

## ارزیابی و پتانسیل‌سنجی استحصال انرژی از پسماندهای شهری با استفاده از

### مدل IPCC- مطالعه موردی شهر زنجان

#### آزاده توکلی<sup>۱\*</sup>

\*<sup>۱</sup>- نویسنده مسئول، دانشکده علوم، گروه علوم محیط‌زیست، دانشگاه زنجان

ایمیل نویسنده مسئول: atavakoli@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۲/۳ تاریخ پذیرش: ۹۸/۲/۱۳

#### چکیده

مدیریت اصولی پسماند از ارکان توسعه پایدار و از نظر بهداشتی- محیط‌زیستی مورد توجه است. دفن بهداشتی همراه استحصال متان می‌تواند علاوه بر تحقق اهداف فوق، در بحث استحصال انرژی تجدیدپذیر مدنظر قرار گیرد. این پژوهش براساس داده‌های کمیته و کیفیت پسماندهای شهر زنجان در سه مقطع زمانی (سال‌های ۸۳، ۸۸ و ۹۵)، به پتانسیل استحصال متان در بازه زمانی ۲۴ ساله (۱۴۰۰-۱۳۷۶) از محل دفن شهر زنجان (مهمترچایی) پرداخته است. در این راستا مدل پیشنهادی هیات بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC Waste Model)، تاثیر شرایط آب و هوایی (دما و رطوبت) بر پتانسیل استحصال و الگوی زمانی انتشارها مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد با توجه به درصد بالای مواد آلی فسادپذیر (۶۰-۷۰ درصد) و رطوبت نسبی (۶۹ درصد)، پسماندهای شهر زنجان پتانسیل مناسبی برای استحصال متان دارند. مقدار انتشارها در بازه زمانی مورد مطالعه ۴۳/۳۴ Gg و در گذر زمان الگوی صعودی- نزولی دارد. بهترین شرایط اقلیمی گرم و مرطوب و بعد از آن معتدل و مرطوب است. زباله‌سوزی در مقایسه با دفن بهداشتی (همراه با استحصال متان)، علیرغم کاهش قابل توجه در حجم پسماند و استحصال سریع انرژی، به‌علت بالا بودن سطح رطوبت و محدودیت مواد قابل‌اشتعال پسماند، گزینه مناسبی نیست و پیامدهای محیط‌زیستی فراوانی دارد.

#### کلمات کلیدی:

”پسماند“، ”استحصال متان“، ”مدل IPCC“، ”زنجان“

## Evaluation and Potential Estimation of Energy Extraction from Municipal Wastes Using IPCC Waste Model- Case Study of Zanjan City

Azadeh Tavakoli<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Environmental Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

\*Email Address: atavakoli@znu.ac.ir

#### Abstract

Systematic management of waste as a principle of sustainable development is considerable from health- environmental perspectives. Sanitary disposal of waste with methane extraction meet these goals and also consider renewable energy extraction.

This study paid to the potential of methane extraction during period of 24 years (1997-2021) in Zanjan landfill (Mehtarchiee), based on quantity and quality of Zanjan wastes in three time section (2004, 2009 and 2016). For this purpose, the proposed model by Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC Waste Model), the effect of climate (temperature and humidity) on extractions and time pattern of emissions are studied. Results indicated that due to the high percentage of decomposable organic compounds (60-70%) and relative humidity (69%), Zanjan's wastes have a high potential for methane extraction. During the study period, 43.34 Gg of methane and an ascending- descending pattern have been emitted. The best climatological conditions are warm-humid and temperate- wet, respectively.

Waste incineration in compare with sanitary disposal (with methane extraction), despite a significant reduction in volume and rapid energy recovery, is not a good option due to the high humidity level and limitation of combustible material and faced with environmental consequences.

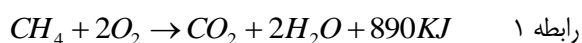
#### Keywords:

“Waste”, “Methane extraction”, “IPCC Model”, “Zanjan”

## ۱- مقدمه

رشد جمعیت و توسعه صنعتی از یک سو و افزایش روزافزون حجم زباله و بحران‌های محیط‌زیستی ناشی از آن از سوی دیگر بر توجه و استفاده بهینه از پسماندها تأکید می‌کند. مدیریت زباله‌ها در اکثر کشورها، به خصوص موارد در حال توسعه، به صورت ناکارآمد و دفع به صورت غیربهداشتی و غیراصولی انجام می‌شود. همین امر موجب شیوع بیماری‌های مختلف و خسارات جبران‌ناپذیر به جوامع شهری و روستایی می‌شود. مدیریت پسماند از مهم‌ترین گام‌ها برای رسیدن به اهداف توسعه پایدار است. سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA) چهار گزینه شامل کاهش در مبدأ تولید، بازیافت و کمپوست، سوزاندن و دفن بهداشتی در زمین (همراه با استحصال متان) را به‌عنوان گزینه‌های مدیریت جامع پسماند پیشنهاد کرده است (قهرمانی و هم‌کاران، ۱۳۹۱). از بین گزینه‌ها، کاهش در مبدأ، بازیافت و کمپوست و نهایتاً دفن در زمین جزء جدایی‌ناپذیر مدیریت پسماند بوده اما گزینه سوزاندن بسته به شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی منطقه قابل حذف است. در ایران به دلیل فقدان هماهنگی بین ارگان‌ها و نبود آموزش افراد، تلاش سازمان‌یافته‌ای در خصوص کاهش در مبدأ و بازیافت انجام نگرفته و بازیافت اغلب در انحصار دوره‌گردها و گروه‌های غیررسمی است. مدیریت اصولی زایدات جامد، مشکلات ناشی از دفع پسماند را تا حدی کاهش ولی سرنوشت نهایی تمامی زایدات، حتی خاکستر زباله‌های سوزانده شده، دفن در زمین است (حاجی باقری و همکاران، ۱۳۹۲). دفن بهداشتی زباله شامل انتقال زباله به مراکز دفن (به صورت گودال‌های طبیعی یا مصنوعی) است به نحوی که ملاحظات محیط‌زیستی به‌طور کامل رعایت شود. در صورت فقدان زمین مناسب برای گودبرداری، زباله‌ها به صورت نوارهای باریک در سطح زمین پخش، در حد امکان متراکم و با لایه‌ای از خاک پوشانده می‌شوند. این روش بهترین و متداول‌ترین روش دفع زباله در جهان محسوب می‌شود و اگر به صورت کاملاً بهداشتی انجام شود، روشی قابل قبول و مطمئن است. به دنبال دفن پسماندها در محل‌های دفن، گازهای مختلف (موسوم به بیوگاز) تولید و منتشر می‌شوند که از طریق فناوری‌های مختلفی می‌توان از این انتشارها به‌صورت بهینه و به‌عنوان منبع تجدیدپذیر انرژی استفاده کرد. بیوگاز از تخمیر بی‌هوازی پسماندهای آلی توسط باکتری‌های تولیدکننده متان تولید (لی‌مویی و محبت‌کار، ۱۳۹۶) و منابعی از قبیل فضولات دامی، پسماندهای کشاورزی، زباله‌های خانگی و صنعتی می‌توانند در تولید آن استفاده شوند. تقریباً ۵۰ تا ۶۰ درصد ترکیب بیوگاز، متان (CH<sub>4</sub>) و ۴۰ تا ۵۰ درصد باقی‌مانده متان دی‌اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>) و جزء اندکی را گازهای دیگر از جمله سولفید هیدروژن (H<sub>2</sub>S) تشکیل می‌دهند

(عمرانی و هم‌کاران، ۱۳۸۶). انتشار متان، به‌عنوان یک گاز گلخانه‌ای با پتانسیل بالای گرمایش جهانی، باعث تشدید پدیده تغییر اقلیم و آسیب به لایه ازن می‌شود. اگرچه متان سمی و خطرناک نیست، اما در حین مهاجرت به سمت بالا، در عمق لایه‌های خاک محل دفن زباله جایگزین اکسیژن می‌گردد. علاوه بر این، اکسیداسیون متان در خاک میزان اکسیژن را کاهش و غلظت دی‌اکسیدکربن را افزایش می‌دهد. مسأله جدی دیگری که به گاز متان تولیدی در محل‌های دفن زباله مربوط می‌شود، پتانسیل بالای انفجاری آن است. احتراق یک مول متان ۸۹۰ کیلوژول انرژی تولید می‌کند (راپله ۱) و بخار آب و دی‌اکسید کربن از بقایای احتراق می‌باشد (سالار و همکاران، ۱۳۹۳).



از زمان شروع فعالیت مراکز دفن تا حدود ۵۰ سال از زمان تعطیلی این مراکز، به‌واسطه واکنش‌های بی‌هوازی در محیط پسماند، مقداری گاز تولید و انتشار می‌یابد. ترکیب گازهای تولیدی براساس فاز تجزیه‌ای حاکم در محل‌های دفن متغیر و شامل متان، دی‌اکسیدکربن، هیدروژن، سولفید هیدروژن، نیتروژن و اکسیژن است (Park et al., 2005). انتشار گاز از محل دفن زباله به چند دلیل عمده در مدیریت محل دفن باید مورد توجه قرار گیرد که مهم‌ترین آنها به جزء اصلی تشکیل‌دهنده گاز، یعنی متان (در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد کل گازهای محل دفن) مربوط می‌شود (Bogner & Matthews, 2003). تجزیه بی‌هوازی پسماند سه مرحله شامل هیدرولیز، اسیدسازی و متان‌سازی را شامل می‌شود. در اولین مرحله جامدات و ترکیبات آلی پیچیده محلول توسط عوامل تخمیرکننده هیدرولیز و به اسیدهای چرب فرار اولیه، الکل، هیدروژن و دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌شوند. در دومین مرحله باکتری‌های اسیدساز، محصولات مرحله اول را به اسید استیک تبدیل و در آخرین مرحله متان به‌وسیله باکتری‌های متان‌ساز که شامل باکتری‌های اسیددوست (با تبدیل اسید استیک به متان و دی‌اکسیدکربن) و باکتری‌های هیدروژن‌دوست (با تبدیل هیدروژن و دی‌اکسیدکربن به متان) هستند، تولید می‌شود (سالار و همکاران، ۱۳۹۳).

عوامل مختلفی بر میزان گاز تولیدی از محل دفن تأثیرگذار هستند که از این جمله می‌توان به ترکیب پسماند، مدت زمان دفن، سطح اکسیژن، سطح مواد مغذی، رطوبت و دما، اسیدیته (pH)، تأثیرات ناشی از سولفات، بافرازی و خردایش اشاره داشت (سالار و همکاران، ۱۳۹۳؛ معین‌پور و هاشمی، ۱۳۹۰).

استقرار سیستم‌های استحصال گاز و انرژی در محل‌های دفن پسماند با هزینه‌های اقتصادی و ملاحظات تکنیکی فراوان همراه

عمیق، با استفاده از مدل پیشنهادی IPCC در کشور تایلند مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد دفن گاه مدیریت شده در فصول بارانی ۵ تا ۶ برابر و در دفن گاه های فاقد مدیریت ۲ تا ۵ برابر بیشتر از فصول زمستان و تابستان انتشار متان دارند. همچونین با انتخاب مناسب پارامتر اصلاح متان و فاکتور اکسیداسیون می توان نتایج مدل سازی را تا حد زیادی به نتایج واقعی نزدیک و دقیق کرد (Wangyao et al., 2010). مطالعه شهر آدیاس آبا، پایتخت و بزرگترین شهر آدیاسی، بر روی محل های دفن زباله مدیریت نشده با استفاده از مدل IPCC نشان داد میزان انتشار خالص متان از رقم ۷/۱۱ Gg در سال ۲۰۰۳ به ۹/۹۸ Gg در سال ۲۰۱۲ افزایش و علت اصلی افزایش به رشد جمعیت باز می گردد. افزایش نرخ متان تولیدی می تواند تامین کننده هزینه های ساخت دفن گاه جدید با پتانسیل استحصال متان باشد (Jigar et al., 2014). مقایسه محل های دفن روباز و سرپوشه در ایالات متحده از منظر انتشار گاز توسط پاول و همکاران در سال ۲۰۱۵ نشان داد سیستم های جمع آوری گاز روبسته از لحاظ آماری کارآمدتر و به طور متوسط ۱۷ درصد کارایی بیشتری نسبت به محل های دفن روباز دارند. این در حالی است که محل های دفن روباز مسئول ۹۱ درصد از کل گازهای گلخانه ای انتشار یافته از مراکز دفن هستند (Powell et al., 2016).

در کشور ایران نیز مطالعات محدودی به این حوزه پرداخته است. به عنوان نمونه قره و شریعتمداری با برآورد میزان گاز تولید شده در مرکز دفن پسماندهای شهر مشهد با استفاده از مدل کاربردی Land GEM میزان گاز متان تولیدی را در شرایط خوش بینانه، ۳/۳۷×۱۰۷ مترمکعب در سال و در شرایط محافظه کارانه، ۱/۷۲×۱۰۷ مترمکعب در سال تخمین زدند. نتایج مدل سازی نشان داد حداکثر میزان گاز متان تولیدی مربوط به سال ۱۳۸۶، یعنی یک سال پس از سالی که میزان دفن در این مدفن به حداکثر مقدار خود می رسد، می باشد (قره و شریعتمداری، ۱۳۸۵). در مطالعه دیگری عمرانی و همکاران وضعیت استحصال گاز متان از محل دفن زباله برمشور شهر شیراز را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با شیوه لوله گذاری صحیح و مهندسی به موقع (همزمان با در نظر گرفتن منطقه به عنوان سایت دفن) می توان از وقوع حوادثی چون انفجار و آتش سوزی جلوگیری و تا حد زیادی از ایجاد بوی نامطبوع در اماکن دفن زباله کاست (عمرانی و همکاران، ۱۳۸۶). سال ۱۳۹۲ پرنگ و همکاران به بررسی بوی گاز حاصل از دفن گاه شیراز و تأثیری که انتشارها در تغییر اقلیم دارند، پرداختند. نتایج موید آن بود که جمع آوری بوی گاز از محل دفن پسماندها در شیراز اقدام موثری در جهت کاهش انتشار گاز های

است. به همین دلیل قبل از برنامهریزی و اجرای این سیستمها لازم است کمیته و پتانسیل استحصال مورد ارزیابی و براین اساس تصمیم گیری شود. این ارزیابی با روش های مختلفی امکان پذیر است. نمونه برداری و آنالیزهای آزمایشگاهی می تواند روشی موثر و قابل استناد جهت برآورد میزان تولید متان باشد. هرچند با توجه به زمان بردن فرآیند تولید متان (گاهها تا دو دهه) و هزینه های بالای این روش، امروزه مدل سازی به عنوان یکی از روش های پرکاربرد و اقتصادی مطرح می باشد. انواع مدل های تجربی، شیمیایی و دیگر موارد برای این منظور کاربرد دارد. مدلهایی از قبیل Land GEM، IPCC Waste Model و شبکه عصبی مصنوعی از نمونه های موفق در برآورد میزان استحصال متان مراکز دفن به شمار می روند.

با توجه به مضرات انتشار و رها سازی متان در محیط و امکان استفاده از آن به عنوان منبع انرژی، مطالعات فراوانی با رویکرد پتانسیل سنجی، تخمین نرخ استحصال متان از مکان های دفن و خطرات احتمالی بی توجهی به این انتشارها شکل گرفته است. نخستین بار کنترل گاز محل دفن در اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ در ایالات متحده انجام شد. برج سون و سونسون در سال ۱۹۹۷ به بررسی و پایش دائمی محل های دفن زباله در سوئد پرداختند. نتایج نشان داد فعالیت میکروارگانیسم های اکسیدکننده متان بیشتر در عمق ۰/۶-۰/۵ m بوده و رطوبت بالا در این سطح باعث افزایش انتشار می گردد (Börjesson & Svensson, 1997). در سال های بعد، کو مار و همکاران در پژوهش خود با بررسی محل های دفن زباله در هند (۱۹۹۹-۱۹۸۰) با استفاده از روش پیش فرض IPCC 1996 میزان انتشار متان از پسماندها را بررسی و نشان دادند که این پتانسیل می تواند در محاسبه ذخایر ملی انتشار متان کشور استفاده شود (Kumar et al., 2004). مقایسه شش مدل مختلف در تخمین انتشار متان از مراکز دفن توسط اسکارف و جاکوبز نشان داد که ماهنگی و تلفیق مدل ها نتیجه بهتری نسبت به استفاده از تک مدل ارایه می دهد. در این وضعیت عدم اطمینان کاهش و نتایج قابل مقایسه، سازگار و شفاف خواهد بود (Scharff & Jacobs, 2006). استفاده از دو مدل پیشنهادی IPCC در تخمین میزان انتشار متان ناشی از زباله در پاناما (۱۹۹۰-۲۰۲۰) نشان داد مدل اخیرمقادیر انتشار را در صدی بالاتر پیش بینی می کند و از توانایی های مطلوبی در زمینه مدیریت داده ها، پیش فرض های وابسته به نوع سایت دفن و نوع پسماند برخوردار است (Weitz et al., 2008). در مطالعه وانگ یایو و همکاران تعداد نه دفن گاه، اعم از مدیریت شده و فاقد مدیریت، با عمق های دفن سطحی و

پالایش گاز خروجی گزینه مناسب جهت حذف این گاز گلخانه‌ای می‌باشد (طلایی خوزانی و همکاران، ۱۳۹۵).

با این رویکرد در پژوهش حاضر تلاش شده است برای نخستین بار در منطقه مورد مطالعه، براساس داده‌ها و نمونه‌برداری‌های سه مقطع زمانی مختلف (سال‌های ۸۳، ۸۸ و ۹۵)، به پتانسیل استحصال متان از پسماندهای شهر زنجان در محل دفن‌گاه فعلی و در بازه زمانی ۲۴ ساله (۱۳۷۶-۱۴۰۰) پرداخته و در کنار آن گزینه زباله‌سوزی به‌عنوان راهکار مدنظر شهرداری مورد ارزیابی قرار گیرد. در ارزیابی نرخ انتشار متان از مدل اخیر پهنه‌یابی هیات بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC Waste Model) استفاده و براساس جمعیت، ترکیب، کمیّت پسماند و شرایط اقلیمی منطقه میزان انتشار بیوگاز و الگوی انتشارها برآورد شده است.

## ۲- روش انجام تحقیق

### • محدوده مورد مطالعه

شهر زنجان، مرکز استان زنجان، در منطقه شمال غرب کشور، طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۴ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی واقع شده است (پایگاه استانداری استان زنجان، ۱۳۹۱). شهرستان زنجان دارای سه بخش مرکزی، قره‌پشتلو و زنجان‌رود است که بخش مرکزی خود به سه منطقه شهری (۱، ۲ و ۳) تقسیم‌بندی شده است. میانگین ارتفاع شهر زنجان ۱۶۵۹/۴ متر از سطح دریا، براساس طول دوره آماری ۱۹۵۶ تا ۲۰۱۴، میانگین دمایی این شهر ۱۱/۴۸ درجه سلسیوس و میانگین سالانه بارش ۳۱۱/۹۳۰ میلی‌متر است (پایگاه هواشناسی استان زنجان، ۱۳۹۶). بر طبق آخرین سرشماری رسمی عمومی نفوس و مسکن در سال ۹۵، شهر زنجان جمعیتی معادل ۵۲۱۳۰۲ نفر دارد (پایگاه مرکز آمار ایران، ۱۳۹۶).

زباله‌های شهری زنجان در سه گروه زباله‌های شهری، صنعتی و بیمارستانی قابل تفکیک است. ترکیب پسماند در فصول مختلف و با توجه به وضعیت اقتصادی مناطق شهر کمی متفاوت است. در انجام این پژوهش از داده‌های مربوط به حجم و ترکیب پسماند در بازه‌های مختلف استفاده شده است تا دیدگاه صحیحی در مورد کمیّت و کیفیت پسماندها در طولانی‌مدت حاصل شود. نخستین نمونه‌برداری در سال ۱۳۸۳ انجام و درصد اجزای پسماند در فصول مختلف سال برآورد شد (مدحت و همکاران، ۱۳۹۰). در سال‌های ۸۹-۱۳۸۸ نمونه‌برداری میدانی دیگری از پسماندها انجام و ترکیب فیزیکی-شیمیایی پسماند در فصول مختلف و در مناطق مختلف شهر مورد بررسی قرار گرفت (فتحی‌دخت لاحشری، ۱۳۸۹). در سال‌های ۹۶-۱۳۹۵ نیز مجدداً

گلخانه‌ای و دی‌اکسید کربن معادل (به‌عنوان معیار ارزیابی و سنجش گازهای گلخانه‌ای) را به میزان ۳۶۵۷۴ تن کاهش می‌دهد (پرنگ و همکاران، ۱۳۹۲). سالار و همکاران در سال ۱۳۹۳ عوامل موثر بر تولید گازها در محل دفن زباله را مورد بررسی قرار دادند. عوامل غیرزیستی، میزان اکسیژن و هیدروژن موجود، سطح دما و رطوبت، میزان pH پسماند، نوع لایه‌های پوششی محل دفن و اجرای فرآیند پیش‌کمپوست‌سازی در جایز مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر میزان انتشار متان از پسماند معرفی شد. در این پژوهش همچنین تأثیرات انتشار متان از زباله مثل انتشار بوی نامطبوع، امکان آتش‌سوزی، ضرر و زیان انتشار گازها برای سلامت انسان‌ها و پدیده گرمایش جهانی ناشی از انتشار گاز متان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (سالار و همکاران، ۱۳۹۳).

جوهری‌پور و حکیمی محل دفن مدرن آبادان را مورد بررسی قرار داده و فواید تولید بیوگاز را بررسی کردند. بررسی‌ها نشان داد مهم‌ترین و اساسی‌ترین نتیجه‌ای که دستگاه‌های تولید بیوگاز دارند، تهیه کود بهداشتی مناسب و با کیفیت است که موجب نابودی بذر علف‌های هرز و بسیاری از پارازیت‌ها و انگل‌ها، از جمله تخم کرم آسکاریس می‌شود. بیوگاز تولیدی جهت مصارف خانگی، صنعتی (دیگ‌های بخار و میکروتوربین‌ها) و سوخت اتومبیل کاربرد دارد. بدیهی است که ارزش سوختی بیوگاز تولید شده وابسته به درصد متان و هرچه مقدار گاز متان بیشتر باشد، قابلیت استحصال انرژی از گاز بیشتر است. همچنین کنترل و استحصال گازهای حاصل از مراکز دفن به جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر کمک شایانی می‌کند که همین امر از مهم‌ترین فواید جمع‌آوری این گازها به‌شمار می‌آید (جوهری‌پور و حکیمی، ۱۳۹۴). بررسی پسماندهای آشپزخانه توسط صالحی و همکاران نشان داد زباله‌هایی می‌توانند در هضم بی‌هوازی، گاز متان تولید کنند که تحت تخمیر هوازی قرار نگرفته و افزودن کود گوسفند به عنوان منبع تأمین‌کننده باکتری‌های بی‌هوازی مقدار بیوگاز تولیدی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. به‌علاوه، اگر محیط کشت متانوزن طی ۱۶ الی ۲۰ روز آماده گردد، فرآیند تولید بیوگاز در ۲۴ ساعت کامل شده و بیوگاز عمدتاً شامل متان است (صالحی و همکاران، ۱۳۹۳). طلایی خوزانی و همکاران، انتشار دی‌اکسید کربن و متان در دفن‌گاه شهر بندرعباس را بررسی و نشان دادند بیشترین میزان گاز تولیدی از محل دفن یک سال بعد از پایان پروژه خواهد بود که در صورت عدم استفاده از سیستم‌های کنترل و بازیافت، گاز به اتمسفر منتشر و اثرات مخرب محیط‌زیستی فراوانی به‌جا خواهد گذاشت. ضمن این که استفاده کاربردی از انرژی حاصل از این گاز با تأکید بر تصفیه و

شهر زنجان طی سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۰ (بازه فعالیت مرکز دفن) ارزیابی شود.

مدل پیشنهادی IPCC جهت برآورد انتشار متان از محل دفن براساس روش تجزیه مرتبه اول (FOD) عمل می‌کند. در این روش فرض می‌شود مولکول کربن آلی تجزیه پذیر (DOC) در زباله‌ها به آرامی و در طی چند دهه کاهش و طی آن متان و دی‌اکسیدکربن تشکیل می‌شود. اگر شرایط ثابت باشد، میزان تولید متان صرفاً به میزان کربن باقی‌مانده در ضایعات بستگی دارد. به عبارتی، انتشار متان از ضایعات ذخیره شده در محل دفن در چند سال اول پس از دفن بالاترین مقدار و سپس به تدریج کاهش می‌یابد (IPCC, 2006). تبدیل مواد قابل تجزیه به متان و دی‌اکسیدکربن توسط زنجیره‌ای از واکنش‌ها و واکنش‌های موازی است. انتشار متان از زباله‌های جامد برای یک سال با استفاده از روابط ۲ تا ۸ تخمین زده می‌شود و در نهایت با جمع‌مقادیر، می‌توان میزان انتشار متان در یک بازه زمانی را برآورد کرد.

$$CH_4.Emissions = \left[ \sum_x CH_4.generated_{x,T} - R_T \right] \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\bullet (1 - OX_T)$$

$$DDOC_m = W \times DOC \times DOC_f \times MCF \quad \text{رابطه ۳}$$

$$DDOC_{maT} = DDOC_{maT} + (DDOC_{maT-1} \times e^{-k}) \quad \text{رابطه ۴}$$

$$DDOC_{m,decompT} = DDOC_{maT-1} \times (1 - e^{-k}) \quad \text{رابطه ۵}$$

$$CH_{4,generated,T} = DDOC_{m,decomp,T} \times F \times \frac{16}{12} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$DOC = \sum_i (DOC_i \times W_i) \quad \text{رابطه ۷}$$

$$k = \ln(2) \div t_{1/2} \quad \text{رابطه ۸}$$

در این معادله‌ها:

$CH_{4,generated}$  = متان تولید شده از مواد مورد تجزیه

$x$  = نوع یا گروه پسماند

$R_T$  = متان بازیابی شده در سال  $T$  ( $Gg$ )

$OX_T$  = فاکتور اکسیداسیون در سال  $T$  براساس نحوه مدیریت دفن‌گاه

$DDOC_m$  = جرم  $DOC$  مدفون و قابل تجزیه،  $Gg$

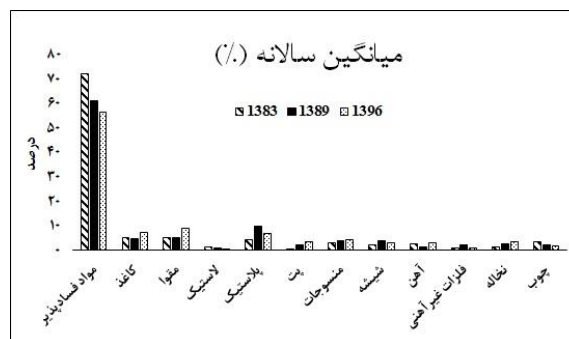
$W$  = جرم پسماندهای دفن شده،  $Gg$

$DOC$  = کربن آلی تجزیه‌پذیر در سال دفن،  $Gg$  کربن بر زباله

$DOC_f$  = کسری از  $DOC$  که می‌تواند تجزیه شود

$DOC_i$  = کسری از کربن آلی تجزیه‌پذیر در پسماند نوع  $i$  (بر پایه وزن مرطوب)

نمونه‌برداری میدانی از پسماندها در مناطق مختلف شهری انجام و درصد اجزاء مختلف پسماند سنجش شد (قرجه‌لو، ۱۳۹۶). براساس این سه مطالعه ترکیب پسماندهای خانگی شهر زنجان عمدتاً شامل پسماندهای آلی، کاغذ و مقوا، فلزات، پلاستیک، پلی اتیلن ترفتالات یا پت (PET)، لاستیک، منسوجات، شیشه، نخاله و چوب می‌باشد (شکل ۱). در حدود ۶۰ الی ۷۰ درصد وزن زباله‌های شهری زنجان را پسماندهای آلی و فسادپذیر و ۱۰ الی ۱۶ درصد مواد قابل اشتعال از قبیل کاغذ، مقوا و چوب تشکیل شده است. براساس این مطالعات، محدوده رطوبت زباله‌ها در حدود ۶۹ درصد برآورد شده که این رقم از پتانسیل بالای پسماندها در تولید متان و بیوگاز حکایت می‌کند (معین‌پور و هاشمی، ۱۳۹۰). براساس اندازه‌گیری‌ها، میانگین سرانه تولید پسماند شهر زنجان روزانه ۸۵۰ گرم (قرجه‌لو، ۱۳۹۶) و با احتساب جمعیت سال ۱۳۹۵، روزانه حدود ۴۴۳/۱ تن زباله در شهر زنجان تولید می‌گردد. زباله‌ها پس از جمع‌آوری به محل دفن، واقع در کیلومتر ۱۹ جاده مهترچایی منتقل می‌شود. براساس اسناد موجود، دفن زباله‌ها از سال ۱۳۷۶ در این مکان آغاز و احتمالاً تا سال ۱۴۰۰ ادامه خواهد داشت (پایگاه سازمان مدیریت پسماند زنجان، ۱۳۹۶).

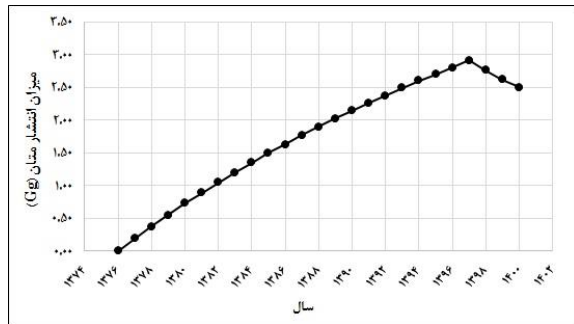


شکل ۱- درصد انواع پسماند در زباله‌های شهری زنجان (مدحت و همکاران، ۱۳۹۰؛ فتحی‌دخت لاحسری، ۱۳۸۹؛ قرجه‌لو، ۱۳۹۶)

### • روش اجرای پژوهش و مدل‌سازی

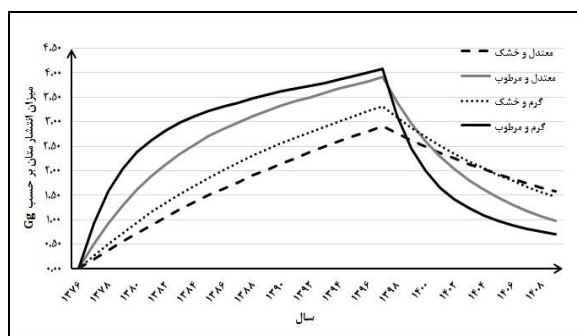
در این پژوهش با هدف برآورد میزان انتشار متان و نیاز به داده‌های مربوط به کمیّت و کیفیت پسماند، براساس داده‌های موجود در سه مقطع زمانی، بهترین خط عبوری از سه نقطه تعیین و برای دیگر سال‌ها از روش میان‌یابی و برون‌یابی برای تعیین درصد انواع پسماند استفاده شد. به‌علاوه، داده‌های جمعیتی، شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه از نظر دما و رطوبت، پارامترهای دخیل در انتشار (فاکتور اصلاح متان، عامل اکسیداسیون و ...) به‌طور کامل تعیین و به‌عنوان ورودی وارد مدل IPCC گردید تا پتانسیل استحصال متان از پسماندهای

تا زمان اتمام بهره‌برداری از محل دفن، بلکه تا ۵۰ سال بعد از رهاسازی دفن‌گاه می‌تواند ادامه داشته باشد (با سیر نزولی و کاهشی). پس از جمع‌آوری گاز متان می‌توان آن را سوزاند تا خطر کمتری برای محیط‌زیست ایجاد نماید و یا از انرژی آن برای تولید برق و یا گازکشی منازل استفاده نمود (Talaie-khozani et al., 2016).



شکل ۲- نرخ انتشار متان از زمان شروع تا خاتمه بهره‌برداری از محل دفن

میزان استحصال متان از مرکز دفن تحت تاثیر شرایط آب و هوایی منطقه تغییر می‌کند. برای انجام مقایسه و ارزیابی شرایط مختلف دما و رطوبتی تحت مدل IPCC، در بخشی از این پژوهش مدل‌سازی و ارزیابی نتایج تاثیر شرایط اقلیمی انجام که به شرح شکل ۳ می‌باشد. براساس نتایج، بهترین شرایط اقلیمی برای تولید متان، اقلیم گرم و مرطوب و پس از آن، معتدل و مرطوب می‌باشد. شرایط آب و هوایی خشک به‌واسطه محدودیت رطوبت در دسترس، تاثیر کاهشی بر انتشار متان دارد. شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب در مقایسه با معتدل و مرطوب، با نرخ تولید بالاتر و زوال سریع‌تر متان همراه است. می‌توان نتیجه گرفت میزان انتشار متان با درصد رطوبت رابطه مستقیم دارد، به‌طوری که با افزایش رطوبت، فعالیت میکروارگانیسم‌ها و در نتیجه میزان تولید متان افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که تأثیر دما تا هنگامی که از ۴۰ درجه سلسیوس فراتر نرود مثبت و برای دماهای بالاتر این مقدار تأثیر منفی بر فعالیت باکتری‌ها داشته و میزان انتشار متان کاهش خواهد داشت.



شکل ۳- انتشار متان در شرایط آب و هوایی مختلف

$MCF$  = فاکتور اصلاح متان برای تجزیه هوازی در سال دفن و براساس نحوه مدیریت دفن‌گاه

$$DDOC_m = DDOC_{maT} Gg$$

$$DDOC_m = DDOC_{maT-1} Gg, (T-1)$$

$$DDOC_m = DDOC_{mdT} Gg$$

$$DDOC_m = DDOC_{m.decompT} Gg, T \text{ سال}$$

$$K = \text{ثابت واکنش}$$

$$t_{1/2} = \text{نیمه عمر (سال)}$$

$$W_i = \text{کسری از پسماند نوع } i \text{ با گروه‌بندی زباله، (بر پایه وزن مرطوب)}$$

در این پژوهش با توجه به فقدان مدیریت در محل دفن و با توجه به عمق دفن، فاکتور اصلاح متان ( $MCF$ ) ۰/۸ و فاکتور اکسیداسیون ( $OX$ ) معادل صفر منظور شده است (IPCC, 2006).

### ۳- نتایج

در این پژوهش به ارزیابی پتانسیل استحصال متان از محل دفن زباله‌های شهری شهر زنجان (۱۳۷۶-۱۴۰۰) با استفاده از مدل پیشنهادی IPCC و براساس داده‌های واقعی برگرفته از سه مقطع نمونه‌برداری از پسماندهای شهری زنجان پرداخته شد. از آنجایی که تنها بخش آلی پسماند در فرآیند تولید بیوگاز نقش دارد، لذا جرم مربوط به این بخش که تقریباً برابر ۶۸ درصد جرم زباله سالانه می‌باشد، به تفکیک اجزای مختلف بخش آلی، یعنی مواد غذایی، زباله‌های پارک و باغ، زایدات چوبی و کاغذی در طی دوره ۲۴ ساله مورد استفاده و میزان انتشار متان برای این بازه زمانی  $43/34 \text{ Gg}$  برآورد شد. بر طبق نتایج به‌دست آمده، در سال نخست دفن میزان انتشار صفر و تولید بیوگاز در دفن‌گاه با چند ماه تأخیر نسبت به دفن پسماند آغاز شده است. این تأخیر با درصد مواد آلی تجزیه‌پذیر، رطوبت، نحوه توزیع مواد درون پسماند، میزان نفوذ آب به محل دفن و دمای محیط ارتباط دارد (پرنگ و همکاران، ۱۳۹۲). با شروع فعالیت میکروارگانیسم‌ها در محیط بی‌هوازی نرخ انتشار متان افزایش می‌یابد. طی دوره ۲۴ ساله مورد بررسی، انتشار متان از پسماندهای شهری در ابتدا سیر صعودی و در حدود سال ۱۳۹۷ به بالاترین سطح خود رسیده است. با توجه به تجزیه کامل مواد آلی موجود از سال‌های قبل، نرخ انتشار متان رفته‌رفته کاهش می‌یابد (شکل ۲). انتشارها نه‌تنها

#### ۴- نتیجه گیری

از میان روش‌های مختلفی که در مدیریت پسماند قابل اجرا می‌باشد، بسته به ویژگی و شرایط پسماند از منظر کمیّت، کیفیت، درصد رطوبت، سایز و ترکیب و نیز با احتساب شرایط آب و هوایی منطقه و مسایل اقتصادی، می‌توان گزینه مطلوب و بهینه (شامل دفن بهداشتی، استحصال متان، تولید کمپوست، زباله‌سوزی و ...) را انتخاب نمود.

مطالعه زباله‌های شهر زنجان، از درصد بالای مواد آلی و فسادپذیر (۶۰-۷۰ درصد)، رطوبت بالا (میانگین ۶۹ درصد) و درصد پایین مواد قابل اشتعال از قبیل کاغذ، مقوا و چوب در پسماند (۱۶-۱۰ درصد) حکایت دارد. براساس مطالعات، در مواردی که درصد رطوبت پسماند بیش از ۶۰ درصد باشد (مانند پسماندهای شهر زنجان) فرآیند تجزیه بی‌هوازی به خوبی صورت می‌پذیرد و میزان استحصال متان از زباله بالا می‌رود. بالابودن درصد مواد آلی، سطح مناسب رطوبت و در اختیار داشتن زمین کافی به‌عنوان محل دفن، استفاده از گزینه دفن بهداشتی همراه با استحصال متان را برای شهر زنجان به گزینه مطلوب و قابل ارزیابی تبدیل می‌کند. در کنار آن، بازیافت به‌عنوان یکی از بهترین گزینه‌های مدیریت پسماند دارای صرفه اقتصادی، فواید محیط‌زیستی و تاثیر قابل توجهی از نظر کاهش حجم پسماندها در پی دارد. متأسفانه تاکنون در شهر زنجان تلاش جدی در این زمینه صورت نگرفته و همچنان پسماندها به‌صورت مخلوط و تفکیک‌نشده دفن می‌شوند. گزینه مدنظر شهرداری زنجان در راستای مدیریت پسماندها، خرید

و استقرار زباله‌سوز می‌باشد. فرآیند زباله‌سوزی با کاهش قابل‌توجه در حجم زباله و تولید سریع انرژی همراه است. هرچند رطوبت بالا و ارزش حرارتی پایین پسماندهای زنجان می‌تواند در میزان استحصال انرژی در این روش مداخله جدی داشته باشد. فرآیند زباله‌سوزی با هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری و امکان انتشار آلاینده‌های خطرناک در هوا (شامل منواکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و اکسیدهای گوگرد، مواد معلق، گازهای اسیدی، فلزات سنگین، ترکیبات آلی فرار، دی‌اکسیدها و فوران‌ها) همراه است (عزیزی و عزیزی، ۱۳۹۱). در فقدان تجهیزات پیشرفته کنترل آلاینده‌های هوا، زباله‌سوزها توانایی انتشار ۲۷ نوع فلزات سنگین، ۲۱ نوع ترکیبات سرطان‌زای دی‌اکسیدها و فوران و بیش از ۴۰۰ نوع ترکیبات آلی به هوای محیط را دارند. به‌همین دلیل در صورت نامناسب بودن کیفیت پسماند، در تامین انرژی مطلوب ناتوان و از نظر اقتصادی و محیط‌زیستی غیرقابل توجیه هستند (عبدلی و جمشیدی، ۱۳۸۵). این پژوهش به پتانسیل‌های انتشار و استحصال انرژی از پسماندهای شهر زنجان پرداخته و این زباله‌ها را از نظر کمی و کیفی مورد مطالعه قرار داده است. این در حالی است که توجیه اقتصادی و برآورد هزینه‌ها به‌عنوان یکی از پارامترهای تعیین‌کننده مورد مطالعه قرار نگرفته است. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های بعدی با در نظر گرفتن دستاوردهای این پژوهش و مطالعات پیشین، عوامل اقتصادی و هزینه‌های حاکم بر سیستم‌های مختلف مدیریت پسماند را مورد ارزیابی و بررسی قرار دهند.

## منابع

- پایگاه استناداری استان زنجان، ۱۳۹۱. طرح آمایش زنجان، [www.ostandari-zn.ir](http://www.ostandari-zn.ir)
- پایگاه سازمان مدیریت پسماند زنجان، ۱۳۹۶. [www.bazpasmand.ir](http://www.bazpasmand.ir)
- پایگاه مرکز آمار ایران، ۱۳۹۶. نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۵. [www.amar.org.ir](http://www.amar.org.ir)
- پایگاه هواشناسی استان زنجان، ۱۳۹۶. پروژه تحقیقاتی اطلس باد زنجان، [www.zanjanmet.ir/ProvinceIntroduced.aspx](http://www.zanjanmet.ir/ProvinceIntroduced.aspx)
- پرنک، س.، حلیبان، ا. ح.، خوشبخت، ر. ا.، ۱۳۹۲. بازیابی بیوگاز حاصل از دفن گاه شیراز، تبدیل آن به انرژی برق و تأثیر آن بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی، چهارمین همایش بیو انرژی ایران (بیوماس و بیوگاز)، هم‌اندیشان انرژی کیمیا.
- جوهری‌پور، م.، حکیمی، ا.، ۱۳۹۴. بررسی روش‌های تولید بیوگاز و فواید آن در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، کنفرانس بین‌المللی پژوهش در مهندسی، علوم و تکنولوژی، موسسه مدیران ایده پرداز پایتخت ویرا.
- حاجی‌باقری، ه.، صفری، ا.، یآوری، ا. ر.، ۱۳۹۲. معرفی مدل LandGEM در برآورد میزان بیوگاز تولیدی از محل دفن و پارامترهای آن، اولین همایش ملی انرژی‌های نو و پاک، شرکت هم‌اندیشان محیط‌زیست فردا.
- سالار، ی.، معطر، ف.، خضری، م.، ۱۳۹۳. عوامل موثر بر تولید گازها در محل دفن زباله، مجله انسان و محیط‌زیست، دوره ۱۲، شماره ۱ (۲۸-۳۹)، ص ۳۱-۳۹.
- صالحی، ک.، خضرای، س. م.، حسینی، ف. ا.، خسروانی‌پور مصطفی‌زاده، ف.، ۱۳۹۳. تولید بیوگاز از زباله آشپزخانه و کود گوسفند در مقیاس آزمایشگاهی، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، سال ۱۶، ویژه‌نامه شماره ۱، ص ۴۶۳-۴۷۰.
- طلایی‌خوزانی، ا. ر.، مریدی، م.، دروار، پ.، ۱۳۹۵. بررسی میزان انتشار دی‌اکسید کربن، متان و مجموعه گازهای آلی غیرمتانی از محل دفن زباله‌های شهر بندرعباس، ششمین همایش ملی و نخستین همایش بین‌المللی کاربردهای شیمی در فناوری‌های نوین، موسسه آموزش عالی جامی.
- عبدلی، م. ع.، ۱۳۸۵. بازیافت مواد زاید جامد شهری (کاهش، استفاده مجدد و بازچرخش)، نشر دانشگاه تهران، موسسه انتشارات و چاپ.
- عبدلی، م. ع.، جمشیدی، م.، ۱۳۸۵. جایگاه زباله‌سوزی در سیستم مدیریت پسماندهای شهری، اولین همایش تخصصی مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران.
- عزیزی، آ.، عزیزی، آ.، ۱۳۹۱. انواع آلاینده‌های انتشار یافته از زباله‌سوز و روش‌های کنترل آن‌ها، دومین کنفرانس برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست، دانشگاه تهران.
- عمرانی، ق.، حقیقت، ک.، محسنی، ن.، ۱۳۸۶. بررسی وضعیت استحصال گاز متان از لندفیل زباله برمشور شهر شیراز، دهمین همایش ملی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی همدان.
- فتحی‌دخت لاحشری، ح.، ۱۳۸۹. قابلیت‌سنجی تولید کمپوست از زباله‌های خانگی شهر زنجان: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان.
- قرچه‌لو، ف.، ۱۳۹۶. مطالعات کمی، کیفی و آنالیز فیزیکی و شیمیایی زباله‌های جامد شهری زنجان: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان.
- قره، س.، شریعتمداری، ن.، ۱۳۸۵. مدل‌سازی مرکز دفن زباله شهر مشهد جهت برآورد میزان گازهای تولیدی، سومین همایش ملی مدیریت پسماند و جایگاه آن در برنامه‌ریزی شهری، سازمان بازیافت و تبدیل مواد.
- قهرمانی، ا.، باقری اردبیلیان، م.، ززولی، م. م.، قربانیان اله‌آباد، م.، ۱۳۹۱. اصول فناوری تولید کمپوست، نشر خانیران.
- لیمویی، ف. ا.، محبت‌کار، ح.، ۱۳۹۶. بیوگاز و نتایج زیست‌محیطی آن، مجله پژوهش ملل، سال ۱۷، شماره ۲، ص ۱۲۱-۱۳۵.
- مدحت، آ.، منوری، م.، جاوید، ا. ح.، اسلامی، ا.، احد نژاد، م.، ۱۳۹۰. ارزیابی و بهینه‌سازی سیستم جمع‌آوری و حمل پسماند شهر زنجان و استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی جغرافیایی، مجله انسان و محیط‌زیست، سال ۹، شماره ۱ (۱۶- پی‌اپی ۲۷)، ص ۳۳-۴۰.
- معین‌پور، ح.، هاشمی، س.، ۱۳۹۰. مدل‌های پخش و پراکنش گازهای متصاعد از دفن‌گاه‌های زباله، پنجمین همایش تخصصی مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران.



- Bogner, J., Matthews, E. 2003. Global methane emissions from landfills: new methodology and annual estimates 1980–1996, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 17(2).
- Börjesson, G., Svensson, B. H. 1997. Seasonal and diurnal methane emissions from a landfill and their regulation by methane oxidation, *Waste Management & Research*, Vol. 15(1), p. 33-54.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC.
- Jigar, E., Bairu, A., Gesessew, A. 2014. Application of IPCC model for estimation of methane from municipal solid waste landfill, *Journal of Environmental Science and Water Resources*, Vol. 3, p. 52-58.
- Kumar, S., Gaikwad, S., Shekdar, A., Kshirsagar, P., Singh, R. 2004. Estimation method for national methane emission from solid waste landfills, *Atmospheric Environment*, Vol. 38(21), p. 3481-3487.
- Park, S. D., Kim, J. G., Kim, W. H., Kim, H. S. 2005. Distribution of tritium in the leachates and methane gas condensates from municipal waste landfills in Korea, *Water and Environment Journal*, Vol. 19(2), p. 91-99.
- Powell, J. T., Townsend, T. G., Zimmerman, J. B. 2016. Estimates of solid waste disposal rates and reduction targets for landfill gas emissions, *Nature Climate Change*, Vol. 6(2), p. 162-165.
- Scharff, H., Jacobs, J. 2006. Applying guidance for methane emission estimation for landfills, *Waste Management*, Vol. 26(4), p. 417-429.
- Sunil, K., Gaikwad, S., Shekdar, A., Kshirsagar, P., Singh, R. 2004. Estimation method for national methane emission from solid waste landfills, *Atmospheric Environment*, Vol. 38(21), p. 3481-3487.
- Talaiekhzani, A., Masomi, B., Hashemi, S. M. J. 2016. Evaluation of gaseous pollutants emission rate from Marvdasht landfills, *Journal of Advanced Medical Sciences and Applied Technologies*, Vol. 2(1), p. 162-175.
- Wangyao, K., Towprayoon, S., Chiemchaisri, C., Gheewala, S. H., Nopparatana, A. 2010. Application of the IPCC Waste Model to solid waste disposal sites in tropical countries: case study of Thailand, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 164(1-4), p. 249-261.
- Weitz, M., Coburn, J. B., Salinas, E. 2008. Estimating national landfill methane emissions: an application of the 2006 intergovernmental panel on climate change waste model in Panama, *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 58(5), p. 636-640.