2.41 \times 10^1$ | ۱۵۲۶۸۱ | برون‌سپاری همه<br>مناطق    | $2.41 \times 10^1$ | ۳۳۱۱ |
| عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ و ۱۴ | $2.41 \times 10^1$ | ۱۹۰۱۵۰ | برون‌سپاری همه<br>مناطق    | $2.41 \times 10^1$ | ۳۴۳۵ |
| عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ و ۱۴ | $2.41 \times 10^1$ | ۲۳۰۷۴۵ | عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ | $2.72 \times 10^1$ | ۳۵۲۷ |
| عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ و ۱۴ | $2.41 \times 10^1$ | ۳۹۴۹۰  | عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ | $2.73 \times 10^1$ | ۴۰۰۳ |
| عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ و ۱۴ | $2.41 \times 10^1$ | ۴۲۰۰۱۲ | عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ | $2.73 \times 10^1$ | ۴۰۹۰ |
| عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ و ۱۴ | $2.41 \times 10^1$ | ۴۸۰۲۵۶ | عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ | $2.73 \times 10^1$ | ۴۱۸۷ |
| عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ و ۱۴ | $2.41 \times 10^1$ | ۵۴۹۸۸۱ | عدم‌برون‌سپاری<br>منطقه ۱۳ | $2.73 \times 10^1$ | ۴۴۶۰ |

جدول ۸. مقادیر شبیه‌سازی شده برای ظرفیت مراکز سوزاندن و دفن

| ظرفیت مراکز سوزاندن | سود نهایی        | تعداد تسهیلات | ظرفیت مراکز دفن | سود نهایی             | تعداد تسهیلات |
|---------------------|------------------|---------------|-----------------|-----------------------|---------------|
| ۴۵۶۳۷               | مسئله جواب ندارد | _____         | ۲۱۴۲۴           | _____                 | _____         |
| ۵۰۴۸۴               | مسئله جواب ندارد | _____         | ۲۷۵۰۶           | _____                 | _____         |
| ۵۱۱۹۹               |                  |               | ۲۹۴۲۴           |                       |               |
| ۶۳۰۲۱               |                  |               | ۳۴۶۹۱           |                       |               |
| ۷۰۶۳۲               |                  |               | ۳۵۱۰۵           |                       |               |
| ۷۴۶۲۲۴              |                  | ۲ تسهیل       | ۳۵۴۹۳           | $۲.۴۱ \times ۱۰^{۱۰}$ |               |
| ۸۱۰۳۲               |                  |               | ۳۶۹۲۴           |                       |               |
| ۸۵۹۸۰               |                  |               | ۳۹۳۷۰           |                       |               |
| ۹۲۳۰۶               |                  | ۲ تسهیل       | ۴۰۰۹۱           | $۲.۳۶ \times ۱۰^{۱۰}$ |               |
| ۹۴۶۵۴               |                  |               | ۴۲۹۷۸           |                       |               |
| ۹۵۷۱۴               |                  |               | ۴۳۷۲۳           |                       |               |
| ۹۸۰۶۲               |                  |               | ۴۵۷۴۲           |                       |               |
| ۱۰۵۶۹۴              |                  |               | ۴۶۵۱۶           |                       |               |
| ۱۱۰۰۹۸              |                  |               | ۴۹۱۵۳           |                       |               |
| ۱۱۹۸۲۰              |                  |               | ۵۳۱۵۶           |                       |               |
| ۱۲۵۰۴۳              |                  | ۱ تسهیل       | ۵۷۴۶۵           | $۲.۵۸ \times ۱۰^{۱۰}$ |               |
| ۱۲۸۰۰۶              |                  |               | ۶۳۹۴۰           |                       |               |
| ۱۳۲۶۴۸              |                  | ۱ تسهیل       | ۶۸۶۰۱           | $۲.۴۱ \times ۱۰^{۱۰}$ |               |
| ۱۳۹۹۸۵              |                  |               | ۷۰۵۸۱           |                       |               |
| ۱۴۵۶۰۳              |                  |               | ۷۲۶۴۵           |                       |               |

**کیفیت زباله.** کیفیت زباله بازگشتی یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در سود است؛ بنابراین با بهبود کیفیت اولیه محصولاتی که بعد از استفاده به چرخه بازیافت و پردازش برمی‌گردند می‌توان ارزش افزوده بیشتری تولید کرد. با ملزم کردن کارخانه‌ها برای رعایت استانداردها که در نهایت به تولید با کیفیت بهتر منجر می‌شود می‌توان کیفیت زباله‌های نهایی را نیز بهبود داد. در حال حاضر تنها ۷۰ درصد از زباله‌های بازیافتی و ۸۵ درصد از زباله‌های کمپوستی قابل استفاده برای پردازش هستند. همان‌طور که در نمودار ۳، مشخص است با افزایش کیفیت زباله‌های نهایی سودآوری با شیب مطلوبی افزایش می‌یابد؛ به‌خصوص در ارتباط با زباله‌های بازیافتی شیب نمودار بیشتر است که اهمیت کیفیت زباله‌های بازیافتی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. روند تغییرات سود بر اساس بهبود کیفیت زباله‌ها

جدول ۹. مقادیر شبیه‌سازی شده برای درصد قابل بازیابی زباله‌ها

| سود نهایی             | درصد قابل سوزاندن زباله | سود نهایی             | درصد قابل کمپوست زباله | سود نهایی             | درصد قابل بازیافت زباله |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| $1.56 \times 10^{10}$ | ۵۰                      | $2.76 \times 10^{10}$ | ۵۱                     | $2.60 \times 10^{10}$ | ۵۲                      |
| $1.58 \times 10^{10}$ | ۵۱                      | $2.81 \times 10^{10}$ | ۵۵                     | $2.61 \times 10^{10}$ | ۵۵                      |
| $1.67 \times 10^{10}$ | ۵۵                      | $2.87 \times 10^{10}$ | ۵۹                     | $2.62 \times 10^{10}$ | ۵۹                      |
| $1.69 \times 10^{10}$ | ۵۶                      | $2.91 \times 10^{10}$ | ۶۲                     | $2.64 \times 10^{10}$ | ۶۲                      |
| $1.78 \times 10^{10}$ | ۶۰                      | $2.94 \times 10^{10}$ | ۶۴                     | $2.66 \times 10^{10}$ | ۶۸                      |
| $1.92 \times 10^{10}$ | ۶۶                      | $2.96 \times 10^{10}$ | ۶۶                     | $2.67 \times 10^{10}$ | ۷۰                      |
| $2.01 \times 10^{10}$ | ۷۰                      | $2.98 \times 10^{10}$ | ۶۷                     | $2.68 \times 10^{10}$ | ۷۲                      |
| $2.10 \times 10^{10}$ | ۷۴                      | $3.02 \times 10^{10}$ | ۷۰                     | $2.68 \times 10^{10}$ | ۷۳                      |
| $2.12 \times 10^{10}$ | ۷۵                      | $3.05 \times 10^{10}$ | ۷۲                     | $2.68 \times 10^{10}$ | ۷۴                      |
| $2.15 \times 10^{10}$ | ۷۶                      | $3.13 \times 10^{10}$ | ۷۸                     | $2.69 \times 10^{10}$ | ۷۷                      |
| $2.24 \times 10^{10}$ | ۸۰                      | $3.16 \times 10^{10}$ | ۸۰                     | $2.71 \times 10^{10}$ | ۸۰                      |
| $2.30 \times 10^{10}$ | ۸۳                      | $3.17 \times 10^{10}$ | ۸۱                     | $2.71 \times 10^{10}$ | ۸۲                      |
| $2.39 \times 10^{10}$ | ۸۷                      | $3.20 \times 10^{10}$ | ۸۳                     | $2.72 \times 10^{10}$ | ۸۳                      |

|                       |     |                       |     |                       |     |
|-----------------------|-----|-----------------------|-----|-----------------------|-----|
| $۲.۴۴ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۸۹  | $۳.۲۲ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۸۵  | $۲.۷۳ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۸۴  |
| $۲.۴۶ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۰  | $۳.۲۴ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۸۶  | $۲.۷۵ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۲  |
| $۲.۵۳ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۳  | $۳.۲۸ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۸۹  | $۲.۷۶ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۵  |
| $۲.۵۷ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۵  | $۳.۳۳ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۲  | $۲.۷۷ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۷  |
| $۲.۶۲ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۷  | $۳.۳۶ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۵  | $۲.۷۸ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۸  |
| $۲.۶۴ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۸  | $۳.۳۹ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۷  | $۲.۷۸ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۹  |
| $۲.۶۹ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۰۰ | $۳.۴۳ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۰۰ | $۲.۷۸ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۰۰ |

**سیاست‌های برون‌سپاری و عدم‌برون‌سپاری.** در ارتباط با زباله‌های بازیافتی از آنجاکه تنوع این دسته از زباله‌ها بالا است، مدیریت و پردازش یکپارچه گاهی می‌تواند دشوار و پیچیده باشد. علی‌رغم اینکه درصد بالایی از زباله‌های بازیافتی شهری را موادی چون کاغذ، پلاستیک، آهن و غیره تشکیل می‌دهند؛ اما درصدی از آن‌ها زباله‌های خاصی هستند که نیاز به تجهیزات خاص دارند؛ از این رو باید تلفیقی از این دو سیاست برگزیده شود تا در هر زمان تصمیم‌گیری بهینه باشد. طبق جدول ۱۰، سود نهایی در حالت سوم که هر دو گزینه برون‌سپاری و عدم‌برون‌سپاری موجود است، بیشترین مقدار خود را دارد؛ بنابراین توصیه می‌شود برای زباله‌های کمپوستی که تولید آن کمتر به تجهیزات پیشرفته نیاز دارد، عملیات پردازش توسط سازمان انجام شود و در ارتباط با زباله‌های بازیافتی با توجه به حجم و نوع زباله‌های دریافتی در ارتباط با برون‌سپاری و عدم‌برون‌سپاری آن‌ها تصمیم‌گیری شود. چنانچه درصد بالایی از زباله‌های بازیافتی را زباله‌های خاص تشکیل دهند، برون‌سپاری بازیافت آن‌ها می‌تواند سیاست بهتری باشد. اگر تنوع زباله‌های بازیافتی زیاد باشد نیز انتخاب این سیاست منجر به سود بیشتری خواهد شد؛ درحالی‌که اگر زباله‌های بازیافتی در یک منطقه تنوع کمی داشته باشند و اغلب به فناوری خاصی برای پردازش نیاز ندارند و انجام عملیات پردازش توسط خود سازمان می‌تواند مقرون‌به‌صرفه‌تر باشد؛ درنهایت تلفیق این دو سیاست سودآورتر خواهد بود.

جدول ۱۰. مقایسه سیاست‌های مختلف و تأثیر آن بر سود

| سود نهایی                         | گزینه‌های تصمیم‌گیری       |
|-----------------------------------|----------------------------|
| $۱/۸۳۹۹۵ E + ۱۰$                  | فقط برون‌سپاری             |
| با ظرفیت‌های فعلی امکان‌پذیر نیست | فقط پردازش توسط خود سازمان |
| $۲/۴۱۰۳۹ E + ۱۰$                  | تلفیقی از هر دو سیاست      |

بررسی تغییرات هزینه‌ها. مقادیر شبیه‌سازی شده برای هزینه‌های پردازش زباله‌ها در جدول‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۱. مقادیر شبیه‌سازی شده برای هزینه‌های پردازش زباله‌های بازیافتی و کمپوستی

| سود نهایی             | هزینه پردازش زباله‌های کمپوستی | سود نهایی             | هزینه پردازش زباله‌های بازیافتی |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| $2.59 \times 10^{10}$ | ۴۱۸۲۶                          | $2.78 \times 10^{10}$ | ۱۳۹۸۶۲                          |
| $2.56 \times 10^{10}$ | ۴۴۶۷۱                          | $2.77 \times 10^{10}$ | ۱۴۸۷۸۸                          |
| $2.54 \times 10^{10}$ | ۴۷۵۹۳                          | $2.76 \times 10^{10}$ | ۱۶۴۵۸۱                          |
| $2.50 \times 10^{10}$ | ۵۲۲۷۰                          | $2.72 \times 10^{10}$ | ۲۲۷۳۶۳                          |
| $2.49 \times 10^{10}$ | ۵۳۶۸۳                          | $2.72 \times 10^{10}$ | ۲۳۲۴۱۸                          |
| $2.48 \times 10^{10}$ | ۵۳۹۳۰                          | $2.68 \times 10^{10}$ | ۲۹۶۹۶۳                          |
| $2.48 \times 10^{10}$ | ۵۴۶۹۰                          | $2.63 \times 10^{10}$ | ۳۷۵۱۴۷                          |
| $2.44 \times 10^{10}$ | ۵۸۴۹۰                          | $2.62 \times 10^{10}$ | ۴۰۶۱۷۰                          |
| $2.42 \times 10^{10}$ | ۶۱۱۹۲                          | $2.63 \times 10^{10}$ | ۴۴۱۶۷۴                          |
| $2.41 \times 10^{10}$ | ۶۲۰۳۱                          | $2.59 \times 10^{10}$ | ۴۹۷۶۸۵                          |
| $2.40 \times 10^{10}$ | ۶۴۱۱۱                          | $2.55 \times 10^{10}$ | ۵۱۸۸۹۰                          |
| $2.39 \times 10^{10}$ | ۶۴۶۶۳                          | $2.54 \times 10^{10}$ | ۵۳۶۵۲۰                          |
| $2.37 \times 10^{10}$ | ۶۷۰۴۳                          | $2.52 \times 10^{10}$ | ۵۵۹۳۶۹                          |
| $2.36 \times 10^{10}$ | ۶۸۳۸۸                          | $2.52 \times 10^{10}$ | ۵۷۰۰۶۱                          |
| $2.32 \times 10^{10}$ | ۷۳۳۹۶                          | $2.50 \times 10^{10}$ | ۶۰۱۳۱۰                          |
| $2.26 \times 10^{10}$ | ۸۰۳۸۴                          | $2.49 \times 10^{10}$ | ۶۲۲۰۷۲                          |
| $2.25 \times 10^{10}$ | ۸۰۸۲۳                          | $2.48 \times 10^{10}$ | ۶۳۴۲۴۰                          |
| $2.25 \times 10^{10}$ | ۸۱۶۱۳                          | $2.43 \times 10^{10}$ | ۷۱۲۶۲۱                          |
| $2.23 \times 10^{10}$ | ۸۳۱۲۰                          | $2.42 \times 10^{10}$ | ۷۳۴۳۱۹                          |
| $2.19 \times 10^{10}$ | ۸۸۳۳۵                          | $2.41 \times 10^{10}$ | ۷۵۲۶۵۲                          |

جدول ۱۲. مقادیر شبیه‌سازی شده برای هزینه‌های پردازش زباله‌های سوزاندنی و دفن‌شدنی

| سود نهایی             | هزینه پردازش زباله‌های دفن‌شدنی | سود نهایی             | هزینه‌ی پردازش زباله‌های سوزاندنی |
|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| $۲.۴۹ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۵۹۴۵                           | $۲.۶۳ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۳۹۰۰                             |
| $۲.۴۷ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۹۸۹۵                           | $۲.۶۱ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۶۰۵۵                             |
| $۲.۴۶ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۲۰۹۳۸                           | $۲.۵۸ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۹۸۵۵۶                             |
| $۲.۴۶ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۲۱۰۴۰                           | $۲.۵۵ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۰۲۴۲۱                            |
| $۲.۴۵ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۲۳۰۲۵                           | $۲.۵۴ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۰۳۴۴۸                            |
| $۲.۴۴ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۲۴۴۲۰                           | $۲.۵۰ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۰۶۹۲۱                            |
| $۲.۴۴ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۲۵۵۲۰                           | $۲.۵۰ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۰۶۹۶۸                            |
| $۲.۴۳ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۲۶۱۶۷                           | $۲.۴۸ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۰۸۹۶۰                            |
| $۲.۴۲ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۲۸۴۲۴                           | $۲.۴۵ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۱۲۵۰۲                            |
| $۲.۴۱ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۳۰۴۱۶                           | $۲.۴۵ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۱۳۰۴۴                            |
| $۲.۴۰ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۳۲۷۳۷                           | $۲.۳۹ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۱۸۳۶۰                            |
| $۲.۳۹ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۳۴۵۰۰                           | $۲.۳۹ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۱۹۳۷۷                            |
| $۲.۳۷ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۳۷۶۶۱                           | $۲.۳۵ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۲۲۶۴۱                            |
| $۲.۳۶ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۳۹۶۵۹                           | $۲.۳۴ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۲۴۳۹۹                            |
| $۲.۳۵ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۳۹۹۴۹                           | $۲.۳۷ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۳۱۸۳۳                            |
| $۲.۳۴ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۴۱۸۲۳                           | $۲.۳۵ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۳۳۱۹۵                            |
| $۲.۳۴ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۴۲۵۴۳                           | $۲.۳۴ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۳۵۱۲۳                            |
| $۲.۳۴ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۴۳۰۶۳                           | $۲.۳۲ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۳۶۶۷۷                            |
| $۲.۳۳ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۴۳۸۶۶                           | $۲.۳۱ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۳۷۳۶۲                            |
| $۲.۳۳ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۴۴۹۷۴                           | $۲.۳۱ \times ۱۰^{۱۰}$ | ۱۳۷۴۵۳                            |

### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی چندمحصولی به‌منظور بیشینه‌سازی سود هر دو سطح به‌صورت همزمان، ارائه شد. در پژوهش حاضر در سطح اول شهرداری به‌عنوان رهبر در ارتباط با تأسیس مراکز پردازش، قیمت خرید زباله از مناطق تولید زباله، تخصیص زباله‌های



دریافتی به مراکز پردازش و سیاست‌های برون‌سپاری و عدم‌برون‌سپاری تصمیم‌گیری می‌کند. برای تعیین این سیاست شهرداری به برگزاری مزایده می‌پردازد و شرکت‌های شرکت‌کننده در مزایده در سطح دوم مدل به‌عنوان پیرو در ارتباط با قیمت پیشنهادی برای شرکت در مزایده تصمیم می‌گیرند.

از ویژگی‌های بارز مدل پیشنهادی، در نظر گرفتن قیمت خرید زباله به‌عنوان متغیر تصمیم است که تأثیر زیادی در بهبود سود نهایی دارد؛ همچنین با استفاده از نظریه‌ی بازی‌ها شرکت‌های شرکت‌کننده در مزایده با هم رقابت می‌کنند. نوع بازی در نظر گرفته‌شده در این مدل، «بازی استکلبرگ» است. برای حل و تبدیل مدل دوسطحی به یک‌سطحی از روش K.K.T استفاده شد که در مبانی نظری در موارد مشابه به‌طور وسیعی از آن استفاده شده است. در پایان از طریق نتایج محاسباتی کارایی مدل پیشنهادی و کیفیت بالای عملکرد و کاربردی بودن مدل نمایش داده شد. بدین منظور مدل در حالت‌های مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در حالتی که قیمت خرید یک پارامتر است و مقداری ثابت دارد و مقایسه آن با حالت فعلی که قیمت یک متغیر تصمیم است؛ همچنین مدل با در نظر گرفتن سیاست‌های مختلف برون‌سپاری با هم مقایسه شده است. نتایج مقایسه مدل‌ها حاکی از آن بود که در نظر گرفتن قیمت خرید زباله به‌عنوان یک متغیر تصمیم، موجب می‌شود سود نهایی افزایش یابد. بررسی نتایج مدل‌ها نشان می‌دهد سیاست‌های برون‌سپاری تأثیر زیادی در سود نهایی دارند و بهترین حالت زمانی روی می‌دهد که دو سیاست برون‌سپاری و عدم‌برون‌سپاری با یکدیگر تلفیق شوند. کیفیت زباله‌های جمع‌آوری‌شده نیز می‌تواند یک عامل کلیدی باشد. افزایش ظرفیت در بخش زباله‌های کمپوستی در نهایت به عدم‌برون‌سپاری کلیه‌ی این زباله‌ها منجر می‌شود؛ بنابراین می‌توان موارد زیر را به‌عنوان مسیرهای پیشنهادی برای پژوهش‌های آینده ارائه کرد:

- بر اساس یافته‌های پژوهش حاضر، کیفیت زباله‌ها در سود نهایی تأثیر زیادی دارد؛ ضمن اینکه اگر درصد بالایی از زباله‌ها قابل پردازش باشد، مقدار کمتری از آن دفن خواهد شد؛ بنابراین علاوه بر سودآوری بیشتر به محیط‌زیست نیز آسیب کمتری می‌رسد؛ از این رو پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی هزینه‌ای که باید صرف شود تا کیفیت محصولات که قرار است به زباله تبدیل شود بهبود یابد در نظر گرفته شده و حالت کیفیت بهینه با در نظر گرفتن هزینه تولید و سود ناشی از بازیافت تعیین شو؛

- با توجه به اهمیت کیفیت زباله‌ها می‌توان این عامل را غیرقطعی در نظر گرفت؛ زیرا در دنیای واقعی نمی‌توان دقیق پیش‌بینی کرد زباله‌های جمع‌آوری‌شده از چه کیفیتی برخوردار هستند. این عامل علاوه بر تأثیرگذاری بر تصمیم شهرداری، قطعاً بر تصمیم‌گیری شرکت‌های شرکت‌کننده در مزایده نیز تأثیرگذار خواهد بود؛

- بخشی از زباله‌های بازیافتی و کمپوستی که قابل پردازش نیستند برای سوزاندن به نیروگاه‌های زباله‌سوزی ارسال می‌شوند، بنابراین بین این مراکز نیز تبادل زباله انجام می‌شود که در این مدل در نظر گرفته نشده است؛ از این رو پیشنهاد می‌شود در مدل‌های آتی این تبادلات نیز لحاظ شود؛ - در دنیای امروزی وقوع اختلالات می‌تواند سازمان‌ها را با ضررهای بزرگی مواجه سازد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در مدل‌های آتی مدل با در نظر گرفتن اختلال مدل‌سازی شود.

## منابع

1. Achillas, D.A., Vlachokostas, CH., Moussiopoulou, N., Baniyas, G., & Triantafyllou, D. (2012). A multi-objective decision-making model to select waste electrical and electronic equipment transportation media. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 76-84.
2. Allende, G. B., & Still, G. (2013). Solving bi-level programs with the KKT-approach. *Mathematical programming*, 138(1-2), 309-332.
3. Asefi, S.L., & Lim, S. (2015). A mathematical model for the municipal solid waste location-routing problem with intermediate transfer stations. *Australasian Journal of Information Systems*, 19, 21-35.
4. Bautista, J., & Pereira, J. (2006). Modeling the problem of locating collection areas for urban waste management. An application to the metropolitan area of Barcelona. *Omega*, 34, 617-629.
5. Berglund, P. G., & Kwon, C. (2014). Robust facility location problem for hazardous waste transportation. *Networks and Spatial Economics*, 14(1), 91-116.
6. Bocken, N., Short, S., Rana, P., & Evans, S. (2014). A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, 65, 42-56.
7. Buhrkal, A.L., & Ropke, S. (2012). The waste collection vehicle routing problem with time windows in a city logistics context. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 241-254.
8. Das, A.H.C. (2011). Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. *Int. J. Production Economics*, 135, 209-221.
9. Deng, L.M., Tian, F., & Cai, J. (2011). An Optimal Model and Its Algorithm for Multi-echelon MSW Recycling Network Design . 24-25 Sept. 2011, (pp 254-259) Computer Engineering and Management Sciences (ICM), 2011 International Conference.
10. Eiselt, V.M. (2013). A bi-objective model for the location of landfills for municipal solid waste. *European Journal of Operational Research*, 235, 187-194.
11. Erkut, E., & Neuman, S. (2003). Analytical models for locating undesirable facilities. *European Journal of Operational Research*, 40, 275-291.
12. Ezequiel, J., Ponce-Ortega, J., Betzabe González-Campos, J., Serna-González, M., & El-Halwagi, M. (2013). Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste. *Waste Management*, 33, 2607-2622.
13. Ezequiel, J., Ponce-Ortega, J., Betzabe González-Campos, J., Serna-González, M., & El-Halwagi, M. (2014). Optimal Planning of Supply Chains for Multi-Product Generation from Municipal Solid Waste. *Chemical engineering transaction*, 42, 55-60.
14. Faccioa, M., Persona, A., & Zanin, G. (2011). Waste collection multi objective model with real time traceability data. *Waste Management*, 31, 2391-2405.
15. Ghiani, G., Laganà, D., Manni, E., & Triki, C. (2012). Capacitated location of collection sites in an urban waste management system. *Waste management*, 32(7), 1291-1296.
16. Ghiani, G., Manni, A., Manni, E., & Toraldo, M. (2014). The impact of an efficient collection sites location on the zoning phase in municipal solid waste management. *Waste Management*, 34(11), 1949-1956.

17. Giusti, L. (2009). A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste management*, 29(8), 2227-2239.
18. Gupta, A., & Sharma, D. C. (2011). Integer programming model for integrated planning of solid waste management in Jaipur. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2(3), 115-124.
19. Lee, C. K. M., Yeung, C. L., Xiong, Z. R., & Chung, S. H. (2016). A mathematical model for municipal solid waste management—A case study in Hong Kong. *Waste Management*.
20. Mavrotas, G., Gakis, N., Skoulaxinou, S., Katsouros, V., & Georgopoulou, E. (2015). Municipal solid waste management and energy production: Consideration of external cost through multi-objective optimization and its effect on waste-to-energy solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1205-1222.
21. Ng, W. P. Q., Lam, H. L., Varbanov, P. S., & Klemeš, J. J. (2014). Waste-to-energy (WTE) network synthesis for municipal solid waste (MSW). *Energy Conversion and Management*, 85, 866-874.
22. Peltola, T., Aarikka-Stenroos, L., Viana, E., & Mäkinen, S. (2016). Value capture in business ecosystems for municipal solid waste management: Comparison between two local environments. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1270-1279.
23. Rasouli, R., Zamaheni, M., & Jamshidi, A. (2012). Forecasting Model Designing of Economic Firm's Performance in Competitive Environment. *Journal of Industrial Management Perspective*, 2(7), 29-44 (In Persian).
24. Sadjadi, S. J., Soltani, R., & Eskandarpour, A. (2014). Location based treatment activities for end of life products network design under uncertainty by a robust multi-objective memetic-based heuristic approach. *Applied Soft Computing*, 23, 215-226.
25. Samanlioglu, F. (2013). A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 226(2), 332-340.
26. Sodhi, M. S., & Reimer, B. (2001). Models for recycling electronics end-of-life products. *OR-Spektrum*, 23(1), 97-115.
27. Soltanian Telkabadi, H., Mohaghar, A., & Sadeghimoghadam, M. R. (2016). Pricing-Policy Analysis of Petrochemical Feed-Stock through Dynamic Systems Approach. *Journal of Industrial Management*, 5(20), 59-78 (In Persian).
28. Taleizadeh, A., & Mohammadi, R. (2015). Optimizing the Selling Price and Advertising Cost in a Two Layers Supply Chain Including a Manufacturer and Two Retailers. *Journal of Industrial Management Perspective*, 5(18), 107-127 (In Persian).
29. Tavares, G., Zsigraiová, Z., & Semiao, V. (2011). Multi-criteria GIS-based siting of an incineration plant for municipal solid waste. *Waste management*, 31(9), 1960-1972.
30. Vadenbo, C., Hellweg, S., & Guillén-Gosálbez, G. (2014). Multi-objective optimization of waste and resource management in industrial networks—Part I: Model description. *Resources, Conservation and Recycling*, 89, 52-63.
31. Vahdani, B., & Naderi-Beni, M. (2014). A mathematical programming model for recycling network design under uncertainty: an interval-stochastic robust optimization model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(5-8), 1057-1071.

32. Von Stackelberg, H. (1954). *Marktform and Gleichgewicht* Springer-Verlag, Berlin, 1934. engl. transl.: *The Theory of the Market Economy*.
33. Wu, C. B., Huang, G. H., Li, W., Xie, Y. L., & Xu, Y. (2015). Multistage stochastic inexact chance-constraint programming for an integrated biomass-municipal solid waste power supply management under uncertainty. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1244-1254.
34. Xie, Y., Lu, W., Wang, W., & Quadrioglio, L. (2012). A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation. *Journal of hazardous materials*, 227, 135-141.
35. Xu, Y., Huang, G. H., Cheng, G. H., Liu, Y., & Li, Y. F. (2014). A two-stage fuzzy chance-constrained model for solid waste allocation planning. *Journal of Environmental Informatics*, 24(2), 101-110.
36. Xue, W., Cao, K., & Li, W. (2015). Municipal solid waste collection optimization in Singapore. *Applied Geography*, 62, 182-190.
37. Ye, J. J. (2006). Non differentiable multiplier rules for optimization and bi-level optimization problems. *SIAMJ. Optim.* 15, 252274 (2004) 14. Ye, JJ: Constraint qualifications and KKT conditions for bi-level programming problems. *Math. Oper. Res.* 31, 811-824.
38. Ye, L., Ye, C., & Chuang, Y. F. (2011). Location set covering for waste resource recycling centers in Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 979-985.
39. Zhang, X., & Huang, G. (2014). Municipal solid waste management planning considering greenhouse gas emission trading under fuzzy environment. *Journal of environmental management*, 135, 11-18.
40. Zhang, Y. M., Huang, G. H., & He, L. (2011). An inexact reverse logistics model for municipal solid waste management systems. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 522-530.
41. Zhang, Y., Huang, G. H., & He, L. (2014). A multi-echelon supply chain model for municipal solid waste management system. *Waste management*, 34(2), 553-561.