

## **Evaluation of minimum cost and greenhouse gas emissions from municipal solid waste processing and disposal centers using NSGA II algorithm**

**Sajad Nasrollahi-Sarvaghaei<sup>1</sup>, Reza Alimardani<sup>\*2</sup>, Mohammad Sharifi<sup>3</sup>, Mohammad Reza Taghizadeh Yazdi<sup>4</sup>**

1. MSc Graduated, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3. Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4. Assistant Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management, University of Tehran, Tehran, Iran

### **ABSTRACT**

**Background and Aims:** Assessment of the stability of an integrated solid waste management system (ISWMS) necessitates analysis of effective criteria. The present study was therefore designed to provide a simple mathematical model to optimize ISWMS aiming at minimizing the cost and emission of greenhouse gases (GHG).

**Materials and Methods:** In order to make use of data recorded during September to October (2014- 2015), it was necessary to make arrangements well in advance with the directors of Waste Management in Tehran. The proposed model was applied and consequently analyzed for allocation of eleven MSW components (including: paper, cardboard, plastic, nylon, metal, glass, PET, wet waste, bread, mixed recyclables and other wastes) into three sub-systems of MSW management (i.e., processing and separation, anaerobic digestion and land filling) at Abali processing and disposal center using NSGA II algorithm.

**Results:** The results of this study indicate that the costs and emissions of GHG would be significantly reduced by increased separation rate in a municipal ISWMS. Furthermore, the identified optimum condition was 100 percent separation and processing with 486 USD (revenue) and 2438 Kg reduced CO<sub>2</sub> (avoided emissions) representing a substantial improvement in the ascending trend rate of disposal separation.

**Conclusion:** It seems necessary to increase daily waste entrance into Abali complex and complement the proposed system with other sub-systems concerning economic and environmental issues in order to enhance the technical feasibility of establishing such a system. On the other hand, given that transport and landfill sub-systems don't have any positive economic and environmental issues, the flow and rate of waste allocation to these sub-systems should be followed in a carefully planned and exact way.

**Keywords:** NSGA II algorithm, Municipal Solid Waste, Greenhouse Gases, Mathematical model

**\*Corresponding author:** Department of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.

**Email:** rwardani@ut.ac.ir

**Received:** 30 Dec 2015

**Accepted:** 27 Apr 2016

## برآورد کمترین هزینه و نشر گازهای گلخانه ای سامانه پردازش و دفن پسماندهای جامد شهری با استفاده از الگوریتم NSGA II

سجاد نصرالهی سروآجایی<sup>۱</sup>، رضا علیمردانی<sup>۲\*</sup>، محمد شریفی<sup>۳</sup>، محمد رضا تقی زاده یزدی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲. استاد، گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳. استادیار، گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۴. استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### چکیده

**زمینه و هدف:** به منظور ارزیابی میزان پایداری یک سامانه یکپارچه مدیریت پسماند (ISWMS)، انجام تجزیه و تحلیل بر روی معیارهای تاثیرگذار ضروری است. بنابراین هدف از این مطالعه ارائه یک مدل ریاضی ساده جهت بهینه سازی ISWMS با دو هدف حداقل سازی هزینه و انتشار گازهای گلخانه ای (GHG) کل سامانه می باشد.

**مواد و روش:** در این پژوهش، قبل از شروع فرآیند مدل سازی، جهت استفاده از داده های ثبت شده در محدوده زمانی مهر ماه ۱۳۹۳ تا آبان ۱۳۹۴ هماهنگی های لازم با مدیران سازمان مدیریت پسماند شهر تهران بعمل آمد. مدل بهینه پیشنهادی برای تخصیص یازده مؤلفه MSW (کاغذ، مقوا، پلاستیک، نایلون، فلزات آهنی، شیشه، پت، پسماندهای تر، نان، مواد قابل بازیافت مخلوط و دیگر پسماندها) به سه زیرسامانه مدیریت MSW (پردازش و تفکیک، هضم بی هوازی و لندفیل) در مجتمع پردازش و دفع آبعلی واقع در منطقه ۴ شهرداری تهران با استفاده از الگوریتم NSGA II حل و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

**یافته ها:** نتایج نشان داد در یک ISWMS شهری با افزایش نرخ تفکیک، میزان هزینه ها و نشر GHG به طور قابل توجهی کاهش پیدا خواهد کرد. همچنین نرخ تفکیک و پردازش ۱۰۰ درصد با ۱۷۵۰۶۹۸ تومان درآمدزایی و  $2438 \text{ kg CO}_2$  اجتنابی (اجتناب از نشر آلاینده) به عنوان بهینه ترین حالت برآورد شد.

**نتیجه گیری:** به منظور افزایش توجه فنی تاسیس چنین سامانه هایی، افزایش نرخ پسماند ورودی روزانه به مجتمع آبعلی و تکمیل زیرساختی سامانه دارای بعد اقتصادی و زیست محیطی ضروری به نظر می رسد. از طرف دیگر با توجه به اینکه زیرسامانه های حمل و نقل و لندفیل از هیچ بعد اقتصادی و زیست محیطی مثبتی برخوردار نمی باشند، لازم است جریان و روند تخصیص پسماند در این زیرسامانه ها با دقت بیشتری دنبال شود.

**کلید واژه ها:** الگوریتم NSGA II، پسماند شهری، گازهای گلخانه ای، مدل ریاضی

نویسنده مسئول :

کرج، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی ماشین های کشاورزی

Email: rmardani@ut.ac.ir

تاریخ دریافت : ۹۴/۱۰/۹

تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۸

## مقدمه

مدیریت صحیح پسماندهای جامد شهری (Municipal Solid Waste: MSW) از جمله عوامل بسیار مهم در حفاظت از محیط زیست و منابع طبیعی می‌باشد، به طوری که در عصر حاضر به دلیل گسترش شهرنشینی و افزایش جمعیت به یکی از چالش‌های اساسی مدیران و دولتمردان تبدیل شده است [۱]. روزانه حدود ۱۷ میلیارد تن پسماند در سطح دنیا تولید می‌شود [۲] که از این مقدار حدود ۱/۳ میلیارد تن مربوط به MSW است، با توجه به رشد جمعیت، افزایش شهرنشینی، توسعه اجتماعی و بالا رفتن سطح درآمد کشورهای در حال توسعه، پیش‌بینی شده است این مقدار تا سال ۲۰۲۵ به ۲/۲ میلیارد تن افزایش پیدا کند [۳]. یک سامانه مدیریت پسماند به صورت سنتی از روش‌های پردازش و دفع بیولوژیکی، پسماندسوزی در هوای آزاد و دفن در گودال‌های رو باز تشکیل می‌شود [۵،۴]، اما در سال‌های اخیر، به دلیل اهمیت بالای مسائل زیست محیطی و پتانسیل استحصال انرژی از پسماند، تعداد فن‌آوری‌ها و روش‌های پردازش و دفع بهداشتی پسماند از ایستگاه‌های حمل میانی تا مجتمع‌های دفن و پردازش، افزایش چشمگیری داشته است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به روش‌های تفکیک در مبدا و مجتمع‌های پردازش، هضم بی‌هوازی (تولید بیوگاز و تبدیل به الکتریسیته)، هضم هوازی (تولید کمپوست)، پسماندسوزی ایزوله (تولید الکتریسیته و انرژی حرارتی) و دفن بهداشتی پسماند اشاره کرد [۷،۶]. از این رو، در بسیاری از کشورها، مدیریت MSW و سامانه‌های انرژی، با توجه به بهره‌برداری اقتصادی و زیست محیطی از سامانه‌های پردازش و دفع پسماند، دارای ارتباط تنگاتنگی می‌باشند. به علاوه اینکه، قسمت عمده‌ای از انرژی حاصل از MSW به عنوان منبع انرژی تجدید پذیر در نظر گرفته می‌شود [۸]. با این حال، هر یک از فن‌آوری‌های ذکر شده از نظر مقدار انرژی تولیدی، کاهش حجم پسماند، انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی متفاوت می‌باشند [۶]، به طوری که، میزان برتری هر کدام و ترکیب آنها نسبت به دیگری به عوامل متعددی از جمله روش‌های جمع‌آوری، ترکیب فیزیکی پسماند و ترجیحات و اهداف سامانه مربوطه بستگی دارد. به عبارتی بهتر، همیشه یک ساختار مشخص از فن‌آوری‌های پردازش و عمل‌آوری برای تمام سامانه‌های مدیریتی مناسب نخواهد بود، بلکه ترکیب‌های متفاوتی از آنها می‌تواند با در نظر گرفتن شرایط خاص منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شود. از همین رو، با توجه به پیچیدگی مسئله به کارگیری یک برنامه‌ریزی و روش اصولی جهت پیدا کردن بهینه‌ترین حالت تخصیص پسماند به هر یک زیرسامانه‌های (هضم هوازی، هضم بی‌هوازی، پسماندسوزی، لندفیل و بازیافت) مدیریت MSW با در نظر گرفتن رویه‌های اقتصادی و زیست محیطی، ضروری به نظر

می‌رسد. برنامه‌ریزی ریاضی (Mathematical Programming: MP) روشی است که اغلب برای بهینه‌سازی سامانه‌های مدیریت MSW و سامانه حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این برنامه‌ریزی، ابتدا با توجه به متغیرهای تصمیم‌گیری (از قبیل تعداد نیروی انسانی، مقدار انرژی مصرفی، کیلومتر مسافت طی شده و غیره) مدل‌سازی ریاضی انجام و سپس محدودیت‌های مربوط به هر تابع هدف (برای مثال: مقدار در دسترس از هر متغیر تصمیم) اعمال می‌شود [۹]. در طی چند دهه اخیر، MP به عنوان محبوب‌ترین ابزار رشته تحقیق در عملیات، جهت حل مسائل واقعی مطرح شده است. به نحوی که در مسائل بهینه‌سازی انرژی، سرمایه‌گذاری، صنعت، کشاورزی، زنجیره تامین و مدیریت منابع آب به طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰]. اخیراً پژوهش‌های مختلفی جهت حل مسائل سامانه‌های مدیریت MSW با استفاده از روش‌های MP انجام شده است [۱۱]. برای مثال، ماوروتاس و همکاران (۲۰۱۵) از روش تبدیل به قید ( $\epsilon$ -constraint) به کمک نرم افزار GAMS در حل مدل ریاضی سامانه دفع پسماند شهر آتن یونان با دو هدف کمینه‌سازی هزینه و نشر گازهای گلخانه‌ای بهره بردند [۷]. سورنیل (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای از الگوریتم NSGA II جهت بهینه‌سازی سامانه دفع پسماند شهر ساربروری تایلد و با در نظر گرفتن منابع تولید، ترکیبات فیزیکی، فن‌آوری‌های پردازش و مسیرهای حمل پسماند، استفاده کرد [۱۲]. هوانگ و همکاران (۱۹۹۵) و لی و همکاران (۲۰۰۸ و ۲۰۱۲) در مطالعات مشابهی با استفاده از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح سامانه‌های مدیریت پسماند شهری در شرایط عدم قطعیت را مدل‌سازی کردند [۱۳-۱۵] و همچنین وادنبو و همکاران (۲۰۱۴) از روش برنامه‌ریزی اعداد صحیح مخلوط خطی جهت بهینه‌سازی سامانه‌های مدیریت پسماند شهری با رویکرد زیست محیطی استفاده کردند [۱۶]. همچنین مطالعات مشابهی با همین رویکرد در سایر نقاط دنیا صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به گوتینگر (۱۹۸۸) در شهر مونیخ آلمان، جی و همکاران (۲۰۱۰) در شهر بیچینگ چین، گو و هوانگ (۲۰۱۰) در شهر رجینا کانادا، چاتروردیس و کومیلز (۲۰۱۲) در شهر تریس یونان، بدران و الهاجر (۲۰۰۶) در بندر پورت سعید مصر و لوئیس و شی در شهرستان الگنی آمریکا اشاره کرد [۱۷-۲۲]. برطبق بررسی‌های صورت گرفته تا قبل از انجام این پژوهش، تاکنون مطالعه‌ای با این رویکرد در ایران و همچنین تلفیق روش ارزیابی چرخه حیات با مدل ریاضی چند هدفه در هیچ مطالعه‌ای در دنیا انجام نشده است، بر همین اساس هدف از این پژوهش ارائه یک مدل ریاضی چند هدفه جهت تخصیص بهینه اجزاء تشکیل دهنده پسماند شهری به هر یک از زیرسامانه‌های پردازش و دفع انتخاب گردید، به طوری که مقدار هزینه و نشر گازهای گلخانه‌ای کل سامانه به کمترین مقدار

شده) و دفن بهداشتی (ارسال پسماندهای برگشتی به مجتمع آزاد کوه) می باشد. در این مطالعه با توجه به ضرورت بحث، مجتمع پردازش و دفع آبعلی به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد، این مجتمع در سال ۱۳۹۲ با مساحتی حدود ۳۰۰۰۰ متر مربع در شمال شرق تهران جهت پردازش پسماندهای تولیدی منطقه ۴ شهرداری تهران که سالانه حدود ۱۱ درصد از کل پسماند شهر تهران را تولید می کند، احداث شده است. جدول ۱ ترکیب فیزیکی و درصد تفکیک مواد قابل بازیافت پسماندهای تولیدی شهر تهران را نشان می دهد [۲۵، ۲۴]. همانطور که ذکر شد، سامانه یکپارچه پردازش و دفع آبعلی از ۴ زیرسامانه حمل و نقل، پردازش و تفکیک، هضم بی هوازی و دفن بهداشتی تشکیل شده است، پسماندهای جمع آوری شده از منطقه ۴ شهرداری تهران ابتدا به ایستگاه میانی حکمیه در این منطقه ارسال می شود، سپس حدود ۳۰۰ تن از پسماندها توسط کامیون های مخصوص حمل پسماند بارگیری شده و به مجتمع مذکور منتقل و توزین می شود. در ادامه، جریان پسماندها به داخل سوله های پردازش جهت تفکیک مواد بازیافتی، آلی و برگشتی تزریق می شود. نهایتاً از مواد بازیافتی جهت تولید مواد اولیه یا بازاستفاده، از مواد آلی جهت تولید بیوگاز، الکتریسیته و کود غنی کمپوست استفاده شده و مواد برگشتی نیز به دفنگاه های مجتمع آزاد کوه منتقل می شود.

لازم به ذکر است، داده های مورد نیاز برای این پژوهش با استفاده از اطلاعات ثبت شده در مجتمع آبعلی (از مهر ۱۳۹۳ تا آبان ۱۳۹۴)، مصاحبه حضوری با کارشناسان و مسئولین امر در این مجتمع و همچنین مطالعه اسناد، آمار و اطلاعات موجود در کتابخانه ی سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران به دست آمده است.

جدول ۱- ترکیب فیزیکی و درصد تفکیک پسماند تولیدی شهر تهران

| نوع                     | درصد | مقدار سالانه (تن) | درصد تفکیک (RPR) | درصد زیاله برگشتی (Res) |
|-------------------------|------|-------------------|------------------|-------------------------|
| پسماند آلی              | ۶۸/۳ | ۱۸۶۹۷۱۲/۵         | -                | -                       |
| پلاستیک                 | ۲/۶  | ۷۱۱۷۵             | ۱۷/۵۷            | ۱۰                      |
| پت                      | ۱/۲  | ۳۲۸۵۰             | ۲۸/۰۴            | ۵۰                      |
| نایلون                  | ۳/۲  | ۸۷۶۰۰             | ۲۳               | ۱۰                      |
| کاغذ                    | ۵/۵  | ۱۵۰۵۶۲/۵          | ۶/۰۳             | ۴۵                      |
| مقوا                    | ۴/۲  | ۱۱۴۹۷۵            | ۵/۲              | ۴۵                      |
| فلزات آهنی              | ۲    | ۵۴۷۵۰             | ۱۹/۴۶            | ۱۰                      |
| شیشه                    | ۱/۹  | ۵۲۰۱۲/۵           | ۹/۳              | ۱۰                      |
| نان                     | ۴/۴  | ۱۲۰۴۵۰            | ۱۰۰              | ۰                       |
| سایر (قابل بازیافت)     | ۱/۵  | ۴۱۰۶۲/۵           | ۰                | -                       |
| سایر (غیر قابل بازیافت) | ۵/۲  | ۱۴۲۳۵۰            | ۰                | -                       |
| کل                      | ۱۰۰  | ۲۷۳۷۵۰۰           | ۲۸/۱۹            | -                       |

ممکن تقلیل پیدا کند. تفاوت عمده یک مدل ریاضی تک هدفه با مدل چند هدفه در این است که در مدل تک هدفه تنها یک پاسخ بهینه تولید می شود در حالی که مدل های چند هدفه معمولاً مجموعه از پاسخ های بهینه تحت عنوان جبهه پرتو را ارائه می دهند که توسط هیچ پاسخ دیگری مغلوب نمی شود، همچنین در صورتی که از روش های فراابتکاری (مانند NSGA II) استفاده شود تمام نقاط مربوط به جبهه پرتو در قسمت های مقعر و محدب با تعداد تکرار و ارجاع به تابع هدف بسیار زیاد کشف خواهد شد که سایر روش های حل و نرم افزارهای کلاسیک قادر به انجام آن نیستند. بنابراین به کارگیری چنین روش ها و الگوریتم هایی فرصتی را فراهم می کند تا مدیران و تصمیم سازان با در نظر داشتن اولویت ها و امکانات موجود، گزینه های مختلفی را جهت رسیدن به نقطه بهینه مدیریتی آزمون کنند. در حقیقت روش بهینه سازی چند هدفه فراابتکاری به دلیل بررسی راه حل های مختلف درجه آزادی فرآیند تصمیم گیری را افزایش می دهد به طوری که نهایتاً بهترین گزینه به صورت مقایسه و داد و ستد بین اهداف مسئله انتخاب می شود [۲۳].

## مواد و روش ها

### منطقه مورد مطالعه

شهر تهران به عنوان پایتخت ایران و بزرگترین کلانشهر غرب آسیا با جمعیتی حدود ۸ میلیون نفر سالانه حدود ۲۷۳۷۵۰۰ تن MSW تولید می کند [۲۴]. بخش عمده ای از پسماند تولیدی روزانه پس از جمع آوری از مناطق ۲۲ گانه ابتدا به ۱۱ ایستگاه میانی موجود در داخل شهر برده شده و سپس جهت پردازش و دفن به مجتمع های پردازش و دفع آزادکوه منتقل می شوند (حدود ۹۶ درصد). تا اواخر دهه ۸۰، بخش قابل توجهی از پسماندهای منتقله به این مجتمع با کمترین پردازش و پالایش به صورت غیر بهداشتی در گودال های روباز دفن می شد، به طوری که شیرابه های حاصل از پسماندهای تر مشکلات زیست محیطی فراوانی در چند دهه گذشته به وجود آورده بود، از همین رو سازمان مدیریت پسماند شهر تهران در طی چند سال اخیر جهت کاهش مشکلات زیست محیطی، استفاده از پتانسیل های موجود (استحصال انرژی) و همچنین کاهش هزینه های پردازش و دفع اقدام به تاسیس سامانه یکپارچه مدیریت پسماند شهری در دو مجتمع پردازش و دفع آزاد کوه با ظرفیت روزانه ۷۳۰۰ تن و مجتمع پردازش و دفع آبعلی با ظرفیت ۳۰۰ تن در روز کرده است. مجتمع آزاد کوه از ۵ زیرسامانه حمل و نقل، پردازش و تفکیک، هضم هوازی (تولید کمپوست)، پسماندسوزی (تولید الکتریسیته) و دفن بهداشتی (لندفیل) تشکیل شده است در حالی که مجتمع آبعلی متشکل از ۴ زیرسامانه حمل و نقل، پردازش و تفکیک، هضم بی هوازی (تولید بیوگاز، الکتریسیته و کمپوست غنی

بیوگاز نظری حاصل از اجزا زیست تجزیه پذیر در نظر گرفته می‌شود، در حالی که بیوگاز بازیافت نشده راکتورهای بی‌هوازی (۳۰ درصد) بدون هیچ گونه اکسیداسیون وارد جو می‌شود.

۵. باقیمانده تمام زیرسامانه‌های پردازش و دفع پسماند (مواد برگشتی از ANB و مواد برگشتی از MRF) به عنوان درصدی از مقدار ورودی بیان شده است. در نهایت همه این مواد به عنوان لندفیل با ارزش بازاری صفر در نظر گرفته شد.

۶. متان بازیافت شده از هاضم بی‌هوازی با راندمان ۳۳ درصد به الکتریسیته تبدیل می‌شود [۲۶]. در تمام موارد فوق، فرض بر این است که الکتریسیته بازیافتی به شبکه برق کشور وصل می‌شود.

### مرزهای سامانه

MSW (مواد جدا نشده در منبع و مخلوط) تولید شده توسط گروه‌های جمع‌آوری پسماند (شهرداری‌ها) ابتدا به ایستگاه‌های انتقال برده می‌شود. اجزا جدا نشده در منبع MSW (P, CB, PL, MT, GL) از WTS به زیرسامانه پردازش و تفکیک و سپس به MRFها منتقل شده، در حالی که MSW مخلوط از WTS به زیرسامانه پردازش و تفکیک و سپس به زیرسامانه هضم بی‌هوازی یا لندفیل ارسال می‌شوند.

از آنجایی که هزینه جمع‌آوری و هزینه‌های انتقال از شهرداری‌ها به WTS، ثابت هستند. به این ترتیب، آنها در مسیر بهینه‌سازی تاثیر نمی‌گذارد و در تابع هدف گنجانده نمی‌شوند. از سوی دیگر، تمام فواصل از WTS به زیرسامانه پردازش و تفکیک و مرکز دفع و پردازش و همچنین از MRF به مرکز دفع و پردازش در معادلات بهینه‌سازی برای محاسبه هزینه‌های انتقال بودند.

انتقال مواد قابل بازیافت از MRF به صنایع بازیافت در سامانه بهینه‌سازی وارد نشده است. در نهایت تخصیص بهینه یازده مؤلفه MSW به ۳ زیرسامانه مدیریت، پس از جداسازی از منبع مواد قابل بازیافت انجام می‌شود، به طوری که هزینه کل MRF هم که با توجه به میزان مشارکت در بازیافت متفاوت است، در هزینه خالص کل سامانه گنجانده شده است. مرزهای سامانه در شکل ۱ نشان داده شده است.

### معادلات بهینه سازی

معادلات بهینه‌سازی توابع هدف شامل متغیرهای تصمیم و محدودیت است. ۲ متغیر قابل بهینه شدن بود: (الف) هزینه کل سامانه و (ب) انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط سامانه.

### مدلی برای کمینه‌سازی هزینه‌های پردازش و انتشار گازهای گلخانه‌ای

هدف کلی از این بهینه‌سازی، تخصیص بهینه مواد تشکیل دهنده پسماند جامد شهری به ۳ زیرسامانه مدیریت پسماند شامل تفکیک مواد در یک مرکز بازیابی مواد (MRF)، هضم بی‌هوازی (ANB) و دفن پسماند (LF) با استفاده از ۲ تابع هدف هزینه کل و نشر گازهای گلخانه‌ای بود. همچنین ترکیب فیزیکی MSW به یازده جز کاغذ (P)، مقوا (CB)، پلاستیک (PL)، نایلون (N)، فلزات آهنی (MT)، شیشه (GL)، پت (P)، پسماندهای مواد غذایی (FW)، نان (B)، مواد قابل بازیافت مخلوط (MW) و دیگر پسماندها (OTH) طبقه بندی شد. در نهایت مدل بهینه‌سازی با در نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی، زیرساختی و زیست محیطی در منطقه ۴ شهر تهران مورد استفاده قرار گرفت.

### فرضیات فنی مدل‌سازی

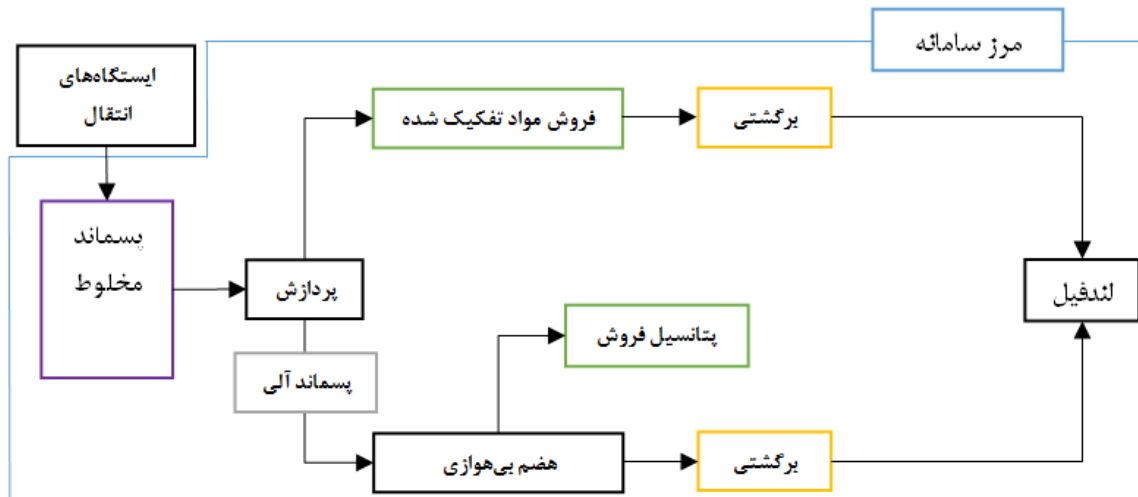
فرضیه‌های فنی که به منظور فرموله کردن بهینه‌سازی سامانه MSW استفاده شده، به شرح زیر است:

۱. مواد خشک قابل بازیافت که در منبع جدا نشده‌اند (P, CB, PL, MT, GL) در مخازن پسماند مخلوط قرار داده و به ایستگاه‌های حمل پسماند (WTS) منتقل می‌شوند و سپس در آنجا توسط تجهیزات پردازش و تفکیک (MRF) به عنوان مواد قابل بازیافت تفکیک می‌شوند تا به وسیله تجهیزات بازیابی به مواد اولیه تبدیل شوند. نرخ سهم جداسازی در منبع و مجتمع (RPR) می‌تواند از ۰ تا ۱۰۰ درصد در هر بخش متفاوت باشد. باقی مانده (غیرقابل بازیافت) مواد تولید شده توسط MRF به محل‌های دفن بهداشتی پسماند برده می‌شود.

۲. اجزا تفکیک نشده MSW (باقی مانده MSW مخلوط که در زیرسامانه پردازش و تفکیک به صورت پسماند تر و برگشتی تفکیک شده) به زیرسامانه‌های هضم بی‌هوازی (ANB) و لندفیل ارسال می‌شوند.

۳. محل دفن بهداشتی (LF) پسماند فرآوری نشده (خام)، فرآوری شده (باقی مانده از یک مرکز دفع) و همچنین برگشتی‌های MRF را می‌پذیرد.

۴. حصول بیوگاز و بهره‌برداری (از طریق تبدیل به الکتریسیته) تنها در محل هضم بی‌هوازی به کار رفته است که اجزای زیست تخریب پذیر فرآوری نشده (به عنوان مثال P, CB, FW, YW) را در نرخ ورودی ۱۵۰ تن در روز می‌پذیرد (حدود ۵۴/۷۵۰ T/y). بیوگاز بازیافت شده محل دفن در بهترین حالت برابر ۷۰ درصد عملکرد



شکل ۱: مرزهای سامانه یکپارچه مدیریت پسماند مجتمع آبعلی

TC: هزینه کل سامانه مدیریت MSW است که باید به حداقل برسد (d/ واحد پول).

j(1-11): شاخصی که مطابق با اجزای MSW است، پلاستیک (j=1)، پت (j=2)، نایلون (j=3)، کاغذ (j=4)، مقوا (j=5)، فلزات

مدل ریاضی به حداقل رساندن هزینه کل

تابع هدف اول به حداقل رساندن هزینه کل سامانه می باشد که در معادله (۱) گنجانده شده است:

$$\begin{aligned} \text{Min TC} = & TC_1 * \sum_{j=1}^{11} TP_j * RPR_j + \sum_{i=2}^3 TC_i * \sum_{j=1}^{11} TP_j * (1-RPR_j) * Y_{ij} + TC_2 * \left( \sum_{i=3}^3 \sum_{j=1}^{11} TP_j * (1-RPR_j) * Y_{ij} * Res_{ij} \right) \\ & + \sum_{j=1}^9 TP_j * (1-RPR_j) * (1-MRF_{eff}) + 2 * d_{WTS-MRF} * TC_4 * \sum_{j=1}^9 TP_j * RPR_j + 2 * d_{WTS-ISWMS} * TC_4 * \sum_{j=1}^{11} TP_j * (1-RPR_j) \\ & + 2 * d_{MRF-ISWMS} * TC_4 * \sum_{j=1}^9 TP_j * (1-RPR_j) * (1-MRF_{eff}) - \sum_{j=1}^9 TP_j * RPR_j * MRF_{eff} * MRK_j - IN_3 * \sum_{j=1}^{11} TP_j * (1-RPR_j) * Y_{3j} \end{aligned} \quad (1)$$

تمام هزینه های مربوط به زیرسامانه ها تابعی از نرخ ورودی پسماند می باشد، کل هزینه هر یک از زیرسامانه ها برابر مجموع هزینه سرمایه گذاری مستهلک شده و هزینه های عملیاتی است که هر دو با توجه به داده های هزینه ای محاسبه شده (جدول ۲) و سپس جهت استفاده در رابطه اول، وارد مدل چند هدفه شده است.

$TP_j$ : میزان تولید از جزء j پسماند (t/d).

$RPR_j$ : نرخ مشارکت در بازیافت (جداسازی در مبداء و زیرسامانه پردازش) اجزاء پسماند j (جدول ۱ مقادیر واقعی (% آورده شده است).

$d_{WTS-MRF}$ : فاصله یک طرفه بین یک WTS و MRF (کیلومتر).

$d_{WTS-ISWMC}$ : فاصله یک طرفه بین یک WTS و مراکز دفع و پردازش (کیلومتر).

$d_{MRF-ISWMC}$ : فاصله یک طرفه بین یک MRF و مراکز دفع و پردازش (کیلومتر).

آهنی (j=6)، شیشه (j=7)، نان (j=8)، پسماند تر (j=9)، سایر- قابل بازیافت- (j=10)، سایر- غیرقابل بازیافت- (j=11).

i(1-4): شاخصی که مطابق با زیرسامانه های مدیریت MSW است: بازیافت (i=1)، دفن بهداشتی پسماند (i=2)، هضم بی هوازی (i=3) و حمل و نقل (i=4).

$y_{ij}$ : کسری از جزء j که توسط زیرسامانه i پردازش و یا دفع می شود. این متغیر مداوم در محدوده ۰ به ۱ (متغیرهای تصمیم گیری در بهینه سازی برای رسیدن به مقدار مطلوب هستند) تغییر می کند.

TC1: هزینه کل زیرسامانه MRF (t/ واحد پول).

TC2: هزینه کل زیرسامانه لندفیل (t/ واحد پول).

TC3: هزینه کل زیرسامانه هضم بی هوازی (t/ واحد پول)

TC4: هزینه کل حمل و نقل (Km-t/ واحد پول).

$IN_3$ : درآمد حاصل از تبدیل پسماند به بیوگاز (t/ واحد پول).



بی‌هوازی را توصیف می‌کند. کلیه هزینه‌ها در این کار با استفاده از شاخص قیمت مصرف کننده مناسب به هزینه‌های ۱۳۹۴ تبدیل شده است.

### مدل ریاضی حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای

معادله بهینه سازی جهت به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای به شرح زیر است:

$P$ : نشر گازهای گلخانه‌ای کل سامانه مدیریت MSW است که باید به حداقل برسد ( $\text{kg CO}_2/\text{d}$  معادل).

$P_1$ : نشر گازهای گلخانه‌ای کل زیرسامانه MRF ( $\text{kg CO}_2/\text{t}$  معادل).

$P_2$ : نشر گازهای گلخانه‌ای زیرسامانه لندفیل ( $\text{kg CO}_2/\text{t}$  معادل).

$P_3$ : نشر گازهای گلخانه‌ای زیرسامانه هضم بی‌هوازی ( $\text{kg CO}_2/\text{t}$  معادل).

$\text{MRF}_{\text{eff}}$ : بهره وری تفکیک جزء  $j$  در یک MRF (حدوداً ۲۸ درصد).

$\text{MRK}_j$ : قیمت فروش جزء  $j$  بازیافت شده ( $\text{t}$  واحد پول).

$\text{Res}_{ij}$ : باقی مانده از جزء  $j$  در زیرسامانه  $i$  (جدول ۱ مقادیر واقعی آورده شده است).

جمله اول از رابطه ۱ هزینه کل زیرسامانه MRF، که تابعی از RPR است، را شرح می‌دهد. جمله دوم هزینه کل زیرسامانه‌های دفع و پردازش (LF، ANB) که پسماندهای جدا نشده را قبول می‌کند، توصیف می‌کند. جمله سوم هزینه‌های دفن پسماندهای اضافی ناشی از زیرسامانه ANB و همچنین MRF ها را توصیف می‌کند. جمله‌های که شامل فاصله ( $d$ ) است، هزینه حمل و نقل را با توجه به مسافت ایستگاه‌های حمل و نقل از زیرسامانه‌های بازیافت و پردازش و دفع (WTS، MRF، ISWMC) محاسبه می‌کند. جملات بعدی به ترتیب درآمد حاصل از فروش مواد بازیافت شده، فروش انرژی الکتریکی تولید شده با استفاده از متان بازیابی شده در زیرسامانه‌های

$$\begin{aligned} \text{Min } P = & P_1 * \sum_{j=1}^9 \text{TP}_j * \text{RPR}_j + \sum_{i=2}^3 P_i * \sum_{j=1}^{11} \text{TP}_j * (1 - \text{RPR}_j) * Y_{ij} \\ & + P_2 * \left( \sum_{i=3}^3 \sum_{j=1}^{11} \text{TP}_j * (1 - \text{RPR}_j) * Y_{ij} * \text{Res}_{ij} + \sum_{j=1}^9 \text{TP}_j * (1 - \text{RPR}_j) * (1 - \text{MRF}_{\text{eff}}) \right) \\ & + 2 * d_{\text{WTS-MRF}} * \sum_{j=1}^9 \text{TP}_j * \text{RPR}_j * P_4 * K_m + 2 * d_{\text{WTS-ISWMS}} * \sum_{j=1}^{11} \text{TP}_j * (1 - \text{RPR}_j) * P_4 * K_m \\ & + 2 * d_{\text{MRF-ISWMS}} * \sum_{j=1}^9 \text{TP}_j * (1 - \text{RPR}_j) * (1 - \text{MRF}_{\text{eff}}) * P_4 * K_m \end{aligned} \quad (2)$$

جمله‌هایی که شامل فاصله ( $d$ ) است، انتشار آلاینده‌های حمل و نقل را با توجه به مسافت ایستگاه‌های حمل و نقل از زیرسامانه‌های بازیافت و پردازش و دفع (WTS، MRF، ISWMC) محاسبه می‌کند.

### متغیرهای قابل تنظیم

۳۳ متغیر قابل تنظیم ( $y_{ij}$ ) در مدل‌های بهینه سازی بالا وجود دارد (یازده مؤلفه MSW × سه زیرسامانه پردازش و دفع).

معادله اصلی محدودیت است:

$$\sum_{i=2}^5 Y_{ij} = 1, \quad \sum_{i=2}^5 \text{Res}_{ij} = 1 \quad \text{for } j=1 \text{ to } 11. \quad (3)$$

$P_4$ : نشر گازهای گلخانه‌ای زیرسامانه حمل و نقل ( $\text{kg CO}_2/\text{t-Km}$  معادل).

تمام انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به زیرسامانه‌ها تابعی از نرخ ورودی پسماند می‌باشد، نشر گازهای گلخانه‌ای کل هر یک از زیرسامانه‌ها با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات توسط نرم افزار سیمپرو به صورت  $\text{kg CO}_2$  معادل محاسبه شده (جدول ۳) و سپس جهت استفاده در رابطه دوم، وارد مدل چند هدفه شده است. جمله اول از رابطه ۲ نشر گازهای گلخانه‌ای کل زیرسامانه MRF، که تابعی از RPR است، را شرح می‌دهد. جمله دوم انتشار آلاینده‌های کل زیرسامانه‌های دفع و پردازش (LF، ANB) که پسماندهای جدا نشده را قبول می‌کند، توصیف می‌کند.

جمله سوم انتشار آلاینده‌های ناشی از دفن پسماندهای اضافی مربوط به زیرسامانه‌های ANB و همچنین MRF ها را توصیف می‌کند.

جبهه پارتو فضای جواب‌ها را تشکیل می‌دهد، سپس به منظور انتخاب والدین جهت تقاطع از بین مجموعه راه‌حل‌های موجود معمولاً یکی از روش‌های انتخاب تصادفی و یا انتخاب رقابتی دوتایی استفاده می‌شود، در روش تصادفی از میان راه‌حل‌های موجود به میزان درصد تلفیق، از اعضای جمعیت به عنوان والد انتخاب می‌شود، ولی در روش رقابتی دوتایی از میان راه‌حل‌های موجود به میزان درصد تلفیق، دو عضو به تصادف انتخاب شده و سپس عضوی که دارای رتبه بهتری باشد به عنوان والد انتخاب می‌شود، اگر چنانچه رتبه دو عضو یکسان باشد در این صورت عضوی که دارای فاصله ازدحامی بیشتری باشد به عنوان والد انتخاب می‌شود، به عبارتی دیگر در حالتی که رتبه دو عضو برابر باشد عضوی انتخاب می‌شود که در ناحیه خلوت‌تری از آن جبهه قرار دارد. فاصله ازدحامی از رابطه ۵ بدست می‌آید.

$$d_i^j = \frac{f_{i-1}^j + f_{i+1}^j}{f_{\max}^j - f_{\min}^j}, \quad d_i = \sum_{j=1}^D d_i^j \quad (5)$$

$d_i^j$  = فاصله ازدحامی عضو  $i$ ام در بُعد  $j$ ام؛

$f_{i+1}^j$  = فاصله عضو  $i+1$  از عضو  $i$ ام در بُعد  $j$ ام؛

$f_{i-1}^j$  = فاصله عضو  $i-1$  از عضو  $i$ ام در بُعد  $j$ ام؛

$f_{\max}^j$  = بزرگ‌ترین عضو بُعد  $j$ ام؛

$f_{\min}^j$  = کوچک‌ترین عضو بُعد  $j$ ام؛

$d_i$  = فاصله ازدحامی عضو  $i$ ام

پس از انتخاب والدین، با توجه به پیوسته بودن فضای حل مسئله از روش تقاطع حسابی به منظور تلفیق استفاده شد و در ادامه به منظور انجام جهش نیز به میزان درصد جهش و به طور تصادفی عضوهایی از مجموعه راه‌حل‌های موجود انتخاب شدند و جهش روی آنها صورت گرفت، بدین صورت که در هر راه‌حل انتخابی با توجه به نرخ جهش تعدادی از مقادیر تخصیصی موجود در راه‌حل ( $y_{ij}$ ) به طور تصادفی انتخاب شدند و مقادیر هر عدد تخصیصی انتخابی با در نظر داشتن محدودیت لازم، تغییر کرد. در نهایت میزان هزینه و انتشار GHG، برای اعضای جدیدی که از تقاطع و جهش به دست آمده‌اند، محاسبه و این اعضا به اعضای جمعیت قبلی اضافه شد.

پس از آن دوباره کل جواب‌ها رتبه‌بندی شده و فاصله ازدحامی آنها محاسبه شد. سپس با توجه رتبه‌بندی و فاصله ازدحامی، جواب‌ها دسته‌بندی شد، بدین گونه که ابتدا بر اساس فاصله ازدحامی (از بیشتر به کمتر) و سپس بر اساس رتبه (از کمتر به بیشتر) دسته‌بندی صورت گرفت، ذکر این نکته ضروری است

رابطه ۳ در عمل معادله تعادل جرم است که نشان می‌دهد هر یک از اجزای پسماند و یا کسری از آن می‌تواند به یک یا چند زیرسامانه پردازش و دفع اختصاص داده شود و در مجموع مقادیر آن جزء که وارد زیرسامانه‌های مختلف می‌شود باید برابر جرم کل اولیه آن جزء باشد.

### حل مدل‌های چند هدفه با استفاده از روش‌های الگوریتم فراابتکاری

همان‌طور که اشاره شد، برای اجرای یک سیستم یکپارچه مدیریت پسماند ۳۳ متغیر تصمیم ( $y_{ij}$ ) وجود دارد که هر یک می‌توانند یک عدد از بازه پیوسته ۰ و ۱ اختیار کنند، در این صورت تعداد حالات ترکیبی مختلف برای انجام این پروژه بی‌نهایت خواهد بود. در این مطالعه هدف آن است که از بین این حالت‌های مختلف تخصیص اجزای فیزیکی پسماند، بهترین حالت که دارای کمترین هزینه و کمترین انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) است، پیدا شود. همچنین از آنجایی که انجام محاسبات به صورت دستی جهت رسیدن به یک جواب ایده‌آل، بسیار زمان‌بر و تقریباً غیر ممکن است، به کارگیری الگوریتم فراابتکاری برای حل این مسئله، امری ضروری می‌باشد. بنابراین برای حل این مسئله، الگوریتم NSGA-II مورد استفاده قرار گرفت و برای کدنویسی الگوریتم از نرم افزار MATLAB V. 2014a استفاده شد.

### الگوریتم ژنتیک مبتنی بر دسته‌بندی نامغلوب (NSGA-II)

در این الگوریتم، ابتدا در یک ماتریس با اندازه ۱۱\*۳ که هر کدام از سطرها بیانگر یکی از زیرسامانه و هر کدام از ستون‌ها بیانگر کسری از اجزا پسماند تخصیص داده شده به هر کدام از زیرسامانه‌ها است، تشکیل می‌دهیم. به عبارتی بهتر، کروموزوم‌هایی با ۳۳ متغیر (۱۱\*۳) به اندازه جمعیت اولیه تولید می‌نماییم، به طوری که هر متغیر موجود در کروموزوم یک عدد صحیح تصادفی بین صفر و یک اختیار نماید، که مجموع اعداد در هر ستون برابر ۱ باشد، سپس با توجه به توابع هزینه‌ای و نشر GHG جواب‌های تولید شده در جمعیت اولیه را ارزیابی می‌کنیم. در مرحله بعد، از آنجایی که فضای تابع هدف از دو مولفه هزینه و انتشار GHG تشکیل شده است، لازم است جواب‌های ناشی از جمعیت اولیه با استفاده از رابطه ۴ جبهه‌بندی شوند.

$$\text{Dominated} = \text{all}([x_1, x_2] \leq [y_1, y_2]) \& \text{any}([x_1, x_2] < [y_1, y_2]) \quad (4)$$

در این مرحله راه‌حل‌هایی که توسط هیچ راه‌حل دیگری مغلوب نشده‌اند، به رتبه یک اختصاص داده می‌شوند و مجموع این جواب‌ها



محاسبه گردید و سپس نتایج حاصل به منظور برآورد کمترین هزینه و نشر گازهای گلخانه‌ای به کمک الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II) در سامانه یکپارچه مدیریت پسماند شهری مجتمع آبعلی استفاده شد. جدول ۲ میزان هزینه و درآمد مربوط به هر یک از زیرسامانه‌ها را در حالت فعلی (بدون بهینگی) نشان می‌دهد، همانطور که نمایان است در این سامانه، زیرسامانه هضم بی‌هوازی دارای بیشترین هزینه و درآمد می‌باشد در حالی که زیرسامانه‌های حمل و نقل و لندفیل با وجود سهم بالا در هزینه‌ها از قابلیت درآمدزایی برخوردار نیستند. همچنین در جدول ۳ میزان نشر و اجتناب از نشر GHG در سامانه مذکور خلاصه شده است، مطابق جدول در این بخش نیز زیرسامانه هضم بی‌هوازی و پردازش و تفکیک به ترتیب دارای بیشترین نشر اجتنابی هستند در حالی که زیرسامانه‌های حمل و نقل و لندفیل به ترتیب بیشترین نقش را در نشر آلاینده‌گی ایفا می‌کنند.

که در روش‌های مرسوم دسته‌بندی ابتدا اولویت کمتر سپس اولویت بیشتر مدنظر قرار می‌گیرد.

در ادامه، از میان جمعیت دسته‌بندی شده موجود، به اندازه جمعیت اولیه ذخیره و بقیه حذف شدند، همانند مراحل قبل پس از حذف دوباره دسته‌بندی صورت گرفت، این کار با توجه به نسبی بودن رتبه‌بندی و فاصله ازدحامی انجام می‌گیرد و با هر بار تغییر در راه‌حل‌ها بایستی دوباره محاسبه شوند. در آخر اعضای دارای رتبه یک، به جبهه پارتو اختصاص داده شدند.

### یافته‌ها

#### برآورد هزینه و نشر گازهای گلخانه‌ای در یک سامانه یکپارچه مدیریت پسماند

همانطور که قبلاً نیز ذکر گردید، در این مطالعه ابتدا میزان هزینه‌ها و نشر GHG به ازای یک تن پسماند در هر یک از زیرسامانه‌ها

جدول ۲- مقادیر هزینه و درآمد تفکیک شده سامانه یکپارچه مدیریت پسماند آبعلی

| زیرسامانه      | هزینه سالانه (تومان) | هزینه واحد (تومان) | درصد (%) | درآمد سالانه (تومان) | درآمد واحد (تومان) | درصد (%) |
|----------------|----------------------|--------------------|----------|----------------------|--------------------|----------|
| حمل و نقل      | ۱۸۱۴۱۵۴۶۱۶           | ۱۶۵۶۷/۶            | ۲۰/۰۶    | ۰                    | ۰                  | ۰        |
| پردازش و تفکیک | ۹۶۸۵۳۴۰۸۰/۵          | ۸۸۴۵/۰۶            | ۱۰/۷     | ۱۱۹۶۰۹۷۱۹۸           | ۱۰۹۲۳/۳            | ۳۱       |
| هضم بی‌هوازی   | ۵۹۴۷۹۳۶۶۳۲           | ۱۱۳۱۶۴/۷           | ۶۵/۸     | ۲۶۶۰۲۵۶۰۷۲           | ۵۰۶۱۳/۷            | ۶۹       |
| لندفیل         | ۳۰۹۸۱۹۶۱۷/۶          | ۵۷۸۶/۱             | ۳/۴۳     | ۰                    | ۰                  | ۰        |
| مجموع          | ۹۰۴۰۴۴۴۹۴۵           | ۱۴۴۳۶۳/۵           | ۱۰۰      | -                    | -                  | ۱۰۰      |

جدول ۳ - مقدار نشر گازهای گلخانه‌ای سامانه یکپارچه مدیریت پسماند آبعلی\*

| زیرسامانه      | نشر GHG سالانه (kg CO <sub>2</sub> معادل) | نشر GHG واحد (kg CO <sub>2</sub> معادل) | درصد نشر GHG | درصد اجتناب از نشر GHG |
|----------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------|------------------------|
| حمل و نقل      | ۷۹۹۳۵۰                                    | ۷/۳                                     | ۷۸           | -                      |
| پردازش و تفکیک | -۳۰۸۰۶۰۰                                  | -۲۸/۱۵                                  | -            | ۴۱/۵                   |
| هضم بی‌هوازی   | -۴۳۴۳۵۰۰                                  | -۸۲/۶۳                                  | -            | ۵۸/۵                   |
| لندفیل         | ۲۲۴۴۷۵                                    | ۴/۲                                     | ۲۲           | -                      |
| مجموع          | -۶۴۰۰۲۷۵                                  | -۱۰۲/۸۸                                 | ۱۰۰          | ۱۰۰                    |

\* اعداد منفی نشان دهنده اجتناب از نشر گازهای گلخانه‌ای توسط زیرسامانه می‌باشد.

هدف به حالت بهینه‌تری میل کرده است. البته باید توجه داشت که با انتخاب یکی از توابع هدف به عنوان ملاک ارزیابی، ممکن است حالت بهینه برای آن هدف خاص در درصدهای تفکیک پایین نیز حاصل گردد.

#### نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک مبتنی بر دسته‌بندی نامغلوب (NSGA-II)

مقدار هزینه و نشر GHG بهینه به همراه تخصیص بهینه ترکیب فیزیکی پسماند برای هر یک از زیرسامانه‌های مورد مطالعه به ازای ۳۰۰ تن پسماند ورودی روزانه در نرخ‌های مختلف بازیافت در مبدا و زیرسامانه پردازش (۶ سناریو)، مطابق جدول ۴ خلاصه شده است. همان‌طور که نمایان است، با افزایش درصد تفکیک مقادیر توابع

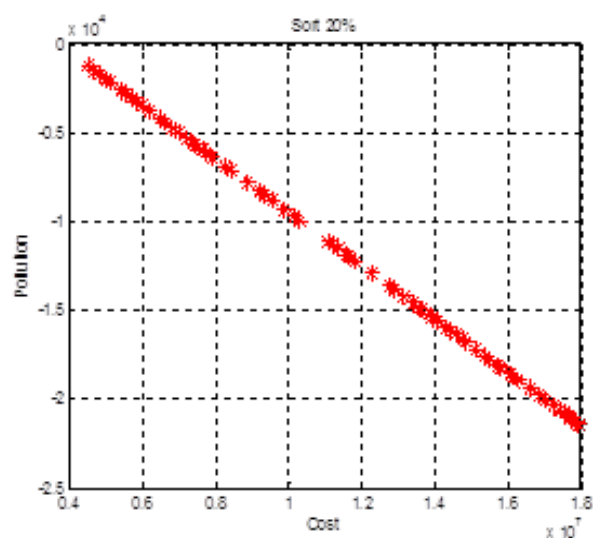
جدول ۴- نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک (NSGA-II)<sup>a</sup>

| تفکیک (%)                          | ۰                | ۲۰              | ۴۰       | ۶۰      | ۸۰      | ۱۰۰      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------|------------------|-----------------|----------|---------|---------|----------|------|------|------|------|------|------|
| هزینه کل بهینه (تومان)             | ۳۶۲۵۵۵۳          | ۴۵۲۲۱۰۸         | ۱۶۳۹۱۲۸۲ | ۱۵۷۰۷۲۳ | -۱۳۴۵۷۲ | -۱۷۵۰۶۹۸ |      |      |      |      |      |      |
| نشر GHG (kg CO <sub>2</sub> معادل) | -۱۳۱۱            | -۱۴۲۸           | -۲۱۴۶۹   | -۱۶۰۸   | -۱۹۰۵   | -۲۴۳۸    |      |      |      |      |      |      |
| ترکیب بهینه تخصیص پسماند           | ANB <sup>c</sup> | LF <sup>b</sup> | ANB      | LF      | ANB     | LF       | ANB  | LF   | ANB  | LF   | ANB  | LF   |
| پلاستیک                            | ۰/۳۳             | ۰/۶۷            | ۰/۲۳     | ۰/۷۷    | ۰/۴۵    | ۰/۵۵     | ۰/۳۱ | ۰/۱۳ | ۰/۸۷ | ۰    | ۰    | ۰    |
| پت                                 | ۰/۴۸             | ۰/۵۲            | ۰/۵۴     | ۰/۴۶    | ۰/۴۲    | ۰/۵۸     | ۰/۲۱ | ۰/۷۹ | ۰/۲۸ | ۰/۷۲ | ۰    | ۰    |
| نایلون                             | ۰/۶۰             | ۰/۴۰            | ۰/۲۵     | ۰/۷۵    | ۰/۳۹    | ۰/۶۱     | ۰/۲۵ | ۰/۷۵ | ۰/۱۱ | ۰/۸۹ | ۰    | ۰    |
| کاغذ                               | ۰/۳۸             | ۰/۶۲            | ۰/۴۲     | ۰/۵۸    | ۰/۹۵    | ۰/۰۵     | ۰/۳۳ | ۰/۶۷ | ۰/۳۰ | ۰/۷۰ | ۰    | ۰    |
| مقوا                               | ۰/۳۵             | ۰/۶۵            | ۰/۵۶     | ۰/۴۴    | ۰/۶۸    | ۰/۳۲     | ۰/۲۶ | ۰/۷۴ | ۰/۳۵ | ۰/۶۵ | ۰    | ۰    |
| فلزات آهنی                         | ۰/۵۱             | ۰/۴۹            | ۰/۲۷     | ۰/۶۳    | ۰/۴۳    | ۰/۵۷     | ۰/۰۸ | ۰/۹۲ | ۰/۲۲ | ۰/۷۸ | ۰    | ۰    |
| شیشه                               | ۰/۲۳             | ۰/۷۷            | ۰/۱۹     | ۰/۸۱    | ۰/۴۸    | ۰/۵۲     | ۰/۱۴ | ۰/۸۶ | ۰/۲۳ | ۰/۷۷ | ۰    | ۰    |
| نان                                | ۰                | ۰               | ۰        | ۰       | ۰       | ۰        | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    |
| پسماند تر                          | ۰/۱۶             | ۰/۸۴            | ۰/۱۵     | ۰/۸۵    | ۰/۳۸    | ۰/۶۲     | ۰/۱۰ | ۰/۹۰ | ۰/۰۶ | ۰/۹۴ | ۰/۱۱ | ۰/۸۹ |
| سایر (قابل بازیافت)                | ۰/۴۰             | ۰/۶۰            | ۰/۳۷     | ۰/۶۳    | ۰/۷۲    | ۰/۲۸     | ۰/۵۰ | ۰/۵۰ | ۰/۲۹ | ۰/۷۱ | ۰/۳۲ | ۰/۶۸ |
| سایر (غیر قابل بازیافت)            | ۰/۸۰             | ۰/۲۰            | ۰/۸۲     | ۰/۱۸    | ۰/۴۶    | ۰/۵۴     | ۰/۷۸ | ۰/۲۲ | ۰/۴۲ | ۰/۵۸ | ۰/۱۷ | ۰/۸۳ |

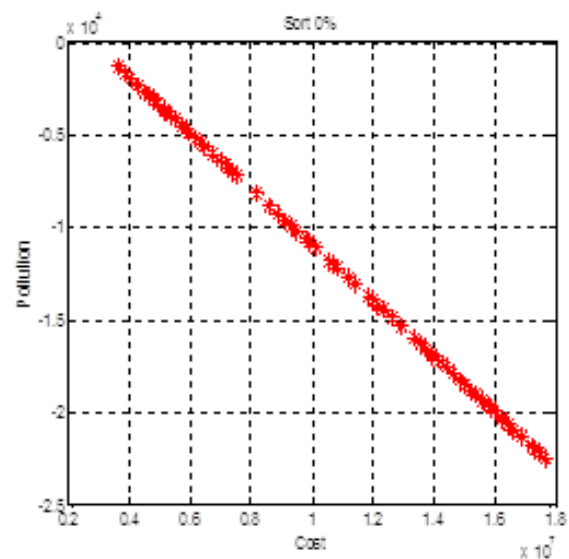
<sup>a</sup> اعداد منفی نشان دهنده سود اقتصادی و اجتناب از نشر آلاینده می باشد،<sup>b</sup> زیرسامانه لندفیل،<sup>c</sup> زیرسامانه هضم بی هوازی

نشر آلاینده ها را نیز داشته باشد. به عبارتی بهتر، هر یک از نمودارها مجموعه ای از راه حل های بهینه را در نرخ های تفکیک ثابت در اختیار مدیران سامانه مدیریت پسماند شهری قرار می دهد که به کمک آن می توانند نسبت به تعیین وضعیت فعلی سامانه و یا طرح ریزی برای برنامه های آینده از قبیل افزایش نرخ ورودی، افزایش ظرفیت پردازش و تاسیس زیرسامانه های دیگر مانند پسماندسوز و هضم هوازی (تولید کمپوست) اقدام کنند.

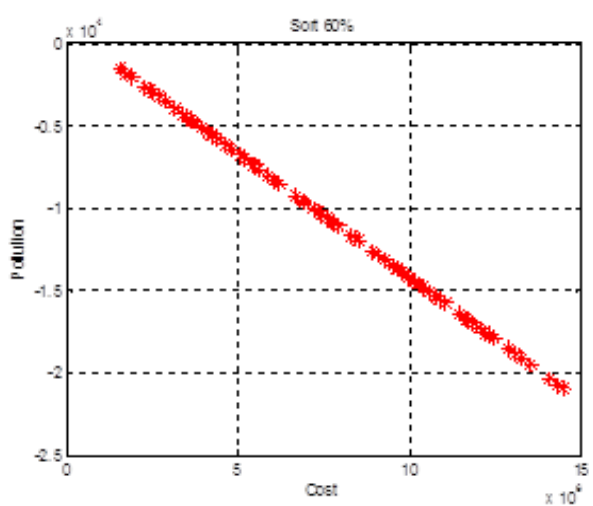
در نهایت، شکل ۲: الف، ب، پ، ت، ج و ث مقادیر بهینه ی دو تابع هدف هزینه و نشر GHG را به ترتیب در نرخ های صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد تفکیک در مبداء و مجتمع های پردازش را نشان می دهد. مطابق شکل، با افزایش نرخ تفکیک میزان هزینه و نشر آلاینده با شیب ملایمی کاهش پیدا می کنند به طوری که از نرخ تفکیک ۶۰ درصد به بعد اکثر راه حل های ارائه شده توسط الگوریتم قابلیت سوددهی اقتصادی و اجتناب از نشر آلاینده های زیستی دارد. از طرفی دیگر، از آنجایی که دو هدف کاملاً در تضاد با یکدیگر هستند، در تمامی نمودارها مشاهده می شود جواب های بهینه تولید شده نسبت به جواب های قبلی و بعدی خود دارای حالت افزایش یا کاهشی در یکی از اهداف مورد نظر مسئله می باشد به نوعی تولید جواب های بهینه مربوط به جبهه پرتو همیشه در حالت داد و ستد بین اهداف می باشد. همچنین بررسی نتایج و نمودارها نشان می دهد که در یک سامانه یکپارچه مدیریت پسماند شهری با نرخ تفکیک ثابت، تخصیص بهینه هر جزء از پسماند به یک زیرسامانه پردازش و دفع تا حدود زیادی می تواند در کنار سود اقتصادی، جلوگیری از



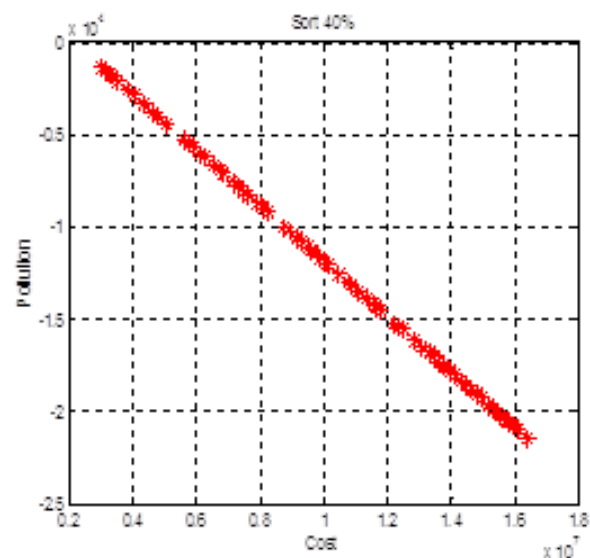
ب



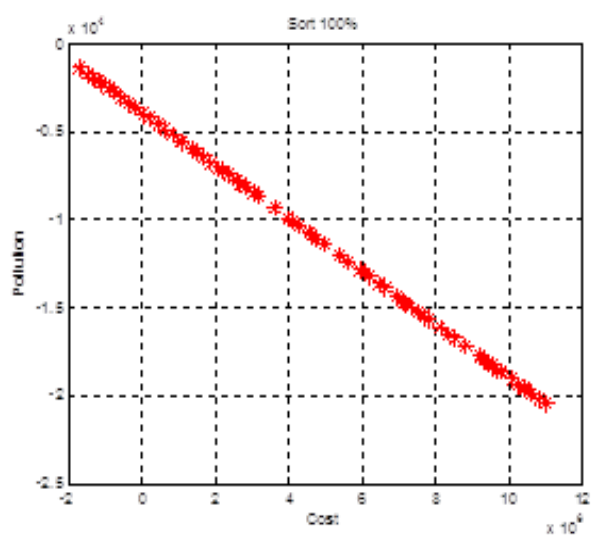
الف



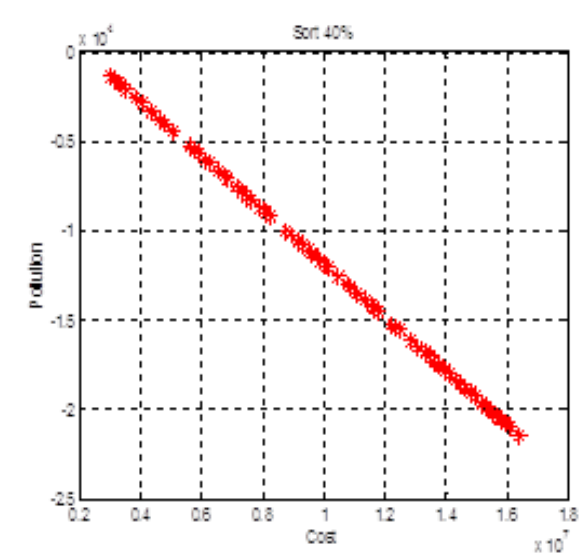
ت



ج



ث



ج

شکل ۲: مقادیر بهینه هزینه و نشرآلاینده های زیستی برای درصدهای مختلف تفکیک  
(الف): ۰ درصد، (ب): ۲۰ درصد، (پ): ۴۰ درصد، (ت): ۶۰ درصد، (ج): ۸۰ درصد، (ث): ۱۰۰ درصد

## بحث و نتیجه‌گیری

مطابق جدول شماره ۴ در نرخ‌های بازیافت کمتر از ۶۰ درصد بخش قابل توجهی از مواد قابل بازیافت تفکیک پذیر بدون پردازش وارد زیرسامانه‌های لندفیل و هضم بی‌هوازی خواهد شد که در این صورت با توجه به ماهیت مواد و زیرسامانه‌های مذکور سامانه یکپارچه مدیریت پسماند دچار اختلال می‌شود، برای مثال زیرسامانه هضم بی‌هوازی که اختصاصاً جهت پردازش و تخمیر پسماندهای آلی و استحصال بیوگاز طراحی شده است به ناچار با حجم انبوهی از ناخالصی‌ها روبه‌رو خواهد شد که در صورت ورود آنها به این زیرسامانه اولاً کیفیت کار بسیار پایین خواهد آمد، ثانیاً بعد از تخمیر بخش آلی پسماند، بخش غیر آلی بدون هیچگونه عملیات پردازش و دفع به ناچار وارد گودال‌های دفن خواهد شد که از نظر اقتصادی و زیست محیطی بصره نخواهد بود و یا اینکه زیرسامانه لندفیل مقدار قابل توجهی از پسماندهای آلی مخلوط با مواد قابل بازیافت را خواهد داشت که در کوتاه مدت و بلند مدت از طریق نشر آلاینده‌های زیست محیطی صدمات جبران ناپذیری را به محیط زیست وارد خواهد کرد. به عبارتی بهتر، ایده‌آل‌ترین حالت یک سامانه مدیریت پسماند زمانی خواهد بود که در درجه اول میزان ناخالصی‌ها به کمترین مقدار ممکن تقلیل پیدا کند و سپس تخصیص بهینه سایر مواد از قبیل پسماندتر، پسماندهای قابل بازیافت و غیرقابل بازیافت به زیرسامانه‌های هدف صورت پذیرد. همچنین مشاهده می‌شود در این سامانه تغییرات هزینه و نشر GHG در درصدهای مختلف تفکیک و یا بین پاسخ‌های بهینه تولید شده برای یک نرخ ثابت بسیار کم و در بعضی موارد فاقد توجیه فنی می‌باشد، باید توجه داشت اولاً در حالت فعلی نرخ ورودی حدود ۴ درصد کل پسماند تولیدی روزانه می‌باشد که در صورت افزایش این مقدار به درصدهای بالاتر می‌توان انتظار تغییرات بیشتری را نیز داشت، ثانیاً تضاد ذاتی موجود بین اهداف و تلاش الگوریتم جهت بهینه کردن همزمان آنها اکثراً سبب می‌شود تا تغییرات در بازه‌های بسیار محدود انجام پذیرد، برای مثال در بین بهترین پاسخ‌های ارائه شده برای درصدهای مختلف تفکیک ملاحظه می‌شود بغیر از درصد تفکیک ۴۰ درصد بقیه موارد از چنین الگویی پیروی می‌کنند (بهینگی تعاملی هر دو هدف) در حالی که درصد تفکیک ۴۰ درصد به علت شرایط خاص مسئله و استفاده از مفهوم فاصله ازدحامی در جبهه پرتو نقطه اقتصادی ۱۶۳۹۱۲۸۲ تومان و انتشار گازهای گلخانه‌ای  $\text{kg CO}_2$  ۲۱۴۶۹- معادل را به عنوان نقطه بهینه معرفی کرده است، البته باید توجه داشت در تمام نقاط جبهه پرتو چنین حالتی (بهینگی مطلق به سمت یک هدف) وجود ندارد، بلکه در سایر نقاط جبهه، بهینگی تعاملی به سمت هر دو هدف قابل مشاهده است و این می‌تواند دلیلی بر قدرت بالای الگوریتم در پوشش تمام جواب‌های ممکن باشد.

در مطالعه‌ای که سولانو و همکاران (۲۰۰۲) از یک شهر با اندازه فرضی در ایالات متحده آمریکا جهت پیاده‌سازی مدل ریاضی خود استفاده کردند، نتایج نشان داد با افزایش میزان بازیافت، هزینه کل سیستم افزایش و انتشار GHG کاهش می‌یابد و برعکس [۲۷]. در حالی که در مطالعه حاضر مشاهده شد، با افزایش نرخ بازیافت هر دو هدف به صورت تعاملی کاهش پیدا کردند. البته باید توجه داشت تعیین مرزهای سامانه و پیش فرض‌ها می‌تواند از عوامل بروز این تفاوت باشد. محارب و همکاران (۲۰۰۸) از یک صفحه گسترده مبتنی بر نرم افزار LCA جهت تعیین میزان نشر آلاینده‌های زیست محیطی یک ISWMS شامل زیرسامانه‌های جداسازی از مبدا، پسماندسوزی، هضم هوازی، هضم بی‌هوازی و لندفیل بدون در نظر گرفتن مقایسه اقتصادی استفاده کردند، نتایج نشان داد میزان نشر GHG با افزایش انحراف پسماند از زیرسامانه لندفیل به سمت سایر زیرسامانه‌ها به شدت کاهش پیدا می‌کند، همانطور که در مطالعه حاضر به خصوص در نرخ تفکیک ۱۰۰ درصد به وضوح رویت شد [۲۸]. در پژوهشی دیگر مین اوقلو و کمیل (۲۰۱۳) از مدل ریاضی چندهدفه به منظور برآورد کمترین مقدار نشر گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های پردازش و دفع پسماندهای منطقه مقدونیه شرقی و تراکیه از یونان استفاده کردند. در این مطالعه که حل مدل ریاضی چند هدفه به روش دستی انجام گرفت، نتایج نشان داد در یک سامانه یکپارچه مدیریت پسماند هر چه درصد تفکیک از مبدا و تفکیک در مراکز پردازش پسماند افزایش یابد، مقدار هزینه و نشر آلاینده‌های زیستی نیز به کمترین مقدار خود میل خواهد کرد که در توافق کامل با نتایج مطالعه حاضر بود [۲۹]. نتایج بالا نشان می‌دهد، همیشه در بهینه‌سازی سامانه‌های مدیریت MSW جنبه‌های خاصی وجود دارد که توسط هر محقق فرضیات ساخته شده و مرزهای تعیین شده باید به روشنی تعریف شود و هنگام مقایسه مطالعات مختلف رعایت جانب احتیاط نیز ضروری می‌باشد.

به طور کلی با توجه نتایج حاصل می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری نمود که در یک سامانه یکپارچه مدیریت پسماند شهری هر چقدر نرخ تفکیک از صفر به سمت ۱۰۰ میل کند، با توجه به افزایش مقدار مواد جهت بازیافت و بازاستفاده و همچنین جلوگیری از انتشارات ناشی از تولید مواد اولیه، میزان هزینه‌ها و نشر GHG به طور قابل توجهی کاهش پیدا خواهد کرد، به طوریکه کمترین هزینه و نشر GHG در نرخ تفکیک و پردازش صفر درصد طبق الگوریتم ژنتیک مبتنی بر دسته‌بندی نامغلوب به ترتیب ۳۶۲۵۵۵۳ تومان و  $\text{kg CO}_2$  ۱۳۱۱- معادل و در نرخ تفکیک و پردازش ۱۰۰ درصد به ترتیب ۱۷۵۰۶۹۸- تومان (درآمدزایی) و  $\text{kg CO}_2$  ۲۴۳۸- معادل (انتشارات اجتنابی) برآورد شد که نشان دهنده بهبود قابل توجه نتایج در روند صعودی نرخ تفکیک می‌باشد. همچنین با بررسی

از جمله عوامل کاهش هر دو هدف در زیرسامانه مذکور باشد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل پایان‌نامه با عنوان "مطالعه و امکان‌سنجی برآورد کمترین هزینه و انتشار آلاینده‌گی دفع پسماندهای جامد شهری به روش کمپوست با استفاده از تکنیک‌های تحقیق در عملیات در تهران" در مقطع کارشناسی ارشد در سال ۱۳۹۴ است که با حمایت پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی اجرا شده است. بدینوسیله از مسئولین محترم دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران و مسئولین محترم سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران به ویژه مهندس سعید مرادکیا و افشین آزادی‌فر که در این پژوهش همکاری نمودند، صمیمانه سپاس‌گزاریم.

روند کلی تغییرات توابع هدف مشخص شد که افزایش توجیه فنی تاسیس چنین سامانه‌هایی نیاز به نرخ بالای پسماند ورودی روزانه و تکمیل سامانه با افزایش سایر زیرسامانه‌های دارای بعد اقتصادی و زیست محیطی مثبت از قبیل پسماندسوزی و هضم بی‌هوازی دارد. از طرف دیگر با توجه به اینکه زیرسامانه‌های حمل و نقل و لندفیل از هیچ بعد اقتصادی و زیست محیطی مثبتی (درآمدزایی و انتشارات اجتنابی) برخوردار نمی‌باشند، لازم است جریان و روند تخصیص پسماند در این زیرسامانه‌ها با ظرافت بیشتری دنبال شود. برای مثال استفاده از ماشین‌های حمل و نقل با مصرف سوخت پایین، کمینه کردن فاصله بین ایستگاه‌های حمل میانی و زیرسامانه‌ها با استفاده از تکنیک‌های GIS و نوسازی زیرساخت‌های حمل و نقل در زیرسامانه حمل و نقل و ارسال کمترین مقدار پسماندهای تر و قابل بازیافت به زیرسامانه لندفیل به همراه استفاده از گودال‌های دفن بهداشتی و پوشش مناسب سطح پسماندهای دفن شده می‌تواند

### REFERENCES

1. Aghajani Mir M, Ghazvinei PT, Sulaiman NMN, Basri NEA, Saheri S, Mahmood NZ et al. Application of TOPSIS and VIKOR improved versions in a multi criteria decision analysis to develop an optimized municipal solid waste management model. *Journal of Environmental Management* 2016; 166:109-15.
2. Karak T, Bhagat RM, Bhattacharyya P. Municipal solid waste generation, composition, and management: The world scenario. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 2012; 42(15):1509-630.
3. Hoornweg D, Bhada-Tata P. What a waste—A Global Review of Solid Waste Management. Washington DC: World Bank, 2012.
4. Seng B, Kaneko H, Hirayama K, Katayama-Hirayama K. Municipal solid waste management in Phnom Penh, capital city of Cambodia. *Waste Management & Research* 2010; 29(5):491-500.
5. Yildirim V. Application of raster-based GIS techniques in the siting of landfills in Trabzon Province, Turkey: A case study. *Waste Management & Research* 2012; 30(9):949-60.
6. Milutinović B, Stefanović G, Dassisti M, Marković D, Vučković G. Multi-criteria analysis as a tool for sustainability assessment of a waste management model. *Energy* 2014; 74:190-201.
7. Mavrotas G, Gakis N, Skoulaxinou S, Katsouros V, Georgopoulou E. 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* 2015; 51:1205-222.
8. IPCC. Renewable energy sources and climate change mitigation, Special report of the intergovernmental panel on climate change 2012. Available from: <http://srren.ipcc-wg3.de/report>. Accessed May 20, 2012.
9. Boldrin A, Neidel TL, Damgaard A, Bhandar GS, Møller J, Christensen TH. Modelling of environmental impacts from biological treatment of organic municipal waste in EASEWASTE. *Waste Management* 2011; 31(4):619-30.

10. Winston WL. Operations research: Applications and algorithms. 3rd ed. Boston: Duxbury Press 1994; P: 135-175.
11. Pires A, Martinho G, Chang NB. Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques. *Journal of Environmental Management* 2011; 92(4):1033-1050.
12. Sornil W. Solid Waste Management Planning Using Multi-Objective Genetic Algorithm. *The Journal of Solid Waste Technology and Management* 2014; 40(1):33-43.
13. Huang GH, Baetz BW, Patry GG. Grey integer programming: An application to waste management planning under uncertainty. *European Journal of Operational Research* 1995; 83(3):594-620.
14. Li YP, Huang GH, Nie SL. A two-stage fuzzy robust integer programming approach for capacity planning of environmental management systems. *European Journal of Operational Research* 2008; 189(2):399-420.
15. Li YP, Huang GH, Nie SL. A mathematical model for identifying an optimal waste management policy under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling* 2012; 36(6):2658-73.
16. Vadenbo C, Guillén-Gosálbez G, Saner D, Hellweg S. Multi-objective optimization of waste and resource management in industrial networks-Part II: Model application to the treatment of sewage sludge. *Resources, Conservation and Recycling* 2014; 89:41-51.
17. Gottinger HW. 1988. A computational model for solid waste management with application. *European Journal of Operational Research* 1988; 35(3):350-64.
18. Xi BD, Su J, Huang GH, Qin XS, Jiang YH, Huo SL et al. An integrated optimization approach and multi-criteria decision analysis for supporting the waste-management system of the City of Beijing, China. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2010; 23(4):620-31.
19. Guo P, Huang GH. Interval-parameter semi-infinite fuzzy-stochastic mixed-integer programming approach for environmental management under multiple uncertainties. *Waste Management* 2010; 30(3):521-531.
20. Chatzouridis C, Komilis D. A methodology to optimally site and design municipal solid waste transfer stations using binary programming. *Resources, Conservation and Recycling* 2012; 60:89-98.
21. Badran MF, El-Haggag SM. Optimization of municipal solid waste management in Port Said-Egypt. *Waste Management* 2006; 26(5):534-545.
22. Louis G, Shih JS. A flexible inventory model for municipal solid waste recycling. *Socio-Economic Planning Sciences* 2007; 41(1):61-89.
23. Laundry RS. Multiple Criteria Optimisation: Theory, Computation and Application. *Journal of the Operational Research Society* 1988; 39(9):879-879.
24. Rajaeifar MA, Tabatabaei M, Ghanavati H. Data supporting the comparative life cycle assessment of different municipal solid waste management scenarios. *Data in Brief* 2015; 3:189-194.
25. Tehran Waste Management Organization. Tehran Municipality, Iran, Statistics report on 2015. Available from:



<http://pasmand.tehran.ir/Default.aspx?alias=pasmand.tehran.ir/en>. Accessed January 12, 2015 (In Persian).

26. McDougall F, White P, Franke M, Hindle P. Integrated solid waste management: A life-cycle inventory. 2nd ed. Blackwell Science; 2001. P: 378–422.
27. Solano E, Dumas R, Harrison K, Ranjithan SR, Barlaz MA, Brill ED. Life-cycle-based solid waste management II. Illustrative applications. *Journal of Environmental Engineering* 2002; 128(10):993–1005.
28. Mohareb AK, Warith MA, Diaz R. Modelling greenhouse gas emissions for municipal solid waste management strategies in Ottawa, Ontario, Canada. *Resources, Conservation and Recycling* 2008; 52(11):1241–51.
29. Minoglou M, Komilis D. Optimizing the treatment and disposal of municipal solid wastes using mathematical programming-a case study in a Greek region. *Resources, Conservation and Recycling* 2013; 80:46-57.