



فصلنامه علوم محیطی، دوره نوزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰

۲۰۵-۲۲۴

پتانسیل سنجی بهره‌برداری انرژی از لندفیل سراوان در شهر رشت با رویکرد ارزیابی چرخه حیات

علی احمدی ارکمی* و مریم ملک پور

گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۱

احمدی ارکمی، ع. م. ملک پور. ۱۴۰۰. پتانسیل سنجی بهره‌برداری انرژی از لندفیل سراوان در شهر رشت با رویکرد ارزیابی چرخه حیات. فصلنامه علوم محیطی. ۱۹(۲): ۲۰۵-۲۲۴.

سابقه و هدف: دفن پسماند در لندفیل‌ها افزون بر ایجاد آلودگی، سبب تولید گازهای گلخانه‌ای نیز می‌شود. یکی از بهترین روش‌ها جهت بررسی میزان اثرهای محیط‌زیستی لندفیل، محاسبه و مقایسه سنجه‌های ارزیابی چرخه حیات (LCA) جهت تعیین پایداری نسبی است. هدف از این پژوهش، ارزیابی اثرهای محیط‌زیستی و ملاحظات اقتصادی روش‌های مختلف مدیریت بیوگاز لندفیل سراوان در شهر رشت از سال ۱۴۰۰ شمسی به بعد است تا پایدارترین روش مدیریت گازهای لندفیل سراوان تعیین شود.

مواد و روش‌ها: جهت تخمین میزان انتشار گازهای لندفیل، دو سناریو در نظر گرفته شد که در سناریوی اول، سال ۱۴۰۳ به‌عنوان سال پایان بهره‌برداری از لندفیل در نظر گرفته شد و در سناریوی دوم، فرض شد که لندفیل به‌مدت ۲۰ سال دیگر (تا سال ۱۴۲۳ شمسی) نیز بهره‌برداری شود. میزان انتشار گازهای لندفیل با استفاده از نرم افزار LandGem، تخمین زده شد و صحت نتایج آن با روش موازنه جرم بررسی شد. مطالعه LCA برای سه حالت مختلف کنترلی، حالت پایه بدون کنترل، استفاده از فلرینگ و تولید الکتريسته در نرم افزار openLCA انجام گرفت. انتقال پسماند جامد به لندفیل، انباشت زباله در لندفیل و مدیریت گاز لندفیل به‌عنوان فرایندهای مؤثر در ارزیابی چرخه حیات در این پژوهش در نظر گرفته شدند و از فرایند مدیریت شیرابه با توجه به تأثیر نداشتن در سنجه‌های محیط زیستی مورد مطالعه صرف‌نظر شد. از نتایج نرم افزار LandGem، ضرایب انتشار بین‌المللی و داده‌های موجود در پایگاه داده ELCDC ۷2.3 جهت تخمین میزان انتشار گازها به جو در ارزیابی چرخه حیات استفاده شد.

نتایج و بحث: نتایج محاسبات نشان داد که در سناریوی اول و دوم مقدار کل بیوگاز تولیدی در لندفیل به ترتیب بالغ بر ۶۶۰۰ و ۱۰۵۰۰ گیگاگرم است. همچنین مقدار خطای نسبی نرم افزار LandGem نسبت به روش موازنه جرم در پیش‌بینی مقدار متان تولیدی برابر با ۳/۳٪ برآورد شد. گاز استحصالی در سناریوی اول و دوم و از سال ۱۴۰۰ به بعد به‌طور متوسط برابر با ۱۵۰۰ فوت مکعب در دقیقه است. جهت مدیریت بیوگاز، دو روش فلرینگ و تولید برق توسط موتور احتراق داخلی به ترتیب با سرمایه اولیه ۶۳۹ و ۷۱۲۰ هزار دلار پیشنهاد شد. هزینه سالانه آن‌ها نیز به ترتیب برابر با ۱۸ و ۹۱۸ هزار دلار برآورد شد. بررسی چهار سنجه در مطالعه ارزیابی چرخه حیات نشان داد که با به‌کارگیری دو تکنولوژی فلرینگ و تولید برق توسط موتور احتراق داخلی، پتانسیل گرمایش جهانی کمابیش به اندازه ۳۰٪ نسبت به حالت

* Corresponding Author: *Email Address*.Orkomi@guilan.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.52547/envs.35875>

پایه لندفیل کاهش می‌یابد. به‌طوریکه میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن معادل برای حالت پایه، استفاده از فلر و تولید الکتریسته به ترتیب برابر با ۳۲۴۵، ۲۳۱۱ و ۲۲۷۶ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن به ازای یک مگاگرم زباله ورودی به لندفیل تخمین زده شد. همچنین پتانسیل تولید اکسندهای فتوشیمیایی در حالت پایه (۰/۷ کیلوگرم اتیلن معادل به ازای یک مگاگرم زباله) بسیار بیشتر از مقدار سنجه در دو حالت دیگر است. اما مقدار سنجه پتانسیل اسیدی شدن در حالت تولید الکتریسته نسبت به دو حالت پایه و استفاده از فلر بیشتر است. این در حالی است که پتانسیل تخلیه لایه ازن در هر سه حالت مدیریتی یکسان است.

نتیجه‌گیری: با توجه به سنجه‌های LCA و ارزیابی اقتصادی، تولید الکتریسته توسط موتورهای احتراق داخلی به‌عنوان مناسب‌ترین روش جهت مدیریت گاز بعد از سال ۱۴۰۰ پیشنهاد شد که افزون بر کاهش ۳۰٪ در سنجه گرمایش جهانی، سالانه به میزان ۱۱۰۰۰ مگاوات ساعت برق تولید می‌کند. این میزان کمابیش معادل میانگین مصرف سالانه برق توسط ۵۵۰۰ خانوار گیلانی و یا ۴۰۰۰ خانوار در شهرستان رشت است.

واژه‌های کلیدی: گرمایش جهانی، لندفیل، LandGem، LCA

مقدمه

و با توجه به اینکه گاز لندفیل به‌عنوان یک منبع انرژی تجدید پذیر می‌باشد، می‌توان با استفاده از تکنولوژی‌های مناسب، مقادیر قابل توجهی انرژی از لندفیل‌ها استخراج نمود (Safari et al., 2009). یکی از مهمترین کاربردهای گاز لندفیل، استفاده از آن جهت تولید الکتریسته است. به‌طوریکه بیش از ۷۵٪ پروژه‌های مدیریت گاز لندفیل در آمریکا به این امر اختصاص دارد (EPA, 2020). در این زمینه نیز مطالعات گوناگونی صورت گرفته است. به‌عنوان نمونه Milich (1999) افزون بر معرفی منابع تولید گاز متان، منابعی که در آن‌ها به‌کارگیری روشی جهت کاهش تولید متان ضروری باشد، معرفی کرده و اثر گاز متان در گرمایش جهانی را بررسی کرده است.

Mosher et al. (1999) ضمن بیان دو روش برای اندازه‌گیری مستقیم انتشار گاز متان در لندفیل، روشی جهت بازیافت انرژی از متان را پیشنهاد دادند. Sofsatayi (2010) به معرفی حوزه‌های دفن زباله شهری و بررسی نتایج حاصل از آنالیز بیوگاز خروجی از چاهک‌های مختلف حوزه دفن زباله شهر اصفهان پرداخته است. همچنین با استفاده از اندازه‌گیری سرعت بیوگاز خروجی چاهک‌های مختلف، تولید سالانه بیوگاز حوزه‌های دفن زباله شهر اصفهان را برآورد و با نتایج حاصل از مدل ثنوری Scholl-Canyon مقایسه کرد. نتایج نشان داد که به‌طور متوسط از هر تن زباله، سالانه ۱۲ متر مکعب بیوگاز قابل دستیابی

با توجه به افزایش جمعیت و توسعه رفاه شهرها، پیش‌بینی می‌شود که میزان تولید سالانه پسماند تا سال ۲۰۲۵ میلادی به حدود ۲/۶ میلیارد تن پسماند جامد شهری در سراسر جهان برسد (Turner et al., 2016). به‌طورکلی پسماند، به سه دسته شهری، صنعتی و زباله‌های خطرناک تقسیم‌بندی می‌شود (Noorpoor et al., 2013). لازم به بیان است که بنابر گزارش‌های سازمان بهداشت پان - آمریکا، هنوز در آمریکای شمالی تعداد شهرهایی که زباله‌های آن‌ها به شکل آزاد دفع می‌شوند، بسیار زیاد است. بنابراین با توجه به اینکه بیشتر کشورهای پیشرفته و در حال توسعه دنیا از این روش جهت دپوی پسماند جامد شهری استفاده می‌کنند، یکی از فاکتورهای اقتصادی که سبب افزایش توجه برای حل این مشکل شده، بهره‌برداری از بیوگازی است که به‌صورت طبیعی از فرایندهای تجزیه بی‌هوازی پسماند جامد ایجاد می‌شود (Ahmadzadeh et al., 2014). گاز لندفیل شامل مخلوطی از ۴۰ تا ۷۰ درصد جرمی متان، ۱۵ تا ۵۰ درصد دی‌اکسیدکربن (CO₂)، مقدار کمی بخار آب، مقدار ناچیز از بخارهای ترکیب‌های آلی و غیر آلی است (Talaiekhosani et al., 2016). از آنجا که اثر گلخانه‌ای گاز متان کمابیش حدود ۲۵ برابر گاز CO₂ است، می‌تواند پیامدهای محیط زیستی بسیاری از جمله گرمایش جهانی را به‌دنبال داشته باشد

انتشار CO_{2eq} به طور متوسط حدود ۷۰٪ کاهش می‌یابد. از بین مدل‌های مختلف موجود جهت تخمین انتشار گازهای لندفیل، نرم افزار LandGem میزان انتشار متان از لندفیل را با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کند (Thompson *et al.*, 2009; Sil *et al.*, 2014). افزون بر مطالعات بیان شده در مورد اثرهای محیط‌زیستی فرایند تجزیه پسماند در لندفیل، مطالعات LCA با هدف بررسی اثرهای محیط‌زیستی در کل چرخه حیات پسماند نیز انجام گرفته است و توسعه پایدار نسبی سیستم‌های مختلف مدیریت زباله را با هم مقایسه می‌کند (Cherubini *et al.*, 2009; Hong *et al.*, 2010; Ghanbarzadeh and Sabour, 2010; Marashi *et al.*, 2019). در این راستا (Rahimi *et al.*, 2019) سه سناریوی مختلف مدیریت پسماند را از طریق نتایج LCA با هم مقایسه کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد در صورتیکه ۵۵٪، ۱۰٪، ۵٪ و ۳۰٪ پسماند تولیدی شهر تهران به ترتیب در فرایندهای تولید کمپوست، بازیافت، بازیافت انرژی و دفن در لندفیل مورد استفاده قرار گیرد، مقادیر متوسط شش سنجه مورد بررسی در LCA حدود ۷۲٪ کاهش می‌یابد و این سناریو از منظر اقتصادی نیز بر دو سناریوی دیگر برتری دارد. همچنین (Rahmani *et al.*, 2019) سناریوی موجود در مدیریت پسماند شهر رشت را با سه سناریوی پیشنهادی دیگر که شامل بازیافت، زباله سوز و دست‌یابی انرژی از لندفیل بودند، با به‌کارگیری نرم افزار تخمین سیاهه انتشار IWM-1 مقایسه کرد. نتایج بررسی نسبی سنجه‌های LCA نشان داد که سناریوی موجود بدترین سناریوی مدیریتی و سناریوی پیشنهادی که در آن ۱۵٪ پسماند بازیافت، حدود ۵۰٪ آن به کارخانه کمپوست منتقل شود و ۳۵٪ مابقی به‌همراه پسماند خروجی از واحد کمپوست به لندفیل بهداشتی با بازیابی انرژی منتقل شود، بهترین عملکرد را از منظر سنجه‌های LCA دارد. ارزیابی اثرهای محیط‌زیستی پنج سناریوی مختلف مدیریت پسماند در شهر نور با در نظر گرفتن پنج سنجه مصرف انرژی، گازهای گلخانه‌ای، خروجی‌های سمی، اسیدی شدن و تخلیه

است. (Scharff and Jacobs (2006) نتایج شش مدل رایج جهت تخمین انتشار گاز لندفیل را با داده‌های اندازه‌گیری شده از سه لندفیل، مقایسه کردند نتایج گویای اختلاف زیاد بین مدل‌سازی و سنجش میدانی بود و کارایی مدل‌های مختلف در پیش‌بینی نتایج اندازه‌گیری شده، در هر یک از لندفیل‌ها به‌طور کامل متفاوت بود و پیشنهاد شد که با بهره‌گیری از داده‌های بیشتر، بتوان مدل‌های موجود را کالیبره نمود. (Bicheldey and Latushkina (2010) در یک مطالعه میدانی در دو لندفیل بسته شده در کشور روسیه، پتانسیل انتشار گازهای لندفیل، دبی گاز و ترکیب درصد آن را مورد بررسی قرار دادند تا پتانسیل بیوگاز در لندفیل جهت تولید انرژی گرمایی و الکتریکی در سال‌های آینده را تعیین کنند. (Boyaghchi *et al.* (2013) با استفاده از مدل ریاضی تخریب مرتبه اول میزان گازهای متان، CO₂ و دی‌اکسید گوگرد (SO₂) را در لندفیل آرادکوه جهت دست‌یابی به انرژی تخمین زدند. نتایج به‌دست آمده نشان داد، حجم کل گازهای تولید شده در این لندفیل طی ۳۰ سال ۲۱۳ میلیون متر مکعب برآورد شده است. همچنین مقایسه نتایج مدل با نتایج روش موازنه جرمی نشان داد که مدل دارای خطای پیش‌بینی ۵/۹ برای گاز متان است. مقایسه تولید گازهای گلخانه‌ای در حالت کنترل شده و کنترل نشده نشان از کاهش ۶۴ درصدی گاز دی‌اکسید کربن معادل (CO_{2eq}) داشت. (Rezaee and Abolhasani (2018) میزان تولید گازهای لندفیل شماره دو شاهین شهر جهت دست‌یابی انرژی را با استفاده از مدل تخریب مرتبه اول تخمین زدند. نتایج مدل را نیز با روش موازنه جرمی مقایسه کردند که خطای نسبی ۳۵ درصدی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، میزان گازها در طول زمان و با افزایش سن لندفیل کاهش می‌یابد و بیشترین گاز متان و CO₂ تولید شده به ترتیب در حدود ۱۰۵۰ تن و ۲۸۷۰ تن در سال ۱۳۹۴ و کمترین مقدار آن‌ها به ترتیب در حدود ۱۷۴ و ۴۷۶ تن در سال ۱۴۲۴ برآورد شده است. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد با بهره‌گیری از روش‌های کنترل گاز لندفیل، مقدار

همزمان برق و گرما بهترین عملکرد را دارد. در تحقیق حاضر با توجه به عدم انجام مطالعات LCA در محل‌های دفن پسماند در استان گیلان با دیدگاه اثرهای کل چرخه حیات پسماند و نبود هیچ راهکار کنترلی عملی جهت مدیریت گاز لندفیل، چهار سنجه LCA جهت بررسی پایداری نسبی، دو روش مدیریت گاز لندفیل مورد استفاده قرار گرفتند. در بخش دیگری از تحقیق، دو روش سوزاندن متان در فلر (مشعل) و استفاده از گاز لندفیل به‌عنوان سوخت در واحد تولید الکتریسیته از منظر اقتصادی نیز با یکدیگر مقایسه شدند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مرکز دفن سراوان در منطقه جنگلی سراوان، در فاصله ۱۵ تا ۲۰ کیلومتری از شهر رشت واقع شده است که از سال ۱۳۶۳ فعالیت دفن زباله در آن آغاز شده و بیش از ۳۵ سال است که به‌عنوان محل دائمی دفن پسماندهای حوزه مرکزی استان مورد استفاده قرار می‌گیرد و پذیرنده زباله شهرهای رشت، فومن، شفت، صومعه سرا، خشک‌بیجار، کوچصفهان و لشت‌نشاء می‌باشد. ویژگی‌های کلی مرکز دفن سراوان در جدول ۱ آورده شده است.

ازن نشان داد که سناریوی پیشنهادی ۱۵٪ بازیافت، ۵۰٪ کمپوست، ۳۵٪ زباله سوز و انتقال پسماندهای دور ریز به لندفیل بهداشتی به‌عنوان بهترین سناریو جهت مدیریت پسماند در شهر نور است (Zazouli *et al.*, 2020). Wanichpongpan and Gheewala (2007) با استفاده از سنجه گرمایش جهانی (GWP100) در مطالعه LCA در لندفیل‌های کشور تایلند به این نتیجه رسیدند که اگر به‌جای استفاده از چندین لندفیل کوچک با هزینه‌های حمل و نقل کم، یک لندفیل بزرگ احداث و از گاز آن جهت تولید الکتریسیته استفاده شود، اثرهای گرمایش جهانی بسیار کمتری خواهد داشت. (Beylot *et al.*, 2013) چهار حالت مختلف مدیریت گاز لندفیل (بدون مدیریت، فلرینگ، استفاده از گاز برای تولید همزمان برق و گرما و استفاده از بیوگاز به‌عنوان سوخت در اتوبوس) را از منظر سنجه‌های مختلف LCA با هم مقایسه کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که از منظر سنجه‌های پتانسیل تولید اکسندهای فتوشیمیایی (PO)، خزه‌زدگی و سمیت محیط‌زیستی، استفاده به‌عنوان سوخت وسایل نقلیه کمترین اثرهای منفی را دارد و در سنجه‌های پتانسیل تخلیه لایه ازن (OD) و سمیت غیر سرطانی، عملکرد سه روش مدیریتی کمابیش یکسان است ولی از منظر سنجه GWP100 روش تولید

جدول ۱- ویژگی‌های مرکز دفن سراوان و آنالیز کیفی پسماند (Pirooz *et al.*, 2010; Sabetraftar *et al.*, 2010)

Table 1. Saravan landfill specification and analytical results of solid wastes (Pirooz *et al.*, 2010; Sabetraftar *et al.*, 2010)

سال شروع فعالیت Start year	1984	
Operation duration (year) مدت زمان بهره‌برداری (سال)	40	
Surface area (ha) مساحت لندفیل (هکتار)	9	
Altitude (m) ارتفاع از سطح دریا (متر)	75	
Slope (%) شیب (درصد)	More than 15	
نوع منطقه Climate	مرطوب Wet	
نوع خاک Soil type	شنی لومی با سنگریزه Loamy sand with pebbles	
ترکیب‌های زباله خشک (درصد جرمی) Dry waste species (%)	ترکیبات آلی Organic	85
	فلز Metal	3
	شیشه Glass	7
	کاغذ Paper	2
	پلاستیک Plastic	1
	سایر مواد Others	2

۱۷۰ متر مکعب بر مگاگرم و ۰/۰۵ در نظر گرفته شد (Cho et al., 2012; Xi et al., 2012). افزون بر متان، میزان تولید گازهای دی‌اکسیدکربن و ترکیب‌های آلی فرار غیرمتانی (NMVOC) نیز در نرم افزار محاسبه می‌گردد. به‌منظور مقایسه و صحت‌سنجی نتایج مدل LandGem، میزان انتشار گاز متان از لندفیل سراوان با استفاده از روش موازنه و بقاء جرم نیز محاسبه شد و با نتایج نرم افزار مقایسه گردید. لازم به بیان است که با توجه به تقریبی بودن ظرفیت بهره‌برداری از لندفیل سراوان و وجود نداشتن برنامه مشخص جهت مدیریت پسماند تولیدی در پایان سال ۱۴۰۳، ممکن است طی سال‌های بعد از دوره ۴۰ ساله نیز از این مرکز دفن بهره‌برداری صورت بگیرد، بنابراین افزون بر تخمین میزان انتشار گازها در سناریوی اول (پایان بهره‌برداری سال ۱۴۰۳ است) در یک سناریوی دیگر، به تخمین انتشار گازهای منتشر شده از لندفیل با استفاده از پیش‌بینی جمعیت تا ۲۰ سال بعد از دوره ۴۰ ساله (تا سال ۱۴۲۳) پرداخته شد و نتایج به‌صورت مجزا بیان شده است.

مدیریت گازهای لندفیل جمع‌آوری گازهای لندفیل

با توجه به مجراها و چاله‌های عمقی و جمع‌کننده‌های افقی که در سطح لندفیل تعبیه می‌شوند، بخشی از گازهای تولید شده در حدود ۵۵ تا ۹۰ درصد قابل جمع‌آوری است که به‌طور متوسط مقدار ۷۵ درصد در نظر گرفته می‌شود (Turner, 1997; EPA, 2008; Wanichpongpan and Gheewala, 2007). همچنین برای لندفیل‌هایی مانند لندفیل مورد مطالعه که هنوز بسته نشده‌اند نیز با توجه به اینکه کل سطح لندفیل، پوشش محافظتی برای جلوگیری از خروج گاز ندارد، عددی به‌عنوان ضریب پوشش در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش نیز بازده جمع‌آوری گاز از لندفیل در هر دو سناریو ۷۵٪ و ضریب پوششی نیز برای سناریوی اول ۹۰٪ و برای سناریوی دوم ۸۰٪ در نظر گرفته شد. زیرا در سناریوی دوم، لندفیل به مدت بیست سال دیگر نیز باز است (Turner, 1997; EPA, 2008).

در حال حاضر روزانه حدود ۱۰۰۰ تن زباله وارد لندفیل سراوان می‌شود، که سهم شهرستان رشت بیش از ۸۵۰ تن زباله در روز است که حدود ۹۰ درصد از زباله ورودی را شامل می‌شود (Rahmani et al., 2019). بنابر آمار اداره پسماند شهر رشت (Sabetraftar et al., 2010)، میزان سرانه تولید زباله در منطقه‌های شهری و منطقه‌های روستایی به‌طور متوسط حدود ۹۵۰ گرم در روز است.

۲-۲. برآورد نرخ انتشار گازهای لندفیل

در این پژوهش از نرم افزار LandGem جهت برآورد میزان انتشار گازها از لندفیل استفاده شده است. در این نرم افزار از واکنش تخریب درجه اول ترکیب‌های آلی برای تخمین میزان انتشار متان تولیدی استفاده گردیده است که معادله جبری حاصل به‌صورت رابطه (۱) بیان می‌شود (Faour et al., 2007).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 KL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] e^{-Kt_{ij}} \quad (1)$$

که در آن Q_{CH_4} ، n ، i ، j ، K ، L_0 ، M_i و t_{ij} به ترتیب گاز متان تولیدی بر حسب متر مکعب در سال، شمارنده گام زمانی بر حسب سال، گام زمانی بر حسب دهم سال، تعداد سال‌هایی که از ورود زباله می‌گذرد، نرخ تولید متان در سال، پتانسیل تولید متان بر حسب متر مکعب به ازای یک مگاگرم زباله ورودی، جرم زباله وارد شده در سال i -ام بر حسب مگاگرم و سن قسمت j -ام از جرم M_i که در سال i -ام وارد شده هستند. جهت تعیین جمعیت، آمار سرشماری شهرهای مورد بررسی در بازه‌های پنج ساله و یا ده ساله از سامانه اطلاعات آماری استان گیلان (GPSIS, 2018) برداشت شد و به‌منظور تعیین جمعیت در سال‌های میانی از رابطه (۲) استفاده گردید.

$$p_n = p_0(1+r)^n$$

$$r = \sqrt[n]{\frac{p_n}{p_0}} - 1 \quad (2)$$

که در آن p_n ، p_0 ، r و n به ترتیب جمعیت در سال پایه، نرخ جمعیت در سال n -ام، ضریب رشد جمعیت و تغییرات زمان بر حسب سال است. پتانسیل تولید متان و ثابت تولید متان، با توجه به شرایط آب و هوایی مرطوب در این استان،

سوزاندن گاز در فلر

کل انتشار CO_2 از فلر در اثر احتراق بیوگاز جمع‌آوری شده از سیستم جمع‌آوری، از طریق رابطه (۳) قابل محاسبه است. این رابطه با توجه به واکنش استوکیومتری احتراق متان به‌دست آمده است.

$$Q_{CO_2} = Q_{FCH_4} \times EFF \times \frac{44}{16} + Q_{FCO_2} \quad (3)$$

که در آن Q_{CO_2} ، Q_{FCH_4} و Q_{FCO_2} به ترتیب جرم کل گاز CO_2 منتشر شده از فلر، جرم متان در بیوگاز ارسالی به فلر و مقدار جرمی CO_2 در بیوگاز بر حسب گیگاگرم هستند. EFF نیز بازده مولی احتراق فلر و برابر با ۰/۹۸ در نظر گرفته شد. همچنین کل متان منتشر شده از فلر از رابطه (۴) قابل محاسبه است.

$$Q_{CH_4} = Q_{FCH_4} \times (1 - EFF) \quad (4)$$

که در آن Q_{CH_4} جرم کل متان خروجی از فلر بر حسب گیگاگرم است. سایر پارامترها هم همان پارامترهای رابطه (۳) هستند.

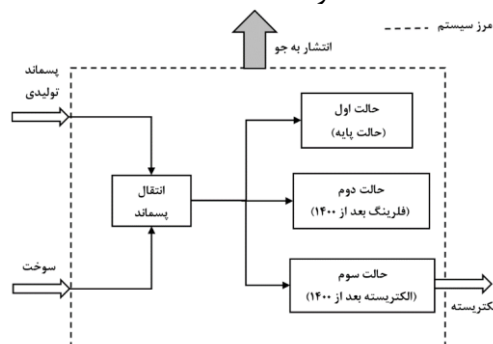
تولید الکتریسته

تولید الکتریسته از گاز لندفیل به‌طور کلی در موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های گازی و میکروتوربین‌ها انجام می‌گیرد. موتورهای احتراق داخلی، پرکاربردترین تجهیز جهت تولید الکتریسته از گاز لندفیل هستند زیرا سرمایه اولیه مورد نیاز برای آن به‌نسبت پایین است و بازده آن بین ۳۰ تا ۴۰ درصد است که نسبت به تجهیزات دیگر بالاتر است. غالباً برای لندفیل‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که دبی گاز لندفیل بین ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ فوت

مکعب در دقیقه باشد. مقیاس‌های موجود و رایج موتورهای احتراق داخلی از ۵۴۰ کیلووات (جریان مورد نیاز گاز لندفیل برابر با ۲۰۴ فوت مکعب در دقیقه) تا ۱/۲ مگاوات (جریان مورد نیاز گاز لندفیل برابر با ۵۰۰ فوت مکعب در دقیقه) است (EPA, 2020). توربین‌های گازی برای لندفیل‌های بزرگتر مناسب هستند به‌طوری‌که دبی گاز لندفیل پیشنهادی برای توربین‌های گازی، مقداری بالغ بر ۲۱۰۰ فوت مکعب در دقیقه است. میکروتوربین‌ها برای لندفیل‌هایی که گاز تولیدی آن‌ها کم است (۲۰ تا ۲۵۰ فوت مکعب در دقیقه) مورد استفاده قرار می‌گیرد. هزینه تقریبی سرمایه‌گذاری و جاری مربوط به تکنولوژی‌های مورد استفاده جهت تولید الکتریسته در راهنمای EPA جهت مدیریت گازهای لندفیل (EPA, 2020) آورده شده است.

ارزیابی چرخه حیات

جهت مطالعه اثرهای چرخه حیات لندفیل سراوان، مبنای محاسبات یک گیگاگرم زباله ورودی به لندفیل در نظر گرفته شد و تمامی فاکتورها بر مبنای این مقدار محاسبه گردید. با توجه به این امر، محاسبات LCA در دو سناریوی بررسی شده در این مقاله، کمابیش یکسان خواهد بود. بنابراین ارزیابی چرخه حیات فقط برای سناریوی اول انجام گرفته است. مرزهای سیستم مورد بررسی در این پژوهش از مرحله انتقال پسماند به لندفیل شروع شده و دفن پسماند در لندفیل و روش‌های مدیریت گاز لندفیل را نیز شامل می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- مرزهای سیستم و فرایندهای مؤثر در ارزیابی چرخه حیات

Fig. 1- System boundaries and processes involved in life cycle assessment

برابر با ۳۸ مگاژول بر مترمکعب فرض شده است (EPA-AP42, 1995). همچنین از مصرف سوخت در ماشین-های زباله کوب و یا لودرها در محل لندفیل صرف نظر شده است. جهت تعیین انتشار گازها در فرایندهای تولید سوخت دیزل از داده‌های موجود در پایگاه داده ELCD v2.3 در نرم افزار openLCA و بر پایه روش ارزیابی اثرهای ارائه شده توسط مرکز مطالعات محیطی دانشگاه لیدن (CML 2015) و براساس استانداردهای بین‌المللی ISO 14040 و ISO 14044 استفاده شد (ISO-14040, Skone, 2019, 2006; ISO-14044, 2006). از سنجه-های GWP100، پتانسیل اسیدی شدن (AP)، PO و OD جهت ارزیابی کلی اثرهای محیط زیستی در مطالعه LCA استفاده شد. همچنین از آنجایی که شیرابه تولیدی در هر سه حالت مدیریت گاز لندفیل اثر یکسانی دارد و همچنین این بخش، تأثیر ناچیزی روی سنجه‌های مورد بررسی دارد، در LCA مورد بررسی قرار نگرفت. همچنین در حالت مدیریت با فلر و مدیریت از طریق تولید الکتریسته نیز تا سال ۱۴۰۰، مقادیر انتشار گازها بدون هیچ مدیریتی و مشابه حالت پایه در نظر گرفته شدند زیرا در واقعیت امر نیز شرایط اینگونه است.

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج محاسبات انتشار گازها از لندفیل در دو سناریوی بهره‌برداری لندفیل و مقایسه نتایج مدل با روش موازنه جرم آورده شده است. همچنین نتایج بررسی دو روش کنترلی برای دستیابی انرژی از گاز لندفیل نیز گزارش شده است و در انتها نتایج ارزیابی چرخه حیات لندفیل آورده شده است.

برآورد انتشار گاز لندفیل

سناریوی اول (بهره‌برداری تا سال ۱۴۰۳)

بنابر آمار موجود در سامانه اطلاعات آماری استان گیلان (GPSIS, 2018)، تغییرات جمعیت کل شهرستان‌های مورد نظر در طی دوره ۳۰ سال به شرح جدول ۲ می‌باشد.

با توجه به شکل ۱، در این پژوهش سه حالت مختلف مدیریت گاز لندفیل در مطالعه LCA مورد بررسی قرار گرفتند. در حالت اول (حالت پایه) بدون راهبرد کنترلی فرض شد. در حالت دوم (کنترل - فلر) فرض شد که گازهای منتشره از لندفیل، از سال ۱۴۰۰ شمسی به بعد جمع‌آوری شده و در فلر سوزانده شود. در حالت سوم (کنترل - الکتریسته) نیز فرض شده که گازهای لندفیل از سال ۱۴۰۰ به بعد، جهت تولید الکتریسته در موتورهای احتراق داخلی به‌عنوان سوخت مصرف شوند. در هر یک از سه حالت مورد بررسی، فرض شده که پسماند توسط کامیون‌های با توان ۱۳۵ اسب بخار ساخت داخل از شش شهر تولید کننده زباله به محل لندفیل منتقل می‌شوند. با فرض سرعت ۴۰ کیلومتر در ساعت، مصرف سوخت دیزل در این کامیون‌ها برابر با ۵۲۰ گرم در هر کیلومتر برآورد شد (Mirzaei, 2010). با توجه به مقادیر تولید روزانه پسماند، تعداد ماشین‌های حمل پسماند در هر شهر (GPSIS, 2018)، فاصله‌های شش شهر مربوطه تا لندفیل سراوان و در نظر گرفتن مسیر رفت و برگشت، به‌طور متوسط به ازای هر تن زباله ورودی به لندفیل، ۴/۴۵ کیلومتر پیموده می‌شود. بنابراین میزان مصرف سوخت به ازای هر تن زباله برابر با ۲۳۱۴ گرم است. ضرایب انتشار گازهای مونوکسیدکربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، NMVOC، متان، ذرات معلق (PM) و CO₂ نیز برابر با مقادیر پیشنهادی برای کشورهای اروپایی فرض شد (Ntziachristos et al., 2009). ضرایب انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای بیان شده در راهنمای EPA جهت تخمین این گازها در اثر سوختن متان در فلر استفاده شد (EPA-AP42, 2018). ضرایب انتشار CO، CO₂، NO_x، NMHC، CH₄ و PM برای موتور احتراق داخلی به ترتیب برابر با ۱۱۲۲۰۰، ۸۳/۶۴، ۳۲۶/۴، ۲/۱۴۲، ۸/۷۷، ۶/۷۳ و ۳/۰۶ پوند به ازای یک میلیون فوت مکعب متان است. ارزش حرارتی ناخالص متان نیز

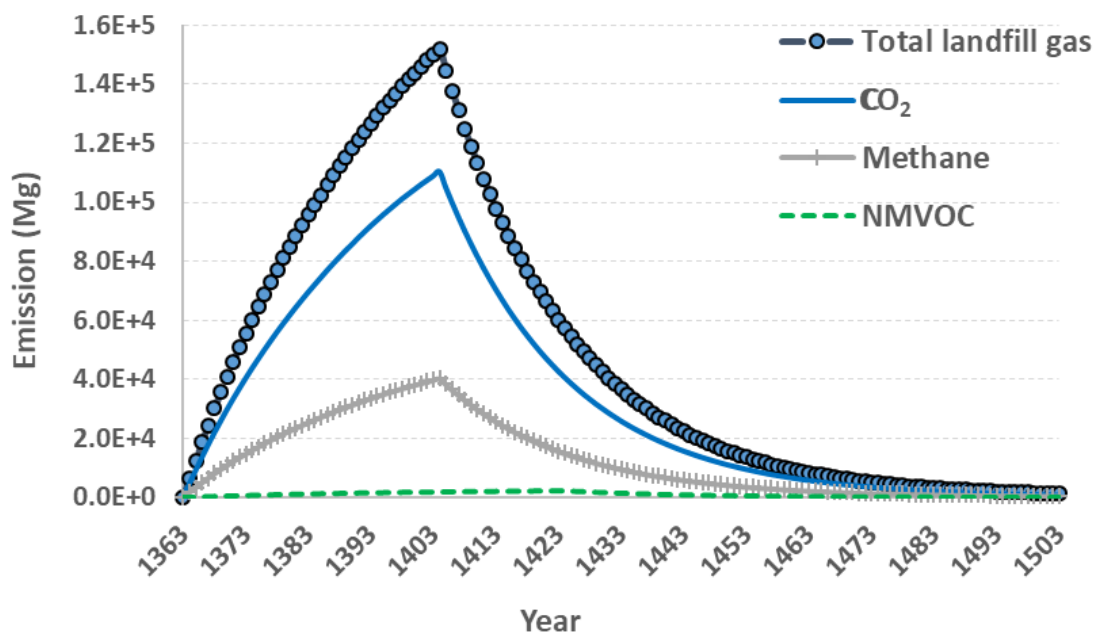
جدول ۲- تغییرات جمعیت کل شهرستان‌ها^۱
Table 2. Time series of all counties' population

سال Year	1986	1996	2006	2016
جمعیت (نفر) Population	924198	1027418	1149412	1228575
نرخ رشد جمعیت (درصد) Growth rate (%)	1365-1375	1375-1385	1385-1395	
	1	1		0.5

۱ زباله شهرستان‌ها شامل زباله منطقه‌های شهری و منطقه‌های روستایی می‌باشد.
The counties' wastes include both urban and rural areas

سال‌های بین دو سرشماری متوالی تعیین شد. کل میزان زباله در لندفیل سراوان در بازه ۴۰ ساله کمابیش برابر با ۱۵۲۶۰ گیگاگرم برآورد شده است. شکل ۲ میزان انتشار گازهای منتشر شده از دفنگاه سراوان از سال ۱۳۶۳ تا ۱۵۰۳ را نشان می‌دهد.

جهت تعیین جمعیت در سال‌های میانی ابتدا با استفاده از رابطه (۲) و داده‌های جمعیت سرشماری، نرخ رشد جمعیت در بازه بین دو سرشماری محاسبه شد و در جدول ۲ آورده شده است. سپس با استفاده از نرخ رشد محاسبه شده، جمعیت کل شهرستان‌های مورد نظر در



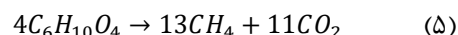
شکل ۲- میزان انتشار گازهای لندفیل سراوان در سناریوی اول
Fig. 2- Emission rates of the Saravan landfill biogas in the first scenario

آلی تجزیه‌ناپذیر، کمتر می‌شود. پس از پایان بهره‌برداری نیز مشاهده می‌شود که به دلیل وجود زباله‌های قدیمی، همچنان تولید گازها ادامه دارد اما نرخ انتشار گازها بسیار کمتر است و کمابیش تا ۸۰ سال پس از بسته‌شدن لندفیل نیز انتشار گازها ادامه دارد.

بنابر شکل ۲، روند تولید گازهای منتشرشده از لندفیل سراوان طی سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۳ به صورت صعودی است و بیشینه مقادیر انتشار گازها در سال ۱۴۰۴ مشاهده می‌شود. هرچه از دیوی پسماند می‌گذرد، تغییرات سالانه انتشار گازها به دلیل وجود زباله‌های قدیمی و ترکیب‌های

تخمین انتشار از طریق موازنه جرمی

از آنجایی که ترکیب عمده در بین مواد آلی موجود در زباله جامد لندفیل، اسید چرب ($C_6H_{10}O_4$) فرض می‌شود، واکنش تجربی بی‌هوازی آن به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود (Scharff and Jacobs, 2006; Boyaghchi *et al.*, 2013; Rezaee and Abolhasani, 2018).



نتایج آنالیز جرمی زباله خشک لندفیل سراوان در جدول ۱ آورده شده است. این درحالی است که درصد رطوبت در زباله جامد خام ورودی به لندفیل برابر با ۶۳ درصد است (Sabetraftar *et al.*, 2010). بنابراین میزان کل تولید متان در سناریوی اول به ازای ورود زباله در بازه ۴۰ ساله به صورت زیر محاسبه می‌شود.

کل زباله تولیدی در ۴۰ سال = 15409821 مگاگرم

کل ترکیبات آلی = 15409821

$$\times (1 - 0.63)$$

$$\times 0.85$$

$$= 4846389 \text{ مگاگرم}$$

$$\text{کل متان تولیدی} = 4846389/146 \quad (6)$$

$$\times 3.25 \times 16$$

$$= 1726110 \text{ مگاگرم}$$

$$\frac{\text{متان تولیدی}}{\text{زباله ورودی}} = \frac{1726110}{15409821} \times 1000$$

$$= 111.7 \text{ Kg/Mg}$$

با جمع مقادیر انتشار سالانه متان و یا انتگرال زیر سطح منحنی تولید متان در شکل ۲، مقدار کل متان تولیدی توسط نرم افزار LandGem در بازه ۴۰ ساله و بازه زمانی ۱۰۰ سال پس از بسته شدن لندفیل، برابر با ۱۷۸۰ گیگاگرم است که معادل ۱۱۵/۵ کیلوگرم متان به ازای یک مگاگرم زباله ورودی است. با مقایسه نتایج مدل LandGem و روش موازنه جرم می‌توان دریافت که خطای نسبی نتایج نرم افزار LandGem نسبت به موازنه

جرم کمابیش برابر با ۳/۳٪ است که نشان‌دهنده تخمین بسیار خوب نرم افزار LandGem است. هرچند نرم افزار نسبت به روش موازنه جرمی، کل پسماند ورودی را در محاسبه مقدار متان تولیدی در نظر می‌گیرد و مقدار مواد بی اثر موجود در پسماند را از کل پسماند کم نمی‌کند (Sofsatayi, 2010). بنابراین مقدار گاز تولیدی را اندکی بیشتر تخمین می‌زند. در این راستا، Rezaee and Abolhasani (2018) از یک مدل مرتبه اول و موازنه جرمی جهت پیش‌بینی مقدار متان تولید شده استفاده کرده‌اند که خطای پیش‌بینی مدل برابر با ۳۵٪ برآورد شده است. همچنین Boyaghchi *et al.* (2013) خطای نسبی مدل مرتبه اول را نسبت به روش موازنه جرم در پیش‌بینی متان تولید شده در لندفیل آرادکوه برابر با ۵/۹٪ برآورد کرده‌اند که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

سناریوی دوم (بهره‌برداری تا سال ۱۴۲۳)

در این سناریو یک بازه ۲۰ ساله پس از سال ۱۴۰۳ در نظر گرفته شد تا شرایط تولید گازها در چنین شرایطی نیز بررسی شود. از آخرین نرخ رشد جمعیت برای تخمین جمعیت در سال‌های آتی استفاده شد. همچنین سرانه تولید زباله نیز برای سال‌های آتی همان ۹۵۰ گرم در روز در نظر گرفته شد. میزان انتشار گازهای خروجی از سال ۱۴۰۴ تا ۱۴۲۳ در نرم افزار LandGem محاسبه شد. سایر پارامترهای مورد نیاز نرم افزار، مشابه مقادیری است که در سناریوی اول مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه و در جدول ۳ مقایسه کلی بین سناریوی اول و سناریوی دوم در تولید گازها انجام شده است. همچنین مقدار گاز دی‌اکسیدکربن معادل نیز در هر سناریو با توجه به قابلیت گرمایش جهانی^۲ گازهای متان و CO_2 محاسبه و مقایسه شده است. قابلیت گرمایش جهانی گازهای CH_4 ، N_2O و CO_2 در یک افق ۱۰۰ ساله برابر با ۲۵، ۲۹۶ و ۱ است (Rezaee and Abolhasani, 2018; Change, 2006).

جدول ۳-مقادیر انتشار گازها در سناریوی اول و دوم از لندفیل سراوان
Table 3. Emission rates of gases from Saravan landfill in the first and second senarios

انتشار کل (گیگاگرم) (Gg) Total emission					سناریو Senario
دی اکسیدکربن معادل CO _{2eq}	دی اکسیدکربن CO ₂	NM VOC	متان Methane	کل گاز تولیدی Total biogas	
49384	4884	76.5	1780	6664	از 1363 به بعد From 1984
26996	2671	40	973	3644	از 1400 به بعد From 2021
78515	7765	121.6	2830	10595	از 1363 به بعد From 1984
55701	5126	85	2023	7149	از 1400 به بعد From 2021

لندفیل منتشر می‌شوند. از این مقدار حدود ۱۳ گیگاگرم متان و ۳۵۷۴ گیگاگرم CO₂ بعد از سال ۱۴۰۰ منتشر می‌شوند. در سناریوی دوم نیز میزان انتشار کلی متان و CO₂ به ترتیب برابر با ۳۴ و ۹۲۳۵ گیگاتن برآورد شده است که از این مقدار، ۲۴ گیگاگرم متان و ۶۳۴۸ گیگاگرم CO₂ بعد از سال ۱۴۰۰ منتشر می‌شوند. لازم به بیان است که این اعداد فقط با در نظر گرفتن گازهای جمع‌آوری شده محاسبه شده‌اند و بخشی از گاز که قابلیت جمع‌آوری توسط سیستم جمع‌آوری گاز لندفیل را ندارد، در نظر گرفته نشده است. جهت تعیین مقدار کل انتشار گازها بایستی گازهای استحصال نشده را نیز به این ارقام اضافه نمود. هزینه سرمایه‌گذاری سیستم جمع‌آوری گاز به همراه فلرینگ کمابیش برابر با ۷۱ هزار دلار به ازای هر هکتار مساحت لندفیل است. همچنین هزینه تعمیرات و نگهداری سالانه نیز برابر با ۲۰۰۰ دلار به ازای هر هکتار مساحت لندفیل است (EPA, 2020). در جدول ۴ خلاصه‌ای از نتایج تأثیر به‌کارگیری فناوری فلرینگ بعد از سال ۱۴۰۰ آورده شده است.

تولید الکتریسته

با توجه به مقدار گاز لندفیل تولیدی، ضرایب استحصال و ایده‌آل بودن گاز، دبی متوسط گاز قابل استحصال از لندفیل سراوان، کمابیش برابر با ۱۵۰۰ فوت مکعب در دقیقه است. بنابراین می‌توان از موتورهای احتراق داخلی استفاده کرد. برای این منظور، می‌توان از سه موتور با ظرفیت ۱/۲ مگاوات استفاده کرد. خلاصه نتایج به‌کارگیری

با توجه به جدول ۳ می‌توان دریافت که کل گازهای تولیدی در سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول ۱/۶ برابر شده است. این در حالی است که سال‌های عملیاتی در سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول ۱/۵ برابر شده است. بیشترین گاز منتشر شده از لندفیل در سال‌های انتهایی عملیات و در سال‌های اولیه پس از بسته شدن مشاهده می‌شود. به‌طوریکه کمابیش ۱۵ سال پس از بسته شدن، میزان انتشار کل گازها به نصف میزان گاز در اولین سال بسته شدن لندفیل می‌رسد (شکل ۲). این امر مؤید این مطلب است که بایستی در سال‌های اولیه بعد از بسته شدن لندفیل به جمع‌آوری و بهره‌برداری از گازهای آن پرداخت. نتایج مطالعه Pazoki et al. (2015) نیز نشان داد که با تأخیر ۱۵ ساله در جمع‌آوری گاز لندفیل، مقدار انرژی قابل دستیابی نیز ۲/۸ برابر کمتر می‌شود. یافته‌های این بخش با فرض اینکه در ۲۰ سال آینده نرخ رشد جمعیت و سرانه تولید زباله برابر با مقادیر کنونی باشد، به‌دست آمده است. با توجه به تغییر فرهنگ زندگی در نسل جدید و افزایش رویکرد زندگی ماشینی، انتظار می‌رود که سرانه تولید زباله در سال‌های آتی افزایش یابد و این امر سبب افزایش تولید گازهای لندفیل نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده، می‌شود.

مدیریت گازهای لندفیل

سوزاندن گاز در فلر

به‌طور کلی در سناریوی اول ۲۴ گیگاگرم متان و ۶۵۳۴ گیگاگرم CO₂ از سال ۱۳۶۳ تا ۸۰ سال بعد از بسته شدن

در فرایند تولید الکتریسته نیز جهت حفظ ایمنی در سیستم همواره فلر نیز طراحی می‌شود، بنابراین در بخش سرمایه اولیه و هزینه‌های جاری تولید الکتریسته، هزینه‌های فلرینگ نیز اضافه شده است.

موتور با بازده ۳۵٪ جهت تولید الکتریسته در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به اینکه تاکنون از این تکنولوژی استفاده نشده است، تأثیر به‌کارگیری این تکنولوژی از سال ۱۴۰۰ به بعد در نظر گرفته شده است. از آنجایی که

جدول ۴- خلاصه جنبه‌های اقتصادی دو تکنولوژی پیشنهاد شده
Table 4. Summary of economic implications of two proposed technologies

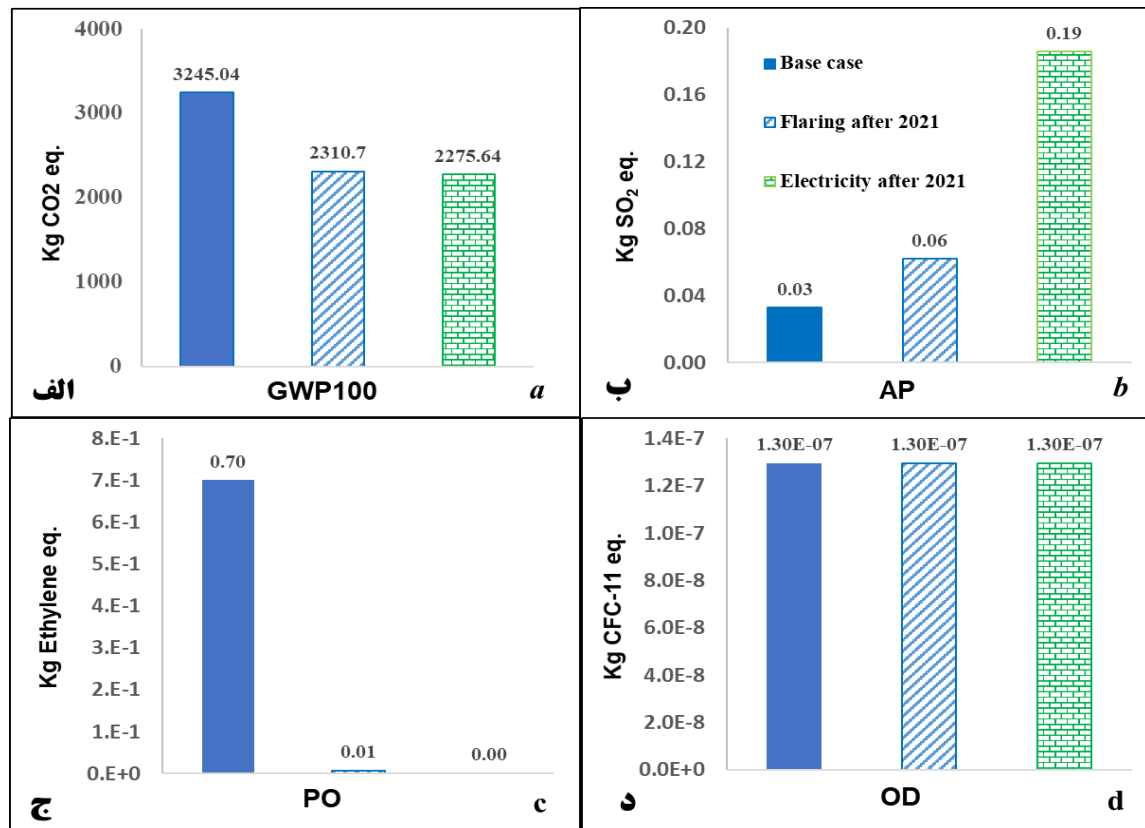
سناریو دوم (از 1400 به بعد) Second senario (from 2012)		سناریو اول (از 1400 به بعد) First scenario (from 2021)		سناریو Senario پارامتر Parameter
تولید الکتریسته Electricity generation	فلرینگ Flaring	تولید الکتریسته Electricity generation	فلرینگ Flaring	
1537		1542		گاز استحصال شده (فوت مکعب در دقیقه) Extracted biogas (ft ³ /min)
11	-	11	-	الکتریسته تولیدی سالانه (گیگاوات ساعت) Annual electricity generation (Gwhr)
7120	639	7120الف	639	سرمایه اولیه (هزار دلار) [۶] Initial investment (M\$)
918	18	918ب	18	سرمایه جاری سالانه (هزار دلار) [۶] Operation cost (M\$)
الف: سه عدد موتور با ظرفیت 1.2 مگاوات به اضافه هزینه اولیه جمع‌آوری گازها که برابر با 639 هزار دلار است. Three 1.2 MW engines cost and the biogas gathering costs is equal to 639000 \$				
ب: هزینه جاری سه موتور با ظرفیت 1.2 مگاوات به اضافه هزینه نگهداری سیستم جمع‌آوری و فلرینگ که برابر با 18 هزار دلار در سال است. The annual cost of three 1.2 MW engines including the maintenance cost of biogas hathering and flaring system is equal to 18000\$				

گاز لندفیل از سال ۱۴۰۰ به بعد است. این در حالی است که بیشتر تحقیق‌های موجود، سناریوهای مختلف مدیریت گاز لندفیل را از همان سال اول بهره‌برداری لندفیل در نظر می‌گیرند و سنجه‌های LCA را در چنین شرایطی محاسبه و نتایج را با حالت پایه مقایسه کرده‌اند (Wanichpongpan and Gheewala, 2007; Abduli *et al.*, 2011; Beylot *et al.*, 2013; Rahimi *et al.*, 2019). اما از آنجایی که در لندفیل‌های موجود، راهکارهای کنترلی به‌صورت پیشنهاد مطرح شده است، بایستی تأثیر آن راهکار در تعیین سنجه‌های LCA نیز از زمان دادن پیشنهاد در نظر گرفته شود. همچنین در نتایج تحقیق‌ها (Boyaghchi *et al.*, 2013) و (Rezaee and Abolhasani, 2018)، میزان انتشار CO_{2e} معادل در حالت کنترل شده به ترتیب ۶۴ درصد و ۷۰ درصد کاهش داشته است که تفاوت اعداد با نتایج این تحقیق به این دلیل است که در پژوهش‌های بیان شده بازده جمع‌آوری و استحصال گاز را ۱۰۰٪ فرض کرده‌اند.

با توجه به جدول ۴، با به‌کارگیری موتور احتراق داخلی نسبت به روش سوزاندن در فلر، سالانه ۱۱ هزار مگاوات برق تولید می‌شود که می‌توان در مواقع نیاز این برق را به شبکه تزریق کرد.

ارزیابی چرخه حیات

مطالعه ارزیابی چرخه حیات نشان داد که سنجه پتانسیل گرمایش جهانی برای حالت پایه برابر با ۳۲۴۵/۰۴ کیلوگرم CO₂ به ازای یک مگاگرم زباله ورودی به لندفیل است (شکل ۳.الف) که این مقدار برای حالت مدیریت با فلرینگ و مدیریت از طریق تولید الکتریسته به ترتیب برابر با ۷۱ و ۷۰ درصد مقدار سنجه برای حالت پایه است. هرچند انتظار می‌رود که با بهره‌گیری از روش‌های کنترلی، مقادیر این سنجه بسیار کمتر شود (کاهش ۸۸٪ و ۵۵٪ در سنجه GWP100 به ترتیب در مطالعات (Abduli *et al.*, 2011) و (Beylot *et al.*, 2013) گزارش شده است). اما یک نکته که در محاسبات پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است، بهره‌گیری از روش‌های کنترل



شکل ۳-سنجه‌های الف) پتانسیل گرمایش جهانی، ب) پتانسیل اسیدی شدن، ج) پتانسیل تولید اکسندهای فتوشیمیایی و د) پتانسیل تخلیه لایه ازن در سه حالت مختلف مدیریت بیوگاز

Fig. 3- a) Global warming potential, b) acidification potential, c) photochemical oxidants production potential and d) ozone layer depletion potential for three biogas management cases

زباله) است که این امر به دلیل وجود ترکیب‌های آلی فرار غیرمتانی است که نقش اصلی را در انجام واکنش‌های فتوشیمیایی دارند. در حالت کنترل با فلر و کنترل با تولید الکتريسته، ترکیب‌های آلی فرار در فرایند احتراق، اکسید شده و انتشار آن‌ها بسیار کم می‌شود و تنها NMVOC موجود در گاز غیر قابل استحصال وارد اتمسفر می‌شود. بنابراین سنجه PO برای این دو حالت بسیار کمتر از حالت پایه است. سنجه چهارمی که مورد بررسی قرار گرفت، پتانسیل تخلیه لایه ازن بود که برای هر سه حالت مقدار یکسانی به دست آمد. به منظور تعیین سهم هر یک از فرایندها در هر یک از سه حالت مدیریتی مورد بررسی، سهم نسبی فرایندهای مختلف در هر حالت در نرم افزار openLCA تعیین و در جدول ۵ بر حسب درصد گزارش شده است.

هرچند سنجه GWP100 بارزترین سنجه در مطالعه LCA این لندفیل است، اما سنجه AP نیز مقادیر قابل توجهی را نشان می‌دهد. به طوریکه در حالت مدیریت با تولید الکتريسته، مقدار این سنجه بیشینه است و حالت پایه کمترین مقدار (۰/۰۳ کیلوگرم معادل SO₂) را دارد. مقدار این سنجه به طور عمده به انتشار آلاینده‌های SO₂ و NO_x مربوط می‌شود. از آنجا که ترکیب‌های گوگردی در چرخه حیات لندفیل کمتر وجود دارد، نقش آلاینده NO_x پررنگ‌تر است. در موتورهای درون سوز تولید الکتريسته به دلیل بالابودن دمای شعله نسبت به فلرها، انتشار اکسیدهای نیتروژن بیشتر بوده و مقدار سنجه AP بیشتر است. در مقایسه تأثیر سه حالت مدیریتی روی اکسندهای فتوشیمیایی، حالت پایه دارای بیشترین مقدار سنجه (۰/۷ کیلوگرم اتیلن معادل به ازای یک تن

جدول ۵. تأثیر نسبی فرایندهای مختلف در سنجه‌های LCA بر حسب درصد
Table 5. Relative contributions of different process in LCA indicators (%)

الکتریسته از ۱۴۰۰ (حالت سوم) Electricity after 2021 (third case)	فلرینگ از ۱۴۰۰ (حالت دوم) Flaring after 2021 (second case)	حالت پایه (حالت اول) Base case (first case)	سنجه Indicator
پتانسیل گرمایش جهانی ۱۰۰ ساله (100-year global warming potential)			
0.1	0.1	0.1	تهیه سوخت دیزل Diesel production
0.3	0.3	0.2	حمل زباله Waste transportation
99.6	99.6	99.7	مدیریت در لندفیل Management in landfill
اسیدی شدن (Acidification potential)			
9	27	50	تهیه سوخت دیزل Diesel production
9	27	50	حمل زباله Waste transportation
82	46	0	مدیریت در لندفیل Management in landfill
تولید اکسندهای فتوشیمیایی (Photochemical oxidation)			
1.2	0.4	0	تهیه سوخت دیزل Diesel production
16.2	5.5	0.1	حمل زباله Waste transportation
82.6	94.1	99.9	مدیریت در لندفیل Management in landfill
تخلیه لایه ازن (Ozone depletion)			
100	100	100	تهیه سوخت دیزل Diesel production
0	0	0	حمل زباله Waste transportation
0	0	0	مدیریت در لندفیل Management in landfill

امر به دلیل تولید و انتشار اکسیدهای نیتروژن در احتراق گاز متان تولیدی در لندفیل است. برای سنجه PO، که ناشی از ترکیب‌های آلی فرار غیر متانی است، بیشترین نقش را فرایند مدیریت گاز در لندفیل دارد. هرچند سهم نسبی فرایند مدیریت در لندفیل نسبت به سایر فرایندها از حالت مدیریت اول به سوم، کمتر می‌شود که این امر به دلیل کمتر شدن مقدار انتشار این ترکیب‌ها در حالت‌های دوم و سوم است. با توجه به شکل ۳.۵ و جدول ۵ می‌توان گفت که تنها فرایند متأثر بر سنجه OD، فرایند تهیه و انتقال سوخت است که برای هر سه حالت مدیریت لندفیل مشترک و مقدار آن یکسان است.

با توجه به شکل ۱ و جدول ۵، سه فرایند مختلف در تعیین مقدار سنجه‌های LCA برای لندفیل مورد نظر نقش دارند. همان‌طور که انتظار می‌رود، سنجه GWP100 بیش از هر فرایند دیگری، متأثر از انتشار گازهای گلخانه‌ای در درون لندفیل است و در هر سه حالت مدیریت گاز لندفیل، کمابیش بیش از ۹۹ درصد سهم این سنجه مربوط به فرایند مدیریت گازها در لندفیل است. فرایند تهیه و انتقال سوخت و حمل زباله هر کدام ۵۰ درصد سهم سنجه AP در حالت پایه را بر عهده دارند. در صورتیکه در حالت مدیریت با فلرینگ و مدیریت با تولید الکتریسته، سهم فرایند مدیریت در لندفیل نسبت به دو فرایند دیگر بیشتر می‌شود که این

نتیجه‌گیری

می‌باید. هرچند مقدار سنجه AP با توجه به تولید اکسیدهای نیتروژن در دمای بالای احتراق در حالت تولید الکتریسته نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است. همچنین با بهره‌گیری از سه موتور احتراق داخلی ۱/۲ مگاواتی، می‌توان سالانه به میزان ۱۱ هزار مگاوات برق تولید کرد. بنابراین می‌توان حالت مدیریت گاز برای تولید الکتریسته را بهترین روش برای مدیریت گاز در بین حالت‌های مورد بررسی قلمداد کرد. با توجه به سامانه اطلاعات آماری استان گیلان (GPSIS, 2018)، متوسط برق مصرفی هر خانوار گیلانی و هر خانوار در شهرستان رشت به ترتیب برابر با ۲/۱ و ۲/۵ مگاوات ساعت در سال ۱۳۹۷ است. با توجه به این مقادیر، برق تولید از طریق استحصال بیوگاز لندفیل سراوان، معادل برق مصرفی بالغ بر ۵۰۰۰ خانوار گیلانی و یا ۴۰۰۰ خانوار در شهرستان رشت است. همچنین می‌توان از برق تولیدی برای تولید انرژی مورد نیاز جهت تصفیه شیرابه لندفیل نیز استفاده نمود که این مورد در مطالعه LCA در این پژوهش در نظر گرفته نشد.

پی‌نوشت‌ها

¹ Pan American Health Organization (PAHO)

² Global Warming Potential (GWP)

Abduli, M.A., Naghib, A., Yonesi, M. and Akbari, A., 2011. Life cycle assessment (LCA) of solid waste management strategies in Tehran: landfill and composting plus landfill. *Environmental Monitoring and Assessment*. 178(1-4), 487-498.

Ahmadzadeh, A., Khosravi, A., Orkomi A.A. and Tehrani, HJ., 2014. Principles of Design, Operation and Landfill Gas Management. 1st ed. Khaniran, Iran. (In Persian).

Beylot, A., Villeneuve, J. and Bellenfant, G., 2013. Life cycle assessment of landfill biogas management: sensitivity to diffuse and combustion air emissions. *Waste Management*. 33(2), 401-411.

در مطالعه حاضر با استفاده از آمار جمعیتی و آمار کمی و کیفی زباله‌ها، مقادیر زباله تولیدی در سال‌های گذشته و سال‌های آتی در دو سناریوی مختلف محاسبه و یا پیش‌بینی شد. نتایج نرم افزار LandGem نشان داد چنانچه بعد از اتمام دوره ۴۰ ساله بهره‌برداری، لندفیل بسته شود، بالغ بر ۶۶۰۰ گیگاگرم گاز لندفیل به‌طور کلی از انباشت و تجزیه بی‌هوازی زباله‌ها در محل لندفیل تولید می‌شود. همچنین با توجه به وجود نداشتن جایگزینی برای لندفیل سراوان، چنانچه بعد از اتمام دوره ۴۰ ساله، به مدت ۲۰ سال دیگر نیز از لندفیل استفاده شود، میزان انتشار گازها کمابیش ۱/۶ برابر خواهد شد. با توجه به حجم بالای بیوگاز تولید شده و به‌منظور کاهش اثرهای گلخانه‌ای آن، روش‌های سوزاندن در فلر و تولید الکتریسته مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. نتایج ارزیابی چرخه حیات نشان داد که با استفاده از یک سیستم جمع‌آوری گاز با بازده تقریبی ۷۵٪، سنجه GWP100 برای دو حالت مدیریتی نصب فلر و تولید الکتریسته به‌طور متوسط به میزان ۳۰٪ در حل چرخه حیات زباله از محل تولید تا دفن در لندفیل کاهش

منابع

Bicheldey, T. and Latushkina, E., 2010. Biogas emission prognosis at the landfills. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 7(4), 623-628.

Boyaghchi, FA., Khanpour, N. and Ashrafi, M., 2013. Emission rate assessment in landfill and energy generation technologies (Case study: Aradkooh landfill). *Journal of Environmental Studies*. 3(67), 6-8. (In Persian with English abstract).

Change, IP., 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. 2013-04-28. Available online at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or>

jp./public/2006gl/index.html.

Cherubini, F., Bargigli, S. and Ulgiati, S., 2009. Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. *Energy*. 34(12), 2116-2123.

Cho, H.S., Moon, H.S. and Kim, J.Y., 2012. Effect of quantity and composition of waste on the prediction of annual methane potential from landfills. *Bioresource Technology*. 109, 86-92.

EPA AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, 1995. Section: c03s01: Stationary Internal Combustion Sources, Stationary Gas Turbines.

EPA AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, 2018. Section: dc13s05: Miscellaneous Sources, Industrial Flares.

Faour, A.A., Reinhart, D.R. and You, H., 2007. First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills. *Waste Management*. 27(7), 946-953.

Ghanbarzadeh Lak, M. and Sabour, MR., 2010. Greenhouse gas emissions and energy consumption through solid waste disposal scenarios using LCA, case study: SIRI island. *Journal of Environmental Studies*. 36(55), 67-78. (In Persian with English abstract).

GPSIS, 2018. Management and planning organization of Guilan Province. Statistical information system of Guilan province. Guilan Province Statistical Information System (In Persian with English abstract). Available online at: <http://sdi.mpgl.ir/>.

Hong, J., Li, X. and Zhaojie, C., 2010. Life cycle assessment of four municipal solid waste management scenarios in China. *Waste Management*. 30(11), 2362-2369

ISO-14040, 2006. Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO-14044, 2006. Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Marashi, F., Haghighifard, N.J., Khorasani, N. and Monarouei, S.M., 2019. Life cycle assessment of the sugar industry: A case study of Amir Kabir Sugar Cane Industry. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*. 49(4), 597-608.

Milich, L., 1999. The role of methane in global warming: where might mitigation strategies be focused? *Global Environmental Change*. 9(3), 179-201.

Mirzaei, S., 2010. Transportation energy data book. Iranian Academic Center for Education, Culture & Research, Tehran, Iran, submitted to Iranian Fuel Conservation Company.

Mosher, B.W., Czepiel, P.C., Shorter, J., Allwine, E., Harriss, R.C., Kolb, C. and Lamb, B., 1996. Mitigation of methane emissions at landfill sites in New England, USA. *Energy Conversion and Management*. 37(6-8), 1093-8.

Noorpoor, A., Afrasyabi, H. and Davoodi, S.M., 2013. Waste management processing assessment in the World and Iran. Iran. Studeis and Planning Department of Tehran Municipality. (In Persian with English abstract).

Ntziachristos, L., Samaras, Z., Kouridis, C., Hassel, D., McCrae, I., Hickman, J., Zierock, K.H., Keller, M., Andre, M., Winther, M. and Gorissen, N., 2009. Category Exhaust Emissions From Road Transport. EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook. Part B, Chapter 1.A.3.b.i-iv.

- Pazoki, M., Delarestaghi, R.M., Rezvanian, M.R., Ghasemzade, R. and Dalaei, P., 2015. Gas production potential in the Landfill of Tehran by landfill methane outreach program. *Jundishapur Journal of Health Sciences*. 7(4), 29679. (In Persian with English abstract)
- Pirooz, B., Razdar, B., Bagherzadeh, A. and Kavianpour, M.R., 2010. Environmental impact assessment of Rasht landfill within Saravan forest in Guilan province. *Proceedings of the National Conference on Human, Environment and Sustainable Developm.* 2010 March. 10. Hamedan. Iran. (In Persian with English abstract).
- Rahimi, F., Atabi, F., Nouri, J. and Omrani, G.A., 2019. Using life cycle assessment method for selecting optimal waste management system in Tehran City. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*. 4(4), 866-878.
- Rahmani, K., Dadashkhah, Z., Alighadri, M., Mokhtari, A. and Nazari H., 2019. Environmental assessment of life cycle of waste management system based on LCAIWM1 modeling (Case study: Rasht city). *Journal of Environmental Health Engineering*. 6(4), 443-456. (In Persian with English abstract).
- Rezaee, E. and Abolhasani, M.H., 2018. Evaluation of landfill gas generation for exploitation energy (Case study: landfill no. 2 of Shahinshahr). *Journal of Environmental Health and Engineering*. 5(4), 389-400. (In Persian with English abstract).
- Sabetraftar, K., Tavakoli, B., Sedighrahnama, S., Tolouian, M. and Farogh, M., 2010. The Comprehensive Waste Management Plan of Guilan Central District. (In Persian with English abstract).
- Safari, E., Asadollahfardi, G. and Joghatayi, F., 2009. Methane reduction possibility study in Rasht city landfills considering green development mechanism. *International Journal of Applied Environmental Sciences*. 4, 337. (In Persian with English abstract).
- Scharff, H. and Jacobs, J., 2006. Applying guidance for methane emission estimation for landfills. *Waste Management*. 26(4), 417-29.
- Sil, A., Kumar, S. and Kumar, R., 2014. Formulating LandGem model for estimation of landfill gas under Indian scenario. *International Journal of Environmental Technology and Management*. 17(2-4), 293-299.
- Skone, T.J., 2019. NETL CO₂U openLCA LCI Database. National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, PA, Morgantown, WV, and Albany, OR United States.
- Sofsatayi, A., 2010. The biogas extraction technologies and potential of bioenergy production from the landfills in Isfahan. *Proceedings of the 1st Iranian Bioenergy Conference*. 13th October, Tehran, Iran. (In Persian with English abstract).
- Talaiekhosani, A., Bahrami, S., Hashemi, S.M.J. and Jorfi, S., 2016. Evaluation and analysis of gaseous emission in landfill area and estimation of its pollutants dispersion, (case of Rodan in Hormozgan, Iran). *Environmental Health Engineering and Management Journal*. 3(3), 143-150. (In Persian with English abstract).
- Thompson, S., Sawyer, J., Bonam, R. and Valdivia, J.E., 2009. Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills. *Waste Management*. 29(7), 2085-2091.
- Turner, D.A., Williams, I.D. and Kemp, S., 2016. Combined material flow analysis and life cycle assessment as a support tool for solid waste management decision making. *Journal of Cleaner*

Production. 129, 234-248.

Turner, J.H., 1997. The US EPA 40 CFR part 258 financial test/corporate guarantee-new environmentally protective, cost-effective mechanisms for the demonstration of financial responsibility. *Fordham Environmental Law Journal*. 9, 567.

United State Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 2008. Background Information Document for Updating AP42 Section 2.4 Municipal Solid Waste Landfills. EPA/600/R-08-116 2008.

United State Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 2020. LFG Energy Project Development Handbook. 1st ed. EPA.

Wanichpongpan, W., and Gheewala, S.H., 2007. Life cycle assessment as a decision support tool for landfill gas-to energy projects. *Journal of Cleaner Production*. 15(18), 1819-1826.

Xi, B.D., He, X.S., Wei, Z.M., Jiang, Y.H., Li, M.X., Li, D., Li, Y. and Dang, Q.L., 2012. Effect of inoculation methods on the composting efficiency of municipal solid wastes. *Chemosphere*. 88(6),744-750.

Zazouli, M., Karimi, Z. and Rafiee, R., 2020. Selecting the best options of management of municipal solid waste using life cycle assessment methodology (Case study: Noor city). *Iranian Journal of Health and Environment*. 12(4), 607-620. (In Persian with English abstract).





Environmental Sciences Vol.19 / No.2 / Summer 2021

205-224

Energy utilization potential of Saravan landfill in Rasht with life cycle assessment approach

Ali Ahmadi Orkomi* and Maryam Malekpour

Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Rasht, Iran

Received: 2020.09.11

Accepted: 2020.11.10

Ahmadi Orkomi, A. and Malekpour, M., 2021. Energy utilization potential of Saravan landfill in Rasht with life cycle assessment approach. *Environmental Sciences*. 19(2):205-224.

Introduction: In addition to causing pollution, landfills also produce greenhouse gases. One of the best methods to assess landfills' environmental impact is to calculate and compare life cycle assessment (LCA) indicators to determine the relative stability of systems. The purpose of this study was to evaluate the environmental effects and economic implications of different methods of Saravan landfill biogas management in Rasht from 2024 forward to determine the most sustainable method for Saravan landfill gas management.

Material and methods: Two scenarios were considered for biogas emission estimation from the landfill. In the first scenario, the landfill will be closed in 2024, and in the second scenario, the landfill will be in operation for another 20 years (until 2044). LandGem software has been applied to estimate the amount of biogas emitted from the landfill and the accuracy of results was assessed by the mass balance technique. The LCA study was conducted for three different control situations, including an uncontrolled base case, flare utilization, and electricity generation using internal combustion engines in openLCA software. Waste transportation, landfilling, and biogas management was considered in the system boundary in the life cycle assessment. The leachate treatment process was not investigated because of its negligible effect on the studied indicators. To estimate the emission rates of wastes to the atmosphere in the life cycle assessment software, the LandGem simulation results, international emission factors, and data in the ELCD v2.3 databases were used.

Results and discussion: The results showed that in the first and second scenarios, the total amount of biogas generated in the landfill was over 6,600 and 10,500 Gigagrams, respectively. Also, the relative error of LandGem in predicting the generated methane was almost 3.3%. The extracted gas flow rate in the first and second scenarios from 2024 was about 1500 cubic feet per minute. Two flaring and electricity-generating using

* Corresponding Author: *Email Address*.Orkomi@guilan.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.52547/envs.35875>

the internal combustion engine methods have been proposed for landfill gas management with capital costs of 639,000 and 7,120,000 U.S. dollars, respectively. Their annual costs were 18,000 and 918,000 U.S. dollars, respectively. Examining four environmental indicators in life cycle assessment showed that by applying flaring and electricity-generating using the internal combustion engine, global warming potential (GWP100) was reduced by about 30% compared to the uncontrolled base case. So that, the equivalent carbon dioxide emission was almost 3,245, 2,311 and 2,276 kilograms per Mega grams of input solid waste in the base case, the flaring case and the electricity generation case, respectively. Moreover, the photochemical oxidant formation potential in the base case (0.7-kilogram equivalent ethylene per Megagrams solid waste) was much more than that for the other two cases. Meanwhile, the ozone depletion potential was equal for all three management cases.

Conclusion: Given the LCA indicators and economic implications, internal combustion engines have been suggested as the most suitable option for landfill gas management after 2024. It not only reduced about 30% of the global warming potential, but also produced 11,000 megawatt-hours of electricity per year. This is almost equal to the average annual electricity consumption of 5,500 households in Guilan Province or 4,000 households in Rasht County.

Keywords: Global warming, Landfill, LandGem, LCA, Solid waste

