مدل‌سازي سيستم تبديل انرژي از پسماندهاي شهري (زباله) با استفاده از فناوري گازي سازي

پیام هوشمند[۱]، رامین روشندل[*۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۱/۲/۱۷
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۱/۵/۱

چکیده:

رو به اتمام بودن سوخت های فسیلی در آینده نزدیک و توجه روز افزون به حفاظت از منابع انرژی، توجه جهانیان را به خود جلب نموده است. استفاده از گاز سنتز ناشی از گازی سازی زائدات و زباله های شهری در ایران می تواند منجر به افزایش سهم تولید برق و انرژی و کاهش هزینه های دفن زائدات گردد. در این تحقیق، یک مدل ترمودینامیکی بر اساس ثابت های تعادل واکنش های اصلی گازی سازی به منظور بررسی اثر رطوبت زائدات، روی ترکیب گاز سنتز خروجی، دمای تعادل گازی سازی، ارزش حرارتی گاز سنتز خروجی در یک گازی ساز بستر ثابت پائین سو مورد مطالعه قرار گرفته است. ترکیب گاز خروجی این مدل به کمک داده های عملی اعتبار سنجی شده است. از زباله شهر تهران به عنوان نمونه استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش میزان رطوبت زباله، مقدار هیدروژن تا ۱۷٫۹٪ روند افزایشی دارد. مقدار مونوکسید کربن کاهش، مقدار دی اکسید کربن افزایش، و مقدار نیتروژن افزایش می یابد. همچنین اثر دما بر غلظت گازسنتز و تعداد مول های آن نیز بررسی شده است.

کلمات کلیدی:
سیستم تولید انرژی، زباله شهر تهران ، گازی ساز پائین سو ، ترکیب گاز خروجی

۱) دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه انرژی
*۲) استادیار دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

مقدمه

امروزه بیوماس (زیست توده) به عنوان بزرگترین منبع انرژی تجدیدپذیر در مقایسه با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، در تأمین انرژی اولیه جهان شناخته می شود. حدود ۸,۲ درصد از کل ۴۷۴ اگزاژول (۱۰ به توان ۱۸) انرژی اولیه مصرفی جهان در سال ۲۰۰۸ به کمک منابع انرژی تجدیدپذیر فراهم شده است. منابع زیست توده بر اساس همین آمارگیری و برآورد در سال ۲۰۰۸ حدود ۴ درصد از کل انرژی اولیه جهان را فراهم کرده است [۷]. یکی از انواع ترکیبات زیست توده، زباله های شهری یا پسماند می باشد. پسماند به مواد جامد، مایع و گاز(غیر از فاضلاب) گفته می‌شود که به طور مستقیم یا غیر مستقیم حاصل از فعالیت انسان بوده و از نظر تولید کننده زائد تلقی می‌شود[۱].

سیستم‌های بازیافت انرژی از پسماند

کاغذ، مقوا، پلاستیک، شیشه، فلزات و... از جمله مواد قابل بازیافت اصلی در مواد زائد جامد شهری می‌باشند که بازیافت هریک ازآنها باید بر مبنای ارزیابی اقتصادی و ملاحظات محلی صورت گیرد. انواع روش های بازیافت ماده و انرژی از مواد زائد جامد که در نهایت می توانند منجر به سود دهی و بهره وری اقتصادی شوند، عبارتند از:[۱]

۱- کمپوست سازی

۲- سوزاندن در زباله سوز و بازیابی انرژی

۳- پیرولیز

۴- گازی سازی (فرآیند تبدیل به گاز)

۵- تولید بیوگاز

۶- بازیافت واستفاده مجدد از مواد زائد

یکی از انواع روش ها، استفاده از سیستم گازی سازی می باشد که در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. فرایندهای گازی سازی از نظر روش تبادل جرم و طراحی راکتور به سه گروه اساسی دسته بندی می شوند:[۱۴]

- فرایندهای گازی سازی بستر ثابت
- فرایندهای گازی سازی بستر سیال
- فرایندهای گازی سازی جریان پیوسته آرام

هر یک از راکتورهای گازی سازی ذکر شده، دسته بندی مربوط به خود را دارند. گازی سازهای بستر ثابت به دو نوع پایین سو و بالا سو تقسیم بندی می شوند و گازی ساز های بستر سیال به دو نوع جوشان و بازگردشی تقسیم بندی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

می‌شوند. گازی سازهای بستر ثابت دارای ساختار و فناوری ساده تر می باشند که واکنش ها در یک بستر ثابت و به دور از جریانات سیالی رخ می دهد. معمولا این راکتورها در مقیاس کوچک کاربرد دارند. اگر خوراک از بالای گازی ساز وارد راکتور شود و گاز سنتز از پایین خارج شود که در این حالت، جریان گاز سنتز و خوراک در جهت هم می‌باشد، به آن گازی ساز پایین سو گفته می شود و اگر خوراک از بالای گازی ساز وارد راکتور شود و گاز سنتز از بالای آن خارج شود که در این حالت، جریان گاز سنتز و خوراک در خلاف جهت هم می باشد، به آن گازی ساز بالا سو گفته می شود. گازی سازهای بستر سیال از طریق ترکیب شدن مواد بستر راکتور نظیر شن یا ماسه و خوراک در دمای بالا عمل می کنند. در این نوع از گازی ساز با ایجاد جریان سیال مانند، زیست توده نیز حالت سیال به خود گرفته و در اثر این جریانات انتقال حرارت و سایر واکنش ها انجام می گیرد. در گازی سازهای نوع سوم، خوراک و اکسید کننده در یک جهت و همزمان وارد راکتور می شوند. این نوع از راکتورها دارای دمای عملیاتی بالا و انتقال حرارت بالا و در نتیجه قابلیت تبدیل کربن بالایی می باشند. اندازه و خصوصیات خوراک ورودی به این گازی ساز دارای اهمیت فراوانی می باشد.[۱۰]

تحقیقات و دستاوردهای گذشته

در این تحقیق با توجه به مدل‌سازی یک فرایند گازی‌سازی، به بررسی پژوهش‌های دیگران در این زمینه پرداخته می‌شود: مدل‌سازی تعادلی به دو روش تقسیم بندی می شود: روش استوکیومتریک و روش غیر استوکیومتریک. روش استوکیومتریک نیازمند یک واکنش مرجع می باشد که تمامی واکنش ها و گازهای موجود را پوشش دهد و بر اساس این واکنش، مدل‌سازی انجام می گیرد که در این پژوهش، معادله مرجع واکنش جهانی گازی سازی در نظر گرفته شده است. در روش غیر استوکیومتریک هیچ واکنش مرجع و اصلی وجود ندارد. در واقع، تنها ورودی مورد نیاز مدل، آنالیز نهایی خوراک است و بر این اساس مدل‌سازی انجام می گیرد.

یک نوع مدل‌سازی با استفاده از تعادل ترمودینامیکی برای گازی سازی بستر سیال سازی شده با واسطه بخار توسط شاستر و همکارانش [۱۵] صورت گرفت که به پیش بینی ترکیب گاز سنتز خروجی از گازی ساز پرداختند که در این مدل، مقدار متان بیشتر از نتایج تجربی پیش‌بینی شده بود و برای سایر گازها نتایج مناسبی در مقایسه با داده های تجربی به دست آمد. پلیس و ویلک [۱۲]نیز با استفاده از روش تعادل ترمودینامیکی، یک راکتور بالاسوی آزمایشگاهی را مدل نمودند و پس از تطابق مدل خود با داده های آزمایش، به بررسی اثر رطوبت و مقدار هوای تعادل روی ترکیب گاز سنتز خروجی پرداختند. دوتا و جارانگتاماچوت[۸]از روش غیر استوکیومتریک برای مدل سازی سه نوع گازی سازی استفاده کردند که به پیش بینی ترکیب گاز خروجی از گازی ساز پرداختند که نتایج مناسبی در مقایسه با داده های تجربی جز برای مونوکسیدکربن به دست آمد. همچنین در این مقاله به نحوه تغییر ارزش حرارتی گاز سنتز خروجی پرداخته شد. زینال و همکارانش [۱۷] از روش مدل‌سازی استوکیومتریک برای پیش بینی ترکیب گاز تولیدی بیوماس های مختلفی استفاده

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

نمودند. از مقایسه[۸]و[۳] می توان دریافت که با آنکه مدل سازی استوکیومتریک و غیر استوکیومتریک دارای ارزش یکسانی می باشند[۱۶]، اما در مواردی مدل سازی استوکیومتریک به دلیل اینکه تمامی واکنش ها و گازهای موجود را تحت پوشش قرار می دهد و نیازمند بررسی زیر واکنش های انجام شده است و همچنین بر اساس پارامترها و جزئیات بیشتری مدل‌سازی را انجام می‌دهد، می‌تواند نتایجی را در اختیار ما قرار دهد که با نتایج تجربی تطابق بیشتری داشته باشد. جایا و همکارانش[۱۰]نیز با استفاده از روش مدل سازی ترمودینامیکی به بررسی اثر رطوبت و دما و اندازه ذرات روی بازدهی یک گازی ساز پائین سو در سریلانکا پرداختند که اختلاف بین نتایج مدل و نتایج تجربی چشمگیر نبود. پلگرینی [۱۱]و همکارانش با استفاده از یک تحقیق پارامتریک بر اساس تعادل ترمودینامیکی به بررسی دما و رطوبت روی ترکیب گاز خروجی پرداختند. دوتا و جارانگتاماچوت[۸] نیز به کمک مدل‌سازی استوکیومتریک به پیش بینی ترکیب گاز خروجی و دمای یک گازی ساز پائین سو پرداختند که در مقایسه با مورد قبل، علاوه بر در نظرگیری واسطه هوا در محاسبات، به بررسی چگونگی تغییرات ترکیب گاز با تغییر میزان رطوبت بیوماس نیز پرداختند و همچنین تغییرات دما با رطوبت را نیز بررسی نمودند که در این مقاله سعی شده است در راستای این پژوهش، کار توسعه داده شود. به عقیده بسیاری از محققان [۸]و[۳]، هر دو روش استوکیومتریک و غیر استوکیومتریک از لحاظ ارزش مدل‌سازی معادل یکدیگر می باشند. در یک مدل‌سازی از نوع تعادل ترمودینامیکی موارد زیر مفروض است[۴]:

- راکتور بدون بعد فرض می شود و نیازی به طراحی آن نمی باشد.
- گازی ساز کاملاً عایق بندی شده فرض می شود و اتلاف حرارت در آن ناچیز در نظر گرفته می شود.
- اختلاط کامل مواد و توزیع یکنواخت دما فرض می شود.
- نرخ سریع واکنش گازی سازی و همچنین زمان ماند کافی جهت رسیدن به حالت تعادل در نظر گرفته می شود.

هدف و ویژگی‌های تحقیق

آنچه در این تحقیق به عنوان هدف و ویژگی مد نظر بوده، به شرح زیر می باشد:

- در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی ترمودینامیکی تعادلی به پیش بینی رفتار یک گازی ساز پائین سو با خوراک زباله شهری پرداخته شده که این مدل‌سازی جهت آنالیز پارامترهای مختلف به ما کمک نموده در حالی که خرید، ساخت و آزمایش عملی یک گازی ساز واقعی جهت آنالیز پارامترها بسیار هزینه بر و زمان بر است .
- مطابق آمار شهرداری تهران، سالانه هزینه گزافی صرف جمع آوری زباله از سطح شهر تهران می شود که بایستی هزینه پردازش، حمل و نقل و دفع این مواد نیز به آن اضافه گردد. بر اساس برآوردهای بعمل آمده در سال ۱۳۸۹،

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

هر کیلو گرم پسماند برای شهرداری تهران با احتساب هزینه های جمع آوری و دفن، هزینه ای معادل ۳۲۰ ریال در بر دارد. با یک حساب ساده می توان نتیجه گرفت که با توجه به اینکه روزانه در شهر تهران حدودا ۷۵۰۰ تن زباله شهری تولید و به مکانی در جنوب شهر تهران به نام کهریزک منتقل می شود، در مجموع روزانه ۲,۴ میلیارد ریال توسط شهرداری تهران هزینه می شود. لذا گازی سازی بیوماس زباله می تواند یک راه حل مناسب برای صرفه جویی در بخشی از هزینه ها باشد. میزان این صرفه جویی بر اساس خصوصیات و ظرفیت نیروگاه و میزان سرمایه گذاری در این بخش می تواند متفاوت باشد. از طرفی اجرای این پروژه می‌تواند از نظر زیست محیطی بسیار مفید باشد و به جای دفن زباله و رها شدن گاز متان تولید شده به جو، می توان از زباله در جهت تولید انرژی پاک بهره گرفت.[۲]

- به دلیل موثر بودن پارامتر رطوبت بر عملکرد گازی ساز، اثر مقدار رطوبت زباله بر ترکیب گاز خروجی از گازی سازی بررسی شده است.
- این پژوهش مقدمه‌ای برای طراحی، ایجاد و بهینه سازی واحدهای گازی سازی بیوماس در کشور با هدف تولید توان خواهد بود.

معادلات حاکم بر گازی سازی

گازی سازی یک فرایند شیمیایی بسیار پیچیده می‌باشد و در حالت کلی شامل مراحل خشک کردن و تبخیر بیوماس از طریق فرآیند پیرولیز و در نهایت فرایند اکسایش و کاهش می‌باشد. فرایند گازی سازی شامل واکنش‌های متفاوتی می‌باشد که در بحث مدل سازی به فرایندهای اساسی آن پرداخته می شود.

معرفی مدل

نسبت اجزای شیمیایی بیوماس (فرمول شیمیایی خوراک) را می‌توان به صورت $CH_xO_yN_z$ بیان نمود که در آن x وy و z به ترتیب نسبت مولی هیدروژن به کربن ، اکسیژن به کربن و نیتروژن به کربن موجود در خوراک می باشد و برای بیوماس های متفاوت با دانستن آنالیز نهایی می توان مقادیر x و y و z را به دست آورد.

آنالیز نهایی بیوماس مورد استفاده در این مدل‌سازی که یک نوع زائدات شهری شهر تهران می‌باشد، در جدول ۱ نشان داده شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

جدول ۱) : آنالیز نهایی (شیمیایی) زباله شهر تهران[۲]

عناصر	درصد وزنی ناشی از آنالیز نهایی
C	۴۸/۸۱
H	۶/۸۶
O	۴۱/۰۷
N	۲/۷۸
S	۰/۴۸

چنانچه از هوا به عنوان واسطه گازی‌سازی استفاده شود، واکنش جهانی گازی سازی را می توان به شکل زیـر بیـان نمود[۸]. در این واکنش جهانی، خوراک در داخل راکتور گازی ساز در حضور حرارت با رطوبت و هوا واکنش نـشان مـی دهد و در نتیجه، انجام واکنش های شیمیایی که در ادامه به مهم ترین آنها پرداخته می شود، گازهایی از جمله هیـدروژن، مونوکسید کربن، دی اکسیدکربن، متان و نیتروژن حاصل می شود که ترکیب این گازها به نوع خـوراک، میـزان رطوبـت، نوع گازی ساز و ... بستگی دارد: واکنش (۱)

$$CH_XO_YN_Z + m_wH_2O + X_g(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow X_1CO + X_2H_2 + X_3CO_2 + X_4H_2O + X_5CH_4 + \left(\frac{Z}{2} + x_g 3.76\right)N_2$$

از مقدار گوگرد به دلیل ناچیز بودن مقدارش صرف نظر می شود[۸].مقدار m_w کـه عبـارت اسـت از مقـدار رطوبـت موجود در هر کیلو مول خوراک در معادله فوق، به شکل زیر است:

$$m_w = \frac{(M_{bio}m)}{18(1-m)} \qquad (۱)$$

و همچنین x_g معرف مقدار هوا در هر کیلو مول خوراک است، کلیه ورودی ها در سمت چـپ واکـنش(۱) در دمـای ۲۵ درجه سانتی گراد تعریف شده است. در سمت راست معادله، x_i معرف تعداد مول اجزای گازی می باشد که مجهول هستند.

بالانس جرم

برای یافتن پنج x_i مربوط به اجزای گاز تولیدی، نیاز به پنج معادله می باشد که این معادلات با نوشتن معادلـه بـالانس جرم و نوشتن ثابت تعادل برای معادلات اصلی به دست می آید. سه معادله اول از بالانس جرم کربن، هیدروژن و اکسیژن به شکل زیر به دست می آید:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

معادلات زیر به ترتیب برای موازنه مولی کربن، هیدروژن و اکسیژن به کار می‌روند:

$X_1+X_3+X_5=1$ معادله (۲)

$X+2m_w=2X_2+2X_4+4X_5$ معادله (۳)

$y+m_w+2X_g=X_1+2X_3+X_4$ معادله (۴)

تعادل ترمودینامیکی

تعادل شیمیایی را می توان از طریق حداقل‌سازی انرژی گیبس و هم ثابت تعادل بیان نمود که برای حداقل‌سازی انرژی گیبس از روش‌های محدود بهینه‌سازی استفاده می‌کنند که نیازمند عملیات پیچیده ریاضی می باشد. به همین دلیل، اینجا از مدل تعادل ترمودینامیکی بر اساس ثابت تعادل استفاده شده است. دو معادله باقیمانده از پنج معادله مورد نیاز، از رابطه ثابت تعادل واکنش های ناحیه گازی سازی به ترتیب زیر استفاده می‌شود. واکنش اصلی درون راکتور به قرار زیر است:

(۱) واکنش بودووارد $C+CO_2\rightarrow 2CO$

(۲) واکنش آب ـ گاز $C+H_2O\rightarrow CO+H_2$

از ترکیب دو معادله فوق به رابطه زیر می‌رسیم:[۱۳]

(۳) واکنش جابجایی آب ـ گاز $CO+H_2O\rightarrow CO_2+H_2$

واکنش مهم دیگر در فرایند گازی سازی، واکنش تشکیل متان است که به شکل زیر بیان می‌شود:

(۴) واکنش متان $C+2H_2\rightarrow CH_4$

در این مدل‌سازی فرض می‌شود که در تمامی واکنش های ناحیه گازی سازی، تعادل ترمودینامیکی برقرار است و همچنین تمام گازها ایده آل فرض می شود و اینکه تمامی واکنش ها در فشار ۱ اتمسفر اتفاق می افتد. از آنجا که ثابت‌های تعادل تابع دما هستند، برای واکنش جابجایی آب– گاز و واکنش متان، ثابت تعادل تعریف می گردد، می توان به معادلات چهارم و پنجم دست یافت. ثابت تعادل برای دو واکنش (۴) و (۵) بصورت تابعی از نسبت اجزای مولی به صورت زیر نوشته می‌شود:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

$$K_1 = \frac{P_{CO_2} P_{H_2}}{P_{CO} P_{H_2O}} = \frac{n_{CO_2} n_{H_2}}{n_{CO} n_{H_2O}} = \frac{x_3 x_2}{x_1 x_4}$$ معادله چهارم (۵)

$$K_2 = \frac{P_{CH_4}}{(P_{H_2})^2} = \frac{n_{CH_4} n_{tot}}{n_{H_2}^2} = \frac{x_5}{x_2^2} n_{tot}$$ معادله پنجم (۶)

بالانس انرژی

برای به دست آوردن ثابت‌های تعادل نیاز به محاسبه دمای گازی سازی T می باشد. برای این کار از بالانس انـرژی در ناحیه گازی سازی که عموما شرایط آدیاباتیک فرض می شود، استفاده می شود[۱۷]. اگر دمای ناحیه گازی سازی T در نظر گرفته شود و دمای ناحیه ورودی ۲۹۸ درجه کلوین فرض شود، بالانس انرژی به صورت معادله (۷) بیان می شود :

$$\sum_{i=react} H^o_{f,i} = \sum_{i=prod} ni(H^o_{f,i} + \Delta H^o_{T,i})$$ معادله (۷)

با موازنه آنتالپی درون گازی ساز محتوای آنتالپی کل در هر گونه شیمیایی برابر با مجموع انتـالپی شـیمیایی وآنتـالپی مشهود و طبق رابطه زیر بیان می‌شود: معادله (۸)

$$H^o_{f-biomass} + m_w\left(H^o_{f_{H_2O(l)}} + H_{vap}\right) + x_g\left(H^o_{fO_2} + 3.7 H^o_{fN_2}\right)$$
$$= x_1\left(H^o_{fCO} + \int_{298}^{T_g} C_{pCO}\,dT\right) + x_2\left(H^o_{f_{H_2}} + \int_{298}^{T_g} C_{pH_2}\,dT\right) + x_3\left(H^o_{fCO_2} + \int_{298}^{T_g} C_{pCO_2}\,dT\right)$$
$$+ x_4\left(H^o_{fH_2O} + \int_{298}^{T_g} C_{pH_2O}\,dT\right) + x_5\left(H^o_{fCH_4} + \int_{298}^{T_g} C_{CH_4}\,dT\right) + \left(\frac{z}{2} + x_g 3.76\right)\int_{298}^{T_g} C_{pN_2}\,dT$$

که در رابطه زیر داریم :

$$\Delta \int_{298}^{T} C\bar{p}(T)\,dT \bar{h}_T =$$ معادله (۹)

مقدار C_p توسط رابطه زیر برای طیف وسیعی از دما محاسبه می شود:[۸]

$$C_p(T) = c_1 + c_2 T + c_3 T^2 + c_4 T^3 \ (kJ/kg)$$ معادله (۱۰)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

گرمای مشهود هر نوع گاز را می توان با انتگرال گیری از معادله فوق از دمای محیط تا دمای گـازی سـازی محاسـبه نمود. جدول زیر ظرفیت حرارتی ویژه گازهای مختلف را نشان می‌دهد:

جدول ۲): ظرفیت حرارتی ویژه گازهای مختلف

species	C1	C2	C3	C4
N_2	۳۱,۲	$-۱,۳۶ \times ۱۰^{-۲}$	$۲,۶۸ \times ۱۰^{-۵}$	$-۱,۱۷ \times ۱۰^{-۸}$
CO_2	۱۹,۸	$۷,۳۴ \times ۱۰^{-۲}$	$-۵,۶۰ \times ۱۰^{-۵}$	$۱,۷۲ \times ۱۰^{-۸}$
H_2	۲۹,۱	$-۱,۹۲ \times ۱۰^{-۳}$	$۴,۰۰ \times ۱۰^{-۶}$	$-۸,۷۰ \times ۱۰^{-۱۰}$
CO	۳۰,۹	$-۱,۲۹ \times ۱۰^{-۲}$	$۲,۷۹ \times ۱۰^{-۵}$	$-۱,۲۳ \times ۱۰^{-۸}$
CH_4	۱۹,۳	$۵,۲۱ \times ۱۰^{-۲}$	$۱,۲۰ \times ۱۰^{-۵}$	$-۱,۱۳ \times ۱۰^{-۸}$
$H_2O_{(g)}$	۳۲,۲	$۱,۹۲ \times ۱۰^{-۳}$	$۱,۰۲ \times ۱۰^{-۵}$	$-۳,۶۰ \times ۱۰^{-۹}$

سپس با انتگرال گیری و استفاده از جدول فوق می توان معادله (۲) را کامل تر نمود .

از رابطه *HHV* برای محاسبه نسبت اجزای گاز سنتز حاصل از بیوماس و از رابطه *LHV* برای محاسبه گرمای تشکیل استفاده می‌شود. گرمای تشکیل بیوماس (سوخت) طبق معادله زیر محاسبه می‌شود:*[۵]*

$$H^{o}_{f,bio} = \mathrm{LHV} + \sum_{i=1}^{n} n_i p_i$$ معادله (۱۱)

LHV بر مبنای خشک بیوماس می باشد و از طریق معادله زیر محاسبه می گردد:*[۵]*

$$LHV=4.187(81C+300H-26(O-S)-6(9H+m))\ (kJ/kg)$$ معادله (۱۲)

در نهایت، برای محاسبه خطا بین نتایج مدل و نتایج تجربی از پارامتر *RMS* استفاده شده است که نحوه محاسبه آن در معادله (۱۳) بر اساس نتایج بدست آمده از مدل و نتایج تجربی نشان داده شده است:[۸]

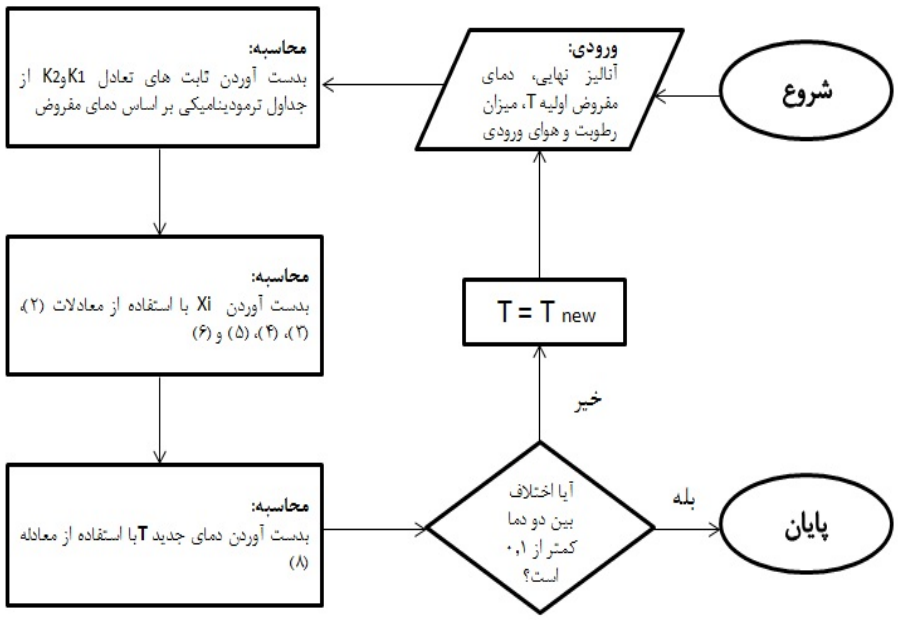
$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i}^{N}(Experiment_i - Model_i)^2}{D}}$$ *معادله*(۱۳)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

فرایند محاسبات

با حل معادلات و به دست آوردن دمای T سپس مقادیر k_1 و k_2 از جداول ترمودینامیکی مطالعه می شود. آنگاه پنج معادله به صورت غیر خطی با متد نیوتون–رافسون حل می شود. پس از به دست آوردن مول اجزای گاز تولیدی واکنش (۱)، دمای جدید به دست می‌آید. جزئیات فرایند محاسبات در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳) : فرایند محاسبات برای حل معادلات



ابتدا یک دما حدس زده می شود و بر اساس داده های موجود، مقادیر ثابت تعادل از جداول ترمودینامیکی مطالعه می‌شود. سپس به کمک روش نیوتن رافسون تعداد مول اجزای گاز تولیدی مشخص می شود و بر همین اساس، به کمک معادله (۸) دمای جدید گازی ساز محاسبه می شود. حال اگر اختلاف آنها از ۰,۱ کمتر باشد، چرخه پایان می‌پذیرد در غیر این صورت، تا رسیدن به جواب قابل قبول ادامه پیدا خواهد کرد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

نتایج

در این بخش با حل معادلات به کمک نرم افزار متلب به شبیه سازی الگوریتم مساله پرداخته می شود و نتایج به صورت زیر در قالب شکل های مستخرج از کد ارائه داده می‌شود. اما قبل از آن به اعتبار سنجی کد پرداخته می شود.

مقایسه با نتایج تجربی (صحه گذاری)

در این بخش، مدل بدست آمده که از توسعه کد محاسباتی حاصل شده است، با نتایج تجربی حاصل از گازی ساز پائین سو با در نظرگیری بیوماس مربوطه در هر مورد عملی به عنوان خوراک، مقایسه شده است. در جدول۴ نتایج حاصل از مدل، با نتایج عملی یک گازی ساز پائین سو مقایسه شده است.

جدول٤) : مقایسه نتایج مدل با نتایج عملی یک گازی ساز پائین سو در دمای ۱۱۰۰ کلوین[۱۰]

Moisture Content Wt% (wet Basis)	Ultimate analysis, Wt% (dry basis)			H_2, % vol. (moisture free basis)		CO, %vol. (moisture free basis)	
	C	H	O	P^*	E^{**}	P^*	E^{**}
۰	۴۷,۳	۵,۸	۴۵	۱۶,۹	۱۴,۱	۲۳	۲۲,۱
۱۲	۴۵,۸	۶	۴۷,۹	۱۷,۶	۱۵,۲	۱۸	۱۹,۱
۱۴	۵۰,۶	۶,۵	۴۲	۱۷,۷	۱۷	۱۷,۵	۱۸,۹
۲۰	۵۲	۶,۱	۴۱,۶	۱۷,۹	۱۷,۲	۱۶,۱	۱۷,۱
RMS				۱,۹۰		۱,۱۵	
P^*=predicted values E^{**}=experimental values							

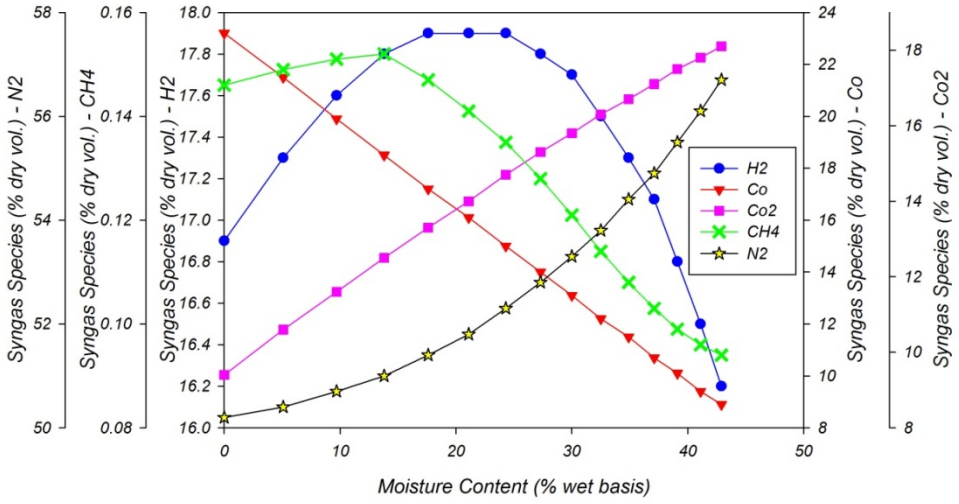
جدول۴ نتایج مدل و میزان اختلاف بین نتایج مدل و نتایج تجربی را نشان می دهد. این میزان اختلاف توسط پارامتر RMS محاسبه شده و مقادیر آن نشان دهنده این مطلب است که میزان این اختلاف بر اساس داده های بدست آمده ناچیز است و همین امر نشان دهنده صحت مدل ارائه شده است. این مقایسه در رطوبت های متفاوت ۰ ، ۱۲ ، ۱۴ و ۲۰ درصد انجام شده و بر اساس آنالیز نهایی پسماند، مقادیر گازهای هیدروژن و مونوکسید کربن که دارای ارزش حرارتی هستند و برای ما حائز اهمیت می باشند، انجام شده است و بر اساس مقایسه اعداد می توان به کوچک بودن خطا پی برد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

اما در ادامه به ارائه نمودارهای حاصل از مدل پرداخته می شود.

نتایج و بحث

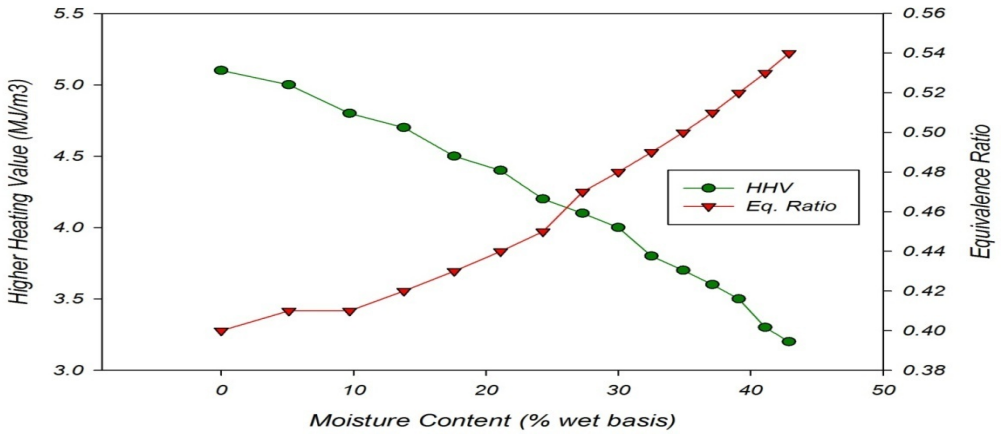
شکل ۱ ترکیب اجزاي گازي شکل خروجي را به ازاي درصد رطوبت مختلف نشان مي دهد که هیدروژن توليدي در ابتدا روند افزايشي، سپس در اثر اشباع شدن واکنش و انجام واکنش در جهت عکس روند کاهشي را به خود مي گيرد و مقدار آن تا ۱۷,۹% روند افزايشي دارد. مونوکسیدکربن در اثر افزايش رطوبت از ۰ تا ٤۰ درصد مقدارش از ۲۳,۳ تا ٦ درصد کاهش مي‌يابد. مقدار مونوکسیدکربن در حداکثر مقدار هیدروژن، ۱۷% مي باشد. دي اکسید کربن و نیتروژن نیز با افزايش ميزان رطوبت، مقدارشان درگاز خروجي افزايش مي يابد و در نهايت، گاز مفید متان که داراي مقدار بسيار کمي مي‌باشد ،داراي روند کاهشي از ۰,۱۵ تا ۰,۰۹ درصد در اين محدوده رطوبت مي شود.



شکل ۱) : اثر محتوای رطوبت بر ترکیب اجزای گازسنتز

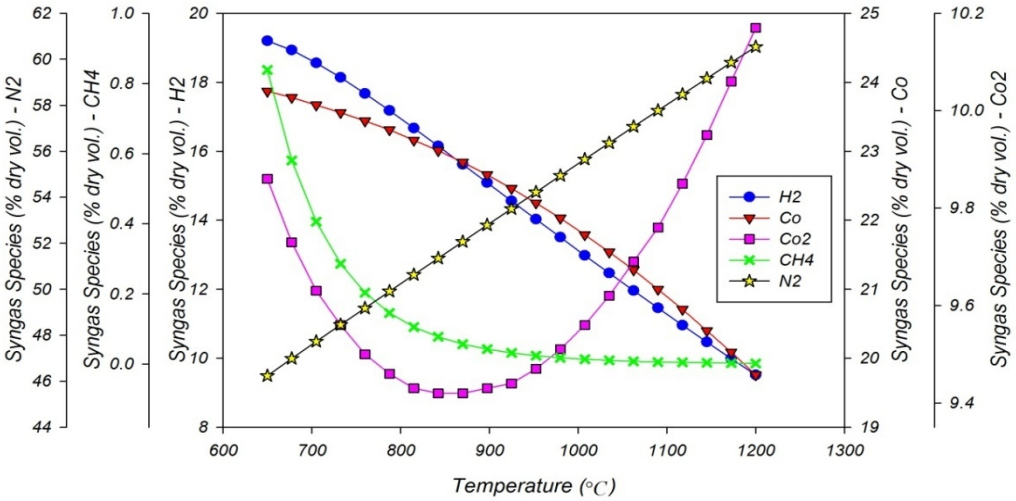
شکل۲ میزان ارزش حرارتی گاز خروجی از گازی سازی را نشان می دهد که با افزایش رطوبت خوراک از ۰ تا ۴۰ درصد، میزان ارزش حرارتی گاز خروجی از گازی سازی از ۵,۲ تا ۳,۲ (مگاژول بر متر مکعب) کاهش می یابد و این امر نشان دهنده مضر بودن وجود رطوبت در خوراک می‌باشد بنابراین، برای جلوگیری از این روند کاهشی ارزش حرارتی، گرفتن رطوبت موجود در خوراک با استفاده از تابش مستقیم نور آفتاب پیشنهاد می شود. این نمودار، نحوه تغییر میزان ثابت تعادل را که معرف میزان سرعت واکنش رفت به سرعت واکنش برگشت می باشد، نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت این میزان از ۰,۳۹ تا ۰,۵۴ روند افزایشی دارد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]



شکل ۲) : اثر محتواي رطوبت بر **HHV** گاز سنتز در شرایط آدیاباتیک

شکل ۳ نیز اثر دما بر غلظت گاز سنتز را نشان می دهد که محدوده دما در ناحیه گازی سازی از ۶۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است. دمای تعادلی برای ناحیه گازی ساز در حدود ۱۰۷۳ درجه کلوین (۸۰۰ درجه سانتی گراد) به دست آمد. شکل ۳ روند افزایشی یا کاهشی غلظت گازهای خروجی از گازی سازی را نشان می‌دهد.

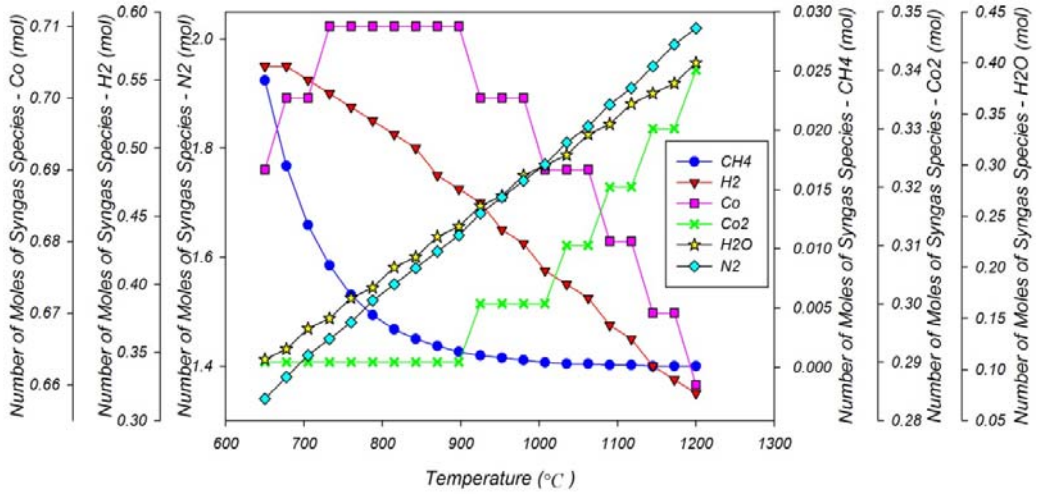


شکل ۳) : اثر دما بر غلظت گازسنتز خروجی از گازی ساز

در نهایت، اثر دما بر تعداد مول های گاز سنتز خروجی از گازی ساز مورد بررسی قرار گرفته که چگونگی این روند در شکل ۴ رسم شده است. هدف از ارائه این نمودار، بررسی بیشتر و دقیق تر گاز سنتز خروجی از گازی ساز و نحوه تغییرات

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

تعداد مول گازهای موجود در گاز سنتز می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود، تعداد مول گاز هیدروژن موجود در گاز سنتز با افزایش محدوده دما کاهش می‌یابد. و تعداد مول گاز مونوکسید کربن در ابتدا افزایش می‌یابد، اما در کل روند کاهشی را به خود می گیرد. علت بررسی گاز های هیدروژن و مونوکسیدکربن موجود در گاز سنتز این است که این گازها ارزش حرارتی دارند و می توانند در سیستم های تولید انرژی نظیر پیل سوختی، موتور احتراق داخلی، توربین گاز و ... تولید انرژی نمایند.



شکل ٤) : اثر دما بر تعداد مول های گاز سنتز خروجی از گازی ساز

نتیجه گیری

از آنجا که انرژی منشاء اصلی و اساس زندگی انسانهاست، نیاز به تولید انرژی‌های تجدید پذیر و پاک به منظور کاهش بحران مصرف انرژی بسیار حیاتی می باشد. امروزه بیوماس به عنوان بزرگترین منبع تجدیدپذیر در مقایسه با سایر منابع تجدیدپذیر، در تأمین انرژی اولیه جهان شناخته می شود. استفاده از گاز سنتز ناشی از گازی سازی زباله های شهری در ایران می تواند منتج به افزایش سهم تولید برق و انرژی و کاهش هزینه های دفن پسماند گردد. از این رو، جهت رفع معضل زباله شهر تهران، یک روش تولید انرژی دوست دار محیطزیست ارائه شد. خوراک مورد استفاده در سیستم، زباله‌های جامد شهری تهران می باشد. در این تحقیق، یک مدل ترمودینامیکی بر اساس ثابت های تعادل واکنش های اصلی گازی سازی به منظور بررسی اثر رطوبت زائدات، روی ترکیب گاز سنتز خروجی، دمای تعادل گازی سازی، ارزش حرارتی گاز سنتز خروجی در یک گازی ساز بستر ثابت پائین سو مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که با افزایش میزان رطوبت زباله، مقدار هیدروژن تا ۱۷٫۹٪ روند افزایشی دارد. در کل، نتایج حاکی از مثبت بودن ارائه طرح می باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

البته جهت افزایش عملکرد سیستم، گرفتن رطوبت از طریق تابش آفتاب پیشنهاد می گردد. گاز سنتز حاصله نیز جهت تولید انرژی در سیستم های تولید انرژی نظیر پیل سوختی، توربین گاز یا میکروتوربین، موتور احتراق داخلی و ... می‌تواند استفاده شود.

منابع

[۱] عمرانی، قاسمعلی. (۱۳۸۳) مواد زائد جامد، جلد ۱ و ۲ ، مرکز انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ۱-۵۰.

[۲] فصلنامه آماری (تابستان ۸۲)، فصلنامه آماری مدیریت مواد زائد جامد شهر تهران ، شماره دوم، سازمان بازیافت و تبدیل مواد

[3] A.L. Villanueva, A. Gomez-Barea, E. Revuelta, M. Campoy and P. Ollero. June 2–6 (2008) "Guidelines for selection of gasifiers modeling strategies" 16th European biomass conference and exhibition Valencia, Spain.

[4] D. Fiaschi, M. Michelini. 2001. "A two-phase one-dimensional biomass gasification kinetic model" Biomass Bioenergy 21, pp. 121–132.

[5] Higman C, van der Burgt MJ.2003. "Gasification, USA: Gulf Professional Pub".

[6] H.L. Chum, R.P. Overend. (2001) "Biomass and renewable dueks" Fuel Processing Technology 71, 187-195.

[7] http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/2009_downloads/statistical_review_of_world_energy_full_report_2009.xls#'Primary.

[8] Jarungthammachote S, Dutta A. 2007 "Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier". Energy 2007; 32: 1660-9.

[9] Li X. (2002) "Biomass gasification in circulating fluidized bed" PhD dissertation. Vancouver, Canada: University of British Columbia.

[10] Maria puig arnavat. 2011 "Performance modeling and validation of biomass gasifiers for trigeneration plants" Doctoral thesis, Department of mechanical engineering, October 2011.

[11]. Pellegrini Jr LF. 2007 "Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification" Energy 2007; 32(4):314-27.

[12]. Plis p, Wilk RK. 2011 "Theoretical and experimental investigation of biomass gasification process in a fixed bed gasifier" Energy (Oxford) 2011vol. 36 No. 6 pp. 3838-3845.

[13] R.D. Perlack, L.L. Wright, AF. Turhollow. 2005 "Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry" The technical feasibility of a billion-ton annual supply. Oak Ridge National Lab, Oak Ridge, 2005.

[14] School of Environment, Resources and Development. 2004 "Municipal solid waste management in Asia / Asian Regional Research Program on Environmental Technology (ARRPET), Asian Institute of Technology, Thailand".

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

[15] Schuster G, Loffler G, Weigl K, Hofnauer H. 2001 “Biomass steam gasification – an extensive parametric modeling study” Biosourr Technol 2001; 77(1):71-9.

[16] W.R. Smith and R.W. Missen. 1982 “Chemical reaction equilibrium analysis: theory and algorithms” Wiley, New York, USA.

[17] Zainal ZA, Ali R, Lean CH, Seetharamu KN. 2001 “Prediction of the performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials” Energy Convers Manage 2001; 42: 1499_515.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]