Archive of SID
محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران، دوره۷۳، شماره۴، زمستان ۱۳۹۹
صفحات ۶۴۹ تا ۶۶۳

محاسبه توان، انرژی و حرارت تولیدی و مصرفی در فناوری‌های مختلف تیمار پسماند جامد شهری با احتساب بازیافت- مطالعه موردی: شهر تهران

سید امیر حسینی لرگانی[۱]؛ شاهین رفیعی[۲*] و سید سعید محتسبی[۲]

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم (گرایش انرژی های تجدید پذیر) دانشگاه تهران

۲- استاد گروه ماشین های کشاورزی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت۹۹/۰۵/۲۹-تاریخ پذیرش۹۹/۰۸/۲۶)

چکیده:

با افزایش جمعیت، توسعه اقتصادی و شهر نشینی، تولید پسماند به خصوص در کشورهای درحال توسعه، رشد سریعی داشته است. با توجه به افزایش نرخ تولید پسماند، روزانه هزینه‌های بالایی از پسماند شامل جمع‌آوری، جابجایی، دفع، سوزاندن در کنار هزینه‌های سنگین دیگر مانند احداث، تعمیر و نگهداری یک فناوری تیمار پسماند بر دولت و مدیران شهری تحمیل می‌شود. در این راستا اطلاع از انرژی و حرارت تولیدی و مصرفی در فناوری‌های مختلف تیمار به دور از روش‌های هزینه بر و طولانی آزمایشگاهی می‌تواند به مدیران شهری در تصمیم‌گیری صحیح کمک کند تا بتوانند فناوری‌های مختلف تیمار پسماند را با تمام ابعادشان در کوتاه ترین زمان ممکن و به‌صورت پایدار بررسی و انتخاب کنند. در این پژوهش، توان، انرژی، حرارت تولیدی و مصرفی کل پسماند (برای فناوری های گازی‌سازی، سوزاندن و هضم بی هوازی) با احتساب بازیافت محاسبه می‌شود. توان و انرژی تولیدی کل پسماند شهر تهران به ترتیب برای فرایندهای سوزاندن، ۳۵/۱۰۲ مگاوات و ۸۸/۱۳۱۲ کیلووات ساعت بر تن، برای فرایند هضم بی هوازی، ۶۹/۶۶ مگاوات و ۸۳/۲۹۰ کیلووات ساعت بر تن و برای فرایند گازی‌سازی ۵۸/۱۳۰ مگاوات و ۴۴/۱۷۱۷ کیلووات ساعت بر تن است. همچنین در تمام مراحل، پتانسیل مقدار مواد بازیافتی برای هر یک اجزا قابل بازیافت پسماند محاسبه شده است. درنهایت می‌توان نتیجه گرفت که انرژی تولید شده یک تن پسماند در هر روز در فرایندهای سوزاندن، هضم بی هوازی و گازی‌سازی به ترتیب معادل انرژی ۱۴ ماه و ۱۲ روز، ۳ ماه و ۱۸ روز و ۱۹ ماه و شش روز است که برای روشنایی منزل استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که عدم قطعیت پارامترهای استفاده شده بر روی نتایج مدل‌سازی نیز بررسی شده است.

کلید واژگان: مدیریت انرژی، توسعه پایدار، هزینه، تیمار پسماند

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۲۳۶۶۲۶۳۱ ایمیل: shahinrafiee@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

طبق گزارش ارائه شده از سوی سازمان پسماند و ضایعات شهری استان تهران، ایرانی‌ها هر روز حدود ۴۰ هزار تن زباله تولید کرده که از این میان بیش از هفت هزار تن آن متعلق به تهران است. نگاهی به ارزش دلاری ضایعات دفن شده نشان می‌دهد که فقط در شهر تهران سالانه ۵۵ میلیون دلار پسماند غذایی آشپزخانه، ۳۵ میلیون دلار کاغذ و مقوا و ۵۰ میلیون دلار نان در مرکز دفن واقع در غرب تهران زیر خروارها خاک می‌رود (khoshnevisan, 2018). دفع روزانه این حجم از زباله، بار زیادی را بر دوش مدیران شهری نهاده است و نحوه صحیح مدیریت برای دفع این مواد یک شرط لازم برای ادامه کار است. در این راستا باید یک یا دو فناوری یا ترکیبی از چند فناوری مناسب برای مدیریت پسماند انتخاب شود. باید توجه داشت که احداث فناوری مناسب برای مدیریت پسماند نیز هزینه بر بوده و انتخاب فناوری مناسب قبل از احداث می‌تواند کمک زیادی به صرفه جویی دارد و دستیابی به بهترین بهره‌وری از این منبع عظیم انرژی را به دنبال خواهد داشت. در راستای پژوهش‌های انجام شده می‌توان به Chen و همکاران (۲۰۰۵) اشاره کرد. آن‌ها به بررسی هزینه‌های کاهش انتشار کربن در چین و آینده توسعه انرژی تا سال ۲۰۵۰ پرداختند و برای این کار از مدل MARKAL-MARCO که یک مدل یکپارچه اقتصادی-اجتماعی-زیست محیطی است، استفاده کردند. Dong و همکاران (۲۰۱۸) میزان ذخیره انرژی و پتانسیل کاهش کربن از پسماندهای بازیافتی در شانگهای چین را کشف کردند. Garibay-Rodriguez و همکاران (۲۰۱۸) مدیریت و بازیابی بهینه انرژی با استفاده از رویکرد برنامه نویسی ریاضی برای پسماند جامد شهری را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. Dehghanifard و همکاران (۲۰۱۸) به ارزیابی و تجزیه و تحلیل پسماند جامد شهری در شهر تهران پرداختند. Rajaeifar و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی پتانسیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تولید برق از طریق فناوری‌های مختلف مدیریت پسماند جامد شهری پرداختند. Ma و همکاران (۲۰۱۶) وضعیت دفع زباله جامد شهری و فناوری انرژی را بررسی کردند. Panahandeh و همکاران (۲۰۱۷) در سال ۱۳۹۶ به بررسی فنی و اقتصادی استفاده ازدورریز پسماندهای شهر تهران به عنوان سوخت کوره‌های سیمان پرداختند. در هیچکدام از پژوهش های انجام شده، پتاسیل تولید توان، انرژی و حرارت تولیدی و مصرفی برای فناوری‌های مختلف تیمار پسماند شهر تهران در کنار پتانسیل بازیافت بررسی و محاسبه نشده است. در راستای مدیریت انرژی ناشی از دفع پسماند به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر و همچنین ارائه یک چارچوب جامع برای رسیدن به توسعه پایدار، نیاز به محاسبه انرژی و حرارت تولیدی به ازای یک مقدار مشخص پسماند (مثلا یک تن پسماند) وجود دارد.

در این پژوهش برای فناوری‌های مختلف تیمار پسماند، شامل گازی‌سازی، هضم بی هوازی و سوزاندن اقدام به محاسبه توان، انرژی و حرارت تولیدی شده است تا بتوان از این محاسبات در شبیه سازی، مدل‌سازی، بهینه‌سازی، امکان سنجی و غیره استفاده کرد. همچنین با توجه به اهمیت بازیافت، در تمام مراحل، پتانسیل مقدار ماده بازیافتی نیز محاسبه شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. ضرایب تبدیل فیزیکی و شیمیایی پسماند جامد شهر تهران

در جدول ۱ میانگین تجزیه و تحلیل فیزیکی پسماند در شهر تهران آمده است. این ضرایب مربوط به اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۶ است(Tehran Municipality Waste Management Organization. 2018). در این پژوهش، شش جزء پسماند (مواد آلی، کاغذ، پلاستیک، شیشه، فلزات و چوب) در نظر گرفته شده است و سایر اجزاء پسماند حذف گردیده است.

جدول۱- ضریب تبدیل فیزیکی اجزاء پسماند

اجزاء	مواد آلی	کاغذ	پلاستیک	شیشه	فلزات	چوب	مجموع ضرایب
ضریب تبدیل فیزیکی	۶۲/۳۳	۴	۲/۴۴	۰/۸۲	۱/۸	۰/۴	۷۱/۷۵

با استفاده از رابطه ۱ می‌توان وزن خشک هر یک از اجزاء پسماند را محاسبه کرد.

رابطه (۱) $$M = \frac{(W-d)}{W} \times 100$$

که در آن M، درصد رطوبت تر (٪)؛ W، وزن اولیه (kg) و d، وزن نمونه خشک شده در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس (kg) است. در جدول ۲، درصد رطوبت و میزان عناصر شیمیایی اجزاء پسماند آمده است. در ادامه برای محاسبات از این جدول استفاده می‌شود (Vadenbo *et al*., 2014).

جدول۲- درصد رطوبت و میزان عناصر شیمیایی هر یک از اجزاء پسماند

اجزا	درصد رطوبت	C	H	O	N	S	سایر عناصر
مواد آلی	۷۰	۰/۱۶	۰/۰۲۳۷	۰/۰۷۰۵	۰/۰۰۷۴۷	۰/۰۰۱۴۵	۰/۷۳۶۸
کاغذ	۸	۰/۳۸۵	۰/۰۵۲۸	۰/۳۶۸	۰/۰۰۱۶۵	۰/۰۰۱۰۲	۰/۲۱۸۵
پلاستیک	۲	۰/۶۷۲	۰/۰۶۰۶	۰/۰۸۲۶	۰/۰۱۶۶	۰/۰۰۳۳	۰/۱۶۴۹
شیشه	۲	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۰۳	۰	۰/۹۹۰۲
فلزات	۲	۰/۰۴۵	۰/۰۰۶	۰/۰۴۳	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۰/۹۰۵۴
چوب	۱۵	۰/۴	۰/۰۴۸	۰/۳۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۲۳۹

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۲. ارزش حرارتی

یکی از رایج ترین روابط ریاضی برای محاسبه ارزش حرارتی، فرمول اصلاح شده دولانگ[1] و به صورت رابطه ۲ است(Panahandeh *et al*., 2017). رابطه (۲)

$$HHV\left(\frac{kJ}{kg}\right) = 337C + 1419\left(H_2 - \frac{O_2}{8}\right) + 93S + 23N$$

که در آن C، H، O، S و N به ترتیب درصد وزن (خشک) کربن، هیدروژن، اکسیژن، گوگرد و نیتروژن است. در این پژوهش از رابطه ۲ برای فرایندهای سوزاندن و گازی‌سازی برای محاسبه بیشترین ارزش حرارتی استفاده می‌شود. توجه شود که میزان ۵۰ درصد از ارزش حرارتی در فرایند زباله‌سوزی (μ_i) به حرارت تبدیل می‌شود که از این میزان ۴۲/۵ درصد ($\mu_{i,n}$) میزان حرارت تولیدی خالص است و مابقی به مصرف خود فرایند می‌رسد. همچنین میزان ۳۰ درصد از ارزش حرارتی (μ_g) در فرایند گازی‌سازی زباله به حرارت تبدیل می‌شود که از این میزان ۲۴ درصد ($\mu_{g,n}$) میزان حرارت تولیدی خالص است و به مصرف خود فرایند می‌رسد (Murphy *et al*., 2004). برای محاسبه حرارت در فرایند هضم بی هوازی از رابطه ۴ استفاده می‌شود (Khairuddin *et al*., 2015). رابطه (۴)

$$H_{AD} = f_{vs} \times b \times g \times 150 \times C_{CH4} \times Q_{CH4}$$

که در آن H_{AD}، پتانسیل بازیابی برق (MJ/ton)؛ fvs، نسبت جامد فرار به کل جامد؛ b، جامدهای فرار زیست تخریب پذیر؛ g، بازده بیوگاز؛ ۱۵۰، نرخ ثابت محصولات بیوگاز (m3/ton)؛ C_{CH4}، غلظت متان در بیوگاز (m3/m3) و Q_{CH4}، ارزش حرارتی (MJ/m3) است. مقادیر پیشنهاد شده در جدول ۳ ارائه شده است.

میزان ۹۰ درصد از حرارت تولیدی حاصل از فرایند هضم بی هوازی پسماند ($\mu_{ad,n}$)، به صورت خالص قابل استفاده است و ۱۰ درصد باقی‌مانده ($\mu_{ad} - \mu_{ad,n}$)به مصرف خود فرایند می‌رسد (Murphy *et al*., 2004).

جدول۳- مقادیر پیشنهادی برای محاسبه حرارت در فرایند هضم بی‌هوازی

Q_{CH4}	C_{CH4}	G	B	f_{vs}
۳۵ MJ/m^3	۰/۶	۰/۵۵	۰/۸۳	۰/۸۴

۲-۳.پتانسیل بازیابی انرژی حاصل از فرایند سوزاندن

با استفاده از رابطه ۵ می‌توان پتانسیل فنی تولید برق را محاسبه کرد (Rajaeifar *et al*., 2017). رابطه (۵)

$$P_{dry\text{-}inc}=R_{HHV}\times 1.157\times 10^{-5}\times n$$

که در آن $P_{dry\text{-}inc}$، پتانسیل فنی تولید برق حاصل از فرایند سوزاندن (MW)؛ R_{HHV}، نرخ تولید زباله خشک با بیشترین ارزش حرارتی (ton/day)؛ HHV، ارزش حرارتی زباله (kJ/kg)؛ ۱/۱۵۷ × ۱۰$^{-۵}$، ضریب ثابت و η بازده عملی است. انرژی را نیز می‌توان با استفاده از رابطه ۶ محاسبه کرد. رابطه (۶)

$$U = P \times t$$

1- Dulong

www.SID.ir

Archive of SID

که در آن U، انرژی (MJ)؛ P، توان (MW) و t، زمان (s) است. برای تبدیل انرژی از واحد مگاژول بر تن به کیلووات-ساعت بر تن کافی است از ضریب تبدیل ۳/۶ استفاده شود.

۲-۴.پتانسیل بازیابی انرژی حاصل از فرایند گازی-سازی

در فرایند گازی‌سازی، مواد آلی، کاغذ، پلاستیک و چوب شرکت می‌کنند. لذا محاسبات برمبنای این چهار جزء انجام می‌شود. با استفاده از رابطه ۷ می‌توان پتانسیل فنی تولید برق را محاسبه کرد (Rajaeifar *et al*., 2017).

رابطه (۷)

$$P_{dry-g} = R_{HHV} \times HHV \times 1.157 \times 10^{-5} \times \eta$$

که در آن P_{dry-g}، پتانسیل فنی تولید برق حاصل از فرایند گازی‌سازی (MW)؛ R_{HHV}، نرخ تولید زباله خشک با بیشترین ارزش حرارتی (ton/day)؛ HHV، ارزش حرارتی زباله (kJ/kg)؛ ۰/۰۰۰۰۱۱۵۷، ضریب ثابت و η بازده عملی است. انرژی را نیز می‌توان با استفاده از رابطه ۶ محاسبه کرد.

۲-۵.پتانسیل بازیابی انرژی حاصل از فرایند هضم بی هوازی

اجزائی از پسماند که در فرایند هضم بی هوازی شرکت می‌کنند، شامل مواد آلی، کاغذ و چوب هستند. با استفاده از رابطه ۸ می‌توان پتانسیل فنی تولید برق را محاسبه کرد (Rajaeifar *et al*., 2017). رابطه (۸)

$$P_{AD} = R_{bio} \times 150 \times 0.6 \times 38000 \times 1.157 \times 10^{-8} \times \eta$$

که در آن P_{AD}، پتانسیل فنی تولید برق حاصل از فرایند گازی‌سازی (MW)؛ R_{bio}، نرخ تولید پسماند (ton/day)؛ ۱۵۰، نرخ ثابت محصولات بیوگاز (m3/ton)؛ ۰/۶، میانگین تغلیظ متان در بیوگاز تولیدشده؛ ۳۸۰۰۰، بالاترین ارزش حرارتی متان (kJ/m3)؛ ۱/۱۵۷ × ۱۰$^{-8}$، ضریب ثابت و η، بازده عملی است. انرژی را نیز می‌توان با استفاده از رابطه ۶ محاسبه کرد. در نهایت جدول ۴، تخصیص پسماند به هر یک از فناوری‌های به کار گرفته در این پژوهش را نشان می‌دهد (Rezwan *et al*., 2018).

جدول۴- اختصاص هر یک از اجزاء پسماند برای فناوری‌های مختلف تیمار در نظر گرفته شده در این پژوهش

	بازیافت	هضم بی هوازی	گازی‌سازی	سوزاندن
مواد آلی		❊	❊	❊
کاغذ	❊	❊	❊	❊
پلاستیک	❊		❊	❊
شیشه	❊			❊
فلزات	❊			❊
چوب		❊	❊	❊

www.SID.ir

Archive of SID

۳. نتایج

۳-۱.محاسبه ارزش حرارتی و محتوای انرژی پسماند جامد شهری با روش سوزاندن و با احتساب بازیافت

در جدول۴، درصد پتانسیل قابل بازیافت برای اجزاء پسماند جامد شهری و وزن اجزاء بازیافت شده آمده است.

در این محاسبه، اجزاء اولیه پسماند (نه اجزاء خشک) برای بازیافت در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه، وزن کاغذ بازیافت شده با استفاده از رابطه زیر، محاسبه شده است. برای سایر اجزاء پسماند نیز می‌توان محاسبات مشابه انجام داد.

درصد پتانسیل قابل بازیافت کاغذ × وزن اولیه کاغذ = وزن کاغذ بازیافت شده

$$= 299.56 \times \frac{60}{100} = 178.39\ (tons)$$

جدول۴- پتانسیل قابل بازیافت و وزن اجزاء بازیافت شده پسماند شهر تهران

اجزاء	مواد آلی	کاغذ	پلاستیک	شیشه	فلزات	چوب
درصد پتانسیل قابل بازیافت	۰	۶۰	۶۵	۹۰	۷۴	۰
وزن اجزاء بازیافت شده (تن)	۰	۱۷۸/۳۹	۱۱۸/۷۸	۵۵/۲۷	۱۰۰/۳۱	۰

با استفاده از رابطه زیر و مقادیر جدول۴، درصد وزنی خشک اجزاء با احتساب بازیافت قابل محاسبه است. به عنوان نمونه، درصد وزنی خشک کاغذ با احتساب بازیافت محاسبه شد. برای سایر اجزاء نیز می‌توان محاسبات مشابه انجام داد. درصد و مقدار وزن خشک در جدول ۵ قابل مشاهده است.

درصد وزنی خشک کاغذ با احتساب بازیافت (درصد پتانسیل اجزاء قابل بازیافت× درصد وزنی خشک کاغذ) − درصد وزنی خشک کاغذ$= 3.65 - \left(3.65 \times \frac{60}{100}\right) = 1.46\%$

درصد وزن خشک کاغذ با احتساب بازیافت ×کل پسماند روزانه تهران = وزن خشک کاغذ با احتساب بازیافت$= 7489 \times 1.46 = 109.41\ (\text{ton})$

جدول۵- درصد وزن خشک و مقدار وزن خشک (با و بدون احتساب بازیافت)

اجزا	مواد آلی	کاغذ	پلاستیک	شیشه	فلزات	چوب	مجموع
درصد وزن خشک با احتساب بازیافت	۱۸/۷	۱/۴۶	۰/۸۳	۰/۰۸	۰/۴۹	۰/۳۲	۲۱/۸۶
وزن خشک (با احتساب بازیافت-تن)	۱۴۰۰/۳۷	۱۰۹/۴۱	۶۲/۶۸	۶/۰۲	۳۴/۵۴	۲۴/۱۹	۱۶۳۷/۲
وزن خشک (بدون بازیافت-تن)	۱۴۰۰/۳۷	۲۷۳/۵۳	۱۷۹/۰۸	۶۰/۱۸	۱۳۲/۸۴	۲۴/۱۹	۲۰۷۰/۱۸

۳-۱-۱.محاسبه عناصر شیم یایی پسماند بر حسب تن با توجه به درصد وزنی خشک اجزاء و با احتساب بازیافت به

عنوان نمونه، وزن کربن مواد آلی محاسبه و در جدول ۶ قابل مشاهده است. برای سایر عناصر شیمیایی و همچنین سایر اجزاء پسماند نیز می‌توان به همین صورت محاسبات را انجام داد (Panahandeh *et al*., 2017).

میزان ترکیب اولیه کربن در مواد آلی × وزن خشک مواد آلی = وزن کربن مواد آلی

$$\Longrightarrow \text{وزن کربن مواد آلی} = 1400.36 \times 0.16$$
$$= 224.06\ (tons)$$

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۶- وزن عناصر شیمیایی تشکیل دهنده پسماند و با احتساب بازیافت

اجزا	کربن (تن)	هیدروژن (تن)	اکسیژن (تن)	نیتروژن (تن)	گوگرد (تن)	مجموع (تن)
مواد آلی	۲۲۴/۰۶	۳۳/۱۹	۹۸/۷۳	۱۰/۴۶	۲/۰۳	۳۶۸/۴۶
کاغذ	۳۹/۱۷	۵/۷۸	۴۰/۲۶	۰/۱۸	۰/۱۱	۸۵/۵
پلاستیک	۴۲/۱۲	۳/۸	۵/۱۸	۱/۰۴	۰/۲	۵۲/۳۴
شیشه	۰/۰۳	۰	۰/۰۲	۰	۰	۰/۰۶
فلزات	۱/۵۵	۰/۲۱	۱/۴۸	۰/۰۲	۰	۳/۲۷
چوب	۹/۶۸	۱/۱۶	۷/۴۳	۰/۱۲	۰/۰۲	۱۸/۴۱
مجموع	۳۱۶/۶۱	۴۴/۱۴	۱۵۳/۱	۱۱/۸۲	۲/۳۸	۵۲۸/۰۴

۳-۲-۱.محاسبه درصد عناصر شیمیایی برای کل پسماند خشک شهر تهران و با احتساب بازیافت

به عنوان نمونه، درصد کربن کل پسماند خشک محاسبه و در جدول ۷ آمده است. برای سایر عناصر شیمیایی پسماند نیز می‌توان به همین صورت محاسبات را انجام داد (Panahandeh *et al*., 2017).

$$\text{درصد کربن اجزاء خشک} = \frac{\text{وزن کربن اجزاء خشک}}{\text{مجموع وزن عناصر شیمیایی در اجزاء خشک}} \times 100$$

$$\Longrightarrow \text{درصد کربن اجزاء خشک} = \frac{316.61}{528.04} \times 100$$

$$= 59.96\ \%$$

جدول۷- وزن کل عناصر شیمیایی پسماند و درصد هر جزء و با احتساب بازیافت

اجزاء	وزن کل (تن)	درصد هر جزء
کربن	۳۱۶/۶۱	۵۹/۹۶
هیدروژن	۴۴/۱۴	۸/۳۶
اکسیژن	۱۵۳/۱	۲۸/۹۹
نیتروژن	۱۱/۸۲	۲/۲۴
گوگرد	۲/۳۸	۰/۴۵
مجموع	۵۲۸/۰۴	۱۰۰

۳-۳-۱.محاسبه ارزش حرارتی کل پسماند جامد شهر تهران و با احتساب بازیافت

با توجه به رابطه زیر، ارزش حرارتی پسماند شهر تهران بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم محاسبه شد (Panahandeh *et al*., 2017).

$$HHV = 337C + 1419\left(H2 - \frac{O2}{8}\right) + 93S + 23N \Longrightarrow HHV$$

$$= (337 \times 59.96) + 1419$$

$$\times \left(8.36 - \frac{28.99}{8}\right) + (93 \times 0.45)$$

$$+ (23 \times 2.24) = 27017.42\ \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

www.SID.ir

Archive of SID

در پژوهشی توسط صادقی، ارزش حرارتی پسماند برای شهر شیراز ۴۹۱۱/۶۸ کیلوژول بر کیلوگرم محاسبه شده است (Sadeghi, 2018). این تفاوت ناشی از حجم پسماند تولیدی بیشتر در شهر تهران نسبت به شهر شیراز (تقریبا هفت برابر) است.

۴-۳-۱.محاسبه توان و انرژی تولیدی کل پسماند شهر تهران و با احتساب بازیافت

با توجه به روابط زیر، توان و انرژی تولیدی محاسبه می-شود. در این فرمول وزن خشک کل پسماند بر حسب تن و بازده زباله‌سوزی، ٪۲۰ لحاظ شده است. همچنین فرض شده است که این فرایند ۲۱ ساعت در روز (در سه نوبت) کار می‌کند.

$$P_{dry-inc} = R_{HHV} \times HHV \times 1.15 \times 10^{-5} \times \eta = 1637.2 \times 27017.42 \times 1.15 \times 10^{-5} \times \frac{20}{100} = 102.35\ (MW)$$

$$U = P \times t = \frac{102.35 \times 21 \times 3600}{1637.2} = 4726.38 \left(\frac{MJ}{tons}\right) \text{ یا } 1312.88 \left(\frac{kWh}{tons}\right)$$

در پژوهشی توسط رجایی فر و همکاران، توان زباله‌سوزی ۴۷/۹ مگاوات محاسبه شده، که ۵۴/۴۵ مگاوات از محاسبات فعلی کمتر است و ناشی از تفاوت در میزان حجم پسماند در نظر گرفته شده و تفاوت در تفکیک فیزیکی هر یک از اجزاء پسماند می‌باشد(Rajaeifar *et al.*, 2017). همچنین در پژوهش صادقی، انرژی تولیدی برای شهر شیراز ۶۹۱/۰۸ کیلوات ساعت بر تن بوده است (Sadeghi, 2018). این تفاوت ناشی از حجم پسماند تولیدی بیشتر در شهر تهران نسبت به شهر شیراز و تفاوت در اجزاء تشکیل دهنده پسماند ناشی از عواملی نظیر عادات غذایی، سبک زندگی و غیره است.

۵-۳-۱.محاسبه حرارت تولیدی و مصرفی کل و با احتساب بازیافت

$$H\left(\text{تولیدی} - \text{سوزاندن}\right) = 27017.42 \times \mu_{i,n} = 11482.4\left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$H\left(\text{مصرفی} - \text{سوزاندن}\right) = 27017.42 \times (\mu_i - \mu_{i,n}) = 2026.31\ \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

در پژوهش صادقی، حرارت خالص تولیدی برای شهر شیراز ۲۸۶۷/۶۷ کیلوژول بر کیلوگرم در فرایند زباله-سوزی بوده است (Sadeghi, 2018). درحالیکه حرارت خالص تولیدی برای شهر تهران در این فرایند ۹۵۴۶/۰۹ کیلوژول بر کیلوگرم است. این تفاوت ناشی از حجم پسماند تولیدی بیشتر در شهر تهران نسبت به شهر شیراز است.

۲-۳.محاسبه ارزش حرارتی و محتوای انرژی پسماند جامد شهری با روش گازی‌سازی و با احتساب بازیافت

در جدول ۸، درصد پتانسیل قابل بازیافت برای اجزاء پسماند جامد شهری و وزن اجزاء بازیافت شده آمده است. با استفاده از فرمول زیر، درصد وزنی خشک اجزاء با احتساب بازیافت قابل محاسبه است. به عنوان نمونه، درصد وزنی خشک کاغذ با احتساب بازیافت محاسبه شد. برای سایر اجزاء نیز می‌توان محاسبات مشابه انجام داد.

درصد وزنی خشک کاغذ با احتساب بازیافت = درصد وزنی خشک کاغذ − (درصد وزنی خشک کاغذ × درصد پتانسیل اجزاء قابل بازیافت) $= 3.65 - \left(3.65 \times \frac{60}{100}\right) = 1.46\%$

وزن خشک کاغذ با احتساب بازیافت = کل پسماند روزانه تهران × درصد وزن خشک کاغذ با احتساب بازیافت $= 7489 \times 1.46 = 109.41\ (\text{ton})$

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۸- درصد وزن خشک و مقدار وزن خشک (بدون احتساب بازیافت)

اجزا	مواد آلی	کاغذ	پلاستیک	چوب	مجموع
درصد وزن خشک با احتساب بازیافت	۱۸/۷	۱/۴۶	۰/۸۴	۰/۳۲	۲۱/۳۲
وزن خشک با احتساب بازیافت (تن)	۱۴۰۰/۳۷	۱۰۹/۴۱	۶۲/۶۸	۲۴/۱۹	۱۵۹۶/۶۵

۳-۲-۱.محاسبه عناصر شیمیایی پسماند بر حسب تن با توجه به درصد وزنی خشک اجزاء و با احتساب بازیافت

به عنوان نمونه، وزن کربن مواد آلی باتوجه به مقادیر جدول ۹ محاسبه شد. برای سایر عناصر شیمیایی و همچنین سایر اجزاء پسماند نیز می‌توان به همین صورت محاسبات را انجام داد (Panahandeh *et al*., 2017)

وزن خشک مواد آلی = وزن کربن مواد آلی

میزان ترکیب اولیه کربن در مواد آلی ×

$\Rightarrow$ وزن کربن مواد آلی $= 1400.36 \times 0.16$

$= 224.06\ (tons)$

جدول۹- وزن عناصر شیمیایی تشکیل دهنده پسماند و با احتساب بازیافت

اجزا	کربن (تن)	هیدروژن (تن)	اکسیژن (تن)	نیتروژن (تن)	گوگرد (تن)	مجموع (تن)
مواد آلی	۲۲۴/۰۶	۳۳/۱۹	۹۸/۷۲	۱۰/۴۶	۲/۰۳	۳۶۸/۴۶
کاغذ	۳۹/۱۷	۵/۷۸	۴۰/۲۶	۰/۱۸	۰/۱۱	۸۵/۵
پلاستیک	۴۲/۱۲	۳/۸	۵/۱۸	۱/۰۴	۰/۲	۵۲/۳۴
چوب	۹/۶۷	۱/۱۶	۷/۴۳	۰/۱۲	۰/۰۲	۱۸/۴۱
مجموع	۳۱۵/۰۲	۴۳/۹۲	۱۵۱/۵۹	۱۱/۸	۲/۳۷	۵۲۴/۷۱

۳-۲-۲.محاسبه درصد عناصر شیمیایی برای کل پسماند خشک شهر تهران و با احتساب بازیافت

به عنوان نمونه، درصد کربن کل پسماند خشک باتوجه به جدول ۱۰ محاسبه شد. برای سایر عناصر شیمیایی پسماند نیز می‌توان به همین صورت محاسبات را انجام داد (Panahandeh *et al*., 2017).

$$\text{درصد کربن اجزاء خشک} = \frac{\text{وزن کربن اجزاء خشک}}{\text{مجموع وزن عناصر شیمیایی در اجزاء خشک}} \times 100$$

$$\Rightarrow \text{درصد کربن اجزاء خشک} = \frac{315.02}{524.72} \times 100$$

$$= 60.04\ \%$$

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۱۰- وزن کل عناصر شیمیایی پسماند و درصد هز جزء و با احتساب بازیافت

اجزاء	وزن کل (تن)	درصد هر جزء
کربن	۳۱۵/۰۲	۶۰/۰۳
هیدروژن	۴۳/۹۲	۸/۳۷
اکسیژن	۱۵۱/۵۹	۲۸/۸۹
نیتروژن	۱۱/۸	۲/۲۵
گوگرد	۲/۳۷	۰/۴۵
مجموع	۵۲۴/۷۲	۱۰۰

۳-۲-۳. محاسبه ارزش حرارتی کل پسماند جامد شهر تهران و با احتساب بازیافت

با توجه به رابطه زیر، ارزش حرارتی پسماند شهر تهران بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم محاسبه شد (Panahandeh *et al*., 2017).

$$HHV = 337C + 1419\left(H2 - \frac{O2}{8}\right) + 93S + 23N \Rightarrow HHV = (337 \times 60.04) + 1419 \times \left(8.37 - \frac{28.89}{8}\right) + (93 \times 0.45) + (23 \times 2.25) = 27080.47\ (\frac{kJ}{kg})$$

۳-۲-۴.محاسبه توان و انرژی تولیدی کل پسماند شهر تهران و با احتساب بازیافت

با توجه به روابط زیر، توان و انرژی تولیدی محاسبه می-شود. در این فرمول وزن خشک کل پسماند بر حسب تن و بازده گازی‌سازی، ٪۲۰ لحاظ شده است. همچنین فرض شده است که این فرایند ۲۱ ساعت در روز (در سه نوبت) کار می‌کند.

$$P_{dry-g} = R_{HHV} \times HHV \times 1.157 \times 10^{-5} \times \eta = 1596.65 \times 27080.47 \times 1.51 \times 10^{-5} \times \frac{20}{100} = 130.58\ (MW)$$

$$U = P \times t = \frac{130.58 \times 21 \times 3600}{1596.65} = 6182.8\left(\frac{MJ}{tons}\right) \text{ یا } 1717.44\ \left(\frac{kWh}{tons}\right)$$

در پژوهش رجایی فر و همکاران، توان گازی‌سازی ۶۲/۵ مگاوات محاسبه شده، که ۶۸/۰۸ مگاوات از محاسبات فعلی کمتر است و که ناشی از ترکیب فرایند پیرولیز با گازی‌سازی در مطالعات رجایی فر و همکاران می‌باشد (Rajaeifar *et al.*, 2017). در پژوهش صادقی نیز، انرژی تولیدی برای شهر شیراز ۱۴۳۸/۶۵ کیلووات ساعت بر تن در فرایند گازی‌سازی بوده است (Sadeghi, 2018). همان‌طور که پیشتر ذکر شد، این تفاوت ناشی از حجم پسماند تولیدی بیشتر در شهر تهران نسبت به شهر شیراز و تفاوت در اجزاء تشکیل دهنده پسماند ناشی از عواملی نظیر عادات غذایی، سبک زندگی و غیره است.

۳-۲-۵.محاسبه حرارت تولیدی و مصرفی کل و با احتساب بازیافت

$$H\ (\text{تولیدی} - \text{گازی سازی}) = 27080.47 \times \mu_{g,n} = 6499.31(\frac{kJ}{kg})$$

$$H\ (\text{مصرفی} - \text{گازی سازی}) = 27080.47 \times (\mu_g - \mu_{g,n}) = 1624.83\ (\frac{kJ}{kg})$$

www.SID.ir

Archive of SID

در پژوهش صادقی، حرارت خالص تولیدی برای شهر شیراز ۱۶۱۷/۷ کیلوژول بر کیلوگرم در فرایند گازی-سوزی بوده است (Sadeghi, 2018). درحالیکه حرارت خالص تولیدی برای شهر تهران در این فرایند ۴۸۷۴/۴۸ کیلوژول بر کیلوگرم است. این تفاوت ناشی از حجم پسماند تولیدی بیشتر در شهر تهران نسبت به شهر شیراز است.

۳-۳. محاسبه حرارت و محتوای انرژی پسماند جامد شهری با روش هضم بی هوازی و با احتساب بازیافت

به عنوان نمونه، با توجه به روابط زیر، توان تولیدی کاغذ با احتساب بازیافت محاسبه و در جدول ۱۱ قابل مشاهده است. برای سایر اجزاء نیز می‌توان محاسبات مشابه انجام داد. توجه شود در این فرمول وزن اولیه با احتساب بازیافت برای کاغذ بر حسب تن و بازده هضم بی هوازی، ٪۳۵ لحاظ شده است. لازم به ذکر است که تنها کاغذ در این فرایند، قابل بازیافت است و محاسبات موادآلی و چوب مانند حالت بدون بازیافت است. در نهایت توان کل، از مجموع توان‌های هر یک از اجزاء در نظر گرفته شده برای فرایند هضم بی هوازی، به دست می‌آید.

$$\text{توان تولیدی کاغذ} = P_{AD} = R_{bio} \times 150 \times 0.6 \times 38000 \times 1.15 \times 10^{-8} \times \eta = 178.39 \times 150 \times 0.6 \times 38000 \times 1.15 \times 10^{-8} \times 0.35 = 2.45\ (MW)$$

با توجه به رابطه زیر، مقدار انرژی تولیدی نیز محاسبه می‌شود.

$$\text{انرژی تولیدی} = U = P \times t = \frac{\text{توان تولیدی} \times 21 \times 3600}{R_{bio}} = \frac{2.45 \times 21 \times 3600}{178.39} = 1038.29\ (\frac{MJ}{tons})$$

جدول۱۱- توان تولیدی، انرژی، برق مصرفی و برق تولیدی در روش هضم بی هوازی برای پسماند شهر تهران و با احتساب بازیافت

اجزاء (با بازیافت)	توان تولیدی بر حسب مگاوات	انرژی هضم بی هوازی بر حسب مگاژول بر تن	برق مصرفی هضم بی هوازی بر حسب کیلووات-ساعت بر تن	برق تولیدی تزریق شده به شبکه بر حسب کیلووات-ساعت بر تن
کل	۶۶/۶۹	۱۰۴۷	۵۸/۱۷	۲۳۲/۶۷

در پژوهش صادقی، انرژی تولیدی برای شهر شیراز ۳۳۲/۳۸ کیلووات ساعت بر تن در فرایند هضم بی هوازی بوده است (Sadeghi, 2018). این تفاوت ناشی از تفاوت در فرمول استفاده شده برای محاسبه توان می‌باشد. در پژوهش انجام شده توسط رجایی فر و همکاران، توان هضم بی هوازی ۹۳/۷ مگاوات محاسبه شده، که ۲۷/۰۱ مگاوات از محاسبات فعلی بیشتر است و ناشی از تفاوت در میزان حجم پسماند در نظر گرفته شده و تفاوت در فرمول استفاده شده برای محاسبه توان می‌باشد (Rajaeifar *et al.*, 2017). با توجه به رابطه زیر، حرارت تولیدی، مصرفی و خالص کل پسماند در فرایند هضم بی هوازی بر حسب مگاژول بر روز، محاسبه می‌شود.

$$\text{حرارت تولیدی} = H_{AD} = R_{bio} \times f_{vs} \times b \times g \times 150 \times C_{CH4} \times Q_{CH4} = 4815.28 \times 0.84 \times 0.83 \times 0.55 \times 150 \times 0.6 \times 38 = 6314914.81\ (\frac{MJ}{day})$$

$$\text{حرارت مصرفی} = 6314914.81 \times (\mu_{ad} - \mu_{ad,n}) = 631491.48\ \left(\frac{MJ}{day}\right)$$

$$\text{حرارت خالص} = 6314914.81 \times \mu_{ad,n} = 5683423.33\ \left(\frac{MJ}{day}\right)$$

در پژوهش صادقی، حرارت خالص تولیدی برای شهر شیراز ۷۰۷۵۳۳/۸۲۴ کیلوژول بر کیلوگرم در فرایند

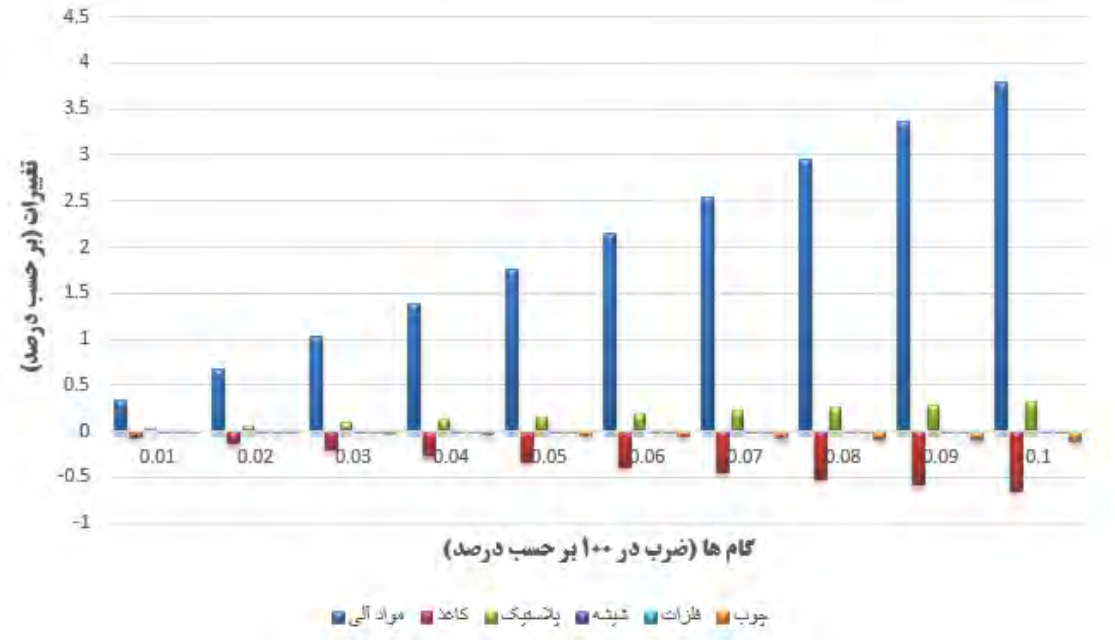
www.SID.ir

Archive of SID

گازی‌سازی بوده است (Sadeghi, 2018). این تفاوت ناشی از حجم پسماند تولیدی بیشتر در شهر تهران نسبت به شهر شیراز و تفاوت در فرمول استفاده شده برای محاسبه حرارت است.

۳-۴.عدم قطعیت

هدف این بخش، بررسی عدم قطعیت پارامترهای استفاده شده بر روی نتایج مدل‌سازی است. به عبارتی باید مشخص شود با ایجاد تغییر در ورودی، خروجی مدل به چه میزان تغییر می‌کند. از آنجا که پارامتری که مدل به آن وابسته است، نرخ تولید زباله خشک با بیشترین ارزش حرارتی یا R_{HHV} می‌باشد که خود آن نیز به هر یک از مولفه‌های پسماند و مقدار آن بستگی دارد. لذا هر یک از مولفه‌های پسماند با گام یک درصد تغییر داده شد تا در نهایت بتوان در گام‌های مختلف (مثلا ۵ درصد یا ۱۰ درصد)، تغییرات دو مولفه خروجی حرارت تولیدی و حرارت مصرفی را مورد ارزیابی قرار داد. با توجه به نمودارهای رسم شده، می‌توان فهمید که مثلا با افزایش یک درصدی هر یک از اجزاء پسماند، تغییرات در حرارت‌های تولیدی و مصرفی چگونه است. شکل ۱ نشان دهنده درصد تغییرات حرارت تولیدی و مصرفی با افزایش گام هر مولفه پسماند در فرایند زباله‌سوزی است که می‌توان میزان تغییر را در ضرایب مختلف ورودی مشاهده کرد. همان‌طور که از نمودار مذکور قابل استنتاج است، به‌طور مثال با تغییر ۵ درصدی در مولفه‌های مواد آلی، کاغذ، پلاستیک، شیشه، فلزات و چوب در فرایند زباله‌سوزی، تغییرات در حرارت‌های تولیدی و مصرفی مدل (به عنوان خروجی) به ترتیب ۱/۷۶، ۰/۳۲-، ۰/۱۶، ۰، ۰/۰۱- و ۰/۰۵- درصد است. همچنین در گام ۱۰ درصد در مولفه‌های مواد آلی، کاغذ، پلاستیک، شیشه، فلزات و چوب، تغییرات در حرارت‌های تولیدی و مصرفی مدل به ترتیب ۳/۸، ۰/۶۴-، ۰/۳۲، ۰، ۰/۰۲- و ۰/۱- درصد است.

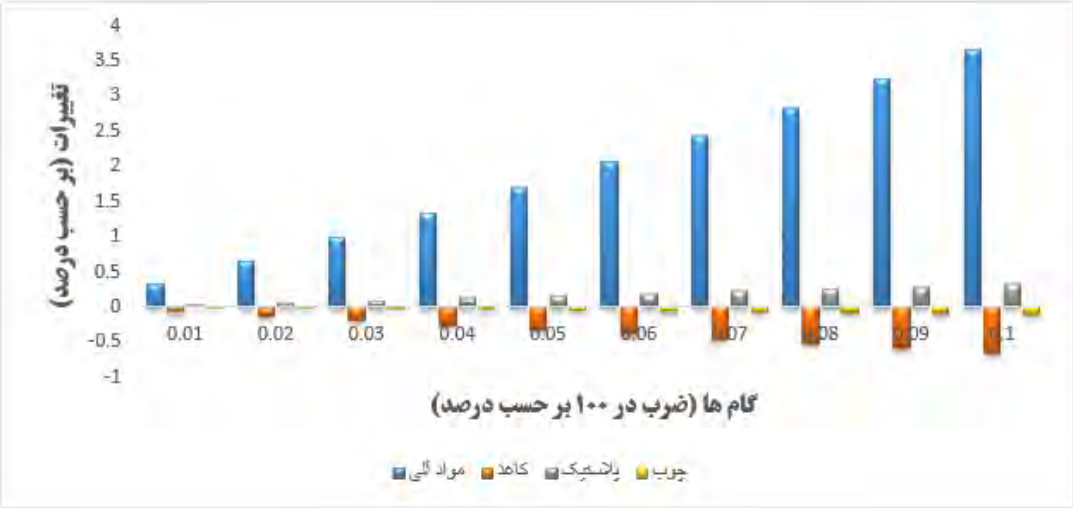


شکل۱- درصد تغییرات حرارت تولیدی و حرارت مصرفی در فرایند زباله سوزی

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۲ نیز نشان دهنده درصد تغییرات حرارت تولیدی و مصرفی در فرایند گازی‌سازی است که میزان تغییر در ضرایب مختلف ورودی قابل مشاهده است. همان‌طور که از نمودار مذکور قابل استنتاج است، به‌طور مثال با تغییر ۵ درصدی در مولفه‌های مواد آلی، کاغذ، پلاستیک و چوب در فرایند گازی‌سازی، تغییرات در حرارت‌های تولیدی و مصرفی مدل (به‌عنوان خروجی) به ترتیب ۱/۷، ۰/۳۳-، ۰/۱۶ و ۰/۰۵- درصد است. همچنین در گام ۱۰ درصد در مولفه‌های مواد آلی، کاغذ، پلاستیک و چوب، تغییرات در حرارت‌های تولیدی و مصرفی مدل به ترتیب ۳/۶۵، ۰/۶۵-، ۰/۳۲ و ۰/۱- درصد است.



شکل۲- درصد تغییرات حرارت تولیدی و حرارت مصرفی در فرایند گازی‌سازی

۴. بحث و نتیجه گیری

با توجه به پژوهش فعلی و مدیریت پسماند در ایران که شامل بازیافت، کمپوست، سوزاندن و خاکچال است، در بخش سوزاندن می‌توان به مجتمع پردازش و بازیافت زباله آرادکوه اشاره کرد. این مجتمع از تأسیسات دفع و بازیافت پسماندهای شهر تهران است که در بخش کهریزک در استان تهران واقع شده است. روزانه به‌طور متوسط ۸۰۰۰ تن انواع پسماندهای مختلف از منابع مختلف همچون مناطق ۲۲ گانه، شهرک و شهرهای اطراف، مراکز بهداشتی و درمانی، لجن و سرشاخه و غیره جهت امحا و دفع به این مرکز ارسال می‌شود. این نیروگاه زباله‌سوز با ظرفیت سوخت روزانه ۲۰۰ تن ریجکت (مواد پلاستیکی قابل اشتعال) پتانسیل تولید برق روزانه ۷۲ مگاوات و ماهانه دو هزار و ۱۶۰ مگاوات را دارد(Tehran Municipality Waste Management Organization. 2018). با توجه به اینکه توان تولیدی برای فرایند زباله‌سوزی در این پژوهش ۱۰۲/۲۵ مگاوات محاسبه شده است، این اختلاف را می‌توان ناشی از عدم جدا کردن کامل ۷۰ درصد مواد آلی از پسماند به منظور کاهش رطوبت و به دنبال آن افزایش احتراق دانست. مدیران شهری می‌توانند متوجه شوند که اگر روش‌هایی نظیر تفکیک از مبدا به منظور جداسازی پسماند تر از خشک به طور کامل و دقیق با همکاری شهروندان انجام شود تا چه میزان می‌توان توان تولیدی را افزایش داد و سودآوری کرد.

www.SID.ir

Archive of SID

به‌طور کلی شهر تهران پتانسیل بسیار بالایی برای تولید انرژی از پسماند دارد. به عنوان مثال، با توجه به داده‌های مرکز آمار ایران (سال۱۳۹۰)، انرژی سالیانه مصرفی روشنایی منازل با ۱۰ ساعت کار در شبانه روز ۱۰۹۵ کیلووات ساعت می‌باشد. با توجه به آن می‌توان نتیجه گرفت که انرژی تولید شده یک تن پسماند در هر روز در فرایندهای سوزاندن، هضم بی هوازی و گازی‌سازی به ترتیب معادل انرژی ۱۴ ماه و ۱۲ روز، ۳ ماه و ۱۸ روز و ۱۹ ماه و ۶ روز است که برای روشنایی منزل استفاده می‌شود. اطلاع از میزان توان و انرژی تولیدی در فرایندهای مختلف تیمار پسماند، در کنار مصالحه بین این عوامل با میزان انتشارات، هزینه‌های اولیه احداث و غیره می‌تواند به مدیران شهری در جهت اتخاذ یک تصمیم مناسب برای دفع صحیح پسماند کمک کند. در نهایت با بررسی این مقادیر می‌توان یک سناریو مطلوب برای مدیریت پایدار پسماند شهر تهران ارائه داد. این موضوع زمانی اهمیت چند برابر پیدا می‌کند که عدم اتکا به سوخت‌های فسیلی، لزوم به‌کارگیری تصمیم درست برای صرفه جویی در وقت و هزینه و غیره مطرح باشد.

References

Anonymous, 1396. Available from www.tehran4.blogfa.com. (In Persian).

Anonymous, 2010-2018. Available from www.wikipedia.org. (In Persian).

Chen, Y., Lo, S. 2015. Evaluation of greenhouse gas emissions for several municipal solid waste management strategies. Journal of Cleaner Production 1-7.

Dehghanifard, E., Dehghani, M. 2018. Evaluation and analysis of municipal solid wastes in Tehran, Iran. MethodsX 5, 312-321.

Dong, H., Geng, Y., Yu, X., Li, J. 2018. Uncovering energy saving and carbon reduction potential from recycling wastes: A case of Shanghai in China. Journal of Cleaner Production 205, 27-35.

Energy balance sheet, Ministry of Power. 2015. (In Persian).

Garibay-Rodriguez, J., Laguna-Martinez, M., Rico-Ramirez, V., Botello-Alvarez, J. 2018. Optimal Municipal Solid Waste Energy Recovery and Management: A Mathematical Programming Approach. Computers and Chemical Engineering 1-45.

Khairuddin, N., Abd Manaf, L., Hassan, M., Halimoon, N., Karim, W. 2015. Biogas Harvesting from Organic Fraction of Municipal Solid Waste as a Renewable Energy Resource in Malaysia: A Review. Pol. J. Environ. Stud. 24, 1477-1490.

Khoshnevisan, B. 2018. Enabling Integrated Municipal Waste Management through Biorefineries - Study of Abali Biogas Plant, PhD thesis, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran. (in Persian)

Ma, H., Cao, Y., Lu, X., Ding, z., Zhou, W. 2016. Review of Typical Municipal Solid Waste Disposal Status and Energy Technology. Energy Procedia 88, 589-594.

Murphy, J. D., McKeogh, E. 2004. Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste. Renewable Energy 29(7), 1043–1057.

Panahandeh, A., Fardi, GH., Mirmohammadi, M. 2017. Technical and economic study of the use of waste disposal in Tehran as fuel for cement furnaces.

www.SID.ir

Archive of SID

Environmental science and technology Volume 19, Special letter No. 4. (In Persian).

Rajaeifar, M. A., Ghanavati, H., Dashti, B., Heijungs, R., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M. 2017. Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 79, 414-439.

Rizwan, M., Saif, Y., Almansoori, A., Elkamel. A. 2018. Optimal processing route for the utilization and conversion of municipal solid waste into energy and valuable products. Journal of Cleaner Production 174, 857-867.

Sadeghi, P., 2018. Potential for energy production with different scenarios of waste in Shiraz city, M.Sc. Thesis, Biosystem Mechanical Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran.

Statistical Center of Iran. 2011. (In Persian).

Tehran Municipality Waste Management Organization. 2018. (In Persian).

Vadenbo, C., Hellweg, S., Guillén-Gosálbez, G. 2014. Multi-objective optimization of waste and resource management in industrial networks – Part I: Model description. Resources, Conservation and Recycling 89, 52-63.

www.SID.ir