

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و یکم، شماره دو، اردیبهشت ماه ۹۸

ارزیابی گزینه‌های دفع نهایی پسماند جامد شهری با استفاده از تلفیق روش‌های

ارزیابی چرخه عمر و تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: شهر تهران)

سمیه خان پورا قدم^۱

مهدی قنبرزاده لک^{۲*}

m.ghanbarzadehlak@urmia.ac.ir

مهر داد مهتدی^۳

محمد رضا صبور^۴

تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۴/۲۴

تاریخ دریافت: ۸۸/۰۸/۲۸

چکیده

زمینه و هدف: به منظور تعیین روش مناسب دفع پسماندهای جامد شهری مدل تلفیقی از روش‌های ارزیابی چرخه عمر و تحلیل سلسله مراتبی تهیه گردید. ارزیابی‌های زیست‌محیطی و فنی سناریوهای (A) دفن زایدات بدون استحصال انرژی، (B) زباله‌سوزی به همراه استحصال انرژی و دفن خاکستر و (C) تولید کود کمپوست از بخش ارگانیک و دفن دیگر زایدات، توسط مدل انجام شد. **روش بررسی:** در انجام ارزیابی‌های زیست‌محیطی، میزان انتشارات گلخانه‌ای (GHGs) در چرخه عمر روش دفع برآورد گردید. ارزیابی‌های فنی نیز مطابق با روش تحلیل سلسله مراتبی و نظرسنجی از متخصصان انجام شد. بمنظور تحلیل نتایج مدل، شهر تهران بعنوان مطالعه موردی انتخاب شده است.

یافته‌ها: بیشترین انتشارات گلخانه‌ای طی سناریوی A و کمترین آن در سناریوی B اتفاق می‌افتد. حداکثر تخفیف در انتشارات بواسطه سوزاندن زایدات غذایی و کاغذ و مقوا، در سناریوی B حاصل می‌شود. برخلاف آن، در سناریوهای A و C، دفن این قبیل زایدات عامل اصلی تولید گاز متان بوده است. سوزاندن زایدات پلاستیکی اگرچه می‌تواند منجر به استحصال انرژی بیشتری در سناریوی B شود، ولی تولید CO₂ غیربیولوژیک اثر افزایشی در انتشار GHGs دارد. سناریوهای A و C از منظر اغلب معیارهای فنی برتری نسبتاً بالایی در مقایسه با سناریوی B داشته‌اند لیکن امکان شیرابه‌زایی در این سناریوها امتیاز فنی آنها را کاهش می‌دهد.

بحث و نتیجه‌گیری: براساس تلفیق ارزیابی‌ها، روش دفن بدون استحصال انرژی نامناسب‌ترین گزینه بوده و زباله‌سوزی با استحصال انرژی منجر به کمترین انتشارات گلخانه‌ای شده و از نظر فنی نیز مورد قبول است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت پسماند شهری، ارزیابی چرخه عمر، تحلیل سلسله مراتبی، انتشارات گلخانه‌ای، تهران.

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-محیط‌زیست، انستیتو آب و انرژی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ایران. * (مسئول مکاتبات)

۳- دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه مریلند، ایالات متحده آمریکا.

۴- دانشیار گروه عمران-محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

Evaluation of Municipal Solid Waste Final Disposal Scenarios Through Life Cycle Assessment and Analytic Hierarchy Process

Methods (Case study: Tehran)

Somayeh Khan Pouraghdam¹

Mehdi Ghanbarzadeh Lak^{2*}

m.ghanbarzadehlak@urmia.ac.ir

Mehrdad Mohtadi³

Mohammad Reza Sabour⁴

Admission Date: July 15, 2010

Data Received: November 19, 2009

Abstract

Background and Objective: An integrated model of life cycle assessment and hierarchical analysis was developed to determine the best practical method for municipal solid waste disposal. The model used for environmental and technical assessments of scenarios included (A) landfilling of wastes without energy extraction; (B) waste incineration with energy recovery and ash burial; and (C) production of compost from the organic components and landfilling other wastes.

Method: In order to conduct environmental assessments, the amount of greenhouse gas emissions (GHGs) was estimated by life cycle of the disposal method. Technical evaluations were carried out based on the hierarchical analysis method and a survey of experts. In order to analyze the results of the proposed model, Tehran city in Iran was selected as a case study.

Findings: The highest greenhouse gas emissions occurred in scenario A, and the lowest was associated with scenario B. Maximum discounts on emissions from burning putrescible wastes, paper and cardboards were obtained in scenario B. In contrast, landfilling of such wastes in scenarios A and C was the main source of methane production. Although the incineration of plastic wastes might lead to more energy extraction in scenario B, the generation of non-biological CO₂ had an incremental effect on GHG emissions. Scenarios A and C had a relatively high superiority over scenario B from the perspective of most technical criteria, but the probability of leachate in these scenarios reduced their technical advantages.

Discussion and Conclusion: Based on the combination of evaluations, the method of landfilling without energy extraction is the most inappropriate option, and waste incineration with energy extraction leads to the lowest greenhouse gas emissions and is technically acceptable.

Keywords: Municipal Solid Waste Management, Life Cycle Assessment, Analytic Hierarchy Process, Greenhouse Gas Emission, Tehran.

1- MSc. in Civil Engineering, Iran. Institute of Water and Energy, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. * (Corresponding Author)

3- PhD, Faculty of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, MD, USA.

4- Associate Professor, Department of Civil & Environmental, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

مقدمه

زوجی را با همدیگر تلفیق نموده و تصمیم بهینه را مشخص خواهد نمود (۳).

در سالیان اخیر روش تحلیل سلسله مراتبی در برنامه‌ریزی‌های شهری و منطقه‌ای بکار گرفته شده است. با استفاده از این روش در مواردی که پارامترهای تاثیرگذار در تصمیم‌گیری متعدد بوده‌اند، ضمن وزن‌دهی به پارامترها و معیارهای گوناگون، تصمیمات مناسب اخذ گردیده است (۴). سیستم‌های مدیریت پسماند نیز به عنوان یکی از مباحث مطرح در برنامه‌ریزی‌های کلان شهری از این قاعده مستثنی نبوده و با توجه به معیارهای متنوع موثر در اتخاذ تصمیمات در زمینه مدیریت پسماند، از این روش به منظور انتخاب گزینه مناسب و یا جانمایی مراکز دفن استفاده می‌شود (۵).

روش ارزیابی چرخه عمر (Life Cycle Assessment = LCA) نیز که از مبانی مهندسی شیمی و آنالیزهای جرم و انرژی نشأت گرفته است، امروزه بعنوان یک متد استاندارد بین‌المللی که قادر است ورودی‌ها و انتشارات بالادستی و پایین‌دستی یک سیستم مدیریت پسماند را متناسب با چرخه عمر محصولات یا فرآیندها مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد، مورد توجه متخصصان جهت انجام ارزیابی‌های زیست‌محیطی می‌باشد (۸-۶). در ارزیابی‌های مبتنی بر LCA، تمام چرخه عمر یک محصول از مرحله استخراج مواد خام اولیه تا مراحل تولید، استفاده و در نهایت دور ریز آن مدنظر بوده و آثار سوء بالقوه متناسب با این مراحل، بصورت کمی بیان می‌گردد (۶) و (۹). از جمله آثار سوء زیست‌محیطی که تاثیر سیستم‌های مدیریت پسماندهای شهری بر آن در سنوات اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، پدیده گرمایش جهانی در اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای (Green House Gases = GHGs) بوده و در این تحقیق ارزیابی زیست‌محیطی سناریوها بر مبنای میزان GHGs منتشره انجام شده است.

استفاده عملی از ارزیابی‌های مبتنی بر LCA در بحث مدیریت مواد زاید جامد به سالهای پایانی دهه ۱۹۹۰ و تحقیقات انجام شده توسط Rieradevall و همکاران (۱۰) و Wietz و

به سیستمی متشکل از مجموعه برنامه‌ها، تاسیسات و تجهیزاتی که به منظور ذخیره‌سازی، جمع‌آوری و حمل، پردازش و بازیافت و دفع نهایی زایدات اجرا می‌گردد، سیستم مدیریت جامع پسماند گفته می‌شود. با توجه به پیشرفت‌های علمی و تکنولوژیکی اخیر، هر کدام از مراحل یک سیستم مدیریت جامع پسماند می‌تواند با استفاده از تجهیزات مختلف و یا به چندین روش (سناریوهای دفع) انجام گردد. در نهایت با توجه به ملاحظات فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی گزینه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و بهترین سناریو انتخاب می‌شود (۱). در بین ارزیابی‌های فوق‌الذکر، ارزیابی زیست‌محیطی و فنی عمومیت بیشتری در میان متخصصان مدیریت پسماند داشته و در این تحقیق بمنظور تعیین روش بهینه استفاده شده است.

در مسائلی که چندین پارامتر در انتخاب گزینه بهینه اثرگذار می‌باشند، استفاده از روش مقایسات زوجی گزینه‌ها و جدول بندی سیستماتیک نتایج عددی، کاربرد نسبتاً وسیعی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی داشته است (۲). در این روش‌ها ابتدا وزن هر یک از فاکتورهای تصمیم‌گیری مطابق با اهداف ارزیابی، مشخص شده و با مقایسه دودویی گزینه‌ها نسبت به هر کدام از فاکتورها، ترتیب اهمیت آنها تعیین می‌گردد.

از انواع روشهای تجزیه و تحلیل چند شاخصه‌ای که در سالیان اخیر کاربرد فراوانی در ارزیابی‌ها داشته است، می‌توان به روش تحلیل سلسله مراتبی (Analytic Hierarchy Process = AHP) اشاره نمود. در روش AHP با فراهم آوردن درخت سلسله مراتب تصمیم که معیارهای مقایسه و گزینه‌های کاندید شده را نشان می‌دهد، یکسری مقایسات زوجی انجام و وزن هر یک از فاکتورها در راستای گزینه‌های کاندید شده مشخص می‌گردد. تحلیل سلسله مراتبی به تصمیم‌گیرنده نهایی کمک می‌کند تا بگونه‌ای نظرات اعضا را با هم تلفیق نماید که تصمیم نهایی در برگزیده نظرات تمامی افراد مصاحبه شونده باشد. در نهایت منطق AHP به گونه‌ای ماتریس‌های حاصل از مقایسات

همکاران (۱۱) برمی‌گردد. تا آن زمان متد ارزیابی چرخه عمر عموماً در ارزیابی‌های زیست‌محیطی یک سیستم تولید محصول بدون در نظر گرفتن بحث زایدات تولیدی و یا ثابت فرض کردن این بخش، بکار گرفته می‌شد. برای اولین بار در سال ۱۹۹۵، آقای White و همکاران نحوه استفاده از LCA در ارزیابی زیست‌محیطی گزینه‌های مختلف دفع پسماند را با ثابت فرض کردن آثار سیستم تولید محصول، تشریح نمودند (۱۲).

در سال ۲۰۰۷، Chen و همکاران مطالعاتی را در خصوص تعیین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از هر کدام از آیت‌های مدیریتی در حال اجرا در جزیره Taipei تایلد شروع کردند. جهت تعیین پایه‌ای برای مطالعات آینده در کشور تایلد، Chen سناریوی دفع موجود را با جزئیات کامل مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که مهمترین عامل تولید گازهای گلخانه‌ای در این سناریو، انتقال بخشی از پسماند شهری (آشپزخانه) به مراکز پرورش دام و فرآوری و سپس استفاده بعنوان خوراک آنها می‌باشد. بعلاوه استفاده از سوخت‌های سنگین در این مراکز جهت تولید بخار و استریلیزاسیون پسماند شهری با آن، انتشارات بالایی از گازهای CO₂ تولید و در اتمسفر پخش خواهد شد. از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به مشارکت قابل توجه بخش حمل و نقل در تولید گازهای گلخانه‌ای اشاره داشت (۱۳).

در تحقیق دیگری که توسط Blengini در سال ۲۰۰۸ در ناحیه‌ای در شمال ایتالیا انجام شده است، کارخانه کمپوستی با ظرفیت ۱۶۰۰۰ تن در سال مورد بررسی قرار گرفت و آثار زیست‌محیطی بهره‌برداری از آن با یک مرکز دفن فرضی بعنوان گزینه جایگزین، مقایسه گردید. از جمله نتایج جالب توجه این تحقیق، منفی بودن اثر تفکیک از مبدا بر پارامترهای زیست‌محیطی مورد مطالعه (یعنی افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای بجای کاهش آن) بواسطه نیاز به کیسه‌های زباله بیشتر، می‌باشد (۱۴).

در این تحقیق سعی شده است با تلفیق روش‌های ارزیابی چرخه عمر و تحلیل سلسله مراتبی، روش بهینه دفع پسماند در شهر تهران تعیین گردد. تهران با جمعیتی رو به رشد، بعنوان یکی از کلان‌شهرهای کشور همواره با مشکل تولید فراوان پسماند و دفع آن مواجه بوده است. این مشکل در سالیان اخیر با اهمیت یافتن ملاحظات زیست‌محیطی از یک سو و افزایش روزافزون میزان تولید پسماند از سوی دیگر، نمود بیشتری یافته، به طوریکه همواره مسئولان شهری با لحاظ نمودن توأم ملاحظات زیست‌محیطی و فنی به دنبال روش بهینه دفع پسماند تولیدی در این شهر می‌باشند. علاوه بر میزان قابل توجه تولید پسماند، ترکیب اجزای پسماند شهری تهران نیز طی سال‌های متمادی تغییرات بسیاری بدلیل دگرگونی عادات اجتماعی و فعالیت‌های روزمره داشته است. بعنوان مثال روند رو به رشد درصد مواد غیر قابل تجزیه بیولوژیکی همچون انواع پلاستیک‌ها در جریان پسماند شهری تهران، میزان تغییر در ترکیب زایدات جامد شهری را بخوبی نشان می‌دهد. در جدول ۱، درصد ترکیبات پسماند شهر تهران در سال ۱۳۸۲ (به روزترین داده‌های آماری موجود در زمان انجام تحقیق) آورده شده است. لازم بذکر است آخرین آنالیز فیزیکی جامع پسماندهای تهران در سال ۱۳۸۲ انجام و نتایج آن در فصلنامه آماری مدیریت پسماندهای جامد شهری تهران ذکر گردیده است (۱۵).

روش بررسی

همانطور که گفته شد، در این تحقیق سناریوی بهینه دفع پسماندهای جامد شهری تهران با انجام ارزیابی‌های زیست‌محیطی (به روش ارزیابی چرخه عمر) و فنی (با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی) تعیین خواهد شد. بنابراین در این قسمت روش انجام ارزیابی‌های فوق‌الذکر آورده می‌شود.

جدول ۱- درصد اجزای پسماند تولیدی در شهر تهران (۱۵)

Table 1- Percentage of waste components produced in Tehran (15)

درصد	نوع پسماند	درصد	نوع پسماند
۱/۶۶	زایدات باغبانی	۶۸/۸۰	پسماند غذایی
۲/۴۰	شیشه	۸/۱۳	کاغذ و مقوا
۷/۶۵	سایر	۹/۶۱	انواع پلاستیک
		۱/۷۵	فلزات

ارزیابی زیست‌محیطی

مطابق با استاندارد ISO 14040، اجرای روش LCA شامل چهار مرحله اساسی (۱) تعریف هدف (اهداف) و قلمرو سیستم مورد مطالعه، (۲) تهیه فهرست چرخه عمر فرآیندهای مد نظر در سناریوها (Life Cycle Inventory = LCI)، (۳) ارزیابی اثرات زیست‌محیطی (Life Cycle Impact Assessment = LCIA) و (۴) تفسیر نتایج، می‌باشد.

تعریف اهداف و قلمرو

هدف از این تحقیق تعیین روش بهینه دفع پسماند در محدوده شهر تهران بوده و برای این منظور از آمار و اطلاعات مربوط به اندازه‌گیری و آنالیز ترکیب پسماند شهری تهران استفاده شده است. واحد مورد مطالعه (Fu) برای مقایسه بین سناریوهای مختلف، یک تن پسماند ورودی به آنها در نظر گرفته شده است. سیستم مورد مطالعه نیز شامل گزینه‌های مختلف دفع (سوزاندن، دفن و کمپوست) در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. نقطه شروع مرز سیستم، لحظه ورود پسماند به سیستم مدیریت پسماندهای جامد بوده و مرزهای این سیستم به محل دفع نهایی پسماند محدود می‌شود چرا که وقوع بیشترین میزان مخاطرات زیست‌محیطی در این فاز از سیستم مدیریت پسماندهای شهری رخ می‌دهد و از طرفی با فرض اعمال سناریوهای یکسان در المان‌های جمع‌آوری و حمل، میزان وقوع مخاطرات زیست‌محیطی در این بخش‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین سه سناریوی دفع به شرح ذیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

سناریوی A: کلیه پسماندهای تولیدی بدون استحصال انرژی دفن می‌گردند.

سناریوی B: کلیه پسماندهای تولیدی وارد واحد زباله‌سوز شده و خاکستر حاصله دفن می‌شود.

سناریوی C: بخش آلی پسماند شامل پسماند غذایی، چوب و زایدات باغبانی وارد فرآیند کمپوست شده و مواد روسرندی کارخانه کمپوست به همراه پسماندهای غیرآلی، دفن می‌گردد.

تهیه فهرست چرخه عمر

برخی پارامترها اثر مستقیم و برخی اثر غیرمستقیم در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند که هر دو حالت در این تحقیق مدنظر قرار گرفته است. همچنین اثر انتشار GHGs از هر جزء پسماند به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است چرا که اثر زیست‌محیطی مورد مطالعه بستگی به درصد مواد تشکیل دهنده پسماند دارد. اطلاعات موردنیاز در برآورد انتشار GHGs از راهنمای انتشار گازهای گلخانه‌ای در سیستم‌های مدیریت پسماند از طرح بین دولتی تغییرات آب و هوا (Intergovernmental Panel on Climate Change = IPCC) (۱۶) و راهنمای آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا USEPA (۱۷) دریافت شده است.

(الف) میزان تولید و ترکیب فیزیکی پسماند: میزان تولید پسماند از فصلنامه‌های آماری مدیریت پسماندهای جامد شهر تهران منتشر شده در بهار ۱۳۸۶ تا بهار ۱۳۸۷ (میانگین سالانه) و اطلاعات مربوط به ترکیب فیزیکی آن نیز از نتایج حاصل از

زایدات باغبانی و پسماندهای غذایی، بعثت بیولوژیک بودن باعث بروز اثرات گلخانه‌ای نشده و در محاسبات وارد نمی‌شوند. از طرف دیگر بازیافت فلزات موجود در خاکستر حاصله از زباله‌سوزی خود می‌تواند بعنوان یک اقدام کاهنده انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب گردد. از آنجاییکه مجموعه عملیات تولید محصولات فلزی از مواد بازیابی شده در مقایسه با فرآیندهای تولید از مواد خام (اکتشاف و استخراج مواد خام از معادن، تغلیظ و خالص‌سازی، ذوب و ...)، به مراتب به انرژی کمتری نیاز دارند، میزان آلودگی منتشره از آنها در محیط نیز کمتر خواهد بود. میزان تولید CO_2 ارتباط مستقیم با ترکیبات موجود در پسماند دارد بنابراین آگاهی از اجزای تشکیل دهنده پسماند و درصد هر یک از اجزا در محاسبه میزان CO_2 تولیدی مهم است. بر خلاف آن، میزان انتشار CH_4 و N_2O تا حدود زیادی مستقل از ترکیبات موجود در پسماند بوده و به شرایط احتراق بستگی دارد.

فاکتورهای انتشار GHGs در فرآیند زباله‌سوزی در جدول ۲ آورده شده است (۱۶).

در توضیح این جدول لازم بذکر است از آنجا که تجزیه برخی مواد همچون کاغذ و مقوا، چوب و زایدات باغبانی و پسماندهای غذایی در شرایط طبیعی خود منجر به تولید گاز دی‌اکسیدکربن طی فرآیندهای بیولوژیکی هوازی می‌شود بنابراین گاز CO_2 ناشی از احتراق آنها در چرخه کربن اخلاقی ایجاد نکرده و در محاسبات اثرات گلخانه‌ای وارد نمی‌شوند. از طرفی در واحدهایی که دارای سیستم استحصال انرژی می‌باشند، بدلیل میزان انرژی استحصال شده از زایدات فوق الذکر (با توجه به ارزش حرارتی بالای آنها در مقایسه با سایر زایدات) و عدم نیاز به تولید همان مقدار انرژی در واحدهای نیروگاهی، زباله‌سوزی این قبیل زایدات منجر به کاهش انتشارات گلخانه‌ای خواهد شد (علامت منفی در جدول ۲).

آنالیز پسماند در سال ۱۳۸۲ استخراج شده است (۱۵). لازم بذکر است آخرین فصلنامه منتشر شده مربوط به فصل بهار سال ۱۳۸۷ بوده و بمنظور پوشش دادن به تغییرات فصلی تولید پسماند در تهران، میانگین سالانه زایدات شهری تحویلی به مجتمع دفع و پردازش آراد کوه، با استخراج آمار از جداول مربوطه، محاسبه شده است.

(ب) **زباله‌سوزی:** انتشارات خروجی از واحدهای زباله‌سوزی را که منجر به پدیده گرمایش جهانی می‌شوند، می‌توان در سه دسته (۱) گازهای CO_2 و N_2O خروجی از دودکش بواسطه احتراق زایدات/سوخت کمکی (در خصوص CO_2 منظور بخشی از آن است که از احتراق پسماندهای غیربیولوژیک همچون انواع پلاستیک، چرم و لاستیک، حاصل می‌شود)، (۲) میزان گازهای گلخانه‌ای که در نتیجه استحصال انرژی از تولید آنها اجتناب می‌شود و (۳) میزان کاهشی که در اثر بازیافت فلزات موجود در خاکستر ته کوره ایجاد خواهد شد، تقسیم‌بندی نمود.

بر این اساس انتشار خالص گازهای گلخانه‌ای را می‌توان مطابق با معادله ۱ محاسبه نمود. کلیه واحدها برحسب تن کربن معادل بر تن پسماند (MTCE/tonne) می‌باشند.

$$E_{ni} = G_{ni} - U_{ni} - R_{nm} \quad (1)$$

که در آن:

E_{ni} : فاکتور انتشار خالص GHGs برای سوزاندن ماده i ؛

G_{ni} : انتشارات CO_2 (از منابع غیربیولوژیکی) و N_2O از

دودکش زباله‌سوز برای ماده i ؛

U_{ni} : میزان GHGs کاهش داده شده بواسطه استحصال انرژی

از سوزاندن ماده i ؛

R_{nm} : میزان کاهش GHGs بواسطه بازیافت فلزات از خاکستر

ته کوره؛

لازم بذکر است مطابق با راهنمای IPCC در برآورد گازهای گلخانه‌ای، CO_2 منتشره از سوختن کاغذ و مقوا، چوب و

جدول ۲- مقادیر فاکتور انتشار گازهای گلخانه‌ای در
پروسه‌های زباله‌سوزی و دفن

Table 2- GHG emission factors for waste
incineration and landfilling methods

فاکتور انتشار (MTCE/tonne)		اجزاء پسماند
دفن	زباله سوزی	
۰/۳۱۰	-۰/۱۶۵	کاغذ و مقوا
۰/۰۱۰	۲/۳۷۰	انواع پلاستیک
۰/۰۱۰	۰/۰۳۰	شیشه
۰/۰۱۰	-۰/۴۰۱	فلزات
۰/۲۹۰	-۰/۰۵۱	پسماند غذایی
-۰/۰۳۰	-۰/۰۶۱	چوب و زایعات باغبانی
۰/۰۱۰	-	خاکستر
۰/۱۷۰	-۰/۰۳۲	سایر

G_{Li} : انتشارات GHGs ناشی از دفن ماده i ؛
 N_{csi} : نگهداشت خالص کربن در صورت دفن ماده i ؛
 T_i : انتشارات GHGs در مراحل بهره‌برداری لندفیل یا بواسطه
حمل و نقل ماده i به مرکز دفن؛
فاکتورهای انتشار GHGs طی دفن در جدول ۲ نشان داده
شده است.

(د) کمپوست: در این بخش فاکتورهای موثر در تولید گازهای
گلخانه‌ای در مراحل مختلفی در نظر گرفته شده‌اند که عبارتند
از: (۱) متان تولیدی در فرآیند هضم بی‌هوازی، (۲) تثبیت کربن
در کمپوست تولیدی، (۳) تولید N_2O از مواد آلی حاوی
نیترژن در پسماند و CO_2 غیرآلی تولیدی در حین انتقال
کمپوست تولیدی به مراکز مصرف. لازم بذکر است CO_2 آلی
تولید شده در کمپوست باعث گرمایش جهانی نبوده و وارد
محاسبات نمی‌شود. در جدول ۳ فاکتورهای انتشار در این روش
آورده شده است.

ارزیابی اثرات زیست‌محیطی

در این تحقیق صرفاً انتشارات در محیط هوا طی سناریوهای
پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس روش پیشنهادی
IPCC، اثر گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوا بواسطه انتشار
گازهای گلخانه‌ای برآورد شده است. مهمترین گازهایی که عامل
بروز اثر گلخانه‌ای و در نتیجه گرمایش جهانی محسوب می‌شوند
از سوی IPCC، گازهای CH_4 ، CO_2 و N_2O معرفی شده‌اند.
فاکتورهای مدنظر نشان دهنده پتانسیل بروز گرمایش جهانی
برای دوره ۱۰۰ ساله بر اساس تن انتشار گاز معادل (CO_2)
بازای هر واحد عملیاتی می‌باشد. براساس استاندارد ISO
14042، چهارچوب عمومی یک LCIA از عناصر اجباری و
اختیاری تشکیل شده است. طبقه‌بندی و شاخص‌گذاری از
جمله عناصر اجباری ارزیابی آثار چرخه عمر بوده و طی آنها
نتایج حاصل از مرحله LCI بصورت غلظتهایی از مواد شاخص
برای هرکدام از دسته‌های آثار بیان می‌شود. پس از آن نتایج را
می‌توان نرمالیزه کرد و وزن دهی نمود (عناصر اختیاری
LCIA) تا به شاخص واحدی در زمینه آثار زیست‌محیطی
دست یافت (۲۰-۱۸).

(ج) دفن: در محاسبه گازهای گلخانه‌ای منتشره در نتیجه دفن
مخلوط پسماند و خصوصاً پسماند غذایی، سه عامل: (۱) میزان
انتشار CH_4 از سلول دفن، (۲) میزان انتشار CO_2 در حین
بهره‌برداری و فعالیت‌های مربوطه و (۳) میزان ذخیره و
نگهداشت کربن، پارامترهای دخیل می‌باشند. میزان CH_4
تولیدی به عواملی همچون نوع طراحی محل دفن، وجود
سیستم جمع‌آوری متان و ترکیبات پسماند، وابسته می‌باشد.
۱۰ درصد از متان تولیدی در اثر فعالیت باکتری‌های موجود در
خاک پوششی مرکز دفن به CO_2 تبدیل و متصاعد می‌شود.
همانند سناریوی زباله‌سوزی، انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از
دفن پسماندهای جامد شهری در لندفیل را می‌توان بر اساس
معادله ۲ محاسبه نمود. کلیه واحدها بر حسب
MTCE/tonne می‌باشند.

$$E_{Li} = G_{Li} - N_{csi} + T_i \quad \text{معادله (۲)}$$

که در آن:

E_{Li} : فاکتور انتشار خالص GHGs برای دفن ماده i ؛

جدول ۳- مقادیر فاکتور انتشار گازهای گلخانه‌ای در پروسه کمپوست

Table 3- GHG emission factors in the composting process

فاکتور انتشار (MTCE/tonne)	پارامترهای تاثیرگذار
۰/۱۰۰	تولید متان
۰/۰۸۸	تولید N ₂ O
۰/۰۱۰	CO ₂ مربوط به حمل و نقل
-۰/۰۵۸	میزان تثبیت کربن
۰/۱۴۰	کل GHGs

تفسیر نتایج LCA

در این بخش که آخرین مرحله از روش LCA می‌باشد، مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای به ازای واحد مورد مطالعه (یک تن

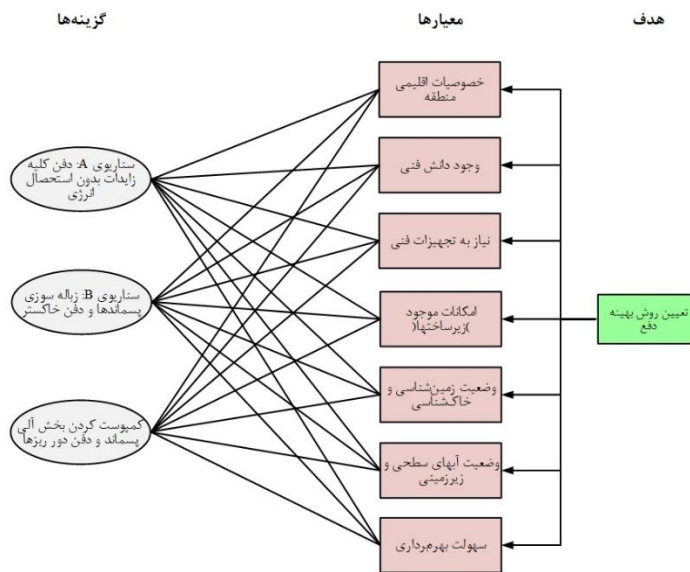
پسماند) برای سناریوهای مختلف برآورد می‌گردد.

ارزیابی فنی

در این بخش از روش تحلیل سلسله مراتبی یا AHP استفاده شده است. به طور کلی روش AHP دارای دو مرحله اساسی می‌باشد:

ساختن درخت سلسله مراتبی

در این مرحله ضمن مشخص نمودن هدف، معیارهای موردنظر برای رسیدن به آن شناسایی شده و گزینه‌های مختلف با توجه به آن معیارها، مورد بررسی قرار می‌گیرند. کلیات اجزای نامبرده شده در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، هفت معیار اقلیم، وجود دانش فنی، نیاز به تجهیزات فنی، امکان‌ات موجود، وضعیت زمین‌شناسی و خاک‌شناسی، وضعیت آب‌های سطحی و زیرزمینی و سهولت بهره‌برداری، برای تعیین روش بهینه دفع لحاظ شده‌اند.



شکل ۱- نمودار درختی سلسله مراتبی مورد مطالعه
Figure 1- The studied hierarchical tree diagram

محاسبه وزن نسبی

پس از وزن‌دهی به هر کدام از معیارهای مورد بررسی نسبت به هدف و وزن‌دهی به هر کدام از گزینه‌ها نسبت به معیارها، می‌توان ارزش هر یک از گزینه‌ها را از معادله ۳ محاسبه نمود.

$$\text{معادله (۳)} \quad \text{ارزش مطلق} = \sum (a_j \times W_{ij})$$

که در آن:

a_j : ارزش نسبی معیار j نسبت به هدف؛

W_{ij} : ارزش نسبی گزینه i نسبت به معیار j ؛

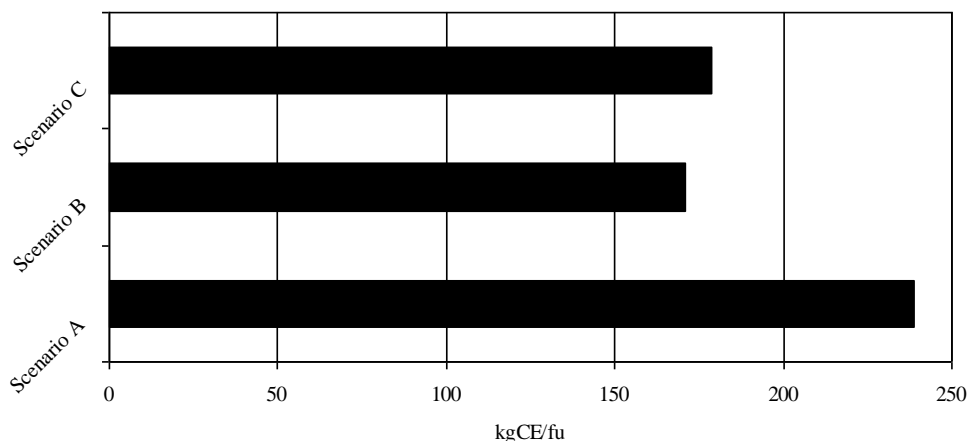
سناریوهای مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، بیشترین میزان انتشار GHGs طی سناریوی A (دفن کلیه پسماندها بدون استحصال انرژی) و کمترین میزان آن نیز طی سناریوی B یعنی زباله‌سوزی به همراه دفن خاکستر تولیدی رخ خواهد داد.

برای استخراج نتایج در این بخش، نرم افزار Expert Choice مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج

۱- نتایج حاصل از ارزیابی زیست‌محیطی

نتایج حاصل از برآورد مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای طی



شکل ۲- مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای طی سناریوهای مختلف دفع پسماند

Figure 2-Greenhouse gas emissions associated with different disposal scenarios

۲- نتایج حاصل از ارزیابی فنی

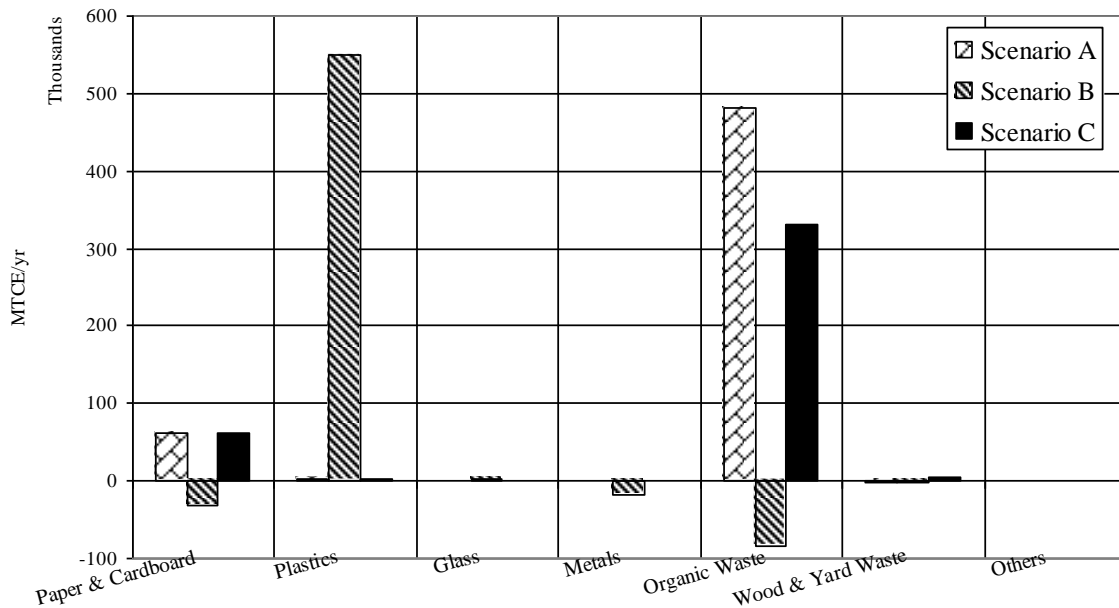
در این بخش پس از نظرسنجی از متخصصان مدیریت مواد زاید جامد شهری در خصوص معیارهای فنی مورد بررسی، هر یک از معیارها وزن‌دهی شده و میانگین نتایج حاصله در خصوص وزن نسبی معیارها نسبت به هدف (انتخاب روش دفع بهینه) و وزن هر یک از گزینه‌ها نسبت به معیارها، به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

مطابق با شکل ۴، امکانات موجود مهمترین دغدغه متخصصان در ارزیابی فنی سناریوها بوده است. با توجه به تجربه این افراد در امر مدیریت پسماند، عموماً فرض بر این است که اگر سیستمی در حال حاضر در کشور وجود نداشته باشد (بعنوان مثال زباله‌سوزهای مدرن یا مراکز دفن استاندارد)، انتقال تکنولوژی از خارج و رسیدن به سطح مطلوب در بهره‌برداری ممکن است مدت زمان طولانی نیاز داشته و علاوه بر آن بدلیل عدم آشنایی متخصصین داخلی با این قبیل سیستم‌ها، تعمیر و نگهداری آنها با مشکل مواجه خواهد شد. از طرف دیگر، بدلیل

بمنظور تعیین میزان اثرگذاری هر کدام از اجزای پسماند بر انتشارات گلخانه‌ای در سناریوهای مورد بررسی، در شکل ۳ میزان GHGs منتشره بواسطه دفع هر جزء از پسماند آورده شده است. بعلت استحصال انرژی از سوزاندن پسماندهای غذایی و با توجه به این نکته که CO₂ تولیدی در نتیجه احتراق این قبیل پسماندها در محاسبه GHGs وارد نمی‌شود (بدلیل بیولوژیک بودن)، بیشترین کاهش یا تخفیف در انتشار گازهای گلخانه‌ای بواسطه سوزاندن زایدات غذایی و کاغذ و مقوا، به ترتیب، در سناریوی B حاصل شده است. همچنین، در سناریوهای A و C دفن پسماندهای غذایی و کاغذ و مقوا، به ترتیب، عامل اصلی تولید گاز متان و در نتیجه انتشار مقادیر بالایی از گازهای گلخانه‌ای بوده است. سوزاندن زایدات پلاستیکی اگرچه می‌تواند دلیل دارا بودن ارزش حرارتی بالا منجر به استحصال انرژی بیشتری در سناریوی B شود، ولی تولید مقادیر زیاد CO₂ غیربیولوژیک باعث اثر افزایشی آن در انتشار GHGs شده است.

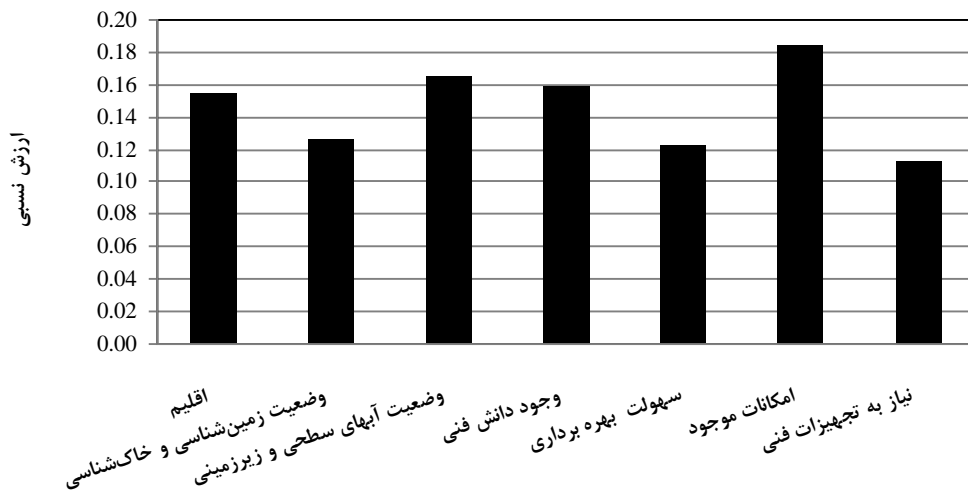
منابع آبی، وضعیت آب‌های سطحی و زیرزمینی دومین عامل مهم در ارزیابی فنی سناریوها تشخیص داده شده است.

عملکرد نامطلوب در بخش مدیریت پسماندهای شهری تهران در سالیان اخیر و به تبع آن افزایش حساسیت نسبت به آلودگی



شکل ۳- مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای برای هر کدام از اجزای پسماند طی سناریوهای مختلف

Figure 3- Greenhouse gas emissions from each waste components in different scenarios



شکل ۴- مقادیر وزن نسبی معیارهای مورد نظر در ارزیابی فنی گزینه‌های دفع

Figure 4- Relative weights of criteria in the technical evaluation of disposal scenarios

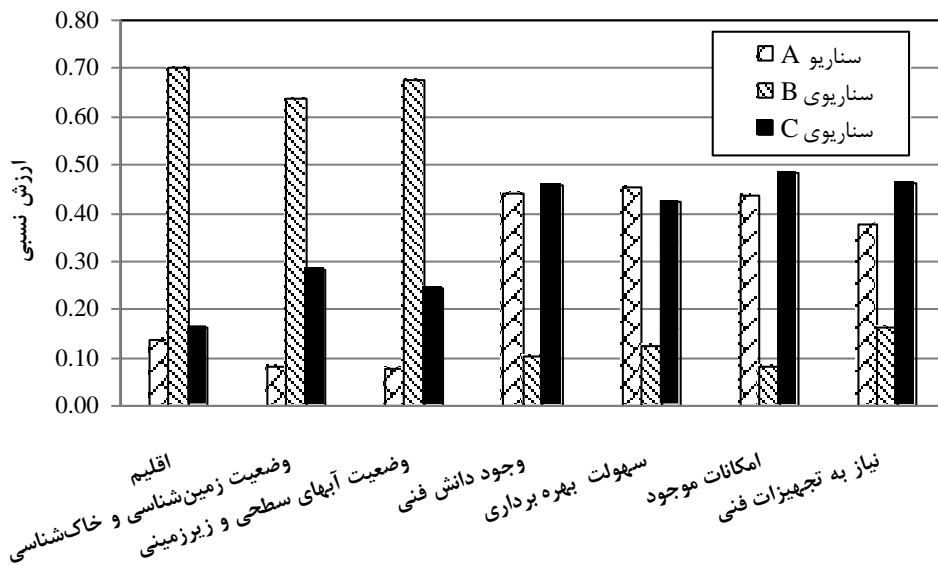
نمودن منابع آبی در مراکز دفن یا تولید کمپوست، گزینه زباله‌سوزی از منظر وضعیت زمین‌شناسی و خاک‌شناسی و نیز وضعیت آب‌های سطحی و زیرزمینی، سناریوی برتر بوده است. نکته دیگر حساسیت بالای سناریوهای A و C به شرایط

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، سناریوهای A و C از نقطه نظر وجود دانش فنی، نیاز به تجهیزات فنی، امکانات موجود و سهولت بهره‌برداری برتری نسبتاً بالایی در مقایسه با سناریوی B داشته اند لیکن دلیل امکان شیرابه زایی و آلوده

به منظور ارائه نتیجه‌ای واحد در مورد سناریوی بهینه دفع، نظرسنجی در خصوص درصد اهمیت ارزیابی‌های زیست‌محیطی و فنی صورت پذیرفت و میانگین نتایج نشان داد که ارزیابی زیست‌محیطی، ۶۱ درصد و ارزیابی فنی، ۳۹ درصد، از نظر متخصصان اهمیت داشته‌اند.

اقلیمی نسبت به سناریوی B می‌باشد. در مجموع با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ و ارزش‌های نسبی برآورد شده، سناریوهای C، B و A به ترتیب با مقادیر ارزش مطلق ۰/۳۶، ۰/۳۵ و ۰/۲۹، به ترتیب از نظر فنی، از مقبولیت بیشتری برخوردار بوده‌اند.

۳- نتایج ارزیابی کلی سناریوها



شکل ۵- مقادیر وزن نسبی گزینه‌ها نسبت به معیارهای مورد نظر

Figure 5- Relative weight of scenarios with respect to the desired criteria

بحث و نتیجه‌گیری

سیستم‌های کمپوست و دفن، از نظر زیست‌محیطی و فنی منجر به حصول نتایج ذیل گردید:

- در صورت دفن کلیه پسماندهای تولیدی شهر تهران، بیشترین میزان انتشار GHGs رخ خواهد داد. این امر عمدتاً بدلیل بالا بودن درصد زایدات ارگانیک در ترکیب پسماند شهری تهران و مشارکت آن در تولید و انتشار گاز متان می‌باشد.

- کمترین میزان GHGs در روش زباله‌سوزی و دفن خاکستر حاصله منتشر می‌گردد. استحصال انرژی در واحد زباله‌سوزی و به تبع آن صرفه جویی در مصرف حامل‌های انرژی بمنظور تولید برق یا حرارت، مهمترین عامل کاهش GHGs در این سناریو بوده است.

در این مقاله روش بهینه دفع پسماند در شهر تهران با تلفیق روش‌های ارزیابی چرخه عمر و تحلیل سلسله مراتبی، تعیین گردید. اگرچه وجود تغییرات در کمیت و کیفیت فیزیکی پسماندهای شهری تهران در طول سال‌های مختلف و از طرف دیگر به روز نبودن آمار ثبت شده در این خصوص، امکان ارائه روشی بهینه جهت مدیریت این قبیل زایدات در آینده را بصورت کم‌رنجتر جلوه می‌دهد، ولی با این وجود با انجام ارزیابی‌های فنی و زیست‌محیطی همانگونه که در این مقاله اشاره شد، می‌توان ارجحیت نسبی سناریوهای دفع را تعیین نموده و بدین ترتیب باعث تسهیل در فرآیند تصمیم‌گیری در این زمینه شد. بررسی سناریوهای پیشنهادی دفع شامل دفن کلیه پسماندها، زباله‌سوزی و دفن خاکستر حاصله، و ترکیب

- T., Schmidt, W.P., Suh, S., Weidema, B.P., Pennington, D.W., 2004, Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications, *Environment International*, 30, pp 701–720.
7. Arena, U., Mastellone, M.L., Perugini, F., 2003, The environmental performance of alternative solid waste management options: a life cycle assessment study, *Chemical Engineering Journal*, 96, pp 207–222.
 8. Cherubini, F., Bargigli, S., Ulgiati, S., 2008, Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration, *Energy*, doi: 10.1016/j.energy.2008.08.023.
 9. Liamsanguan, C., Gheewala, S.H., 2008, LCA: A decision support tool for environmental assessment of MSW management systems, *Journal of Environmental Management*, 87, pp 132–138.
 10. Rieradevall, J., Domenech, X., Fullana, P., 1997, Application of Life Cycle Assessment to Landfilling, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2 (3), pp 141-144.
 11. Weitz, K., Barlaz, M., Ranjithan, R., Brill, D., Thorneloe, S., Ham, R., 1999, Life Cycle Management of Municipal Solid Waste, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 4 (4), pp 193-201.
 12. White, P.R., Franke, M.; Hindle, P., 1995, *Integrated Solid Waste Management: A Life-cycle Inventory*, Aspen Publishers Inc., USA.
 13. Chen, T.C., Lin, C.F., 2008, Greenhouse gases emissions from waste management practices using
- ارزیابی فنی گزینه‌های دفع پسماند با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه، بیانگر مقبولیت نسبتاً کم روش دفن بوده است. البته روش‌های زباله‌سوزی و کمپوست نیز تقریباً مقبولیت یکسانی داشته‌اند.
- نتایج حاصل از نظرسنجی در خصوص معیارهای دارای اهمیت در انتخاب روش دفع، نشان می‌دهد که توجه به مسائل زیست‌محیطی نسبت به ملاحظات فنی از اهمیت بیشتری برخوردار بوده است.
- با توجه به نتایج حاصل از تلفیق ارزیابی‌های صورت گرفته و نظرسنجی در مورد اهمیت هر یک از ارزیابی‌ها، سناریوی دفن کلیه پسماندهای تولیدی نامناسب‌ترین روش دفع و سناریوی زباله‌سوزی به همراه دفن خاکستر، مناسب‌ترین گزینه دفع پسماند شهری تهران تشخیص داده شد.

Reference

1. Banar, M., Cokyil, Z., Ozkan, A., 2008, Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir Turkey, *Journal of waste management*, pp 1-9.
2. Larry, W., Canter, 1997, *Environmental Impact Assessment 2nd ed.*, McGraw-Hill, USA
3. Ghodsypour, S.H., 2007, Analytical Hierarchy Process (AHP), AmirKabir University of Technology (Tehran Polytechnic) Publications (In Persian).
4. Zebardast, A., 2002, Application of Analytical Hierarchy Process in Urban and Regional Planning, *Honar-Ha-Ye-Ziba*, 10, pp 13-21 (In Persian).
5. Boroumandi, M., Khamechiyan, M., Nikoodel, M., 2008, Locating hazardous waste landfills using GIS and Multivariate analysis in Zanjan province, 4TH National Congress on Civil Engineering, Tehran University, Tehran, Iran (In Persian).
6. Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg,

- Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, US Environmental Protection Agency, USA.
18. Pennington, D.W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., Rebitzer, G., 2004, Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice, *Environment International*, 30, pp 721–739.
 19. Goedkoop, M., Oele, M., Schryver, A., Vieira, M., 2008, *SimaPro Database Manual Methods library*, PRé Consultants, Report version: 2.1, Netherlands.
 20. Blengini, G.A., 2008, Using LCA to evaluate impacts and resources conservation potential of composting: A case study of the Asti District in Italy, *Resources, Conservation and Recycling*, 52, pp 1373–1381.
 - Life Cycle Inventory model, *Journal of Hazardous Materials*, 155, pp 23–31.
 14. Blengini, G.A., 2008, “Using LCA to evaluate impacts and resources conservation potential of composting: A case study of the Asti District in Italy,” *Resources, Conservation and Recycling*, 52, pp 1373–1381.
 15. Tehran Waste Management Organization (TWMO), 2003, *Statistical Articles of Solid Waste Management in Tehran* (In Persian).
 16. Riitta Pipatti (Finland), Per Svandal (Norway) & others, 2006, *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Volume 5, Available on: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>.
 17. USEPA, 2002, *Solid Waste Management and Greenhouse Gases A*