محیط‌شناسی، سال سی و نهم، شمارهٔ ۳ ، پاییز ۱۳۹۲، صفحهٔ ۳۲-۲۳

ارزیابی میزان تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی در لندفیل و تکنولوژی‌های استحصال انرژی (مطالعهٔ موردی: لندفیل آرادکوه)

فاطمه احمدی بویاغچی*[1]، نسیم محمدخان پوریامچی[2]، مژده اشرافی بفروئی[3]

۱. استادیار انرژی دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا (س)
۲. دانشجوی کارشناسی، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا (س) nasimkhanpour@gmail.com
۳. دانشجوی کارشناسی، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا (س) mojdeh.ashrafi.b@gmail.com

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۱/۹/۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۲/۳۰

چکیده

لندفیل عبارت است از فضایی ایزوله که به منظور ذخیرهٔ سیستماتیک بلندمدت زباله در شرایطی که از نشت آن به هوا و آب جلوگیری شود طراحی می‌شود. گاز لندفیل از طریق تجزیهٔ باکتریایی تولید می‌شود، به طوری که زباله‌های مواد آلی در شرایط بی‌هوازی از طریق باکتری‌هایی که به طور طبیعی در زباله و خاک وجود دارند در اثر دفن شکسته می‌شوند. گاز لندفیل ترکیبی از مخلوط صدها گاز مختلف است. عموماً ترکیب درصد حجمی این گازها شامل ۴۵ تا ۶۰ درصد متان و ۴۰ تا ۶۰ درصد دی اکسید کربن است. در این پژوهش میزان کل گازهای تولیدی، همچنین گازهای گلخانه‌ای متان و دی اکسید کربن در لندفیل آرادکوه تا ۳۰ سال پس از بسته‌شدن سایت با استفاده از مدل تخریب مرتبهٔ اول پیش‌بینی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تولید گاز در لندفیل با گذشت زمان روند کاهشی دارد، به طوری که بیشترین گاز متان و دی اکسید کربن تولیدشده به ترتیب ۶ و ۱۶ میلیون کیلوگرم در سال ۱۳۹۴ و کمترین مقدار به ترتیب ۰/۳ و ۰/۸ میلیون کیلوگرم در سال ۱۴۲۳ خواهد بود. حجم کل گازهای تولیدشده در این لندفیل طی ۳۰ سال ۲۱۳ میلیون متر مکعب برآورد می‌شود، که ۲۷ درصد جرم آن را متان و ۷۳ درصد آن را دی اکسید کربن تشکیل می‌دهد. همچنین، میزان انتشار گازهای متان، دی اکسید کربن و دی اکسید گوگرد از طریق تکنولوژی‌های استحصال انرژی در مدت ۳۰ سال محاسبه و مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که میزان انتشار گاز دی اکسید کربن کنترل‌شده ۱/۸۵ برابر حالت کنترل‌نشده و میزان انتشار گاز متان در حالت کنترل‌شده ۰/۱۵ حالت کنترل‌نشده است. همچنین، مقدار انتشار گاز دی اکسید گوگرد طی ۳۰ سال ۳۶۱ کیلوگرم پیش‌بینی شده است. برای ارزیابی اعتبار و دقت مدل پیشنهادی، نتایج، با مقادیر حاصل از روش موازنهٔ جرم مقایسه شده‌اند. میزان خطای برآوردی مطلوب‌بودن نتایج مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه

انرژی، بیوگاز، زباله، گاز گلخانه‌ای.

۱. سرآغاز

افزایش جمعیت و صنعتی‌شدن جوامع همراه با رشد اقتصادی باعث افزایش تولید زباله‌های جامد شهری[1] شده است. آمارها نشان می‌دهد که ٤٦ درصد جمعیت دنیا در شهرها زندگی می‌کنند و کل زباله‌های جامد شهری تولیدشده در سال ۱۹۹۷ حدود ۰/٤۹ بیلیون تن برآورد شده است. همچنین، پیش‌بینی می‌شود که نرخ رشد سالانه در جوامع توسعه‌یافته ۳/۲ تا ٤/۵ درصد و در جوامع در حال توسعه ۲ تا ۳ درصد باشد (Suocheng, et al., 2001). مدیریت زباله‌های جامد شهری یکی از چالش‌های مهم جوامع در حال توسعه است. یکی از روش‌های مدیریت، دفن سنتی زباله است، این روش سبب آلودگی‌های ثانویه‌ای نظیر نشت شیرابه‌ها به سفره‌های آب زیرزمینی و تولید بوی ناخوشایند می‌شود (Allen, et al., 1997; Ham, et al., 1993).

آلاینده‌های محیط‌زیست از جمله متان[2]، دی اکسید

* نویسنده مسئول: تلفن تماس: ۲۱۴۰-۸۸۰۴۴۰۴۰ Email: fahmadi@ alzahra.ac.ir

کربن[۳]، مقدار جزئی مواد سمی و بوی ناخوشایند، از تجزیهٔ زباله‌های ارگانیک حاصل می‌شوند.

گازهای گلخانه‌ای متان و دی اکسید کربن از عوامل اصلی بالارفتن دمای کرهٔ زمین محسوب می‌شوند. متان که حدود ۵۰–۶۰ درصد گاز لندفیل را تشکیل می‌دهد، ۲۱–۲۵ برابر دی اکسید کربن پتانسیل گرم‌کردن کرهٔ زمین را دارد. از طرفی این گاز سوخت سبز محسوب می‌شود که می‌توان برای تولید برق از آن استفاده کرد (He, et al., 1997).

یکی از بهترین روش‌های مدیریت زباله‌های جامد شهری دفن آن‌ها در سلول‌های دفن بهداشتی (لندفیل)[۴] در مقایسه با سایر روش‌های متداول شامل سوزاندن، تجزیه در اثر حرارت، بازیافت و غیره است (Lee, et al., 1996).

در سال ۱۹۹۶ آژانس محافظت از محیط‌زیست[۵] استانداردهای عملیاتی جدید و خطوط راهنمای انتشار گاز برای لندفیل‌های زباله شهری را منتشر کرد. بر اساس استانداردها لندفیل‌های بزرگ (لندفیل‌هایی که ترکیبات فرار ارگانیک[۶] منتشرشده از آن بیشتر از ۵۰Mg/year باشد) موظف‌اند گاز حاصله از لندفیل را جمع‌آوری و مدیریت کنند. در گذشته به منظور اجرای این استاندارد گاز لندفیل را با هدف از بین بردن آن و بوی بد حاصله به وسیلهٔ مشعل می‌سوزاندند. در حال حاضر گاز متان حاصل از لندفیل‌ها در نقاط مختلف دنیا به منظور استحصال انرژی استفاده می‌شود. این امر علاوه بر منافع اقتصادی سبب کاهش آثار تخریبی زیست‌محیطی می‌شود.

از لندفیل‌ها و محل‌های دفن زبالهٔ قدیمی در سراسر زمین ۴۰–۶۰ میلیون تن متان آزاد می‌شود. به عبارت دیگر، حدود ۱۱–۱۲ درصد متان تولیدشده از طریق فعالیت‌های انسانی از لندفیل‌ها به دست می‌آید. بدین ترتیب لندفیل‌ها در ردهٔ سوم تولید متان قرار می‌گیرند (Lelieved, et al., 1998).

اولین بار Benfenati در سال ۱۹۹۹ در زمینهٔ کاهش انتشار ترکیبات فرار ارگانیکی ارزیابی‌هایی انجام داد.

Shin و Park در سال ۲۰۰۱ در مقاله‌ای خصوصیات انتشار سطحی از گاز لندفیل حاصل از زباله را به صورت فصلی و روزانه با استفاده از روش محفظهٔ شار هوایی[۷] تخمین زدند و حجم کلی لندفیل را پیش‌بینی کردند.

Kim در سال ۲۰۰۲ میزان انتشار جیوه را در دو لندفیل شیبدار و مسطح بررسی کرد که نتیجهٔ حاصل از آن بهبود انتشار جیوه در لندفیل مسطح در مقایسه با لندفیل شیبدار را نشان می‌دهد.

سپس Hegde و همکارانش در سال ۲۰۰۳ از دو روش FTIR[۸] و محفظهٔ GC[۹] برای اندازه‌گیری نرخ انتشار گاز متان و انتشار کربن دی اکسید از لندفیل استفاده کردند. میزان انتشار گاز به‌دست‌آمده از هر دو روش مشابه و مساوی برآورد شده است. انتشار متان و کربن دی اکسید از هر هکتار لندفیل سالانه ۵/۷۱۷ و ۲۷/۶۱ تن تخمین زده شده است.

Shin و همکارانش در سال ۲۰۰۵ به بررسی تکنولوژی‌های مختلف تولید برق از گاز لندفیل پرداختند و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در صورت استفاده از هر یک از تکنولوژی‌ها را با استفاده از مدل LEAP با یکدیگر مقایسه و تحلیل کردند.

Jaramillo و Mathews در سال ۲۰۰۵ روابطی را برای محاسبهٔ میزان گازهای منتشرشدهٔ متان، دی اکسید کربن و دی اکسید گوگرد[۱۰] از لندفیل بر اساس حجم کلی گاز لندفیل ارائه و میزان آلایندگی تکنولوژی‌های متفاوت بهره‌برداری از گاز متان حاصل از لندفیل مانند مشعل‌ها، توربین‌های گازی، توربین‌های بخار و موتورهای احتراق داخلی را مقایسه کردند.

Ritzkowski و Stegmann در سال ۲۰۰۷ تکنولوژی هوادهی سیتو[۱۱] را برای سرعت‌بخشیدن میزان گاز متان به ۵۰ درصد گاز لندفیل معرفی و تأثیر این فناوری را در انتشار گازهای گلخانه‌ای شامل متان و دی اکسید کربن بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از این تکنولوژی موجب کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای لندفیل می‌شود.

Mukherjee و Sarkar در سال ۲۰۰۸ نرخ کل انتشار را از مجموع نرخ‌های انتشار گاز متان در مکان‌های مختلف داخل لندفیل با استفاده از روش ریاضی محاسبه کردند.

با توجه به اینکه برای محاسبهٔ مقدار دقیق گاز منتشرشده از لندفیل محدودیت‌هایی وجود دارد، Mackie و Cooper در سال ۲۰۰۹ رویهٔ پیش‌بینی میزان انتشار گاز لندفیل را با استفاده از اندازه‌گیری‌های تعداد زیادی ترکیبات ارگانیکی فرار محبوس‌شده روی سطح لندفیل ارائه کردند. به طوری که، تخمین مقدار انتشار گاز لندفیل از طریق این رویکرد به سادگی امکان‌پذیر می‌شود.

Kornbluth و همکارانش در سال ۲۰۱۲ تکنولوژی غنی‌ساز هیدروژن را معرفی کردند که استفاده از آن موجب کاهش گاز ناکس[۱۲] از تکنولوژی‌های تولید انرژی الکتریسیته از گاز لندفیل می‌شود.

Anwar و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۲ انتشار گاز متان در لندفیل پنینسولار[۱۳] در مالزی را در سال ۲۰۱۰ محاسبه و برای سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ پیش‌بینی کردند. طبق این بررسی میزان انتشار گاز متان در این لندفیل در سال ۲۰۱۰، ۳۱۰۲۲۰ تن برآورد شده است و انتظار می‌رود برای سال ۲۰۲۰ حداقل ۳۷۰ هزار تن گاز متان تولید شود.

در این تحقیق میزان تولید گازهای آلایندهٔ متان، دی اکسید کربن و دی اکسید گوگرد در سلول دفن بهداشتی (لندفیل) آرادکوه با استفاده از مدل تخریب مرتبهٔ اول و روابط مربوطه برای دو حالت بدون استحصال انرژی و استفاده از تکنولوژی کنترل گاز به منظور استحصال انرژی محاسبه و اعتبارسنجی شده است.

۲. روش بررسی و تکنولوژی کنترل گاز

برآورد میزان تولید گاز لندفیل به دو صورت: الف) بدون استحصال انرژی و ب) استفاده از تکنولوژی کنترل گاز به منظور استحصال انرژی، صورت گرفته است. با توجه به اینکه زباله‌های جامد شهری منطقهٔ مورد بررسی (تهران) جزء زباله‌های استاندارد به شمار می‌روند بنابراین، مدل به‌کاررفته برای تخمین میزان تولید گاز لندفیل مربوط به آن صادق است.

الف) برآورد میزان گاز لندفیل بدون استحصال انرژی

کل گاز تولیدشده در لندفیل در سال T که در زمان x دفن شده است را می‌تواند بر اساس مدل تخریب مرتبهٔ اول[۱۴] و با استفاده از رابطهٔ زیر تخمین زد (EPA, 1996,1997, 1998).

$$LFG_{T,x}=2KR_xL_0e^{-K(T-x)} \quad \text{(متر مکعب)} \qquad (۱)$$

$LFG_{T,x}$: تولید گاز لندفیل در سال T که در سال x دفن شده (برحسب متر مکعب)

K: نرخ تولید گاز متان (بر سال) که به شرایط آب و هوایی منطقه‌ای، که لندفیل در آن قرار دارد، بستگی دارد. مقدار K برای شرایط آب و هوایی مرطوب، نیمه‌مرطوب و خشک به ترتیب ۰٫۲۲۵، ۰٫۱ و ۰٫۰۶ پیشنهاد می‌شود.

R_x: مقدار زبالهٔ دفن‌شده (بر حسب کیلوگرم)

L_0: پتانسیل تولید متان از زباله برابر ۰٫۱۶۰۱۳ (متر مکعب بر کیلوگرم)

در این روش میزان تولید گاز در بازهای زمانی مختلف و به صورت تابعی از زمان به دست می‌آید.

میزان انتشار گاز متان در لندفیل را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد (Jaramillo, 2005).

$$U_{CH4}=(0.5)(0.6567)(LFG_T)(\text{کیلوگرم}) \qquad (۲)$$

در این رابطه مقدار ۰٫۵ درصد تخمینی از گاز متان در گاز لندفیل و ۰٫۶۵۶۷ مقدار متان بر حسب کیلوگرم در متر مکعب از گاز لندفیل است.

انتشار گاز دی اکسید کربن در لندفیل با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود (EPA, 1996, 1997, 1998):

$$U_{CO2}=(0.5)(1.794)(LFG_T)(\text{کیلوگرم}) \qquad (۳)$$

در این رابطه مقدار ۰٫۵ درصد تخمینی گاز دی اکسید کربن از گاز لندفیل، ۱٫۷۹۴ مقدار دی اکسید کربن بر حسب کیلوگرم در متر مکعب از گاز لندفیل و LFG_T مقدار کلی گاز لندفیل بر حسب متر مکعب که در سال T تولید شده، است.

نتایج حاصل از مدل پیشنهادی (معادلات ۱ تا ۳) در بخش اعتبارسنجی با استفاده از روش موازنهٔ جرم ارزیابی شده است.

ب) تکنولوژی کنترل گاز لندفیل به منظور استحصال انرژی

استفاده از تکنولوژی کنترل گاز با دو هدف استحصال انرژی و کاهش میزان انتشار گاز آلایندهٔ متان که به‌منزلهٔ یکی از عوامل اصلی گرمایش جهانی است صورت می‌گیرد (Dudek, et al .2012). در روش قبلی بخش عمدهٔ گازهای تولیدشده شامل متان و دی اکسید کربن و میزان گاز آلایندهٔ دی اکسید گوگرد ناچیز است. این در حالی است که استفاده از تکنولوژی کنترل گاز به علت فرایند احتراق سبب تولید گاز دی اکسید گوگرد و تبدیل بخش زیادی از متان به دی اکسید گوگرد می‌شود. میزان انتشار این گازها به اتمسفر از روابط ٤ تا ٦ به دست می‌آید (Jaramillo, 2005).

$$C_{CH_4} = (1-\eta_{Col})(U_{CH_4}) \text{ (کیلوگرم)} \qquad (٤)$$

در این رابطه بازده جمع‌آوری η_{COL}، ۸۵ درصد در نظر گرفته شده است (Jaramillo, 2005).

$$C_{CO_2} = U_{CO_2} + (\eta_{Col})(U_{CH_4})(2.75) \text{ (کیلوگرم)} \qquad (٥)$$

در این رابطه مقدار ۲٫۷۵ نسبت وزن ملکولی دی اکسید کربن به وزن ملکولی متان است.

میزان دی اکسید گوگرد تولیدی در لندفیل کنترل‌شده از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود (Jaramillo, 2005).

$$C_{SO2} = 2(122.54\times10^{-8})(LFG_T)(\eta_{Col}) \text{ (کیلوگرم)} \qquad (٦)$$

در این رابطه عدد ۲ نسبت وزن ملکولی دی اکسید گوگرد به وزن ملکولی گوگرد و $۱۲۲٫٥٤\times۱۰^{-۸}$ مقدار ترکیبات سولفور کاهش‌یافته بر حسب کیلوگرم در متر مکعب است (در این رابطه فشار و دمای استاندارد به ترتیب ۱ اتمسفر و ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است).

۳. منطقهٔ مورد بررسی

شکل ۱ مراحل ساخت سلول دفن زبالهٔ آرادکوه واقع در منطقهٔ کهریزک در جنوب تهران را نشان می‌دهد. فرایند ساخت این لندفیل در بهمن ۱۳۸٦ آغاز و از اسفند ۱۳۸۸ دفن زباله در آن شروع شد. در طراحی و ساخت این سلول بهداشتی از استانداردهای اروپا و ایالات متحده استفاده شده است.

مشخصات فنی این سلول عبارت‌اند از:

ظرفیت: ٦۰۰ هزار تن زباله
حجم: ۳۵۰ هزار متر مکعب
عمق: ۱۲ تا ۱۵ متر
عرض: ۲۰۰ متر
طول: ۲۵۰ متر
شیب کف: ۲ تا ۵ درصد

کف سلول از سه لایه تشکیل شده است که عبارت‌اند از: GCL[15]، ژئوممبرین[16] و ژئوتکستایل[17] که روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و از نفوذ شیرابه به درون خاک و آب‌های زیرزمینی جلوگیری می‌کنند. شیرابه‌ها از طریق دو لولهٔ جاسازی‌شده در کف سلول به وسیلهٔ پمپ مکنده‌ای جمع‌آوری و به تصفیه‌خانه فرستاده می‌شوند.

لایه‌ای از قلوه‌سنگ به ضخامت ۰/۵ متر روی کف سلول ریخته شده است تا شیرابه پس از عبور از این لایهٔ زهکش به صورت خالص‌تری به درون لوله‌های جمع‌آوری شیرابه هدایت شود. همزمان با ریخته‌شدن پسماندها، لوله‌هایی سوراخ‌دار به صورت افقی و عمودی در محل‌های از پیش تعیین‌شده قرار می‌گیرند تا بیوگاز تولیدی به درون لوله‌ها هدایت و جمع‌آوری شوند.

شکل ۱. لندفیل آرادکوه (در حال ساخت)

پسماند به صورت مخلوط یا تفکیک‌شده پس از

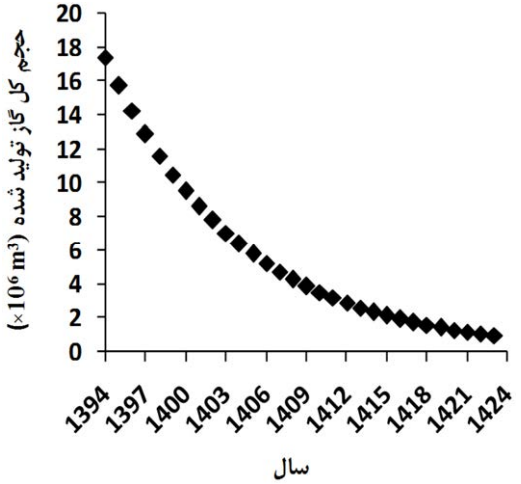
فشرده‌سازی به صورت یک لایه روی کف سلول قرار می‌گیرد و به منظور جلوگیری از انتشار مواد، بو و تکثیر جانوران موذی روی آن‌ها را از طریق لایه‌ای از خاک یا کود کورس کمپوست به ضخامت ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر می‌پوشانند. استفاده از کود کورس کمپوست با محاسنی چون جذب رطوبت و شیرابهٔ جاری‌شده در میان پسماندها همراه است. در ادامه برای فشرده‌کردن هر چه بیشتر لایه‌ها از ماشین‌های کوبشی استفاده می‌شود. این ماشین‌ها لایه‌ها را فشرده می‌کنند و امکان استفاده از فضای سلول را به حداکثر می‌رسانند. پس از چند دورهٔ پیاپی لایه‌گذاری پسماند و خاک (یا کورس کمپوست)، یک لایهٔ پوششی مجزا و ضخیم‌تر روی آن کشیده می‌شود که به پوشش میانی معروف است. در نهایت نیز پس از پرشدن، لایه‌ای نهایی روی لایه‌های دیگر ایجاد می‌شود که به پوشش نهایی معروف است. روی این لایه نیز به فضای سبز تبدیل می‌شود.

٤. نتایج

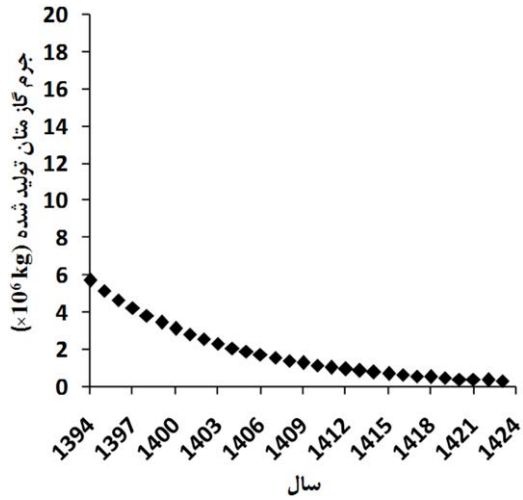
با توجه به ظرفیت سایت و مقدار زباله‌ای که روزانه در آن ریخته می‌شود، انتظار می‌رود که لندفیل آرادکوه در اواسط ۱۳۹۲ پر از زباله و سایت برای تولید گاز بسته شود. میزان کل گازهای تولیدشده (متان و دی اکسید کربن کنترل‌نشده)، طی ۳۰ سال آینده با استفاده از روابط ۱ تا ۳ محاسبه می‌شوند و به ترتیب در شکل‌های ۲ تا ٤ نشان داده شده‌اند.

طبق شکل ۲ بیشترین حجم گاز تولیدشده تقریباً ۱۸ میلیون متر مکعب در سال ۱۳۹٤ و کمترین حجم گاز تولیدشده تقریباً پس از گذشت ۳۰ سال ۰٫۹ میلیون متر مکعب پیش‌بینی می‌شود. میزان تولید گاز در این ۳۰ سال ۲۱۳ میلیون متر مکعب است.

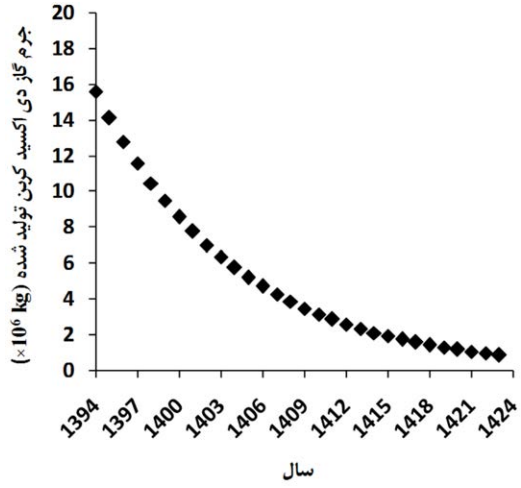
مطابق شکل ۳ بیشترین جرم گاز متان تولیدشده تقریباً ٦ میلیون کیلوگرم در سال ۱۳۹٤ و کمترین مقدار پس از گذشت ۳۰ سال تقریباً ۰٫۳ میلیون کیلوگرم برآورد می‌شود. این روند کاهشی در مقایسه با روند کاهشی کل گاز تولیدشده (شکل ۲) کند است.



شکل ۲. میزان تولید کل گاز کنترل‌نشده در لندفیل آرادکوه



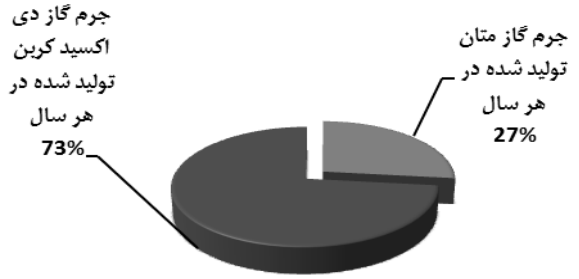
شکل ۳. میزان تولید متان کنترل‌نشده در لندفیل آرادکوه



شکل ۴. میزان تولید دی اکسید کربن کنترل‌نشده در لندفیل آرادکوه

مطابق شکل ٤ بیشترین جرم گاز دی اکسید کربن تولیدشده تقریباً ١٦ میلیون کیلوگرم در سال ١٣٩٤ و کمترین مقدار پس از ۳۰ سال تقریباً ۰٫۸ میلیون کیلوگرم پیش‌بینی می‌شود. از آنجا که حجم گاز دی اکسید کربن ٤٩ درصد حجم کل گازهای تولیدی را تشکیل می‌دهد (طبق شکل ۵)، در نتیجه نرخ کاهش گاز دی اکسید کربن طی این ۳۰ سال با نرخ کاهش کل گاز تولیدشده در لندفیل تقریباً برابر است.

شکل ۵ درصد جرمی گازهای متان و دی اکسید کربن در کل گازهای تولیدی کنترل‌نشده در لندفیل را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هر سال جرم گاز متان تقریباً یک سوم جرم کل گاز لندفیل است.



شکل ۵. درصد جرمی گازهای متان و دی اکسید کربن پیش‌بینی‌شده در گاز لندفیل آرادکوه

۵. اعتبارسنجی

با استفاده از روابط ۱ تا ۳ روند تولید گاز در ۳۰ سال محاسبه شده است. به منظور بررسی صحت و ارزیابی دقت نتایج حاصل از مدل تخریب مرتبهٔ اول، از روش موازنهٔ جرم به شرح زیر استفاده شده است. مدل پیشنهادی در این پژوهش نسبت به روش موازنهٔ جرم مزیت‌هایی دارد که عبارت‌اند از: ۱. تخمین زمان مناسب برای بهره‌برداری از گاز تولیدشده به منظور استحصال انرژی؛ ۲. تخمین زمان مناسب برای پرکردن مجدد سایت.

در روش موازنهٔ جرم، گاز لندفیل تولیدشده در اثر تجزیهٔ بی‌هوازی را می‌توان با واکنش سادهٔ زیر نشان داد:

(۷)

$$C_6H_{10}O_4\ (\text{زباله یا اسید چرب}) + 1.5\ H_2O \rightarrow 3.25\ CH_4 + 2.75CO_2$$

طبق موازنهٔ فوق گاز لندفیل شامل ۵۰–۵٤ درصد متان و ٤۰–٤٦ درصد دی اکسید کربن و سایر محصولات جزئی دیگر مانند آمونیاک و سولفات هیدروژن است (Themelis and Ulloa, 2004).

رابطهٔ ۷ نشان می‌دهد که به ازای هر یک کیلوگرم $C_6H_{10}O_4$ (با جرم ملکولی ١٤٦) ۰٫۳۵٦ کیلوگرم متان و ۰٫۵۲۷ کیلوگرم دی اکسید کربن تولید می‌شود. این مدل برای لندفیل‌های مختلف از طریق نتایج تجربی و تحلیلی ارزیابی شده است. زباله‌های جامد شهری در امریکا شامل ٦۹٫۵ درصد بیوماس یا ٦۰ درصد بیوماس خشک و بقیه شامل رطوبت و مواد غیرآلی است. یعنی به ازای هر تن زبالهٔ جامد شهری ٤۱۷ کیلوگرم (معادل ۲٫۸٦ کیلومول) $C_6H_{10}O_4$ وجود دارد. طبق رابطهٔ ۷ به ازای هر ۱۰۰۰ کیلوگرم زبالهٔ جامد شهری میزان متان تولیدشده ۲۰۸ Nm^3 یا ۱٤۹کیلوگرم (۱ کیلومول متان برابر ۲۲٫٤ Nm^3) و دی اکسید کربن تولیدشده ۳٤۵ کیلوگرم است (USEPA, 2006). مقادیر تجربی میزان متان تولیدشده را ۱۵۳ کیلوگرم و دی اکسید کربن را ۳۵۰ کیلوگرم نشان می‌دهد (Barlaz, at al. 2002).

همچنین Themelis در سال ۲۰۰٤ میزان گاز لندفیل را به ازای هر تن زبالهٔ جامد شهری با فرض ٦۰ درصد بیوماس ۱۰۰–۲۰۰ Nm^3 (متان ۵٤–۱۰۸Nm^3) تخمین زد و با استفاده از رابطهٔ ۷ میزان گاز لندفیل را ۷۳–۱۳۵ Nm^3 و متان تولیدشده را ۲٦–۸۸Nm^3 به دست آورد (Themelis and Ulloa, 2004).

با محاسبهٔ انتگرال زیرسطح در شکل ۲، ۳ و ٤ میزان حجم گاز لندفیل، جرم متان و دی اکسید کربن تولیدشده در لندفیل آرادکوه به ازای هر ۱۰۰۰ کیلوگرم (هر تن) زبالهٔ جامد شهری به ترتیب ۳۱۸ متر مکعب، ۱۱۰ و ۲۷۰ کیلوگرم پیش‌بینی می‌شود.

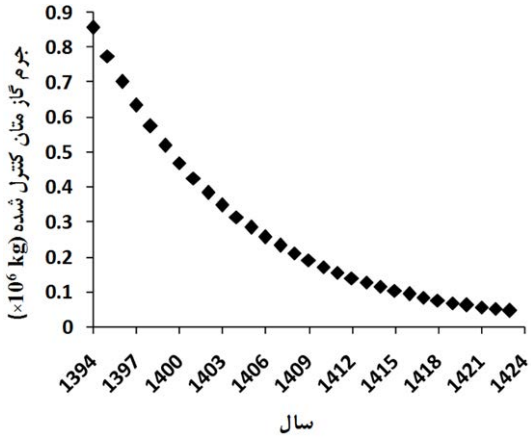
هر ۱۰۰۰ کیلوگرم زبالهٔ جامد شهری تهران شامل ۳٤۵٫۵ کیلوگرم مواد آلی و بیوماس خشک قابل تبدیل است (سعادتی، ۱۳۷۲). این مقدار مواد قابل تبدیل با استفاده از

رابطهٔ ۷ مقدار ۱۱۷ کیلوگرم متان، ۲۸٦ کیلوگرم دی کسید کربن و ۳۳۷٫۵ متر مکعب گاز لندفیل تولید می‌کند.

با توجه به مقادیر حاصل، خطای مدل پیشنهادی و روش موازنهٔ جرم برای گاز متان، دی اکسید کربن و گاز لندفیل به ترتیب ۵٫۹، ۵٫۵ و ۵٫۷ درصد است. در حالی که محدودهٔ خطا در این روش با روش اندازه‌گیری یا روش‌های تحلیلی دیگر تا ۱۵ درصد نیز گزارش شده است (Verma,Themelis. 2004).

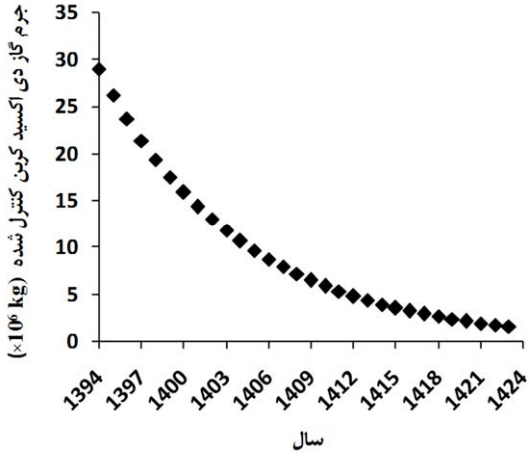
پس از اعتبارسنجی مدل، میزان تولید آلاینده‌های متان، دی اکسید کربن و دی اکسید گوگرد در تکنولوژی‌های استحصال انرژی گاز لندفیل یعنی موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های گاز و توربین‌های بخار، طی ۳۰ سال آینده به ترتیب با استفاده از روابط ٤ تا ٦ که توسط روابط ۱ تا ۳ و نوع تکنولوژی‌های مشخص، به دست آمده‌اند، محاسبه و به ترتیب در شکل‌های ٦ تا ۸ نشان داده شده‌اند. در محاسبهٔ میزان آلاینده‌ها، احتراق متان به صورت استوکیومتری در نظر گرفته شده است.

مطابق شکل ٦ پیش‌بینی می‌شود که بیشترین انتشار گاز متان کنترل‌شده تقریباً ۰٫۸۵ میلیون کیلوگرم در سال ۱۳۹٤ و کمترین مقدار پس از ۳۰ سال تقریباً به ۰٫۳ میلیون کیلوگرم برسد.



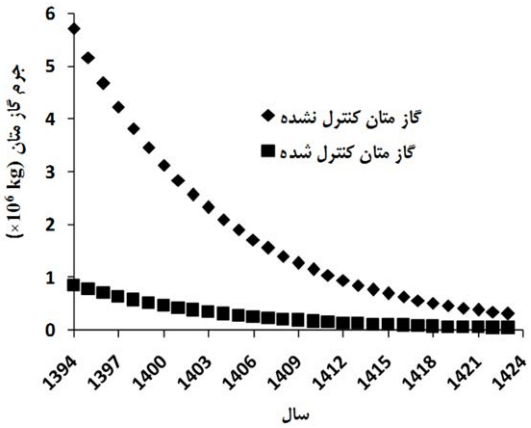
شکل ۶. میزان تولید گاز متان کنترل‌شده در لندفیل آرادکوه

با در نظر گرفتن احتراق استوکیومتری، ۱ ملکول گاز متان پس از احتراق در تکنولوژی‌های استحصال انرژی به ۱ ملکول دی اکسید کربن و ۲ ملکول آب تبدیل می‌شود. در نتیجه مطابق شکل ۷ میزان انتشار گاز دی اکسید کربن در حالت کنترل‌نشده بیشتر است. طبق محاسبات صورت‌گرفته بیشترین انتشار گاز دی اکسید کربن به محیط تقریباً ۳۰ میلیون کیلوگرم در سال ۱۳۹٤ و کمترین مقدار تقریباً ۱٫۵ میلیون کیلوگرم پس از ۳۰ سال خواهد بود.



شکل ۷. میزان تولید گاز دی اکسید کربن کنترل‌شده در لندفیل آرادکوه

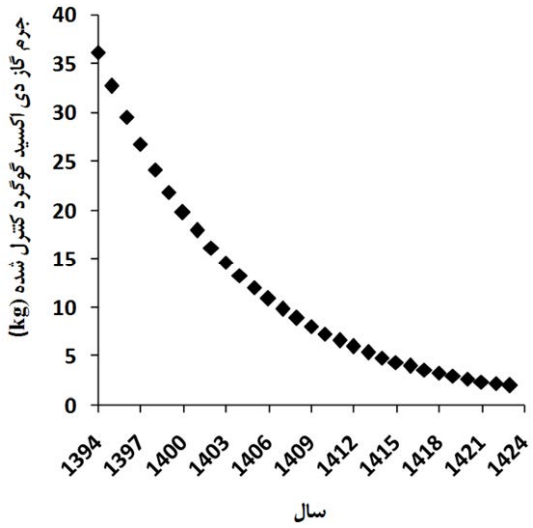
طبق شکل ۸ میزان متان کنترل‌شده در هر سال تقریباً ٦ برابر زمانی است که از تکنولوژی‌های کنترل‌کننده استفاده شده است.



شکل ۸. مقایسهٔ میزان گاز متان در دو وضعیت کنترل‌شده و کنترل‌نشده در لندفیل

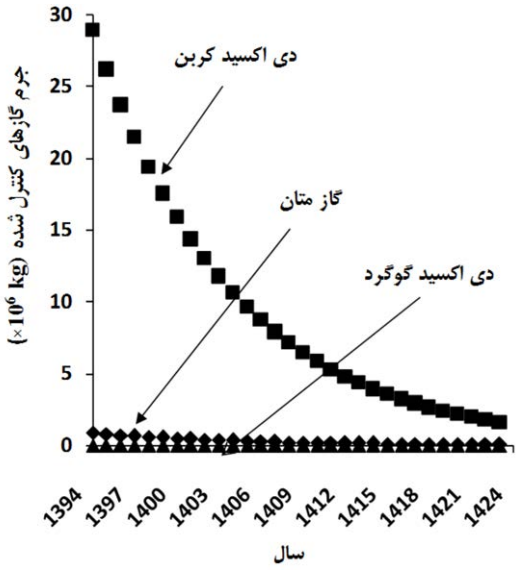
علاوه بر تولید دو گاز متان و دی اکسید کربن در تکنولوژی‌های استحصال انرژی، گاز دی اکسید گوگرد نیز تولید می‌شود. مطابق شکل ۹ بیشترین میزان انتشار گاز دی اکسید گوگرد تقریباً ۳٦ کیلوگرم در سال ۱۳۹٤ و کمترین مقدار پس از گذشت ۳۰ سال تقریباً ۲ کیلوگرم خواهد بود. این مقادیر در مقایسه با گازهای تولیدی دیگر بسیار اندک است، اما سمی‌بودن و تولید باران‌های اسیدی از طریق این

گاز از نظر آثار زیست‌محیطی بسیار مهم خواهد بود. کل گاز دی اکسید گوگرد منتشرشده در ۳۰ سال ۳۶۱ متر مکعب خواهد بود.



شکل ۹. میزان تولید گاز دی اکسید گوگرد کنترل‌شده در لندفیل آرادکوه

شکل ۱۰ مقایسهٔ گازهای تولیدی کنترل‌شده را طی ۳۰ سال آینده در لندفیل آرادکوه نشان می‌دهد. استفاده از تکنولوژی‌های استحصال انرژی به انتشار زیاد گاز دی اکسید کربن و کاهش انتشار گاز متان در مقایسه با حالت کنترل‌نشده منجر می‌شود. این موضوع با توجه به اینکه اثر گاز متان در گرمایش جهانی تقریباً ۲۵ برابر گاز دی اکسید کربن است، حائز اهمیت است.



شکل ۱۰. مقایسهٔ آلاینده‌های گازی کنترل‌شده در لندفیل آرادکوه

جدول ۱ حجم کل گازهای تولیدشده در لندفیل آرادکوه را پس از ۳۰ سال نشان می‌دهد. مطابق مقادیر محاسبه‌شده جرم گاز متان منتشرشده هنگام استفاده از تکنولوژی‌های مهار گاز تقریباً ۰٫۱۵ زمانی است که گاز کنترل نمی‌شود. این در حالی است که جرم انتشار گاز دی اکسید کربن کنترل‌شده در این ۳۰ سال تقریباً ۱٫۸۵ برابر زمانی است که گاز کنترل نشده است.

جدول ۱. مقایسهٔ حجم کل گازهای منتشرشده از لندفیل در ۳۰ سال

	CH_4 ($\times 10^6$kg)	CO_2 ($\times 10^6$kg)	SO_2 (kg)
کنترل‌نشده	۵۷	۱۵۶	–
کنترل‌شده	۸/۵	۲۸۹	۳۶۱

(منبع: محاسبات تحقیق)

٦. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج ارائه‌شده می‌توان موارد زیر را از این پژوهش نتیجه گرفت:

بیشترین گاز متان و دی اکسید کربن تولیدشده در لندفیل آرادکوه به ترتیب ٦ و ١٦ میلیون کیلوگرم در سال ١٣٩٤ و کمترین مقدار به ترتیب ۰٫۳ و ۰٫۸ میلیون کیلوگرم در ١٤٢٣ پیش‌بینی می‌شود.

حجم کل گازهای تولیدشده در این لندفیل طی ۳۰ سال ۲۱۳ میلیون متر مکعب است که ۲۷ درصد جرم آن را متان و ۷۳ درصد آن را گاز دی اکسید کربن تشکیل می‌دهد.

هنگام استفاده از تکنولوژی‌های کنترل‌کنندهٔ گاز لندفیل بیشترین جرم گاز متان و دی اکسید کربن به ترتیب ۰٫۸۵ و ۳۰ میلیون کیلوگرم در سال ١٣٩٤ و کمترین مقدار به ترتیب ۰٫۳ و ۱٫۵ میلیون کیلوگرم در ١٤٢٣ خواهد بود. جرم گاز متان و دی اکسید کربن منتشرشده به ترتیب ۸٫۵ و ۲۸۹ میلیون کیلوگرم خواهد بود.

میزان انتشار گاز دی اکسید کربن کنترل‌شده ۱٫۸۵ برابر

حالت کنترل نشده است. این افزایش در نتیجهٔ تبدیل گاز متان به دی اکسید کربن در تکنولوژی‌های مهار گاز لندفیل است.

میزان انتشار گاز متان در حالت کنترل‌شده ۰٫۱۵ حالت کنترل‌نشده است. با توجه به اینکه اثر گرمایش هر ملکول گاز متان تقریباً ۲۵ درصد اثر گاز دی اکسید کربن است، می‌توان نتیجه گرفت که تکنولوژی‌های مهار گاز لندفیل علاوه بر تولید انرژی الکتریسته و گرما نقش بسزایی در کاهش گاز گلخانه‌ای دارند.

همچنین استفاده از تکنولوژی‌های استحصال انرژی سبب تولید گاز دی اکسید گوگرد می‌شود. مقدار انتشار این گاز طی ۳۰ سال ۳۶۱ کیلوگرم پیش‌بینی می‌شود.

یادداشت

1- Municipal Solid Waste (MSW)
2- Methane
3- Carbon dioxide (CO_2)
4-Landfill
5-Environmental Protection Agency (EPA)
6-Volatile organic component (VOC)
7-Air flux chamber
8-Fourier Transform Infra-Red (FTIR)
9-Gas chromatography (GC) chamber method
10-Long-range Energy Alternative Planning system
11-Sulfur dioxide (SO_2)
12-Situ aeration
13- Peninsular
14- First order decay
15-Geotextile Clay Liner (GCL)
16-Geomembrane
17- Geotextile

منابع

سعادتی، م. ۱۳۷۲. مروری بر آنالیز زبالهٔ خانگی شهر تهران: سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری تهران، تهران.

Allen, M.R., A., Braithwaite, C.C., Hills.1997. Trace organic compounds in landfill gas at seven U.K. waste disposal sites. Environmental science and technology, Vol. 31, PP:1054–1061.

Anwar, J., et al. 2012. Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia. Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 16, PP: 2907– 2912.

Barlaz, M.A., et al. 2002. A critical evaluation of factors required to terminate the post-closure monitoring period at solid waste landfills. Environment science & technology, Vol.36, PP:3457–64.

Benfenati E., et al. 1999. Comparative studies of the leachates of an industrial landfill by gas chromatography–mass spectrometry, liquid chromatography–nuclear magnetic resonance and liquid chromatography–mass spectrometry, Journal of Cromatography, Vol. 831, PP: 243–56.

Dudek, J., et al .2012. Landfill gas energy technology, User's Handbook.

EPA, 1996.Turning a liability into an asset landfill methane outreach program: U.S. Environmental Protection Agency, Government Printing Office: Washington, DC.

EPA, 1997. Energy project landfill gas utilization software (E-PLUS) User's Handbook, Landfill methane outreach program, U.S. Environmental protection agency, Government printing office: Washington, DC.

EPA, 1998. 42 Emission factors: Municipal solid waste landfills, Technology transfer network, Clearinghouse for inventories and emission factors; U.S. environmental protection agency.

Ham, R.K., M. R., Norman, P.R., Fritschel. 1993. Chemical characterization of fresh kills landfill refuse and extracts, Journal of environmental engineering-ASCE, Vol. 119, PP:1176–1195.

He, C., et al. 1997. A catalytic/sorption hybrid process for landfill gas cleanup. Industrial and engineering chemistry research, Vol. 36, PP: 4100–4107.

He, C., et al.1997. A catalytic/sorption hybrid process for landfill gas cleanup. Industrial and engineering Chemistry research, Vol. 36, PP: 4100–4107.

Hegde, U., T.C., Chang, Sh., Yang. 2003. Methane and carbon dioxide emissions from Shan-Chu-Ku landfill site in northern Taiwan. Chemosphere, Vol. 52, PP: 1275–1285.

Jaramillo, P., H.S.,Matthews, 2005. Landfill-Gas-to-Energy Projects: Analysis of Net Private and Social Benefits: Environ. Sci. Technol., Vol. 39, No. 19, PP: 7365–7373.

Kim, K.H, M. Y., Kim. 2002. Mercury emissions as landfill gas from a large-scale abandoned landfill site in Seoul. Atmospheric environment, Vol. 36, PP: 4919–4928.

Kornbluth, K., et al. 2012. Economic feasibility of hydrogen enrichment for reducing NOx emissions from landfill gas power generation alternatives: A comparison of the levelized cost of electricity with present strategies. Energy Policy, Vol. 41, PP: 333 –339.

Lee, S.M., J. W., Park, S.B., Lee. 1996. Surface efflux gas on Nan-Ji Do landfill. Journal of Korea solid wastes engineering society, Vol. 13, PP: 400–406.

Lelieveld, J., P.J., Crutzen, F.J., Dentener. 1998. Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. Tellus B, Vol. 50, PP:128–150.

Mackie K.R., C.D., Cooper. 2009. Landfill gas emission prediction using Voronoidiagrams and importance sampling. Environmental modeling & software, Vol. 24, PP:1223–1232.

Mukherjee, R., U., Sarkar. 2008. Development of a micrometeorological model forthe estimation of methane flux from paddy fields. Validation with standard direct measurements. Environmental modeling and software, Vol. 23, PP:1229–1239.

Park J.W, H. C. Shin. 2001. Surface emission of landfill gas from solid waste landfill. Atmospheric environment, Vol. 35, PP: 3445–3451.

Ritzkowski, M., R., Stegmann. 2007. Controlling greenhouse gas emissions through landfill insitu aeration. International journal of greenhouse gas control, Vol. 1, PP: 281–288.

Shin, et al. 2005. Environmental and economic assessment of landfill gas electricity generation in Korea using LEAP model. Energy policy, Vol. 33, PP: 1261–1270.

Suocheng, D., W.T., Kurt, Y., Wu. 2001. Municipal solid waste management in China: using commercial management to solve a growing problem, Utilities policy, Vol.10, PP: 7–11.

Themelis, N.J., P.A., Ulloa. 2004. Methane generation in landfills. Renewable energy, Vol.32, PP: 1243–257.

USEPA, US Environmental Agency. 2006. Global anthropogenic non-CO2 greenhouse gas emissions. PP:1990–2020. Washington, DC: USEPA, Editor.

Verma, S., N.J., Themelis. 2004. Anaerobic digestion of organic waste in MSW. Waste management world, Jan. –Feb, 20–4.