

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 انرژی‌های تجدید پذیر) دانشگاه تهران

۲- استاد گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۹۹/۰۵/۲۹ - تاریخ پذیرش ۹۹/۰۸/۲۶)

چکیده:

با افزایش جمعیت، توسعه اقتصادی و شهرنشینی، تولید پسماند به خصوص در کشورهای در حال 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 کوتاه‌ترین زمان ممکن و به صورت پایدار بررسی و انتخاب کنند. در این پژوهش، توان، انرژی، حرارت تولیدی و مصرفی کل پسماند (برای فناوری‌های گازی‌سازی، سوزاندن و هضم بی‌هوازی) 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 بی‌هوازی، 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. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که انرژی تولید شده یک تن پسماند در هر روز در فرایندهای سوزاندن، هضم بی‌هوازی 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

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 از دورریز پسماندهای شهر تهران به عنوان سوخت کوره‌های سیمان پرداختند. در هیچکدام از پژوهش‌های انجام شده، پتانسیل 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 (مثلاً 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، مدل سازی، بهینه سازی، امکان سنجی و غیره استفاده کرد. همچنین با توجه به اهمیت بازیافت، در تمام مراحل، پتانسیل مقدار ماده بازیافتی نیز محاسبه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲. 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.

جدول ۱- 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.

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

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).

جدول ۲- درصد رطوبت و میزان عناصر شیمیایی هر یک از اجزاء پسماند

اجزاء	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	۰/۰۰۰۶	۰/۰۴۳	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۰/۹۰۵۴
چوب	۱۵	۰/۴	۰/۰۴۸	۰/۳۰۷	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۰/۲۳۹

۲-۲. ارزش حرارتی

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)؛ f_{vs} ، نسبت جامد فرار به کل جامد؛ b ، جامدهای فرار زیست تخریب پذیر؛ g ، بازده بیوگاز؛ 150 ، 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 باقی مانده ($\mu_{ad} - \mu_{ad,n}$) به مصرف خود فرایند می‌رسد (Murphy et al., 2004).

یکی از رایج ترین روابط ریاضی برای محاسبه ارزش حرارتی، فرمول اصلاح شده دولنگ^۱ 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 گازی سازی برای محاسبه بیشترین ارزش حرارتی استفاده می‌شود. توجه شود که میزان ۵۰ درصد از ارزش حرارتی در فرایند زباله سوزی (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 گازی سازی زباله به حرارت تبدیل می‌شود که از این میزان ۲۴ درصد ($\mu_{g,n}$) میزان حرارت

جدول ۳- 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

که در آن $P_{dry-inc}$ ، 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)؛ $1/157 \times 10^{-5}$ ، ضریب ثابت و η بازده عملی است. انرژی را نیز می‌توان با استفاده از رابطه ۶ محاسبه کرد. رابطه (۶)

$$U = P \times t$$

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)

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

۲-۵. پتانسیل بازیابی انرژی حاصل از فرایند هضم بی‌هوازی

اجزائی از پسماند که در فرایند هضم بی‌هوازی 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)؛ $1/157 \times 10^{-8}$ ، 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).

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 گازی‌سازی

در فرایند گازی‌سازی، مواد آلی، کاغذ، پلاستیک و چوب شرکت می‌کنند. لذا محاسبات بر مبنای 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)؛ $1/157 \times 10^{-5}$ ، ضریب ثابت و η بازده عملی است. انرژی را نیز می‌توان با استفاده از رابطه ۶ محاسبه کرد.

جدول ۴- اختصاص هر یک از اجزاء پسماند برای فناوری‌های مختلف تیمار در نظر گرفته شده در این پژوهش

سوزاندن	گازی‌سازی	هضم بی‌هوازی	بازیافت	
*	*	*		مواد آلی
*	*	*	*	کاغذ
*	*		*	پلاستیک
*			*	شیشه
*			*	فلزات
*	*	*		چوب

۳. نتایج

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

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 می توان محاسبات مشابه انجام داد.

در جدول ۴، درصد پتانسیل قابل بازیافت برای اجزاء پسماند جامد شهری و وزن اجزاء بازیافت شده آمده است.

$$\text{درصد پتانسیل قابل بازیافت کاغذ} \times \text{وزن اولیه کاغذ} = \text{وزن کاغذ بازیافت شده}$$

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

جدول ۴- 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 جدول ۴، 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 می توان 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 \times درصد وزنی خشک کاغذ) - درصد وزنی خشک کاغذ = $1.46\% = (3.65 \times \frac{60}{100}) - 3.65$

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

جدول ۵- 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 می توان به همین صورت محاسبات را انجام داد (Panahandeh et al., 2017).

$$\text{میزان ترکیب اولیه کربن در مواد آلی} \times \text{وزن خشک مواد آلی} = \text{وزن کربن مواد آلی}$$

$$\Rightarrow 1400.36 \times 0.16 = \text{وزن کربن مواد آلی}$$

$$= 224.06 \text{ (tons)}$$

جدول ۶- 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

پسماند نیز می‌توان به همین صورت محاسبات را انجام داد (Panahandeh et al., 2017).

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

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

$$\Rightarrow \text{درصد کربن اجزاء خشک} = \frac{316.61}{528.04} \times 100 = 59.96\%$$

به عنوان نمونه، درصد کربن کل پسماند خشک محاسبه و در جدول ۷ آمده است. برای سایر عناصر شیمیایی

جدول ۷- 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

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

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

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

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

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).

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

بازیافت

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

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

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.

۳-۲. 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

$$\begin{aligned} &= \text{درصد وزنی خشک کاغذ} \\ &- \left(\text{درصد وزنی خشک کاغذ} \right) \\ &\times \left(\text{درصد پتانسیل اجزاء قابل بازیافت} \right) \\ &= 3.65 - \left(3.65 \times \frac{60}{100} \right) = 1.46\% \end{aligned}$$

وزن خشک کاغذ با احتساب بازیافت

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

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 (تقریباً 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 می‌شود. 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.

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

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

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 کیلووات 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.

جدول ۸- 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

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

$$\begin{aligned} & \times \text{میزان ترکیب اولیه کربن در مواد آلی} \\ & \Rightarrow \text{وزن کربن مواد آلی} = 1400.36 \times 0.16 \\ & = 224.06 \text{ (tons)} \end{aligned}$$

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 با توجه به مقادیر جدول ۹ محاسبه شد. برای سایر عناصر شیمیایی و

جدول ۹- 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

پسماند نیز می‌توان به همین صورت محاسبات را انجام داد (Panahandeh et al., 2017).

$$\begin{aligned} & \times 100 = \frac{\text{وزن کربن اجزاء خشک}}{\text{مجموع وزن عناصر شیمیایی در اجزاء خشک}} \\ & \Rightarrow \text{درصد کربن اجزاء خشک} = \frac{315.02}{524.72} \times 100 \\ & = 60.04 \% \end{aligned}$$

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 با توجه به جدول ۱۰ محاسبه شد. برای سایر عناصر شیمیایی

جدول ۱۰- وزن کل عناصر شیمیایی پسماند و درصد هر 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

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

در پژوهش رجایی فر و همکاران، توان گازی سازی ۶۲/۵ مگاوات محاسبه شده، که ۶۸/۰۸ مگاوات از محاسبات فعلی کمتر است و که ناشی از ترکیب فرایند پیرولیز با گازی سازی در مطالعات رجایی فر و همکاران می باشد (Rajaeifar et al., 2017). در پژوهش صادقی نیز، انرژی تولیدی برای شهر شیراز ۱۴۳۸/۶۵ کیلووات ساعت بر تن در فرایند گازی سازی بوده است (Sadeghi, 2018). همان طور 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

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

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

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).

$$HHV = 337C + 1419 \left(H_2 - \frac{O_2}{8}\right) + 93S + 23N \Rightarrow HHV = (337 \times 60.04) + 1419 \times \left(8.37 - \frac{28.89}{8}\right) + (93 \times 0.45) + (23 \times 2.25) = 27080.47 \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

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 گازی سازی، ۲۰٪ لحاظ شده است. همچنین فرض شده است که این فرایند ۲۱ ساعت در روز (در سه نوبت) کار می کند.

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

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 مواد آلی 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.

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

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

$$\begin{aligned} U = P \times t &= \frac{R_{bio} \times 21 \times 3600}{178.39} \\ &= \frac{2.45 \times 21 \times 3600}{178.39} = 1038.29 \left(\frac{MJ}{tons} \right) \end{aligned}$$

جدول ۱۱- 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
کل	۶۶/۶۹	۱۰۴۷	۵۸/۱۷	۲۳۲/۶۷

(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.

$$\begin{aligned} H_{AD} &= R_{bio} \times f_{vs} \times b \times g \times 150 \times C_{CH_4} \times Q_{CH_4} \\ &= 4815.28 \times 0.84 \times 0.83 \times 0.55 \times 150 \\ &\quad \times 0.6 \times 38 = 6314914.81 \left(\frac{MJ}{day} \right) \\ \text{حرارت مصرفی} &= 6314914.81 \times (\mu_{ad} - \mu_{ad,n}) = 631491.48 \left(\frac{MJ}{day} \right) \\ \text{حرارت خالص} &= 6314914.81 \times \mu_{ad,n} = 5683423.33 \left(\frac{MJ}{day} \right) \end{aligned}$$

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

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

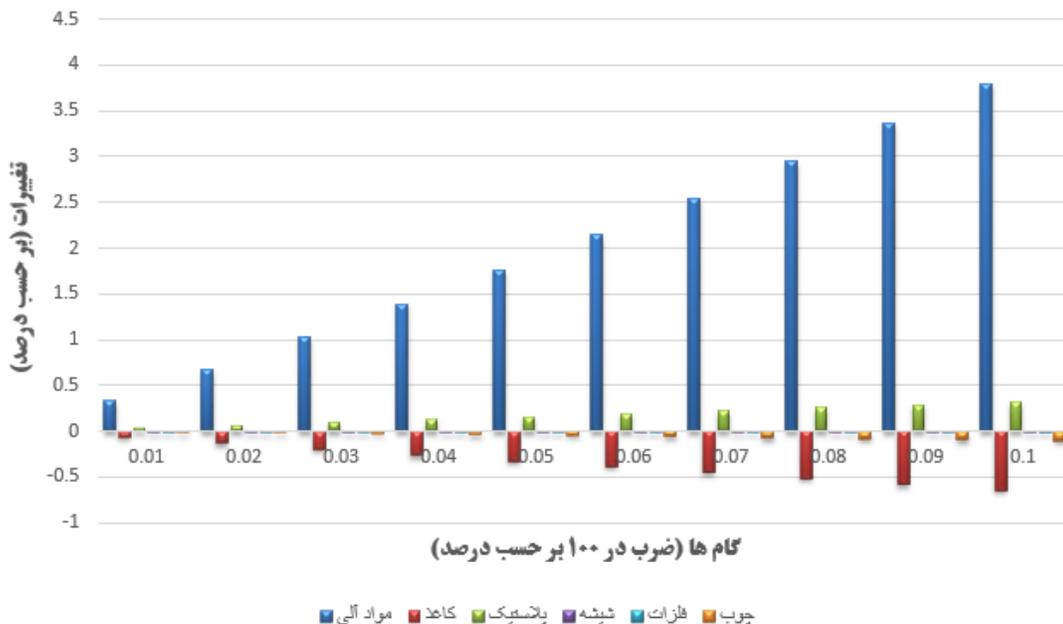
در پژوهش صادقی، انرژی تولیدی برای شهر شیراز ۳۳۲/۳۸ کیلووات ساعت بر تن در فرایند هضم بی هوازی بوده است (Sadeghi, 2018). این تفاوت ناشی از تفاوت در فرمول استفاده شده برای محاسبه توان می‌باشد. در پژوهش انجام شده توسط رجایی فر و همکاران، توان هضم بی هوازی ۹۳/۷ مگاوات محاسبه شده، که ۲۷/۰۱ مگاوات از محاسبات 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

نمودارهای رسم شده، می‌توان فهمید که مثلاً 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.

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

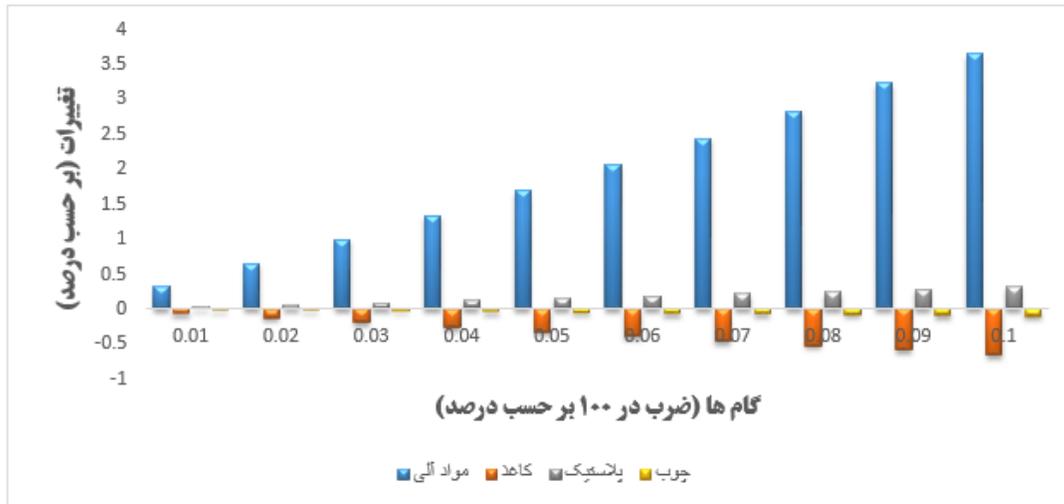
هدف این بخش، بررسی عدم قطعیت پارامترهای استفاده شده بر روی نتایج مدل‌سازی است. به عبارتی باید مشخص شود با ایجاد تغییر در ورودی، خروجی مدل به چه میزان تغییر می‌کند. از آنجا که پارامتری که مدل به آن وابسته است، نرخ تولید زباله خشک با بیشترین ارزش حرارتی یا RHHV می‌باشد که خود آن نیز به هر یک از مولفه‌های 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 (مثلاً ۵ درصد یا ۱۰ درصد)، تغییرات دو مولفه خروجی حرارت تولیدی و حرارت مصرفی را مورد ارزیابی قرار داد. با توجه به



شکل ۱- درصد تغییرات حرارت تولیدی و حرارت مصرفی در فرایند زباله‌سوزی

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.

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



شکل ۲- 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 تولیدی را افزایش داد و سودآوری کرد.

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.

به‌طور کلی شهر تهران پتانسیل بسیار بالایی برای تولید انرژی از پسماند دارد. به عنوان مثال، با توجه به داده‌های مرکز آمار ایران (سال ۱۳۹۰)، 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 بی‌هوازی 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

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.

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.