نشریه علمی(فصلنامه) پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال هفتم/ شماره ۲۲/ بهار ۱۴۰۰ / صفحات ۱۳۰ – ۸۷

ارزیابی تولید بیوگاز از پسماند جامد شهری با استفاده از راکتورهای تخمیر بی‌هوازی پیوسته: مطالعه موردی شهر مشهد

سید علی اصغر شریعت حسینی
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی انرژی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران
alishariat1367@gmail.com
پیمان باشی شهابی
استادیار، گروه مهندسی انرژی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران (نویسنده مسئول)
pbshahabi@mshdiau.ac.ir
کاظم بشیر نژاد
استادیار،گروه مهندسی انرژی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران
bashirnezhad@mshdiau.ac.ir

با توجه به نیاز کشور ایران از جمله شهر مشهد به انرژی و مشکلات ناشی از آلاینده‌های زیست محیطی حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی و همچنین مشکلات ایجاد شده ناشی ازتولید و دفع پسماندهای جامد شهری، مطالعه‌ای بر اساس استفاده ازپسماند جامد شهری جهت تولید بیوگاز در مولدهای بیوگاز در راستای بر طرف نمودن مشکلات ذکر شده انجام شده است. در این مطالعه به منظور بررسی میزان سوخت بیوگاز و انرژی نهایی تولید شده به وسیله پسماند جامد شهری در منطقه مورد مطالعه، از مدل‌های ریاضی ارایه شده مرتبط با راکتورهای پیوسته تک مرحله‌ای استفاده شده است و برآورد اقتصادی طرح توسط نرم افزار رت اسکرین انجام گردیده است. نتایج نشان می‌دهد متان تئوری تولید شده از فرایند هضم ۵۵/۹۸۲ درصد و ارزش حرارتی بالا وپایین بیوگاز به ترتیب ۲۲/۳۲ و۲۰/۱۱ مگاژول بر متر مکعب می‌باشد. انتظار می‌رود به ازاء ۱۶ عدد راکتور بادبی جرمی ورودی هریک ۱۸۱۸/۷۵ کیلوگرم در روز و حداقل زمان ماند ۹/۲۷ روز، بیوگاز با دبی حجمی ۷۱۸۵/۴۱۵ متر مکعب بر روز قابل حصول باشد. توان قابل حصول با فرض ارزش حرارتی بالا و پایین سوخت در این نیروگاه به ترتیب ۶۴۹/۶۹۱ و ۵۸۵/۴۸۸ کیلو وات خواهد بود. یکی از مسائل مهم در نیروگاه بیوگاز بهینه سازی و افزایش راندمان تولید بیوگاز می‌باشد،که بدین منظور می‌توان با استفاده از راکتورهای ترکیبی چند مرحله‌ای یا استفاده از خوراک‌های ترکیبی این نیروگاه را ارتقاء بخشید.

واژگان کلیدی: بیوگاز، تخمیر بی‌هوازی، راکتور پیوسته، زیست توده، پسماند جامد شهری.

تاریخ دریافت: ۶ / ۱۰ / ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۲۸ / ۱۱ / ۱۳۹۹

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

۱. مقدمه

امروزه، با افزایش رشد جمعیت و توسعه جوامع بشری و مشکلات ناشی از آلودگی‌های سوخت‌های فسیلی وهمچنین محدودیت منابع انرژی، استفاده از منابع انرژی جایگزین ازجمله زیست توده را اجتناب ناپذیر کرده است (حسنی وهمکاران، ۱۳۹۸). زیست توده به علت محتوای مواد آلی بالا، مناسب ترین منبع اولیه بیوگاز است. یکی از این زیست توده ها، که به وفور در کشور یافت می‌شود، پسماندهای غذایی است (حسنی وهمکاران، ۱۳۹۸). مدیریت وامحاء این دسته پسماندها که روزانه حجم بالایی را در جوامع بشری به خود اختصاص می‌دهد از جمله چالش‌های محیط‌های اجتماعی محسوب می‌شود (یوسفی، ۱۳۹۹). هضم بی‌هوازی روشی است که علاوه بر مدیریت و دفع این دسته از پسماندها و رفع معضل چالش‌های ناشی از آن در زندگی اجتماعی منجربه تولید انرژی می‌شود (رمی [1]، ۲۰۱۸). در میان انرژی ها، بیوگاز حاصل از زیست توده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و بیوگاز به دلیل سالم سازی محیط زیست، تولید انرژی وکود مرغوب وقابلیت ایجاد در جوار جوامع بشری از اهمیت وجایگاه ویژه‌ای برخوردار است (دنگ و همکاران [2] ۲۰۱۷).

در ایران نیز در خصوص فرایندهای بی‌هوازی و تکنولوژی تولید بیوگاز تحقیقاتی بسیار خوبی صورت گرفته است، طبق بررسی‌های انجام شده بیشترین مطالعات انجام شده مربوط به میزان بیوگاز تولید شده در مقیاس آزمایشگاهی بوده، و به سایر موضوعات نظیر زمان ماند اقتصادی، میزان تأمین انرژی مورد نیاز و چگونگی تأمین انرژی هاضم، اقتصادی بودن هزینه تولید، ارایه راهکار برای رفع معضل پسماندهای شهری وتولید انرژی در مقیاس صنعتی توجهی نشده است. همچنین کمتر مطالعه‌ای به ارایه معادلات مرتبط با با راکتورهای تخمیر بی‌هوازی به ویژه از نوع پیوسته پرداخته شده است، یکی از اهدف این تحقیق حل مشکلات مطالعاتی ذکر شده می‌باشد که در این مطالعه

1. Remy
2. Deng

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

سعی شده است که تا حد الامکان اهداف فوق برآورده شود. دراین مطالعه ابتدا مروری بر پژوهش‌های انجام شده، معرفی انواع راکتور، روش بررسی، نتایج و به بحث ونتیجه گیری این مطالعه پرداخته می‌شود.

۱-۱. پیشینه تحقیق

بعضی از تحقیقاتی که در زمینه استفاده از بیوگاز انجام شده عبارتند از:

ماتئو و همکاران [1] (۲۰۱۷) پتانسیل تبدیل زباله‌های جامد شهری به بیوگاز را، به عنوان منابع انرژی شهری، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تجزیه وتحلیل انرژی نشان داد که چگالی شهری و ویژگی‌های منطقه مورد تجزیه و تحلیل نقش مهمی در ارزیابی فرصت زباله به انرژی دارند.

مهردادی وهمکاران (۱۳۸۳) ارزیابی فرایند هضم بی‌هوازی زباله‌های فساد پذیر شهری را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه ازیک راکتور مجهز به مبدل حرارتی با دمای ۳۷ درجه سانتی گراد با حجم ۲۲ لیتر برای هضم مواد زاید جامد فساد پذیر شهری با درصد بالای جامد خشک استفاده شده بود ونتایج نشان می‌داد تولید گاز ۲۵۰۰ تا ۹۴۰۰ لیتر بر هر متر مکعب راکتور در روز و بهره دهی متان بین ۰/۲۳ تا ۰/۶۷ مترمکعب متان به ازای هر کیلوگرم جامدات فرار و کاهش مواد آلی بیش از ۵۰ درصد برای زمان ماند ۱۰تا ۲۰ روز به دست آمد.

ثقوری و همکاران (۱۳۹۹) در این پژوهش هضم بی‌هوازی حالت جامد قسمت آلی زباله جامد شهری به مدت ۳۰ روز در مقیاس آزمایشگاهی با غلظت مواد جامد ۲۰ درصد جهت ارزیابی میزان تولید بیوگاز در شرایط ناپیوسته و مزوفیلیک (۳۷ درجه سانتیگراد) انجام شد. حجم بیوگاز تولیدی در انتهای فرآیند هضم، مقدار ۳۷۲ میلی‌لیتر به ازای هر گرم مواد جامد فرار با درصد متان ۶۱/۸۲ (معادل ۲۳۰ میلی لیتر) به دست آمد. همچنین میزان تخریب پذیری مواد جامد فرار به عنوان یکی از پارامترهای بهره وری آزمایشات حدود ۶۴/۷ درصد محاسبه شد.

1. Matteo

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

لیند مارک و همکاران [1] (۲۰۱۴) تأثیر شدت همزنی ۱۵۰ و ۲۵ دور در دقیقه ونیز حداقل همزنی بر میزان بیوگاز تولیدی طی تخمیر بی‌هوازی بخش آلی ضایعات جامد شهری را مورد مطالعه قراردادند،که نتایج ارزیابی نشان داد که شدت هم زدن پایین تر منجر به افزایش سرعت و حجم تولید بیوگاز می‌شود.

راجا گوپال و همکاران [2] (۲۰۱۷) مطالعه‌ای بر روی فرایند هضم بی‌هوازی ناپیوسته متوالی مخلوطی از پسماندهای خانگی در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد (شرایط سرما دوست) با محتوای جامد ۱۳ الی۳۷ درصد انجام دادند که درا ین شرایط ۰/۴ مترمکعب گاز متان به ازای یک کیلوگرم مواد فرار تولید شد.

نائیجی و همکاران (۱۳۹۷) پتانسیل سنجی میزان تولید انرژی از فناوری‌های مختلف دفع نهایی پسماند شهرستان آمل را مورد مطالعه قرار دادند بر اساس یافته‌های این تحقیق شهرستان آمل به ترتیبت در صورت اجرای یک محل دفن بیوراکتور بی‌هوازی برای کل پسماند شهری، استفاده از هاضم بی‌هوازی و استفاده از زباله سوز برای پسماند ریجکتی، به ترتیب پتانسیل نصب مولد با ظرفیت ۵ / ۱۳، ۱۴ و ۴ / ۲ مگاوات انرژی را دارد که دو مورد اول مولدهای CHP هستند که حدود ۴۰درصد راندمان الکتریکی دارند.

۲-۱. مکانیسم‌های تولید بیوگاز

گاز حاصل از تخمیر بی هوازی مواد آلی موجود در پسماندهای حیوانی یا انسانی و گیاهی را که در نتیجه فقدان اکسیژن و فعالیت باکتری‌های غیرهوازی، بویژه متانزا در یک محفظه تخمیر بوجود می‌آید را اصطلاحاً بیوگاز می‌نامند (لیمویی و محبت کار،۱۳۹۶). مواد آلی به سه دسته مهم از مولکول‌ها یعنی پروتئین ها، کربوهیدرات‌ها و چربی‌ها دسته بندی می‌شوند (رجبعلی پور چشمه گز، ۱۳۸۹). بیوگاز عمدتاً متشکل از گازهای متان و دی اکسید کربن بوده و

1. Lindmark
2. Rajagopal

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

بعد از ریکاوری می‌تواند به عنوان یک سوخت در موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های گازی، پیل‌های سوختی، بویلرها و گرمکن‌های صنعتی، و یا در ساخت مواد شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد (شفیعی ده آباد، ۱۳۹۴). در شرایط بهینه بیوگاز شامل ۵۰ الی ۶۵ درصد متان است (نظری ونصیری،۱۳۹۳ ؛ نیچران،۱۳۹۴). مقادیر قابل توجه‌ای از پسماندهای تولید شده در بخش‌های کشاورزی، صنعتی، شهری و غیره را مواد آلی زیست تخریب پذیر تشکیل می‌دهد. اگر این پسماند، به صورت بی‌هوازی پردازش شوند، نه تنها مقدار قابل توجهی بیوگاز (حدود ۲۵۰-۳۵۰ متر مکعب به ازای هر تن پسماند) بلکه کود هم تولید می‌شود (گلستانه، ۱۳۹۸).

واکنش‌های تخمیری در دستگاه بیوگاز شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌های شیمیایی و بیولوژیکی دو گروه از باکتریهای اسیدزا و متانزا در محفظه تخمیر است، که رشد، ادامه حیات و میزان بیوگاز تولیدی آنها به شرایط تخمیر بستگی دارد (آکونا [1]،۲۰۱۹؛ سعیدی نیچران،۱۳۹۴).

از جمله عوامل مؤثر بر عملکرد دستگاه بیوگاز می‌توان به این موارد اشاره نمود: درجه حرارت، نوع راکتور و نحوه کارکرد آن، حضور موجودات زنده ذره بینی ا ز نوع بی‌هوازی، وجود مواد باز دارنده، غلظت مواد، زمان ماند، میزان اسیدی بودن PH، مواد مغذی، مواد سمی، اختلاط محتویات، رطوبت، نسبت کربن به نیتروژن.

1. Akunna

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

فناوری‌های متداول هاضم را می‌توان به صورت زیر دسته بندی نمود (طباطبایی و قناواتی[1]، ۲۰۱۸؛گروه پژوهشی انرژی‌های نو، ۱۳۹۴):

جدول ۱. طبقه بندی‌های مختلف هاضم ها

ویژگی	طبقه بندی
نوع هضم	خشک تر
بارگذاری	ناپیوسته پیوسته نیمه پیوسته
رژیم جریان	اختلاط کامل پیستونی لاگون
شکل هاضم	عمودی افقی
دمای بهره برداری	سایکروفیل مزوفیل ترموفیل
مراحل هضم	یک مرحله ای دو مرحله ای چند مرحله ای

هاضم‌های تر با میزان جامدات ۱۰-۱۵ درصد کار می‌کنند(رمی [2]، ۲۰۱۸). بنابراین، رقیق‌سازی با آب برای رسیدن به غلظت کمتر از ۱۵ درصد ضروری است. فرایند تر عموماً اختلاط کامل است و برای اختلاط از پمپ، همزن مکانیکی یا تزریق بیوگاز از کف مخزن استفاده می‌شود (گروه

1. Tabatabaei And Ghanavati
2. Remy

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

پژوهشی انرژی‌های نو، ۱۳۹۴). مهمترین فرایندهای هضم تر تک مرحله ای به شرح زیر می‌باشند (گروه پژوهشی انرژی‌های نو، ۱۳۹۴) :

- فرایند وابیو [1]
- فرایند واسا [2]
- هاضم خودهمزن

در هاضم‌های خشک میزان جامدات ۴۰-۲۰ درصد است (رمی، ۲۰۱۸) و خوراک با ds بیش از ۴۰ درصد نیاز به رقیق ساز ی دارد. سیستم خشک در برابر ذرات جامد مقاوم تر و انعطاف پذیرتر است. عموماً ناخالصی‌های درشت با اندازه بیش از ۴ سانتیمتر قبل از ورود مواد به هاضم جدا می‌شوند (گروه پژوهشی انرژی‌های نو، ۱۳۹۴).خوراک به وسیله تسمه نقاله، خوراک دهنده‌های مارپیچی و پمپ‌های نیرومند که برای جریان‌های با ویسکوزیته بالا طراحی شده اند، منتقل می‌شوند. (گروه پژوهشی انرژی‌های نو، ۱۳۹۴). هاضم‌های تجاری شده خشک زیادی وجود دارد. ولی سه سیستم که بیشترین هاضم‌های تجار ی شده را به خود اختصاص داده اند عبارتند از(رمی، ۲۰۱۸) :

- فرآیند درانکو [3]
- فرآیند والورگا [4]
- فرآیند کمپوگاز [5]

در روش بارگذاری راکتور به صورت نا پیوسته [6]، هاضم برای یکبار با مواد اولیه مناسب بارگیری شده و بسته به نوع خوراک و بار آلودگی موجود در مدت زمان مناسب عمل تخمیر مواد زائد آلی در هاضم انجام می‌گیرد. پس از طی این دوره محتویات راکتور به طور کامل تخلیه

1. Wabio
2. Waasa
3. Dranco
4. Valorga
5. Kompo gas
6. Batch

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

می‌گردد. این روش می‌تواند برای فاضلاب‌های غلیظ، پسماندهای جامد شهری و مواد آلی با جامد خشک ۴۰-۲۰ درصد به کار رود(آکونا [1]،۲۰۱۹؛ رمی [2]، ۲۰۱۸). این روش برای تخمیر ترکیبات سلولزی مفید می‌باشد و پایان تخمیر زمانی فرا می‌رسد که تولید گاز کم شود (نصیری، ۱۳۸۵).

در روش بارگذاری راکتور به صورت پیوسته [3] مواد اولیه به صورت روزانه وارد هاضم شده و در صورت پر بودن آن برابر با حجم ورودی، مواد تخمیر شده از هاضم خارج می‌شود. درصد مواد آلی خشک در این سیستم بین ۵ تا ۱۰ درصد بوده و لازم است که با طراحی همزن‌های مناسب محتویات مخزن کاملاً مخلوط گردد(آکونا،۲۰۱۹؛ طباطبایی و قناواتی [4]، ۲۰۱۸

؛ رمی، ۲۰۱۸). در این روش می‌توان حجم ثابتی از گاز را با خوراک معین به صورت روزانه تولید کرد. در طراحی نیروگاه‌های بزرگ معمولاً از این روش استفاده می‌شود (نصیری، ۱۳۸۵).

در روش بارگذاری راکتور به صورت نیمه پیوسته [5] خوراک دهی به صورت متناوب و در فواصل زمانی مختلف انجام می‌گیرد. با تعیین زمان ماند مناسب می‌توان از این روش برای تخمیر ترکیبات مختلف استفاده کرد (آکونا،۲۰۱۹). همانند سیستم‌های پیوسته در اینجا نیز موقع بارگیری معادل خوراک تغذیه شده از محتویات هاضم خارج می‌شود. در دامداری‌ها و صنایعی که به طور دائم پساب ندارند معمولاً ازاین روش استفاده می‌گردد (نصیری، ۱۳۸۵).

۲. روش تحقیق

۲-۱. معرفی و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

مطابق آمار موجود جمعیت شهر مشهد در سال ۱۳۹۵ برابر ۳۳۷۲۶۶۰ نفر بوده که با نرخ رشد جمعیت ۱/۷۲درصد پیش بینی می‌گردد تا سال ۱۳۹۸ میزان جمعیت ۳۵۴۹۷۰۰ نفر برسد (مرکز آمار ایران،۱۳۹۵). نرخ سرانه مصرف فعلی در حدود ۰/۷ کیلوگرم به ازاء هر نفر در روز می‌باشد (سازمان

1. Akunna
2. Remy
3. Continious
4. Tabatabaei And Ghanavati
5. Semi-continious

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

مدیریت پسماند شهرداری مشهد،۱۳۹۸)، ومیزان پسماند سالانه تولید شده در این شهر ۲۴۸۴۷۹۰ کیلوگرم در روز می‌باشد. محل دفع زباله‌های شهر مشهد در جنوب شرقی شهر و در فاصله ۵ کیلومتری جاده مشهد- نیشابور در زمینی به مساحت ۲۲۰ هکتار واقع شده است. زباله‌های دارای درصد بالای مواد آلی و جمع آوری شده از مناطق خاصی از شهر که میزان نخاله و مواد غیر قابل کمپوست آن کمتر است، به سمت سالن دریافت کارخانه ی کمپوست هدایت می‌شود و سایر مواد زائد شامل نخاله‌های ساختمانی، لجن و زباله‌های حاوی درصد پایین مواد آلی به محل دفن زباله هدایت می‌شوند. این کارخانه وظیفه ی بازیابی و استفاده ی بهینه از مواد آلی موجود در زباله‌های خانگی را برعهده دارد. در این مطالعه ازقسمتی ازمواد آلی جداسازی شده در این کارخانه به منظور ماده اولیه هاضم‌های بی‌هوازی استفاده می‌شود.

۲-۲. تئوری تحقیق

مطالعه انجام شده بر اساس استفاده از شرایط و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پسماند تولید شده در شهر مشهد می‌باشد. دراین مطالعه ظرفیت پذیرش کارخانه تفکیک پسماند مشهد، ۶۰۰۰۰۰ کیلو گرم در روز است (سازمان مدیریت پسماند شهرداری مشهد،۱۳۹۸). در این مطالعه به منظورافزایش راندمان هضم و تولید بیوگاز، جداسازی مواد غیر آلی و قابل بازیافت در دو مرحله انجام می‌شود، مراحل فوق به منظور دسته بندی، تفکیک و کاهش اندازه صورت می گیرد، در مرحله اول پسماند قبل از پردازش دارای مشخصات فیزیکی و شیمیایی مطابق جدول ۲و۳ می‌باشد، پردازش اولیه در مرحله اول با فرض جداسازی کامل موادی نظیر پلی استایرن، پت، فلزات، شیشه و سایر مواد نظیر سنگ وخاک و... انجام می گیرد، و مطابق با مشخصات فیزیکی جدول ۴ از این واحد خارج شده، و با فرض در نظرگرفتن جرمی معادل ۳۰۰۰۰ کیلو گرم در روز به عنوان ماده اولیه مورد نیاز نیروگاه، وارد مرحله دوم پردازش می‌شود، در مرحله دوم پردازش، ۳ درصد دیگر از مواد غیر قابل هضم به ازء هر تن پسماند جداسازی می‌شود، و به مقدار ۲۹۱۰۰ کیلو گرم در روز به واحد تهیه وآماده سازی خوراک منتقل می‌شود، در این مرحله عملیات رقیق سازی به وسیله آب، تنظیم غلظت، مخلوط کرن، تنظیم PH تاحدود ۶/۸ و پیش گرمایش خوراک تا ۳۵ درجه سانتی گرا د صورت می گیرد، سپس جهت

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

هضم مواد آلی وارد هاضم می‌شود. در این مطالعه با توجه به محدود بودن حجم و اندازه هاضم‌های پیوسته، کاهش هزینه ساخت و اقتصادی بودن و همچنین تولید بیوگاز با حجم و فشارثابت جهت بهره برداری در مولدهای برق، از ۱۶ عدد راکتور به عنوان مولد بیو گاز استفاده شده است، در نهایت خوراک به منظور عملیات هضم وتولید بیوگاز با دبی جرمی ۷۵/ ۱۸۱۸ کیلوگرم در روز وارد هر راکتور می‌شود.

بررسی و ارزیابی تولید بیوگاز توسط پسماند جامد شهری در این مطالعه بر اساس استفاده از معادلات و مدل هایی که برای راکتورهای تخمیر بی‌هوازی پیوسته تک مرحله‌ای ارایه شده انجام شده است (هیلکیاه ایگونی [1]، ۲۰۱۶ ؛ هیلکیاه ایگونی و سپیریبو کینگنانا [2]،۲۰۱۶ ؛ هیلکیاه ایگونی و سپیریبو کینگنانا،۲۰۱۷ ؛ چوبانگلوس [3] و همکاران،۲۰۰۳، رینولدز وریچاردز [4]،۱۹۹۶). مدل ارایه شده در این پژوهش شامل راکتور اصلی، مبدل حرارتی وهمزن می‌باشد، واکنش‌های غیر هوازی در راکتور در دمای معادل ۳۵ درجه سانتیگراد درمحدوده فعالیت باکتری‌های مزوفیلیک صورت می‌گیرد، برای حفظ و کترل دما دراین محدوده از یک مبدل حرارتی استفاده شده است. نوع تغذیه راکتور به صورت تک خوراک (پسماند جامد شهری) وبه صورت پیوسته می‌باشد.خوراک به منظور اینکه باکتری‌ها بتوانند موادآلی را جذب کنند، لازم است که مواد به صورت محلول در آیند زیرا آب یکی از عناصر اصلی جهت تغذیه میکرو ارگانیسم‌ها است که موجب حرکت باکتری ها، فعالیت آنزیم‌های سلولی، هیدراسیون بیوپلیمرها و همچنین تسهیل شکست سلولها می‌شود. لذا خوراک با غلظت جامد خشک ($X_{dsc\,(Cstr)}$)، ۱۰ درصد و با دبی جرمی جامد خشک($\dot{m}_{ds}$)، معادل ۹۳۵/۸۲۵ کیلوگرم در روز پس از رقیق سازی با آب وارد راکتور تک مرحله‌ای می‌شود، حجم خوراک روزانه ورودی به راکتور($\dot{V}_{dvr\,(i)}$)، که وابسته به دبی جرمی خوراک ($\dot{m}_{total\ mass\ reactor}$)، وزن مخصوص لجن تر(γ_{Ws})، دانسیته آب (ρ_{water}) و غلظت جامد

1. Hilkiah Igoni
2. Hilkiah Igoni And Sepiribo Kingnana
3. Tchobanoglous
4. Reynolds And Richards

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

خشک ($X_{dsc\,(Cstr)}$) می‌باشد، با استفاده از معادله۱۶ مشخص می گردد. به منظور جلوگیری از ایجاد کف وتشکیل پوسته‌های سطحی بر روی سطح لجن در راکتور و همچنین یکنواخت نگه داشتن محلول از نظر غلظت و درجه حرارت از دو عدد همزن با دور (n_{BRR})، ۱۵۰ دور بر دقیقه و زمان کار(t_{Wm})، ۵دقیقه در هرساعت استفاده شده است، توان مورد نیاز همزن‌ها با استفاده از معادلات ۴۴و۴۵ قابل دستیابی است (دوبلین و اشتاینهاوزر[1]، ۲۰۱۱).

در این مطالعه غلظت کل مواد آلی موجود در پسماند (X_{vs})، برابر با ۷۱/۳ درصد و غلظت مواد غیر آلی (خاکستر) (X_{ash})، برابر ۲۸/۷ درصد است، در طی فرایند هضم عملیات تخریب وتجزیه مواد جامد فرار صورت می گیرد، که مقدار تجزیه پذیری(X_{vds})، برابر با ۸۰ درصد است، لازم به ذکراست تمامی مواد تجزیه شده قابلیت تبدیل شدن به بیو گاز را نداشته، با توجه به این مسأله حداکثر بازدهی تبدیل تجزیه مواد فرار به بیوگاز(X_{vbs})، برابر ۸۳ در صد در نظر گرفته می‌شود، وهمچنین در طی فرآیند هضم سایر مواد غیر آلی ($\dot{m}_{ash}$)، وآلی تجزیه نشده($\dot{m}_{rsvs}$) به صورت لجن باقی می‌ماند، میزان لجن تولید شده در هاضم با استفاده از معادلات ۸،۱۱و۱۲ قابل دستیابی است. خوراک در مدت زمان ماند هیدرولیکی (ϑ_h)، با توجه به عوامل غلظت جامد فرار ورودی($S_{cvs\,(i)}$)، غلظت پساب خروجی($S_{ce\,(O)}$) و نرخ رشد وسرعت تجزیه(K)، هضم شده که این زمان فاصله بین زمان ورود حجم مشخصی ازخوراک به هاضم وزمان خروج آن از هاضم می‌باشد در این مطالعه زمان ماند هیدرولیکی مورد نیاز با استفاده از معادله ۲۷ قابل دستیابی است (هیلکیاه ایگونی [2]، ۲۰۱۶ ؛ هیلکیاه ایگونی و سپیریبو کینگنانا [3]،۲۰۱۶ ؛ هیلکیاه ایگونی و سپیریبو کینگنانا،۲۰۱۷).

دراین مدل حجم راکتور($V_{r\,(Cstr)}$)، تابعی از حجم روزانه خوراک ورودی به راکتور($\dot{V}_{dvr\,(i)}$) و زمان ماند هیدرولیکی(ϑ_h) می‌باشد و با استفاده از معادله ۲۸ قابل دستیابی است. در این مدل غلظت واقعی گاز متان محلول(C_{camd})، با استفاده از نسبت حجم متان استوکیومتریک

1. Deublein And Steinhauser
2. Hilkiah Igoni
3. Hilkiah Igoni And Sepiribo Kingnana

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

تولید شده به جرم جامد فرار($\nu_{S\ (CH4/VS)}$) ، ضریب تبدیل اکسیژن مورد نیاز شیمیایی به جامد فرار(M)، غلظت جامد فرار ورودی($S_{cvs\ (i)}$) و غلظت پساب خروجی($S_{ce\ (O)}$) قابل دستیابی است،که بدین منظور از معادله ۳۲ استفاده می‌شود. همچنین غلظت گاز متان در جمع کننده گاز(C_{Cmgc})،که وابسته به ضریب انتشار گاز متان(K_L)،سطح وحجم راکتور، غلظت اشباع گاز در مایع(C_{cgsl})، غلظت واقعی گاز متان محلول(C_{camd}) و مدت زمان ماند هیدرولیکی(ϑ_h) می‌باشد، با استفاده از معادله ۳۳ قابل دستیابی است (هیلکیاه ایگونی، ۲۰۱۶ ؛ هیلکیاه ایگونی و سپیریبو کینگنانا،۲۰۱۶ ؛ هیلکیاه ایگونی و سپیریبو کینگنانا،۲۰۱۷).

در این مدل دبی حجمی گاز متان تولید شده ($\dot{Q}_{(CH4)}$)، با استفاده از دو پارامتر نسب حجم متان استوکیومتریک تولید شده به بازدهی تبدیل جرم جامد فرار تجزیه شده ($\nu_{S\ (CH4/VBS)}$)، و کل جرم جامد فرار تجزیه شده (بادر نظرگرفتن راندمان تجزیه وتبدیل به بیوگاز)($\dot{m}_{vbs}$) قابل دستیابی است که بدین منظور از معادله ۳۴ استفاده می‌شود. در این مدل حرارت مورد نیاز لجن ورودی($\dot{Q}_{hrs\ (i)}$)، تابعی از دبی جرمی جامد خشک ($\dot{m}_{ds}$)، غلظت جامد خشک ($X_{dsc\ (Cstr)}$)، دمای راکتور(T_r) برابر ۳۵ درجه سانتی گراد، دمای لجن ورودی (T_S) برابر با ۲۰ درجه سانتی گراد وگرمای ویژه آب ($C_{p\ (WATER)}$) می‌باشد و با استفاده از معادله ۳۸ قابل دستیابی است. در این مطالعه جهت دستیابی به میزان انتقال حرارت انجام شده از سطوح راکتور، دمای محیط (T_a) برابر ۱۰- درجه سانتی گراد (میانگین دمایی سردترین روز سال)، دمای زمین(T_g) برابر با ۵ درجه سانتی گراد و دمای راکتور(T_r) برابر ۳۵ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است و همچنین جنس بدنه راکتور از بتن می‌باشد که ضرایب انتقال حرارت (U) از دیواره،کف و سقف راکتور به ترتیب ۴/۹، ۲/۸۵ و۴/۷ وات بر متر مربع درجه سانتی گراد می‌باشد، میزان انتقال حرارت انجام شده و حرارت مورد نیاز راکتور با استفاده از معادلات ۴۳،۴۲،۴۱،۴۰،۳۹ قابل دستیابی است. در این مطالعه ارزش حرارتی بالای بیوگاز (HHV_{BIOGAS}) و پایین بیوگاز (LHV_{BIOGAS}) با توجه به درصد متان استوکیو متریک (X_{CH4}) که برابر با ۵۵/۹۸ درصد می‌باشد و ارزش حرارتی بالای متان ($HHV_{(CH4)}$) وپایین متان ($LHV_{(CH4)}$) با استفاده از معادلات ۴۶ و۴۹ تخمین زده شده

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

است. در این مطالعه توان و انرژی الکتریکی سالیانه تولید شده با دو فرض ارزش حرارتی بالا وپایین سوخت با استفاده از معادلات ۵۱،۵۰،۴۸،۴۷ تخمین زده شده است، راندمان الکتریکی (η_{el}) دستگاه‌های مولد برق در این نیروگاه ۳۵ درصد در نظرگرفته شده است. در این مطالعه به منظور ارزیابی اقتصادی نیروگاه از نرم افزار رت اسکرین [1] استفاده شده است، دوره ی ساخت و ساز برای احداث واحدهای بیوگاز یک سال در نظر گرفته شده است. طول عمر پروژه نیز برابر ۲۰ سال می‌باشد و متوسط نرخ تورم در نظر گرفته شده ۱۵ درصد می‌باشد (بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۹).هزینه سرمایه گذاری نیروگاه شامل هزینه‌های ثابت و متغیر می‌باشد، هزینه ثابت نیروگاه شامل خرید تجهیزات، نصب و راه اندازی و هزینه ساخت نیروگاه می‌باشد، هزینه ثابت نیروگاه با استفاده از معادله ۵۲ قابل دستیابی است (آلزاته، ۲۰۱۹) که در این معادله (I) هزینه احداث نیروگاه بر حسب دلار و ($P_{e(LHV)}$) توان الکتریکی نیروگاه بر حسب کیلووات می‌باشد. در این مطالعه عملکرد نیروگاه در سال ۸۷۶۰ ساعت در نظر گرفته شده است،که به منظور بالا بردن ضریب دسترسی در این نیروگاه،یک عدد مولد برق کمکی دیگر نیز برای واحد نیروگاهی در نظر گرفته شده است، در این مطالعه هزینه ثابت خرید مولد کمکی مطابق پایگاه داده نرم افزار ۴۶۰ دلار به ازاء هر کیلو وات می‌باشد(رت اسکرین، ۲۰۲۰). در این مطالعه هزینه متغیر نیروگاه، شامل هزینه نگه داری سالانه تاسیسات مکانیکی، مولدها ی بیوگاز، مبدل ها،کمپرسورها و غیره می‌باشد، که این هزینه ۱۶ درصد هزینه‌های سرمایه گذاری ثابت می‌باشد (آلزاته، ۲۰۱۹)، و هزینه تعمیر و نگه داری سالیانه مولد برق، ۳۲/۵۵ دلار به ازاء هر کیلو وات در سال مطابق پایگاه داده نرم افزار می‌باشد (رت اسکرین، ۲۰۲۰). تعداد پرسنل مورد نیاز در این واحد نیروگاهی ۱۰ نفر فرض شده است، حداقل هزینه در نظر گرفته شده برای هر نفر در سال ۱۳۹۹ با احتساب حقوق، داشتن دو فرزند، بیمه وسنوات طبق قانون کار، مبلغ ۴۵۳,۷۷۹,۱۶۰ ریال می‌باشد (وزارت تعاون، کار و رفاه اجتماعی، ۱۳۹۹).

1. Retscreen

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

درآمد واحد نیروگاهی شامل فروش برق و درآمد حاصل از فروش گواهی کاهش انتشار کربن می‌باشد، که نرخ پایه تضمین شده خرید برق توسط وزارت نیرو ۵۲۵۰ ریال به ازاء هرکیلو وات ساعت (وزارت نیرو، ۱۳۹۸) و نرخ درآمد کاهش انتشار کربن ۳۵ دلار به ازاء هر تن دی اکسید کربن می‌باشد. در این مطالعه نرخ افزایش خریدتضمینی برق برای هرسال، ۱۰ درصد در نظر گرفته شده ونرخ افزایش اعتبار کاهش کربن و هزینه تبادل اعتبارات کربن به ترتیب ۱۵ و ۵ درصد نظر گرفته شده است. دراین مطالعه نرخ تبدیل ارز به ازای هر دلار ۱۱۰,۰۰۰ ریال در نظر گرفته شده است(بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۹). منابع تأمین مالی در نظرگرفته شده در این مطالعه ۷۰ درصد از طریق سرمایه گذار و ۳۰ درصد از طریق وام تأمین می‌شود و همچنین نرخ بهره وام ۱۲ درصد و مدت زمان باز پرداخت وام ۵ سال در نظرگرفته شده است. میزان مشوق‌های در نظر گرفته شده ۱۰ درصد کل هزینه اولیه می‌باشد. در این مطالعه نرخ تخفیف و نرخ سرمایه گذاری دوباره ۹ درصد در نظر گرفته شده اند و همچنین ضریب تعدیل ۰/۱ می‌باشد. در این مطالعه داده‌ها ی مورد نیاز طراحی درجدول ۵ ارایه شده است.

$\dot{m}_{Total\ (msw)} = 30000\ \frac{kg}{day}$

$X_R = ۳\ \%$

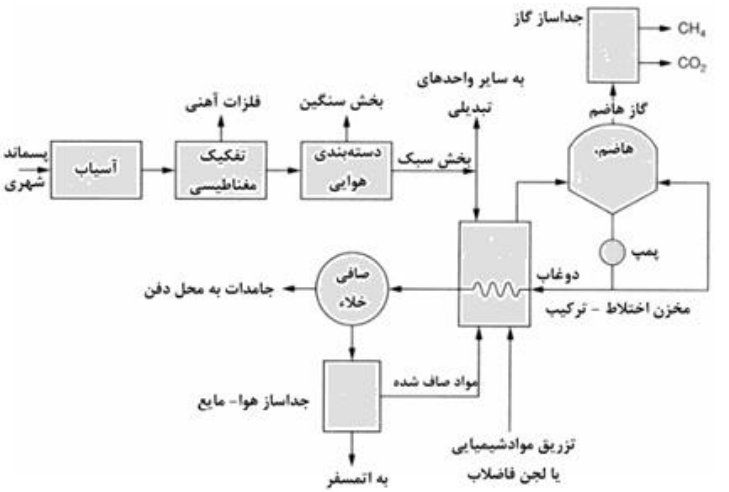
$\dot{m}_{Total\ organic\ waste} = ۲۹۱۰۰\ \frac{kg}{day}$

$\dot{m}_{Organic\ (Cstr)} = 1818.75\ \frac{kg}{day}$

$X_{dsc\ (Cstr)} = ۱۰\ \%$

$N_{Reactor} = ۱۶$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]



نمودار ۱. جریان فرآیند هضم بی‌هوازی با جامدات پایین برای بخش آلی پسماند شهری

۳-۲. داده‌های طراحی

ترکیب زباله‌های شهر مشهد درسال ۱۳۹۸ مطابق جدول ۲ گزارش گردیده که این جدول اساس محاسبات خواهد بود.

جدول۲. آنالیز فیزیکی پسماند (سازمان مدیریت پسماند شهرداری مشهد، ۱۳۹۸)

اجزاء	درصد
پسماند غذایی	۶۶/۱
کاغذ و مقوا	۵/۸
چوب و مواد سلولزی	۵/۵
پلاستیک نرم	۹/۶
پلاستیک سخت	۰/۷
پلی استایرن	۱/۶
پت	۱/۷
شیشه	۱/۵
فلزات	۱/۲
لاستیک	۰/۲۳
پارچه و منسو جات	۲/۵
سایر مواد	۳/۵۷
جمع	۱۰۰

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

جدول۳ آنالیز تحلیلی شیمیایی پسماندهای شهری می‌باشد و می‌تواند به عنوان مبانی محاسبات استوکیومتریک و موازنه جرم مورد استفاده قرار بگیرد. ماکروشیمی پسماند یکی از ورودی‌های بسیار مهم در تخمین میزان گازهای استوکیومتریک و انرژی نهایی می‌باشد.

جدول۳. آنالیز شیمیایی پسماند شهری (نیسن[1]، ۲۰۱۰)

اجزاء	C	H	O	N	S
پسماند غذایی	۴۹/۰۶	۶/۶۲	۳۷/۵۵	۱/۶۸	۰/۲
کاغذ ومقوا	۴۳/۴۱	۵/۸۲	۴۴/۳۲	۰/۲۵	۰/۲
پلاستیک نرم	۶۰	۷/۲	۲۲/۸	۰	۰
پلاستیک سخت	۶۷/۲۱	۹/۷۲	۱۵/۸۲	۰/۴۶	۰/۰۷
پلی استایرن	۸۷/۱	۸/۴۵	۳/۹۶	۰/۲۱	۰/۰۲
پت	۸۴/۵۴	۱۴/۱۸	۰	۰/۰۶	۰/۰۳
لاستیک	۷۷/۶۵	۱۰/۳۵	۰	۰	۲
فلزات	۴/۵۴	۰/۶	۴/۳	۰/۰۵	۰/۰۱
پارچه و منسوجات	۴۶/۱۹	۶/۴۱	۴۱/۸۵	۲/۱۸	۰/۲
شیشه	۰/۵۲	۰/۰۷	۰/۳۶	۰/۰۳	۰
چوب	۴۹/۷	۶/۱	۴۲/۵	۰/۱	۰/۲

ترکیبات ماده اولیه ورودی به هر راکتور پس از حذف وجداسازی پلی استایرن، پت، فلزات، شیشه وسایر مواد نظیرخاک،سنگ و... از مقادیر جدول ۴ پیروی می‌کند.

1. Niessen

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

جدول۴. ترکیبات ماده اولیه راکتور

اجزاء	درصد %	جرم kg	جرم جامدخشک kg	رطوبت %	دانسیته پسماند $\frac{kg}{m^3}$
پسماند غذایی	۷۳/۰۹۵	۷۳۰/۹۵	۲۸۳/۶۱	۶۱/۲	۴۵۰
کاغذ و مقوا	۶/۴۱۳	۶۴/۱۴	۵۳/۸۸	۱۶	۲۳۶
چوب و مواد سلولزی	۶/۰۸۲	۶۰/۸۲	۵۶/۰۲	۷/۹	۲۴۵
پلاستیک نرم	۱۰/۶۱۵	۱۰۶/۱۶	۹۰/۵۵	۱۴/۷	۸۶
پلاستیک سخت	۰/۷۷۴	۷/۷۴	۷/۲۴	۶/۵	۱۳۰
لاستیک	۰/۲۵۴	۲/۵۴	۲/۳۸	۶/۵	۱۳۱
پارچه و منسو جات	۲/۷۶۴	۲۷/۶۵	۲۰/۸۷	۲۴/۵	۸۰
جمع کل	۱۰۰	۱۰۰۰	۵۱۴/۵۴	۴۸/۵۴۵	۲۶۲/۹۲۹

مطابق جدول ۴ درصد رطوبت و جامد خشک ماده اولیه مطابق مقادیر زیر می‌باشد :

رطوبت نسبی:

Φ_{ms}=48.545 %

جرم جامد خشک :

X_{ds}=51.454 %

جدول۵. داده‌های طراحی

پارامتر	مقدار	واحد
درصد جامد فرار (سازمان مدیریت پسماند شهرداری مشهد)	۷۱/۳	%
درصد مواد غیرآلی ASH (سازمان مدیریت پسماند شهرداری مشهد)	۲۸/۷	%
دانسیته پسماند خرد شده	۴۵۰	$\frac{kg}{m^3}$
دانسیته آب	۱۰۰۰	$\frac{kg}{m^3}$
دمای راکتور	۳۵	°C
دمای لجن ورودی به راکتور	۲۰	°C

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

پارامتر	مقدار	واحد
دمای کف زمین	۵	°C
دمای محیط	-۱۰	°C
غلظت جامد خشک در راکتور CSTR	۱۰	%
درصد تجزیه پذیری	۸۰	%
درصد بازدهی تبدیل تجزیه جامد فرار به بیوگاز	۸۳	%
دانسیته متان	۰/۷۱۴	$\frac{kg}{m^3}$
دانسیته دی اکسید کربن	۱/۹۶	$\frac{kg}{m^3}$
دانسیته بیوگاز	۱/۲۶۲	$\frac{kg}{m^3}$
ضریب انتقال حرارت از دیواره راکتور	۴/۹	$\frac{w}{m^2.\ °C}$
ضریب انتقال حرارت از کف راکتور	۲/۸۵	$\frac{w}{m^2.\ °C}$
ضریب انتقال حرارت از سقف راکتور	۴/۷	$\frac{w}{m^2.\ °C}$
گرمای ویژه آب	۴/۱۸۶	$\frac{kJ}{kg.k}$
حداکثر نرخ استفاده از غلظت بستر	۰/۳۸۲	day^{-1}
قطر همزن	۰/۶	m
عدد نیوتون همزن پروانه ای	۰/۵	-
سرعت چرخش همزن	۱۵۰	rpm
زمان کار همزن	۵	$\frac{min}{hr}$
نرخ تسعیر ارز (دلار)	۱۱۰,۰۰۰	ریال
نرخ فروش برق	۵۲۵۰	$\frac{Rial}{Kwh}$
در آمد کاهش گا زهای گلخانه ای	۳۵	$\frac{\$}{ton.co_2}$
عمر پروژه	۲۰	سال
نرخ تورم	۱۵	%
ضریب تعدیل	۰/۱	-
نرخ تخفیف	۹	%
نرخ سرمایه گذاری دوباره	۹	%
نسبت بدهی	۳۰	%

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

پارامتر	مقدار	واحد
نرخ بهره وام	۱۲	%
مدت بدهی	۵	سال
تعداد کارمند	۱۰	نفر
جمع هزینه پرداختی برای هر کارمند شامل حقوق +سنوات+ حق بیمه(ماهیانه)	۳۷,۸۱۴,۹۳۰	ریال
هزینه ثابت خرید مولد برق کمکی	۴۶۰	$\frac{\$}{kw}$
هزینه تعمیرو نگه داری تاسیسات نیروگاه	۱۶	٪
هزینه تعمیرو نگه داری مولد برق	۳۲/۵۵	$\frac{\$}{kw.year}$
تعداد مولد برق کمکی	۱	دستگاه
طول مدت اعتباری کاهش گاز گلخانه ای	۲۰	سال
نرخ افزایش اعتبار کاهش گاز گلخانه ای	۱۵	درصد
هزینه تبادل اعتبارات گازهای گلخانه ای	۵	درصد
نرخ افزایش سالانه خرید برق	۱۰	درصد

٤-۲. معادلات حاکم

۱-٤-۲. موزانه جرم واستوکیومتریک

حجم گاز آزاد شده در زمان تجزیه بی‌هوازی را می‌توان از راه‌های متعددی برآورد کرد، به عنوان مثال اگر اجزاء آلی خاص موجود در پسماند شهری(به استثنای پلاستیک) به صورت فرمول کلی $C_nH_aO_b$ در نظر گرفته شوند،کل حجم گاز تولیدی با فرض تبدیل زیستی کامل پسماند آلی به CO_2 و CH_4 را می‌توان با استفاده از معادله ۱ که به معادله بازول شناخته می‌شود بدست آورد :

$$C_nH_aO_b + (n - \frac{a}{4} - \frac{b}{2})H_2O \Rightarrow (\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4})CH_4 + (\frac{n}{2} - \frac{a}{8} + \frac{b}{4})CO_2 \qquad (۱)$$

با استفاده ازمعادله۱ و مشخصات فیزیکی و شیمیایی درج شده درجدول ۳و ۴ می‌توان فرمول شیمیایی زیر را بدست آورد:

$$C_{55.94}H_{86.98}O_{29.71} \Rightarrow C_{56}H_{87}O_{30}$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

و همچنین میزان اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) از معادله ۲ قابل محاسبه است:

$$C_n H_a O_b N_c + \left(n + \frac{a}{4} - \frac{b}{2} - \frac{3c}{4}\right) O_2 \Rightarrow (n)\, CO_2 + \left(\frac{a}{2} - \frac{3c}{2}\right) H_2O + (c)\, NH_3 \quad (۲)$$

درصورتیکه جامد فرار ۷۱/۳ درصد و مقدار تجزیه مواد ارگانیک ۸۰ درصد و همچنین درصد راندمان و تبدیل مواد ارگانیک به بیوگاز ۸۳ درصد باشد نتایج حاصل از موازنه جرم در جدول 6 گزارش می‌گردد:

جدول۶. نتایج موازنه جرم واستوکیومتریک

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
درصد متان	X_{CH4}	۵۵/۹۸۲	%
درصد دی اکسید کربن	X_{CO2}	۴۴/۰۱۷	%
حجم گاز متان تولیدی به ازاء هر کیلو گرم جامد فرار(VS)	$v_{S\,(CH4\,/\,VS)}$	۰/۳۷۶	$\frac{m^3\ n\ CH4}{kg\ VS}$
حجم گاز متان تولیدی به ازاء هر کیلو گرم جامد فرار تجزیه شده(VDS)	$v_{S\,(CH4\,/\,VDS)}$	۰/۴۷۰۹	$\frac{m^3\ n\ CH4}{kg\ VDS}$
حجم بیو گاز تولیدی به ازاء هر کیلو گرم جامد فرارتجزیه شده(VDS)	$v_{S\,(BIOGAS\,/\,VDS)}$	۰/۸۴۱	$\frac{m^3\ n\ BIOGAS}{kg\ VDS}$
حجم گاز متان تولیدی به ازاء هر کیلو گرم جامد فرارتجزیه شده با در نظر گرفتن بازدهی تبدیل تجزیه(VBS)	$v_{S\,(CH4\,/\,VBS)}$	۰/۵۶۷	$\frac{m^3\ n\ CH4}{kg\ VBS}$
حجم بیو گاز تولیدی به ازاء هر کیلو گرم جامد فرارتجزیه شده با در نظر گرفتن بازدهی تبدیل تجزیه(VBS)	$v_{S\,(BIOGAS\,/\,VBS)}$	۱/۰۱۳	$\frac{m^3\ n\ BIOGAS}{kg\ VBS}$
اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)	COD	۱/۵۸۳	$\frac{kg\ COD}{m^3.day}$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

۲-٤-۲. بالانس خوراک در فرایند هضم

در معادله ۳ کل جرم جامد خشک موجود در پسماند($\dot{m}_{ds}$)، با استفاده از درصد جامد خشک (X_{ds}) و جرم پسماند ارگانیک ورودی به هر راکتور($\dot{m}_{Organic\ (Cstr)}$) قابل حصول است:

$$\dot{m}_{ds} = \dot{m}_{Organic\ (Cstr)} \times X_{ds} \quad (۳)$$

$$\dot{m}_{Organic\ (Cstr)} = 1818.75\ \frac{kg}{day}$$

$$X_{ds} = 51.454\ \%$$

$$\dot{m}_{ds} = 935.825\ \frac{kg}{day}$$

در معادله۴ کل جرم رطوبت موجود در پسماند نشان داده شده است، که پس از کسر جرم جامد خشک($\dot{m}_{ds}$) از کل پسماند ارگانیک تعریف می‌شود :

$$\dot{m}_{Total\ waste\ moisture} = \dot{m}_{Organic\ (Cstr)} - \dot{m}_{ds} \quad (۴)$$

در معادله ۵ درصد آب مورد نیاز برای رقیق سازی نشان داد ه شده است :

$$X_{rm} = 100 - X_{dsc\ (Cstr)} \quad (۵)$$

درمعادله ۵ غلظت جامدخشک درراکتورهای پیوسته ۱۰درصد درنظرگرفته شده است:

$$X_{dsc\ (Cstr)} = 10\ \%$$

در معادله ۶ جرم آب مورد نیاز راکتور($\dot{m}_{Wr}$)،که وابسته به جرم جامد خشک ($\dot{m}_{ds}$) و غلظت جامد خشک ($X_{dsc\ (Cstr)}$)می باشد نشان داده شده است :

$$\dot{m}_{Wr} = \frac{\dot{m}_{ds} \times 100}{X_{dsc\ (Cstr)}} - \dot{m}_{ds} \quad (۶)$$

در معادله ۷ جرم مواد آلی موجود در جرم جامد خشک خوراک($\dot{m}_{vs}$) نشان داده شده است، که وابسته به درصد غلظت جامد فرار(X_{vs}) می‌باشد :

$$\dot{m}_{vs} = \dot{m}_{ds} \times X_{vs} \quad (۷)$$

درمعادله ۷ در صد جامد فرار برابر با :

$$X_{vs} = 71.3\ \%$$

درمعادله ۸ نماد($\dot{m}_{ash}$) بیانگردبی جرمی مواد غیر آلی (غیر قابل تجزیه) ورودی به راکتور می‌باشد:

$$\dot{m}_{ash} = \dot{m}_{ds} \times X_{ash} \quad (۸)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

در معادله ۸ درصد مواد غیرقابل تجزیه برابر با :

$X_{ash} = 28.7\ \%$

مقدار دبی جرمی جامد فرار تجزیه شده($\dot{m}_{vds}$)که وابسته به درصد تجزیه پذیری مواد آلی ارگانیک می‌باشد، با استفاده از معادله ۹ قابل دستیابی است :

$$\dot{m}_{vds} = \dot{m}_{vs} \times X_{vds} \qquad X_{vds} = 80\% \tag{۹}$$

مقدار دبی جرمی مواد جامد فرار تجزیه شده که قابلیت تبدیل شدن به بیوگاز را دارند با استفاده از معادله ۱۰ قابل دستیابی است، که این مقدار وابسته به درصد بازهی تبدیل می‌باشد :

$$\dot{m}_{vbs} = \dot{m}_{vds} \times X_{vbs} \tag{۱۰}$$

در معادله ۱۰ راندمان و بازدهی تبدیل تجزیه به بیوگاز برابر با :

$X_{vbs} = 83\ \%$

معادله ۱۱ نشان دهنده مقدار جرم لجن باقیمانده از فرایند هضم می‌باشد :

$$\dot{m}_{rsvs} = \dot{m}_{vs} - \dot{m}_{vbs} \tag{۱۱}$$

کل لجن باقیمانده حاصل از مواد غیرآلی ورودی به راکتور وتجزیه نشده در فرایند هضم در معادله ۱۲ نشان داده شده است :

$$\dot{m}_{Total\ rs} = \dot{m}_{ash} + \dot{m}_{rsvs} \tag{۱۲}$$

وزن مخصوص لجن خشک که وابسته به درصد غلظت جامد فرار می‌باشد، در معادله ۱۳ نشان داده شده است :

$$\gamma_{ds} = \frac{250}{100 + 1.5\, X_{vs}} \tag{۱۳}$$

درمعادله ۱۳ در صد جامد فرار برابر با :

$X_{vs} = 71.3\ \%$

وزن مخصوص لجن تر با استفاده از معادله ۱۴ قابل دستیابی است، که این پارامتر وابسته به وزن مخصوص لجن خشک و درصد رطوبت موردنیاز راکتور می‌باشد :

$$\gamma_{Ws} = \frac{100 \times \gamma_{ds}}{(X_{rm} \times \gamma_{ds}) + (100 - X_{rm})} \tag{۱۴}$$

درمعادله ۱۴ در صد رطوبت راکتور برابر با :

$X_{rm} = 90\ \%$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

کل دبی جرمی خوراک ورودی به راکتور که شامل جرم جامد خشک پسماند و آب مورد نیاز می‌باشد از معادله ۱۵ قابل دستیابی است، لازم به ذکر است، که جهت برقراری موازنه جرم در مدل سازی آب موجود در پسماند از کل آب مورد نیاز برای هضم کسر می‌گردد :

$$\dot{m}_{\text{Total mass reactor}} = \dot{m}_{ds} - \dot{m}_{\text{Total waste moisture}} + \dot{m}_{Wr} \qquad (۱۵)$$

دبی حجمی ورودی خوراک که وابسته به دبی جرمی خوراک، وزن مخصوص لجن تر، چگالی آب و غلظت جامد خشک می‌باشد با استفاده از معادله ۱۶ قابل دستیابی است :

$$\dot{V}_{dvr\,(i)} = \frac{\dot{m}_{total\ mass\ reactor}}{\gamma_{Ws} \times \rho_{water} \times X_{dsc\,(Cstr)}} \qquad (۱۶)$$

درمعادله ۱۶ غلظت جامد خشک در راکتور و چگالی آب برابر با :

$X_{dsc\,(Cstr)} = 10\ \%$

$\rho_{water} = 1000\ \frac{kg}{m^3}$

میزان غلظت مواد جامد فرار ورودی به راکتور در معادله ۱۷ نشان داده شده است :

$$S_{cvs\,(i)} = \frac{\dot{m}_{Vs}}{\dot{V}_{dvr\,(i)}} \qquad (۱۷)$$

میزان درصد لجن هضم شده در راکتور در معادله ۱۸ نشان داده شده است :

$$X_{dgs} = \frac{\dot{m}_{Total\ rs}}{\dot{m}_{ds}} \times 100 \qquad (۱۸)$$

دبی حجمی لجن هضم شده در راکتور با استفاده از معادله ۱۹ قابل دستیابی است :

$$\dot{V}_{dgs} = \frac{\dot{m}_{Total\ rs}}{\gamma_{ds} \times \rho_{water} \times X_{dgs}} \qquad (۱۹)$$

معادله ۲۰ نشان دهنده میزان تخریب پذیری موادآلی ارگانیک می‌باشد :

$$BF = 0.83 - 0.028\ LC \qquad (۲۰)$$

درمعادله ۲۰ در صد لیگنین برابر با :

$LC = 83\ \%$

میزان بخش غیر قابل تجزیه مواد آلی در معادله ۲۱ نشان داده شده است :

$$R = 1 - BF \qquad (۲۱)$$

میزان غلظت خوراک ورودی که قابلیت تجزیه پذیری در هاضم را داشته باشد، با استفاده از معادله ۲۲ قابل دستیابی است :

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

$$S_{cb\,(i)} = S_{cvs\,(i)} - (R \times S_{cvs\,(i)}) \qquad (۲۲)$$

در معادله ۲۲ بخش غیر قابل تجزیه خوراک برابر با :

$R = 0.19324$

معادله ۲۳ بیانگر میزانی از غلظتی پساب است که قابلیت تجزیه پذیری در هاضم را داشته ولی درطی فرایند هضم بنا به دلایلی تجزیه نشده واز هاضم خارج شده است :

$$S_{cbe} = S_{cb\,(i)} \times (1 - X_{vds}) \qquad (۲۳)$$

درمعادله ۲۳ درصد تجزیه جامد فرار برابر با :

$X_{vds} = 80\ \%$

معادله ۲۴ بیانگر میزان کل غلظت پساب خروجی از سیستم است :

$$S_{ce\,(O)} = S_{cvs\,(i)} \times (1 - X_{vds}) + (X_{vds} \times S_{cvs\,(i)} \times R) \qquad (۲۴)$$

معادله ۲۵ میزان درصد تثبیت مخلوط در هاضم می‌باشد که برابر با :

$$E_{sb} = \left(\frac{S_{cvs\,(i)} - S_{ce\,(O)}}{S_{cvs\,(i)}}\right) \times 100 \qquad (۲۵)$$

۳-٤-۲. برآورد زمان ماند هیدرولیکی

معادله ۲۶ نیمه اشباع ثابت خوراک،که وابسته به میزان نرخ استفاده از غلظت بستر می‌باشد :

$$K_S = 204.6 \times k \qquad (۲۶)$$

درمعادله ۲۶ حداکثر نرخ استفاده از غلظت بستر :

$K = 0.382\ day^{-1}$

معادله ۲۷ بیانگر زمان ماند هیدولیکی مورد نیاز برای فرایند هضم می‌باشد، که وابسته به میزان غلظت مواد جامد فرار ورودی، غلظت پساب خروجی، حداکثر نرخ استفاده از غلظت بستر، نیمه اشباع ثابت، و غلظت میکروبی پساب می‌باشد :

$$\vartheta_h = \frac{(S_{cvs\,(i)} - S_{ce\,(O)}) \times (K_S + S_{ce\,(O)})}{(K \times S_{ce\,(O)} \times X_{cme})} \qquad (۲۷)$$

درمعادله ۲۷ حداکثر نرخ استفاده از غلظت بستر ونیمه اشباع ثابت برابر با :

$K = 0.382\ day^{-1}$

$K_S = 0.0782\ \frac{kg}{m^3}$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

و همچنین غلظت میکروبی پساب :

$$X_{cme} = 1.5 \frac{kg}{m^3}$$

٤-٤-٢. ابعاد واندازه راکتور

معادله ۲۸ نشان دهنده حجم راکتور می‌باشد،که وابسته به میزان دبی حجمی خوراک و زمان ماند هیدرولیکی است :

$$V_{r\,(Cstr)} = \dot{V}_{dvr\,(i)} \times \vartheta_h \qquad (۲۸)$$

معادلات ۳۱،۳۰،۲۹ به ترتیب برابر با قطر، ارتفاع و سطح مقطع راکتور می‌باشد :

$$D = \sqrt[3]{\frac{8 \times V_{r\,(Cstr)}}{\pi}} \qquad (۲۹)$$

$$H = \frac{D}{2} \qquad (۳۰)$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} \qquad (۳۱)$$

٥-٤-٢. حجم بیوگاز و متان تولید شده

درمعادله ۳۲ میزان عبارت غلظت واقعی گاز متان محلول نشان داده شده است،که نماد ($\nu_{S\,(CH4/VS)}$) برابر با نسبت حجم استوکیومتریک گازمتان تولید شده به جرم جامد فرار می‌باشد، و همچنین عبارت (M) برابر با ضریب تبدیل COD به VS می‌باشد :

$$C_{camd} = \nu_{S\,(CH4/VS)} \times M\,(S_{cvs\,(i)} - S_{ce\,(O)})$$

$$M = 1.583 \text{ (conversion factor COD to VS)} \qquad (۳۲)$$

میزان غلظت گاز متان در جمع کننده گاز در معادله ۳۳ نشان داده شده است،که وابسته به سطح و حجم جمع کننده، غلظت واقعی گاز متان محلول، ضریب انتشار گاز متان، غلظت اشباع گاز در مایع و زمان ماند هیدرولیکی می‌باشد :

$$C_{Cmgc} = -K_L \times \frac{A_{\text{interfacial gas transfer area}}}{V_{\text{volume of liquid}}} \times (C_{cgsl} - C_{camd}) \times \vartheta_h \qquad (۳۳)$$

در معادله ۳۳ ضریب انتشار گاز متان و غلظت اشباع گاز در مایع برابر با :

$$K_L = 0.0984 \frac{m}{day}$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

$C_{cgsl} = 0.0057 \frac{kg}{m^3}$

در معادله ۳۴ دبی حجمی گاز متان تولید شده نشان داده شده است، که عبارت $\nu_{S\ (CH4/VBS)}$ برابر با نسبت حجم استوکیومتریک گاز متان تولید شده به بازدهی تبدیل تجزیه جرم جامد فرار می‌باشد :

$$\dot{Q}_{(CH4)} = \nu_{S\ (CH4/VBS)} \times \dot{m}_{vbs} \quad (۳۴)$$

معادلات ۳۵ و۳۶ به ترتیب بیانگر دبی جرمی گاز متان و دبی حجمی بیوگاز تولید شده می‌باشند:

$$\dot{m}_{(CH4)} = \dot{Q}_{(CH4)} \times \rho_{CH4} \quad (۳۵)$$

درمعادله ۳۵ دانسیته گاز متان برابر با :

$$\rho_{CH4} = 0.714 \frac{kg}{m^3\ n} \quad \dot{Q}_{biogas} = \frac{\dot{Q}_{(CH4)} \times 100}{X_{CH4}} \quad (۳۶)$$

در معادله ۳۶ درصد متان استوکیومتریک برابر با :

$X_{CH4} = 55.982\ \%$

کل دبی حجمی بیو گاز تولید شده، با در نظر گرفتن ۱۶ عدد مولد بیوگاز برای نیروگاه، در معادله۳۷ نشان داده شده است :

$$\dot{Q}_{Total\ biogas} = \dot{Q}_{biogas} \times N_{reactor} \quad (۳۷)$$

٦-٤-٢. انرژی مورد نیاز هاضم

معادله ۳۸ بیانگرحداقل حرارت مورد نیاز لجن ورودی به راکتور، برای انجام واکنش‌های شیمیایی می‌باشد:

$$\dot{Q}_{hrs\ (i)} = \dot{m}_{ds} \times \frac{100}{X_{dsc\ (Cstr)}} \times (T_r - T_S) \times \frac{1}{24} \times C_{p\ (WATER)} \quad (۲۸)$$

در معادله ۳۸ دمای راکتور برابر با شرایط مزوفیلیک در نظر گرفته شده که برابر با :

$T_r = 35\ ℃$

و دمای لجن ورودی :

$T_S = 20\ ℃$

و همچنین گرما ویژه آب برابر با :

$C_{p\ (WATER)} = 4.186 \frac{KJ}{kg,\ k}$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

میزان اتلاف حرارت از طریق دیواره،کف و سقف راکتور به ترتیب در معادلات ۴۱،۴۰،۳۹ نشان داده شده است :

$$\dot{Q}_{\text{Heat loss wall}} = UA\,(T_r - T_a) \qquad (۳۹)$$

درمعادله ۳۹ دمای محیط (T_a) برابر با دمای میانگین شهر مشهد در زمستان در نظرگرفته شده که برابر با :

T_a = -10 ℃

و همچنین ضریب انتقال حرارت دیواره راکتور :

$$U = 4.9\ \frac{w}{m^2.℃}$$

$$\dot{Q}_{Heat\ loss\ floor} = UA\,(T_r - T_g) \qquad (۴۰)$$

در معادله ۴۰ دمای زمین برابر با:

T_g= 5 ℃

و همچنین ضریب انتقال حرارت کف راکتور :

$$U = 2.85\ \frac{w}{m^2.℃} \qquad \dot{Q}_{\text{Heat loss roof}} = UA\,(T_r - T_a) \qquad (۴۱)$$

در معادله ۴۱ ضریب انتقال حرارت سقف راکتور برابر با:

$$U=4.7\ \frac{w}{m^2.℃}$$

معادلات ۴۲ و ۴۳ به ترتیب بیانگر میزان اتلاف حرارت کل از سطوح راکتور و کل حرارت مورد نیاز برای انجام واکنش‌ها شیمیایی می‌باشند :

$$\dot{Q}_{\text{Total Heat loss}} = \dot{Q}_{\text{Heat loss wall}} + \dot{Q}_{\text{Heat loss floor}} + \dot{Q}_{\text{Heat loss roof}} \qquad (۴۲)$$

$$\dot{Q}_{\text{Total heat required}} = \dot{Q}_{\text{hrs (i)}} + \dot{Q}_{\text{Total Heat loss}} \qquad (۴۳)$$

۷-٤-۲. توان همزن

میزان توان مورد نیاز همزن‌های راکتور از طریق معادلات ۴۴ و۴۵ قابل حصول است :

$$P_{mixer}=1.3\times Ne_{BRR}\times \rho_{(sludg)} \times n^3_{BRR}\times D^5_{BRR} \qquad (۴۴)$$

در معادله ۴۴ عدد نیوتونی،تعداد دور و قطر پروانه برابر با :

Ne_{BRR}=0.5

n_{BRR}= 150 RPM

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

$D_{BRR}= 0.6\ m$

$$P_{Mixers(Total)}=N_{Mixers}\times t_{Wm}\times P_{mixer} \quad (۴۵)$$

در معادله ۴۵ تعداد همزن‌های هر راکتور۲ عدد در نظر گرفته شده و زمان کار همزن‌ها ۵ دقیقه در هر ساعت در نظرگرفته شده است :

$N_{Mixers}=2$

$t_{Wm}= 5\ \frac{min}{hr}$

۸-٤-۲. توان نیروگاه

در این مطالعه معادلات ۴۶ و۴۹ برای دستیابی به ارزش حرارتی بالا و پایین بیوگاز و معادلات ۴۷، ۴۸، ۵۱،۵۰ به منظور برآورد توان و انرژی الکتریکی سالیانه تولید شده با دو فرض سوخت با ارزش حرارتی بالا و پایین مورد استفاده قرار گرفته اند، لازم به ذکر است ارزش حرارتی بالا وپایین متان در جدول ۷ گزارش شده است :

جدول ۷. مشخصات ارزش حرارتی متان و راندمان الکتریکی نیروگاه

HHV (CH4) $\frac{MJ}{m^3}$	η_{el} %	LHV (CH4) $\frac{MJ}{m^3}$	X_{CH4} %
۳۹/۸۷	35	۳۵/۹۳	۵۵/۹۸

$$LHV_{BIOGAS} = \frac{X_{CH4}}{100}\times LHV_{(CH4)} \quad (۴۶)$$

$$P_{e(LHV)}= \eta_{el}\times \dot{Q}_{Total\ BIOGAS}\left(\frac{m^3}{hr}\right)\times(LHV)_{BIOGAS} / 3.6 \quad (۴۷)$$

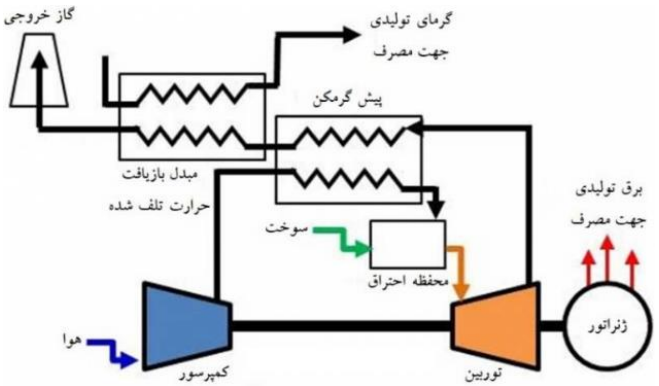
$$E_{e(LHV)}= 8760\times P_{e(LHV)} \quad (۴۸)$$

$$HHV_{BIOGAS} = \frac{X_{CH4}}{100}\times HHV_{(CH4)} \quad (۴۹)$$

$$P_{e(HHV)}= \eta_{el}\times \dot{Q}_{Total\ BIOGAS}\left(\frac{m^3}{hr}\right)\times(HHV)_{BIOGAS} /3.6 \quad (۵۰)$$

$$E_{e(HHV)}= 8760\times P_{e(HHV)} \quad (۵۱)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]



شکل۱. مراحل تولید توان در میکرو توربین

۹-٤-۲. هزینه سرمایه گذاری ثابت

هزینه سرمایه گذاری ثابت نیروگاه شامل خرید تجهیزات، نصب و راه اندازی و هزینه ساخت نیروگاه می‌باشد، هزینه ثابت نیروگاه با استفاده از معادله ۵۲ قابل دستیابی است که در این معادله (I) هزینه احداث نیروگاه بر حسب دلار و ($P_{e(LHV)}$) توان الکتریکی نیروگاه بر حسب کیلووات می‌باشد.

$$I = 101,522 + 3500 \times P_{e(LHV)} \quad (۵۲)$$

۳. نتایج و بحث

طبق نتایج بدست آمده در این مطالعه در صورتیکه پسماند ارگانیک ورودی به هر راکتور $\dot{m}_{Organic\ (Cstr)}$، برابر با ۱۸۱۸/۷۵ کیلوگرم در روز باشد، و جامد خشک پسماند(X_{ds})، ۵۱/۴۵۴ درصد باشد در این صورت در حدود ۹۳۵/۸۲۵ کیلوگرم در روز جرم جامد خشک ($\dot{m}_{ds}$) خواهیم داشت، در صورتیکه میزان غلظت جامد خشک ($X_{dsc\ (Cstr)}$)، ۱۰ درصد باشد، جرم آب مورد نیاز($\dot{m}_{Wr}$) برای رقیق سازی در حدود ۸۴۲۲/۴۳ کیلوگرم در روز خواهد بود. در این مطالعه به منظور موازنه جرم خوراک ورودی به راکتور، میزان رطوبت موجود در پسماند ($\dot{m}_{Total\ waste\ moisture}$) از جرم آب نهایی مورد نیاز راکتور کسر شده است، که در نهایت کل جرم ورودی ($\dot{m}_{total\ mass\ reactor}$)، به هاضم ۸۴۷۵/۳۳۱ کیلوگرم در روز می‌باشد. در صورتی که

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

درصد مواد آلی موجود در جرم جامد خشک (X_{vs})، ۷۱/۳ در صد باشد، کل جرم مواد فرار($\dot{m}_{vs}$)، ۶۶۷/۲۴۳ کیلوگرم در روز تخمین زده می‌شود،که طی فرایند هضم در حدود ۸۰ در صد این مواد تجزیه شده و با در نظر گرفتن ضریب بازدهی تبدیل (X_{vbs})، ۸۳ درصد، در نهایت جرمی از مواد که قابلیت بالای تبدیل شدن به بیوگاز را دارند($\dot{m}_{vbs}$) معادل ۴۴۳/۰۴۹ کیلوگرم در روز خواهیم داشت، وکل لجن باقیمانده حاصل از مواد غیر آلی ورودی ($\dot{m}_{ash}$) ومواد آلی تجزیه نشده در طی فرایند هضم ($\dot{m}_{rsvs}$) برابر با ۴۹۲/۷۷۵ کیلوگرم در روز می‌باشد. همچنین دبی حجمی خوراک ورودی ($\dot{V}_{dvr(i)}$) به هر راکتور ۸۳/۲۹۳ مترمکعب در روز می‌باشد.

در این مطالعه مشخص گردید حداقل زمان ماند مورد نیاز (ϑ_h)، برای تجزیه مواد آلی و تولید بیوگاز ۹/۲۷۱ روز می‌باشد. که این زمان ماند به میزان غلظت مواد جامد فرار ورودی ($S_{cvs(i)}$)، میزان غلظت پساب خروجی ($S_{ce(O)}$) از سیستم و نرخ رشد باکتری (K) وابسته است، وحجم هر راکتور ($V_{r(Cstr)}$) با توجه به زمان ماند مورد نیاز برای هضم در حدود ۷۷۲/۲۵۱ متر مکعب تخمین زده می‌شود. همچنین میزان توان مورد نیاز همزن‌ها ی راکتور ($P_{Mixers(Total)}$)، ۲۳/۶۳۴ کیلوات تخمین زده شده است. در این مطالعه مشخص گردید حداقل حرارت مورد نیاز برای کل راکتورها ($\dot{Q}_{Total\ heat\ required}$) برای رشد و تکثیر باکتر ی‌های متان زا در شرایط دمایی مزوفیلیک برابر ۱۴۹۲/۴۶۴ کیلو وات می‌باشد. که این میزان حرارت شامل حرارت مورد نیاز لجن ورودی و اتلاف حرارت از سطوح راکتو رها می‌باشد. مطابق نتایج موازنه جرم و استوکیومتریک بدست آمده و درج شده در جدول ۶، نسبت حجم گاز متان استوکیومتریک تولیدی به ازاء هر کیلو گرم جامد فرارتجزیه شده با در نظر گرفتن بازدهی تبدیل تجزیه، درحدود ۰/۵۶۷۴ خواهد بود، ودرصد متان تئوری (X_{CH4})، در حدود ۵۵/۹۸۲ درصد تخمین زده می‌شود. طبق نتایج مدل سازی پیش بینی می‌شود میزان دبی حجمی بیوگاز تولید شده برای هر راکتور ($\dot{Q}_{biogas}$) در حدود ۴۴۹/۰۸۸ متر مکعب در روز وکل بیوگاز تولید شده ($\dot{Q}_{Total\ biogas}$)، برای ۱۶ راکتور ۷۱۸۵/۴۱۵ مترمکعب بر روز قابل حصول باشد. با توجه به

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

درصد متان تولید شده، ارزش حرارتی بالای بیوگاز(HHV_{BIOGAS})، ۲۲/۳۲ مگاژول بر متر مکعب و ارزش حرارتی پایین بیو گاز(LHV_{BIOGAS})، ۲۰/۱۱ مگاژول بر متر مکعب خواهد بود. در صورت استفاده مستقیم کل بیو گاز تولید شده در مولدهای برق حداکثر توان($P_{e(HHV)}$) و انرژی الکتریکی سالانه($E_{e(HHV)}$) قابل حصول با ارزش حرارتی بالای سوخت به تر تیب ۶۴۹/۶۹۱ کیلو وات و ۵۶۹۱۲۹۸/۴۷۸ کیلو وات ساعت، و همچنین حداکثر توان($P_{e(LHV)}$) و انرژی الکتریکی سالانه ($E_{e(LHV)}$) قابل حصول با ارزش حرارتی پایین سوخت به تر تیب ۵۸۵/۴۸۸ کیلو وات و ۵۱۲۸۸۷۷/۷۱۱ کیلو وات ساعت خواهد بود.

مطابق نتایج مدل سازی بدست آمده در این مطالعه مشخص می‌شود مقدار بیوگاز تولید شده به میزان غلظت جامد خشک ($X_{dsc\,(Cstr)}$)، میزان مواد آلی موجوددرخوراک (X_{vs}) و میزان تجزیه پذیری نسبت مستقیم داشته،اگرچه این موضوع باعث افزایش تولید بیوگاز می‌شود ولی بایستی به این موضوع توجه داشت که با افزایش غلظت ($X_{dsc\,(Cstr)}$)، میزان زمان ماند مورد نیاز (ϑ_h) برای هضم افزایش پیدا می‌کند، و این خود تاثیر مستقیم درحجم هاضم،تامین حرارت موردنیاز وافزایش هزینه‌های اقتصادی خواهد داشت، که موارد فوق اهمیت طراحی بهینه نیروگاه را نشان می‌دهد، که در بیشترمطالعات انجام شده به این موضوع توجه جدی نشده است. مسأ له بعدی تأمین حرارت هاضم است که با توجه به اینکه راندمان حرارتی مولدهای برق در حدود ۴۰ درصد است می‌توان از تلفات حرارتی مولدهای برق وبازیابی این حرارت به منظور تأمین بخشی از حرارت مورد نیاز هاضم‌ها بهره جست که این موضوع منجر به عدم مصرف سوخت اضافی،آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف آن وکاهش هزینه‌های اقتصادی نیروگاه خواهد شد.

در این مطالعه ارزیابی اقتصادی نیروگاه نیز مورد بررسی قرار گرفت، بر اساس نتایج بدست آمده در جدول ۹، ارزش خالص فعلی طرح (NPV)، برابر با ۴۳۲,۶۵۲,۳۲۷,۰۴۲ ریال می‌باشد، و نرخ بازده داخلی تعدیل شده – ارزش بازاری دارایی، ۱۶/۴ درصد ونسبت فایده به هزینه (B/C)، ۳/۳ می‌باشد. بر اساس جریان نقدینگی درج شده در نمودار ۲ و شاخص‌های مالی طرح در جدول

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

۹، در صورتیکه عمر پروژه،۲۰ سال باشد، نرخ بازده داخلی تعدیل شده (ارزش بازاری دارایی) طرح بیشتر از نرخ تورم می‌باشد و همچنین ارزش خالص فعلی نیز مثبت می‌باشد و نسبت فایده به هزینه بزرگتر از یک می‌باشد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت برآورد مالی طرح مثبت بوده و طرح توجیه اقتصادی دارد، وهمچنین دوره بازگشت سرمایه طرح با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول ۶/۳ سال می‌باشد.

جدول ۸. نتایج محاسبات راکتور CSTR

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
کل پسماند پذیرفته شده	$\dot{m}_{Total\ (msw)}$	۳۰۰۰۰	$\frac{kg}{day}$
درصد مواد قابل تفکیک و بازیافت شده	X_R	۳	%
کل پسماند ارگانیک	$\dot{m}_{Total\ organic\ waste}$	۲۹۱۰۰	$\frac{kg}{day}$
تعداد راکتور	$N_{Reactor}$	۱۶	-
جرم پسماندارگانیک ورودی به هر راکتور	$\dot{m}_{Organic\ (Cstr)}$	۱۸۱۸/۷۵	$\frac{kg}{day}$
جرم جامد خشک	$\dot{m}_{ds}$	۹۳۵ /۸۲۵	$\frac{kg}{day}$
جرم آب مورد نیاز راکتور	$\dot{m}_{Wr}$	۸۴۲۲/۴۳	$\frac{kg}{day}$
جرم رطوبت پسماند	$\dot{m}_{Total\ waste\ moisture}$	۸۸۲/۹۲۴	$\frac{kg}{day}$
جرم جامد فرار	$\dot{m}_{vs}$	۶۶۷/۲۴۳	$\frac{kg}{day}$
جرم غیرآلی و غیر قابل تجزیه ورودی به راکتور	$\dot{m}_{ash}$	۲۶۸/۵۸۱	$\frac{kg}{day}$
جرم جامد فرار تجزیه شده	$\dot{m}_{vds}$	۵۳۳/۷۹۴	$\frac{kg}{day}$
جرم جامد فرار تجزیه شده با درنظر گرفتن بازدهی تبدیل	$\dot{m}_{vbs}$	۴۴۳/۰۴۹	$\frac{kg}{day}$
جرم موادآلی تجزیه نشده	$\dot{m}_{rsvs}$	۲۲۴/۱۹۳	$\frac{kg}{day}$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

ادامه جدول ۸

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
کل لجن باقیمانده	$\dot{m}_{Total\ rs}$	۴۹۲/۷۷۵	$\frac{kg}{day}$
وزن مخصوص لجن خشک	γ_{ds}	۱/۲۰۸	
وزن مخصوص لجن تر	γ_{Ws}	۱/۰۱۷	
کل جرم ورودی به راکتور	$\dot{m}_{Total\ mass\ reactor}$	۸۴۷۵/۳۳۱	$\frac{kg}{day}$
حجم روزانه ورودی به هر راکتور	$\dot{V}_{dvr\ (i)}$	۸۳/۲۹۳	$\frac{m^3}{day}$
غلظت جامد فرار ورودی	$S_{cvs\ (i)}$	۸/۰۱	$\frac{kg}{m^3}$
درصد لجن هضم شده در راکتور	X_{dgs}	۵۲/۶۵۶	%
غلظت ماده ورودی تجزیه پذیر	$S_{cb\ (i)}$	۶/۴۶۲	$\frac{kg}{m^3}$
غلظت پساب خروجی قابل تجزیه زیستی	S_{cbe}	۱/۲۹۲	$\frac{kg}{m^3}$
غلظت پساب خروجی	$S_{ce\ (O)}$	۲/۸۴	$\frac{kg}{m^3}$
درصد تثبیت	E_{sb}	۶۴/۵۴۰۸	%
زمان ماند خوراک در راکتور	ϑ_h	۹/۲۷۱	day
حجم کل هر راکتور	$V_{r\ (cstr)}$	۷۷۲/۲۵۱	m^3
قطر راکتور	D	۱۲/۲۱۷	m
ارتفاع راکتور	H	۶/۱۰۸	m
سطح مقطع راکتور	A	۱۱۷/۱۸۱	m^2
غلظت واقعی گاز متان محلول	C_{camd}	۱/۹۴۸	$\frac{kg}{m^3}$
غلظت گاز متان در جمع کننده گاز	C_{Cmgc}	۰/۲۶۸	$\frac{kg}{m^3}$
دبی جرمی گاز متان تولید شده هر راکتور	$\dot{m}_{(CH4)}$	۱۷۹/۵۰۸	$\frac{kg}{day}$
دبی حجمی گاز متان تولید شده هر راکتور	$\dot{Q}_{(CH4)}$	۲۵۱/۴۱۲	$\frac{m^3}{day}$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

ادامه جدول ۸

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
دبی حجمی بیو گاز تولید شده هر راکتور	$\dot{Q}_{(biogas)}$	۴۴۹/۰۸۸۵	$\frac{m^3}{day}$
کل دبی جرمی گاز متان تولید شده	$\dot{m}_{Total\ (CH4)}$	۲۸۷۲/۱۳۵	$\frac{kg}{day}$
کل دبی حجمی گاز متان تولید شده	$\dot{Q}_{Total(\ CH4\ )}$	۴۰۲۲/۵۹۸	$\frac{m^3}{day}$
کل دبی حجمی بیو گاز تولید شده	$\dot{Q}_{Total\ (biogas)}$	۷۱۸۵/۴۱۵	$\frac{m^3}{day}$
حرارت مورد نیاز لجن ورودی به هر راکتور	$\dot{Q}_{hrs\ (i)}$	۶/۸	KW
کل افت حرارت در هر راکتور	$\dot{Q}_{Total\ Heat\ loss\ (i)}$	۸۶/۴۷۹	KW
کل حرارت مورد نیاز راکتورها	$\dot{Q}_{Total\ heat\ required}$	۱۴۹۲/۴۶۴	KW
کل توان همزن هر راکتور	$P_{Mixers(Total)}$	۲۳/۶۳۴	KW
کل توان الکتریکی تولید شده (ارزش حرارتی بالا)	$P_{e(HHV)}$	۶۴۹/۶۹۱	KW
کل انرژی الکتریکی سالانه (ارزش حرارتی بالا)	$E_{e(HHV)}$	۵۶۹۱۲۹۸/۴۷۸	kWh
کل توان الکتریکی تولید شده (ارزش حرارتی پایین)	$P_{e(LHV)}$	۵۸۵/۴۸۸	KW
کل انرژی الکتریکی سالانه (ارزش حرارتی پایین)	$E_{e(LHV)}$	۵۱۲۸۸۷۷/۷۱۱	KWh
حجم گاز متان به ازاء هر کیلو گرم جامد فرار تجزیه شده	$v_{S\ (\ CH4\ /\ VDS)}$	۰/۴۷۰۹	$\frac{m^3\ CH4}{kg\ VDS}$
حجم گاز متان تولیدی به ازاء هر کیلو گرم جامد فرارتجزیه شده با در نظر گرفتن بازدهی تبدیل تجزیه	$v_{S\ (\ CH4\ /\ VBS)}$	۰/۵۶۷۴	$\frac{m^3\ CH4}{kg\ VBS}$
حجم بیوگاز تولیدی به ازاء هر کیلو گرم جامد فرارتجزیه شده با در نظر گرفتن بازدهی تبدیل تجزیه	$v_{S\ (\ BIOGAS\ /\ VBS)}$	۱/۰۱۳	$\frac{m^3\ BIOGAS}{kg\ VBS}$
درصد متان	X_{CH4}	۵۵/۹۸۲	%
ارزش حرارتی بالای بیوگاز	HHV_{BIOGAS}	۲۲/۳۲۰۳	$\frac{MJ}{m^3}$
ارزش حرارتی پایین بیوگاز	LHV_{BIOGAS}	۲۰/۱۱۴	$\frac{MJ}{m^3}$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

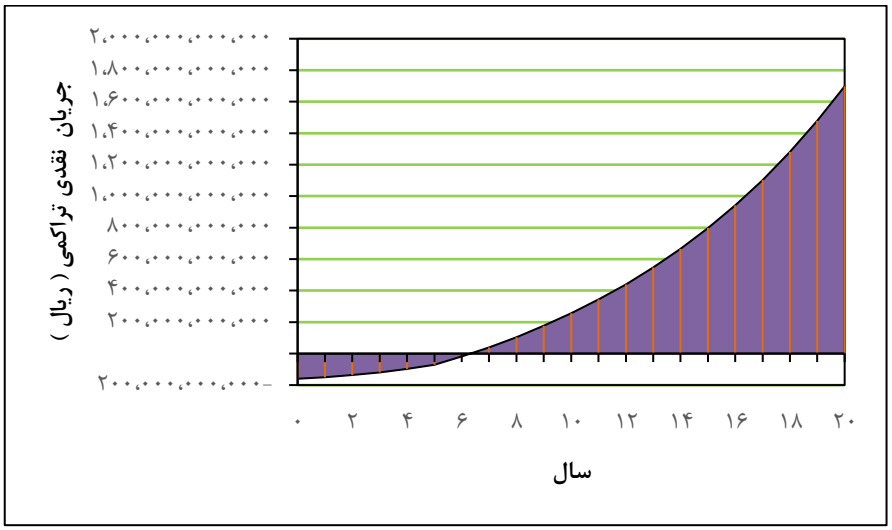
جدول ۹. نتایج اقتصادی نیروگاه بیوگاز

پارامتر	مقدار	واحد
کل مشوق تعلق گرفته	۲۶,۶۲۰,۸۹۵,۵۶۷	ریال
کل بدهی	۷۹,۸۶۲,۶۸۶,۷۰۰	ریال
سرمایه	۱۸۶,۳۴۶,۲۶۸,۹۶۶	ریال
پرداخت وام	۲۲,۱۵۴,۶۸۶,۵۱۰	ریال / سال
درآمد سالیانه فروش برق	۲۶,۹۲۶,۵۹۳,۱۲۰	ریال
کاهش خالص سالیانه انتشار (GHG)[1]	۲۸۱۴/۵۷۰۱	$t\ co_2$
درآمد سالیانه کاهش (GHG)	۱۰,۸۳۶,۰۹۴,۸۰۰	ریال
کل هزینه اولیه	۲۶۶,۲۰۸,۹۵۵,۶۶۶	ریال
کل هزینه سالیانه	۳۰,۶۸۱,۳۴۷,۸۹۸	ریال
درآمد و پس انداز کلی سالانه	۳۷,۷۶۲,۶۸۷,۹۲۰	ریال
جریان مالی سالانه خالص - سال۱	۷,۰۸۱,۳۴۰,۰۲۲	ریال
نرخ بازده داخلی تعدیل شده قبل از مالیات- ارزش بازاری داریی	۱۶/۴	درصد
نرخ بازده داخلی تعدیل شده قبل از مالیات- ارزش داریی	۱۴/۱	درصد
برگشت سرمایه	۶/۳	سال
ارزش خالص فعلی (NPV)	۴۳۲,۶۵۲,۳۲۷,۰۴۲	ریال
نسبت هزینه – فایده (B / C)	۳/۳	-

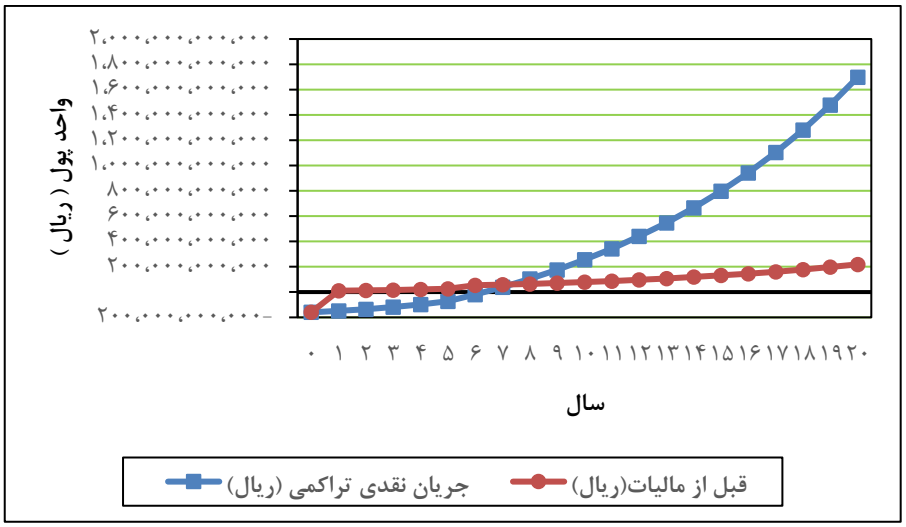
مأخذ: یافته‌های پژوهش

۱ . گاز گلخانه‌ای

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]



نمودار۲.جریان نقدینگی تراکمی



نمودار ۳. جریان نقدینگی تراکمی و جریان قبل مالیات

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

٤. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مطالعه فوق بر اساس استفاده و بهره گیری از پسماند جامد شهری به عنوان خوراک راکتور تخمیر بی‌هوازی پیوسته جهت تولید بیو گاز و در نهایت تامین بخشی از انرژی مورد نیاز شهر مشهد انجام گرفت. با توجه به نتایج حاصله می‌توان نتیجه گرفت، چندین عامل بیشترین تاثیر در راندمان نیروگاه بیوگاز خواهند داشت اولین عامل ترکیبات فیزیکی و شیمیایی خوراک می‌باشد که اصلی ترین نقش را در تولید انرژی نهایی خواهد داشت که هرچه میزان ترکیبات فیزیکی به مواد آلی نزدیک تر باشد بهترین نتیجه حصول خواهد شد، وبیشترین مواد آلی (کربن آلی) قابل تجزیه در اختیار باکتری‌های متانزا برای رشد وتکثیر آنها قرار خواهد گرفت،که در نهایت باعث افزایش تولید بیوگاز خواهد شد که این موضوع نقش جداسازی مواد بازیافتی و قابل تفکیک را پر رنگ تر می‌کند.دومین عامل مهم دیگر که دراین مطالعه مشاهده گردید تاثیر میزان غلظت جامد خشک ومیزان رقیق سازی در تولید بیوگاز نهایی می‌باشد اگرچه به صورت تئوری افزایش غلظت باعث افزایش تولید بیوگاز می‌شود ولی درنهایت باعث افزایش زمان ماند، افزایش میزان انرژی مود نیاز فرایند وافزایش هزینه‌های سرمایه گذاری و بهره برداری خواهد شد، که اهمیت این موضوع با استفاده از معادلات ارایه شده کاملا" مشهود به نظر می‌رسد، وسومین عامل مهم دیگر برآورد انرژی موردنیاز برای هضم می‌باشد که این انرژی شامل دو بخش حرارت موردنیاز لجن و تلفات حرارتی ناشی ازسطوح می‌باشد،که در بیشتر مطالعات انجام شده به اهمیت این موضوع توجه نشده است. نتایج بدست آمده در این مطالعه نشان می‌دهند که پسماند تولید شده در منطقه مورد مطالعه از توانایی بالقوه برای تولید وتامین انرژی برخوردار هستند که صحت این موضوع با برآورد ارزش حرارتی بیوگاز، توان و انرژی الکتریکی سالانه تولید شده در این مطالعه تأیید می‌شود. یکی از مسائل مهم در نیروگاه‌های بیوگاز بهینه سازی و افزایش راندمان تولید می‌باشد که می‌توان با بکارگیری راکتورهای ترکیبی چند مرحله ای، استفاده از خوراک‌های ترکیبی به عنوان مثال ترکیبی از پسماندهای جامد شهری با پسماند دامی یا فاضلاب شهری و بازیابی حرارت مولدهای برق به منظور تأمین حرارت مورد نیاز هاضم ها،کمک شایانی به افزایش راندمان و بازده نیروگاه

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

بیوگاز کرد. به طور کلی باتوجه به مطالب بیان شده دراین مطالعه می‌توان نتیجه گرفت استفاده از پسماندهای جامد شهری به عنوان ماده اولیه ارزان وقابل دسترس در مولدهای بیوگاز به ویژه راکتورهای پیوسته می‌تواند اثرات بسیار مثبتی در تولید وتامین انرژی و هزینه‌های اقتصادی منطقه مورد مطالعه داشته باشد.

تقدیر وتشکر

از تمامی عوامل گروه مهندسی انرژی و مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد،که زحمت زیادی برای تحقق این مقاله داشتند، متشکرهستم. همچنین از همکاری‌ها و راهنمایی‌های سازمان امور پسماند شهرداری مشهد و چناران سپاسگزاری و قدردانی می‌کنم.

منابع

بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران (۱۳۹۹)، نرخ تورم و شاخص بهای کالاها و خدمات مصرفی.

ثقوری، محسن ؛ عبدی، رضا؛ ابراهیمی نیک، محمد علی؛ روحانی، عباس؛ میسمی، محمد علی. (۱۳۹۹). هضم بی‌هوازی حالت جامد قسمت آلی زباله جامد شهری برای تولید بیوگاز (مطالعه موردی در مشهد). تحقیقات سامانه‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی، ۲۱ (۷۶).

حسنی، سید مهدی؛ ایرانمنش، مسعود؛ امیری، حسین؛ رحمتی، محمود. (۱۳۹۸). بررسی آزمایشگاهی اثر عوامل موثر بر بهبود فرآیندتولید بیوگاز از پسماندهای غذایی و آنالیز انرژی آن . سوخت و احتراق، ۱۲ (۳)،۷۳-۸۶.

رجبعلی پور چشمه گز، علی اصغر. (۱۳۸۹)، فرایند تولید انرژی از بیوگاز. نشریه فنی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، شماره ۳۰.

سازمان مدیریت پسماند شهرداری مشهد.(۱۳۹۸)، امور پژوهش.

سعیدی نیچران، محمّدرضا. (۱۳۹۴)، تولید سوخت زیستی بیوگاز. دو فصلنامه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو،۲ (۱)،۴۶-۴۱.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

شفیعی ده آباد، علیرضا. (۱۳۹۴)، زباله سوزی و استحصال انرژی از زباله جامد شهری. مدیریت مطالعات و برنامه ریزی خدمات شهری و محیط زیست، گزارش ۳۳۲.

گروه پژوهشی انرژی‌های نو. (۱۳۹۴)، سند راهبرد ملی و نقشه راه توسعه فناوری‌های مرتبط با انرژی زیست توده در ایران. نشریه پژوهشگاه نیرو.

گلستانه، مهشید. (۱۳۹۸)، تولید انرژی سبز از پسماند، راهی به سوی توسعه پایدار. شیمی سبز و فناوری‌های پایدار، ۱ (۱)،۳۳-۴۳.

لیمویی، فروغ الزمان ؛ محبت کار، حسن. (۱۳۹۶)، بیوگاز ونتایج زیست محیطی آن. پژوهش ملل، ۲ (۱۷)،۱۲۱-۱۳۵.

مرکز آمار ایران (۱۳۹۵)، داده‌ها و اطلاعات آماری.

مهردادی، ناصر؛ محمدی، پرویز؛ کرباسی، عبدالرضا؛ عدل، مهرداد. (۱۳۸۳)، ارزیابی فرایند هضم بی‌هوازی زباله‌های فساد پذیر شهری. محیط شناسی، (۳۴)،۱۵-۱۹.

نائیجی، اسفندیار؛ نورپور، علیرضا؛ قنواتی، حسین؛ جوادیان، بهزاد. (۱۳۹۷)، پتانسیل سنجی میزان تولید انرژی از فناوری‌های مختلف دفع نهایی پسماند شهرستان آمل. مطالعات علوم محیط زیست،۳ (۴)،۸۱۱-۸۰۲.

نصیری، جواد. (۱۳۸۵)، امکان سنجی نیروگاه بیوگازی ساوه. سازمان انرژی‌های نو ایران.

نظری، علی؛ نصیری، جواد. (۱۳۹۳)، انواع هاضم‌های بیهوازی برای استحصال انرژی از مواد آلی فسادپذیر . دو فصلنامه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو،۱(۲)، ۴۴-۳۷.

وزارت تعاون، کار و رفاه اجتماعی. (۱۳۹۹)، بخشنامه ی تعیین حداقل مزد کارگران دائم و موقت.

وزارت نیرو. (۱۳۹۸)، سازمان انرژی‌های تجدید پذیر و بهره وری انرژی برق.

یوسفی، لیلا. (۱۳۹۹)، تاثیر اختلاط هضم شده با پسماندهای‌جامدآلی‌شهری در تولید بیوگاز از طریق مجموعه دستگاهی هضم‌بیهوازی بسته تحت شرایط مزوفیلیک . شیمی سبز و فناوری‌های پایدار، ۲(۱)،۶۹-۶۱.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

Akunna , Joseph.C.(2019). Anaerobic Waste-Wastewater Treatment And Biogas Plants : A Practical Handbook. Crc Press , Taylor & Francis Group ,153 P.

Alzate, Santiago., Restrepo.Cuestas, Bonie., Jaramillo.Duque, Álvaro. (2019). Municipal Solid Waste As A Source Of Electric Power Generation In Colombia: A Techno-Economic Evaluation Under Different Scenarios. *Resources* ,8(1), 51.

Deng ,L., Liu ,Y., Zheng ,D., Wang ,L., Pu , X., Song ,L.(2017). Application And Development Of Biogas Technology For The Treatment Of Waste In China. Renewable And Sustainable Energy Reviews, 70 , 845-851.

Deublein ,Dieter.,Steinhauser, Angelika.(2011). Biogas From Waste And Renewable Resources : An Introduction. Wiley-Vch Verlag Gmbh & Co, Kgaa, Weinheim , Second Edition.

Hilkiah Igoni , Asinyetogha., Sepiribo Kingnana Harry , Ibiye. (2017). Modelling Design Of Continuous Anaerobic Digesters For Municipal Solid Waste In Biogas Production. International Journal Of Energy And Environmental Research , 5 (3), 42-67.

Hilkiah Igoni , Asinyetogha.(2016). Design Of Anaerobic Bio-Reactors For The Simulation Of Biogas Production From Municipal Solid Waste. Rivers State University.

Hilkiah Igoni , Asinyetogha., Sepiribo Kingnana Harry , Ibiye. (2016). Modelling Design Of Anaerobic Continuous Digesters For Municipal Solid Waste In Biogas Production. Rivers State University.

Lindmark , Johan., Eriksson , Per., Thorin , Eva. (2014). The Effects Of Different Mixing Intensities During Anaerobic Digestion Of The Organic Fraction Of Municipal Solid Waste. Waste Management (New York, N.Y.), 34(8),1391-1397

Matteo , U.D., Nastasi ,B., Albo, A., Garcia ,D.A.(2017). Energy Contribution Of Ofmsw (Organic Fraction Of Municipal Solid Waste) To Energy-Environmental Sustainability In Urban Areas At Small Scale. Energies – Open Access Energy Res. Eng. Policy J, 10 , 229-242.

Niessen ,Walter. R. (2010).Combustion And Incineration Processes.Crc Press ,Fourth Edition.

Rajagopal, R., Bellavance ,D., Rahaman , M. S.(2017). Psychrophilic Anaerobic Digestion Of Semi-Dry Mixed Municipal Food Waste: For North American Context. Process Safety And Environmental Protection , 105, 101- 108.

Remy , Florian. (2018). Potential For The Anaerobic Digestion Of Municipal Solid Waste (Msw) In The City Of Curitiba, Brazil.

Reynolds, T. D., Richards, P. A. (1996). Units Operations And Processes In Environmental Engineering. Pws Publishing Company, Boston , Second Edition , 798p.

Tabatabaei , Meisam., Ghanavati , Hossein.(2018). Biogas: Fundamentals, Process, And Operation. Springer International Publishing ,471 P.

Tchobanoglous, G., Burton , F. L., Stensel , H. D. (2003). Wastewater Engineering: Treatment And Reuse. Mcgraw-Hill Companies , Fourth Edition , 1819p.

Www.Retscreen.net.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

فهرست علایم اختصاری

نماد	توضیحات	واحد
$\boldsymbol{A}$	مساحت	m^2
ASH	خاکستر	-
BF	کسر زیست تخریب پذیر	-
C	کربن	-
C_{camd}	غلظت واقعی گاز متان محلول	$\frac{kg}{m^3}$
C_{cgsl}	غلظت اشباع گاز در مایع	$\frac{kg}{m^3}$
C_{Cmgc}	غلظت گاز متان در جمع کننده گاز	$\frac{kg}{m^3}$
$C_{p\,(WATER)}$	گرمای ویژه آب	$\frac{KJ}{kg, k}$
CH_4	متان	-
CO_2	دی اکسید کربن	-
COD	اکسیژن مورد نیاز شیمیایی	$\frac{kg\ COD}{m^3.day}$
D	قطر	m
D_{BRR}	قطر همزن	m
E_e	انرژی الکتریکی	KWh
E_{sb}	درصد تثبیت	%
$\boldsymbol{H}$	ارتفاع	m
H	هیدروژن	-
HHV	ارزش حرارتی بالا	$\frac{MJ}{m^3}$
H_2O	آب	-
I	هزینه ثابت سرمایه گذاری	دلار
k	حداکثر نرخ استفاده از غلظت بستر	day^{-1}
K_L	ضریب انتشار گاز متان	$\frac{m}{day}$
K_S	نیمه اشباع ثابت	$\frac{kg}{m^3}$
LC	درصد لیگنین	%
LHV	ارزش حرارتی پایین	$\frac{MJ}{m^3}$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

نماد	توضیحات	واحد
M	ضریب تبدیل COD به VS	-
MSW	پسماند جامد شهری	-
$\dot{m}_{ash}$	دبی جرمی مواد غیرآلی ورودی	$\frac{kg}{day}$
$\dot{m}_{(CH4)}$	دبی جرمی متان	$\frac{kg}{day}$
$\dot{m}_{ds}$	جرم جامد خشک	$\frac{kg}{day}$
$\dot{m}_{Organic\ (Cstr)}$	جرم پسماند ارگانیک ورودی به هر راکتور	$\frac{kg}{day}$
$\dot{m}_{rsvs}$	دبی جرمی موادآلی تجزیه نشده	$\frac{kg}{day}$
$\dot{m}_{Total\ mass\ reactor}$	کل جرم ورودی به راکتور	$\frac{kg}{day}$
$\dot{m}_{Total\ (msw)}$	کل پسماند پذیرفته شده	$\frac{kg}{day}$
$\dot{m}_{Total\ organic\ waste}$	کل جرم پسماند ارگانیک	$\frac{kg}{day}$
$\dot{m}_{Total\ rs}$	کل لجن باقیمانده	$\frac{kg}{day}$
$\dot{m}_{Total\ waste\ moisture}$	کل جرم رطوبت پسماند	$\frac{kg}{day}$
$\dot{m}_{Vbs}$	دبی جرمی جامد فرار تجزیه شده با درنظر گرفتن بازدهی تبدیل	$\frac{kg}{day}$
$\dot{m}_{vds}$	دبی جرمی جامد فرار تجزیه شده	$\frac{kg}{day}$
$\dot{m}_{Vs}$	دبی جرمی جامد فرار	$\frac{kg}{day}$
$\dot{m}_{Wr}$	دبی جرمی آب راکتور	$\frac{kg}{day}$
N	نیتروژن تک اتمی	-
$N2$	نیتروژن دو اتمی	-
Ne_{BRR}	عدد نیوتون همزن پروانه ای	
NH_3	آمونیاک	-
N_{Mixers}	تعداد همزن	-
$N_{reactor}$	تعداد راکتور	-
n_{BRR}	سرعت چرخش همزن	RPM
O	اکسیژن تک اتمی	-
O_2	اکسیژن دو اتمی	-

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

نماد	توضیحات	واحد
P_e	توان الکتریکی	KW
P_{mixer}	توان همزن	KW
$\dot{Q}$	انتقال حرارت	KW
$\dot{Q}_{biogas}$	دبی حجمی بیوگاز	$\frac{m^3}{day}$
$\dot{Q}_{(CH4)}$	دبی حجمی گاز متان	$\frac{m^3}{day}$
$\dot{Q}_{hrs\ (i)}$	حرارت مورد نیاز لجن ورودی	KW
$\dot{Q}_{Heat\ loss\ floor}$	اتلاف حرارت کف	KW
$\dot{Q}_{Heat\ loss\ roof}$	اتلاف حرارت سقف	KW
$\dot{Q}_{Heat\ loss\ wall}$	اتلاف حرارت دیواره	KW
R	بخش غیر قابل تجزیه	-
$S_{cb\ (i)}$	غلظت ماده ورودی تجزیه پذیر	$\frac{kg}{m^3}$
S_{cbe}	غلظت پساب خروجی قابل تجزیه زیستی	$\frac{kg}{m^3}$
$S_{ce\ (O)}$	غلظت پساب خروجی	$\frac{kg}{m^3}$
$S_{cvs\ (i)}$	غلظت جامد فرار ورودی	$\frac{kg}{m^3}$
T_a	دمای محیط	°C
T_g	دمای زمین	°C
T_r	دمای راکتور	°C
T_S	دمای لجن ورودی	°C
t_{Wm}	زمان کار همزن	$\frac{min}{hr}$
U	ضریب انتقال حرارت	$\frac{w}{m^2k}$
$\dot{V}_{dgs}$	حجم لجن هضم شده روزانه	$\frac{m^3}{day}$
$\dot{V}_{dvr\ (i)}$	حجم روزانه ورودی به راکتور	$\frac{m^3}{day}$
$V_{r\ (cstr)}$	حجم راکتور پیوسته	m^3
VBS	بازدهی تبدیل جامد فرار	-
VDS	جامد فرار تجزیه شده	-
X_{ash}	درصد خاکستر	%
X_{CH4}	درصد متان	%
X_{cme}	غلظت میکروبی پساب	$\frac{kg}{m^3}$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]

نماد	توضیحات	واحد
X_{dgs}	درصد لجن هضم شده	%
X_{ds}	درصد جامد خشک	%
$X_{dsc\ (Cstr)}$	درصد غلظت جامد خشک	%
X_R	درصد مواد بازیافتی و جداسازی شده	%
X_{rm}	درصد رطوبت راکتور	%
X_{vbs}	درصد بازدهی تبدیل جامد فرار تجزیه شده	%
X_{vds}	درصد تجزیه پذیری جامد فرار	%
X_{vs}	درصد جامد فرار	%
γ_{ds}	وزن مخصوص لجن خشک	-
γ_{Ws}	وزن مخصوص لجن تر	-
η_{el}	راندمان الکتریکی	%
ϑ_h	زمان ماند هیدرو لیکی	day
v	حجم مخصوص	$\frac{m^3}{kg}$
$v_{S\ (CH4\ /\ VDS)}$	نسبت حجم متان استوکیومتریک به جامد فرار تجزیه شده	$\frac{m^3\ CH4}{kg\ VDS}$
$v_{S\ (CH4\ /\ VBS)}$	نسبت حجم متان استوکیومتریک به بازدهی تبدیل جامد فرار تجزیه شده	$\frac{m^3\ CH4}{kg\ VBS}$
$v_{S\ (CH4\ /\ VS)}$	نسبت حجم متان استوکیومتریک به جرم جامد فرار	$\frac{m^3\ CH4}{kg\ VS}$
ρ_{CH4}	دانسیته متان	$\frac{kg}{m^3\ n}$
ρ_{biogas}	دانسیته بیوگاز	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_{Water}	دانسیته آب	$\frac{kg}{m^3}$
Φ_{ms}	رطوبت نسبی	%

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-01-29]