

( )

پیام هوشمند<sup>۱</sup>، رامین روشندل<sup>۲\*</sup>

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 گاز سنتز 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

## 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 می شود که به طور مستقیم یا غیر مستقیم حاصل از فعالیت انسان بوده و از نظر تولید کننده زائد تلقی می شود [۱].

## سیستم های بازیافت انرژی از پسماند

کاغذ، مقوا، پلاستیک، شیشه، فلزات و... از جمله مواد قابل بازیافت اصلی در مواد زائد جامد شهری می باشند که بازیافت هریک از آنها 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 ورری 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 و استفاده 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 سازی های بستر ثابت به دو نوع پایین سو و بالا سو تقسیم بندی می شوند و گازی سازی های بستر سیال به دو نوع جوشان و بازگردشی تقسیم بندی

می‌شوند. گازی سازهای بستر ثابت دارای ساختار و فناوری ساده تر می‌باشند که واکنش‌ها در یک بستر ثابت و به دور از جریان‌های سیالی رخ می‌دهد. معمولاً 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 می‌شود 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 می‌باشد، به آن گازی ساز بالا سو گفته می‌شود. گازی سازهای بستر سیال از طریق ترکیب شدن مواد بستر راکتور نظیر شن یا ماسه و خوراک در دمای بالا عمل می‌کنند. در این نوع از گازی ساز با ایجاد جریان سیال مانند، زیست توده نیز حالت سیال به خود گرفته و در اثر این جریان‌ها انتقال حرارت و سایر واکنش‌ها انجام می‌گیرد. در گازی سازهای نوع سوم، خوراک و اکسید کننده در یک جهت و همزمان وارد راکتور می‌شوند. این نوع از راکتورها دارای دمای عملیاتی بالا و انتقال حرارت بالا و در نتیجه قابلیت تبدیل کربن بالایی می‌باشند. اندازه و خصوصیات خوراک ورودی به این گازی ساز دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. [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 می‌شود: روش استوکیومتریکی و روش غیر استوکیومتریکی. روش استوکیومتریکی نیازمند یک واکنش مرجع می‌باشد که تمامی واکنش‌ها و گازهای موجود را پوشش دهد و بر اساس این واکنش، مدل‌سازی انجام می‌گیرد که در این پژوهش، معادله مرجع واکنش جهانی گازی‌سازی در نظر گرفته شده است. در روش غیر استوکیومتریکی هیچ واکنش مرجع و اصلی وجود ندارد. در واقع، تنها ورودی مورد نیاز مدل، آنالیز نهایی خوراک است و بر این اساس مدل‌سازی انجام می‌گیرد.

یک نوع مدل‌سازی با استفاده از تعادل ترمودینامیکی برای گازی‌سازی 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 داده‌های 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 داده‌های آزمایش، به بررسی اثر رطوبت و مقدار هوای تعادل روی ترکیب گاز سنتز خروجی پرداختند. دوتا و جارائنگتاماچوت [۸] از روش غیر استوکیومتریکی برای مدل‌سازی سه نوع گازی‌سازی استفاده کردند که به پیش بینی ترکیب گاز خروجی از گازی ساز پرداختند که نتایج مناسبی در مقایسه با داده‌های تجربی جز برای مونوکسید کربن به دست آمد. همچنین در این مقاله به نحوه تغییر ارزش حرارتی گاز سنتز خروجی پرداخته شد. زینال و همکارانش [۱۷] از روش مدل‌سازی استوکیومتریکی برای پیش بینی ترکیب گاز تولیدی بیوماس‌های مختلفی استفاده

نمودند. از مقایسه [۸] و [۳] می توان دریافت که با آنکه مدل سازی استوکیومتریکی و غیر استوکیومتریکی دارای ارزش یکسانی می باشند [۱۶]، اما در مواردی مدل سازی استوکیومتریکی 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 مدل سازی را انجام می دهد، می تواند 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 پارامتریکی بر اساس تعادل ترمودینامیکی به بررسی دما و رطوبت روی ترکیب گاز خروجی پرداختند. دوتا و جارنگتاماجوت [۸] نیز به کمک مدل سازی استوکیومتریکی 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 استوکیومتریکی و غیر استوکیومتریکی از لحاظ ارزش مدل سازی معادل یکدیگر می باشند. در یک مدل سازی 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 ویژگی های تحقیق

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

- در این تحقیق با استفاده از مدل سازی ترمودینامیکی تعادلی به پیش بینی رفتار یک گازی ساز پائین سو با خوراک زباله شهری پرداخته شده که این مدل سازی 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،

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 حدوداً 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 می تواند 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 مقدمه ای 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 می باشد و در حالت کلی شامل مراحل خشک کردن و تبخیر بیوماس از طریق فرآیند پیرولیز و در نهایت فرایند اکسایش و کاهش می باشد. فرایند گازی سازی شامل واکنش های متفاوتی می باشد که در بحث مدل سازی به فرایندهای اساسی آن پرداخته می شود.

#### معرفی مدل

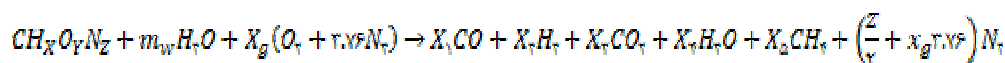
نسبت اجزای شیمیایی بیوماس (فرمول شیمیایی خوراک) را می توان به صورت  $CH_xO_yN_z$  بیان نمود که در آن  $x$  و  $y$  و  $z$  به ترتیب نسبت مولی هیدروژن به کربن، اکسیژن به کربن و نیتروژن به کربن موجود در خوراک می باشد و برای بیوماس های متفاوت با دانستن آنالیز نهایی می توان مقادیر  $x$  و  $y$  و  $z$  را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

آنالیز نهایی بیوماس مورد استفاده در این مدل سازی که یک نوع زائدات شهری شهر تهران می باشد، در جدول ۱ نشان داده شده است.

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 گازی سازی استفاده شود، واکنش جهانی گازی سازی را می توان به شکل زیر بیان نمود [۸]. در این واکنش جهانی، خوراک در داخل راکتور گازی سازی در حضور حرارت با رطوبت و هوا واکنش نشان می دهد و در نتیجه، انجام واکنش های شیمیایی که در ادامه به مهم ترین آنها پرداخته می شود، گازهایی از جمله هیدروژن، مونوکسید کربن، دی اکسید کربن، متان و نیتروژن حاصل می شود که ترکیب این گازها به نوع خوراک، میزان رطوبت، نوع گازی ساز و ... بستگی دارد: واکنش (۱)



از مقدار گوگرد به دلیل ناچیز بودن مقدارش صرف نظر می شود [۸]. مقدار  $m_w$  که عبارت است از مقدار رطوبت موجود در هر کیلو مول خوراک در معادله فوق، به شکل زیر است:

$$m_w = \frac{(M_{big} m)}{w(1-m)} \quad (1)$$

و همچنین  $X_g$  معرف مقدار هوا در هر کیلو مول خوراک است، کلیه ورودی ها در سمت چپ واکنش (۱) در دمای 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 معادله بالانس 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:

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

$$X_1 + X_3 + X_5 = 1 \quad \text{معادله (۲)}$$

$$X + 2m_w = 2X_2 + 2X_4 + 4X_5 \quad \text{معادله (۳)}$$

$$y + m_w + 2X_g = X_1 + 2X_3 + X_4 \quad \text{معادله (۴)}$$

### تبادل ترمودینامیکی

تبادل شیمیایی را می‌توان 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 می‌باشد. 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 واکنش‌های ناحیه‌گازی سازی به ترتیب زیر استفاده می‌شود. واکنش اصلی درون راکتور به قرار زیر است:



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



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



در این مدل‌سازی فرض می‌شود که در تمامی واکنش‌های ناحیه‌گازی سازی، تعادل ترمودینامیکی برقرار است و همچنین تمام گازها ایده آل فرض می‌شود و اینکه تمامی واکنش‌ها در فشار ۱ اتمسفر اتفاق می‌افتد. از آنجا که ثابت‌های تعادل تابع دما هستند، برای واکنش جابجایی آب-گاز و واکنش متان، ثابت تعادل تعریف می‌گردد، می‌توان 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:

$$K_1 = \frac{F_{CO_2} \cdot F_{H_2}}{F_{CO} \cdot F_{H_2O}} = \frac{n_{CO_2} \cdot n_{H_2}}{n_{CO} \cdot n_{H_2O}} = \frac{x_1 x_7}{x_2 x_8} \quad \text{معادله چهارم (۵)}$$

$$K_7 = \frac{F_{CH_4}}{(F_{H_2})^2} = \frac{n_{CH_4} \cdot n_{CO_2}}{n_{H_2}^2} = \frac{x_3}{x_7^2} n_{CO_2} \quad \text{معادله پنجم (۶)}$$

### بالانس انرژی

برای به دست آوردن ثابت‌های تعادل نیاز به محاسبه دمای گازی سازی T می‌باشد. برای این کار از بالانس انرژی در ناحیه گازی سازی که عموماً شرایط آدیاباتیک فرض می‌شود، استفاده می‌شود [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 می‌شود:

$$\sum_{i=\text{react}} H_{f,i}^0 = \sum_{i=\text{prod}} n_i (H_{f,i}^0 + \Delta H_{T,i}^0) \quad \text{معادله (۷)}$$

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

$$\begin{aligned} & H_{f,\text{biomass}}^0 + m_{\text{tw}} (H_{f,H_2O(l)}^0 + H_{\text{vap}}) + x_g (H_{f,O_2}^0 + 3.76 H_{f,N_2}^0) \\ &= x_1 \left( H_{f,CO}^0 + \int_{T_{ref}}^{T_g} C_{p,CO} dT \right) + x_7 \left( H_{f,H_2}^0 + \int_{T_{ref}}^{T_g} C_{p,H_2} dT \right) + x_7 \left( H_{f,CO_2}^0 + \int_{T_{ref}}^{T_g} C_{p,CO_2} dT \right) \\ &+ x_8 \left( H_{f,H_2O}^0 + \int_{T_{ref}}^{T_g} C_{p,H_2O} dT \right) + x_3 \left( H_{f,CH_4}^0 + \int_{T_{ref}}^{T_g} C_{p,CH_4} dT \right) + \left( \frac{x}{4} + x_g 3.76 \right) \int_{T_{ref}}^{T_g} C_{p,N_2} dT \end{aligned}$$

که در رابطه زیر داریم:

$$\Delta \int_{T_{ref}}^T C_p(T) dT \Big|_T = \quad \text{معادله (۹)}$$

مقدار  $C_p$  توسط رابطه زیر برای طیف وسیعی از دما محاسبه می‌شود: [۸]

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

گرمای مشهود هر نوع گاز را می توان با انتگرال گیری از معادله فوق از دمای محیط تا دمای گازی سازی محاسبه نمود. جدول زیر ظرفیت حرارتی ویژه گازهای مختلف را نشان می دهد:

جدول (۲): ظرفیت حرارتی ویژه گازهای مختلف

species	C1	C2	C3	C4
N <sub>2</sub>	۳۱,۲	$-۱,۳۶ \times 10^{-۲}$	$۲,۶۸ \times 10^{-۵}$	$-۱,۱۷ \times 10^{-۸}$
CO <sub>2</sub>	۱۹,۸	$۷,۳۴ \times 10^{-۲}$	$-۵,۶۰ \times 10^{-۵}$	$۱,۷۲ \times 10^{-۸}$
H <sub>2</sub>	۲۹,۱	$-۱,۹۲ \times 10^{-۳}$	$۴,۰۰ \times 10^{-۶}$	$-۸,۷۰ \times 10^{-۱۰}$
CO	۳۰,۹	$-۱,۲۹ \times 10^{-۲}$	$۲,۷۹ \times 10^{-۵}$	$-۱,۲۳ \times 10^{-۸}$
CH <sub>4</sub>	۱۹,۳	$۵,۲۱ \times 10^{-۲}$	$۱,۲۰ \times 10^{-۵}$	$-۱,۱۳ \times 10^{-۸}$
H <sub>2</sub> O(g)	۳۲,۲	$۱,۹۲ \times 10^{-۳}$	$۱,۰۲ \times 10^{-۵}$	$-۳,۶۰ \times 10^{-۹}$

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 می شود. گرمای تشکیل بیوماس (سوخت) طبق معادله زیر محاسبه می شود: [۵]

$$H_{f,sto}^g = LHV + \sum_{i=1}^n n_i p_i \quad \text{معادله (۱۱)}$$

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

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

در نهایت، برای محاسبه خطا بین نتایج مدل و نتایج تجربی از پارامتر  $RMS$  استفاده شده است که نحوه محاسبه آن در

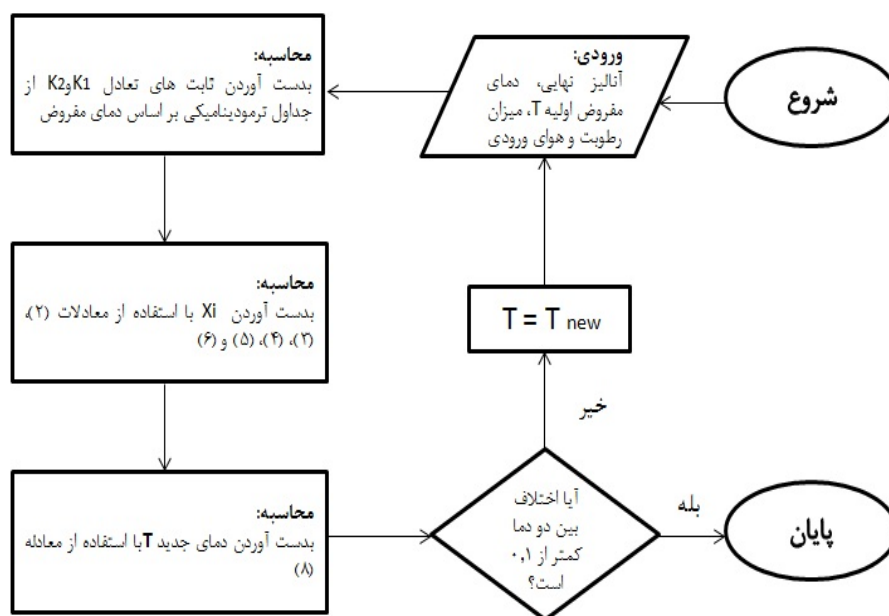
معادله (۱۳) بر اساس نتایج بدست آمده از مدل و نتایج تجربی نشان داده شده است: [۸]

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Experiment_i - Model_i)^2}{D}} \quad \text{معادله (۱۳)}$$

## 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 می آید. 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 می شود. 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 می پذیرد در غیر این صورت، تا رسیدن به جواب قابل قبول ادامه پیدا خواهد کرد.

## 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 می شود. 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 جدول ۴ نتایج حاصل از مدل، با نتایج عملی یک گازی ساز پائین سو مقایسه شده است.

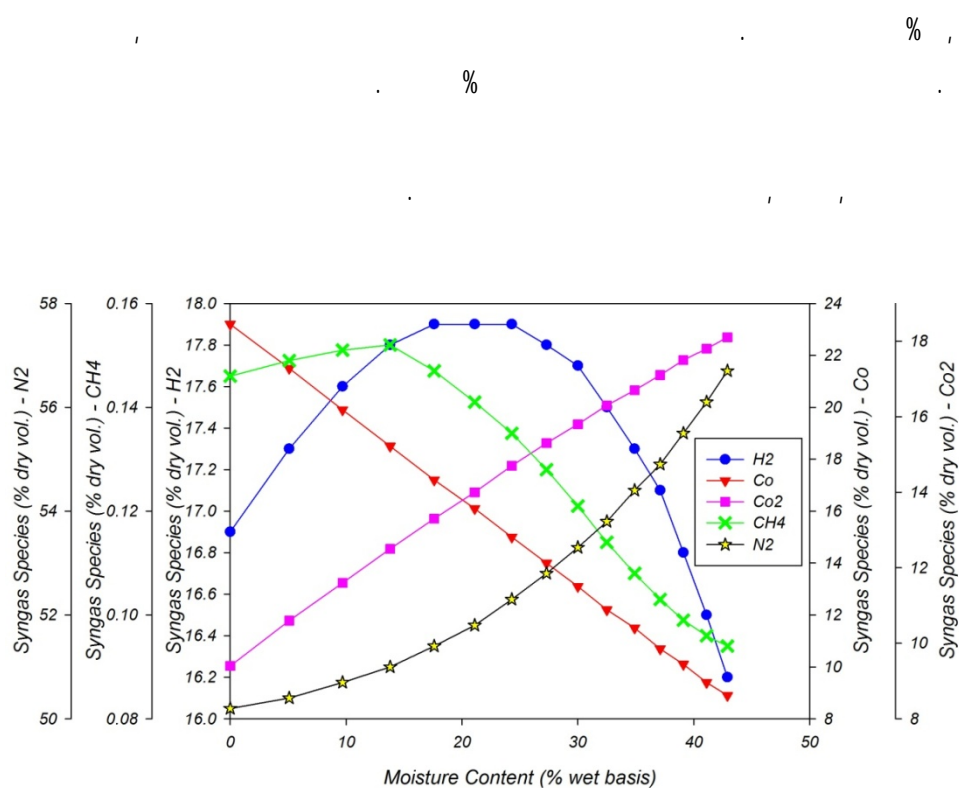
جدول ۴: مقایسه نتایج مدل با نتایج عملی یک گازی ساز پائین سو در دمای ۱۱۰۰ کلونین [۱۰]

Moisture Content Wt% (wet Basis)	Ultimate analysis, Wt% (dry basis)			H <sub>2</sub> , % 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	
				<i>P*</i> =predicted values		<i>E**</i> =experimental values	

جدول ۴ 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 خطای پی برد.

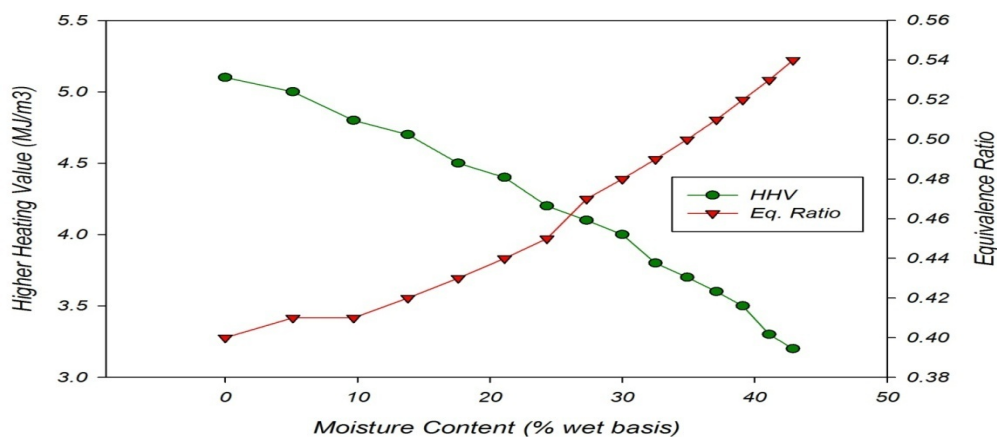
اما در ادامه به ارائه نمودارهای حاصل از مدل پرداخته می شود.

### نتایج و بحث



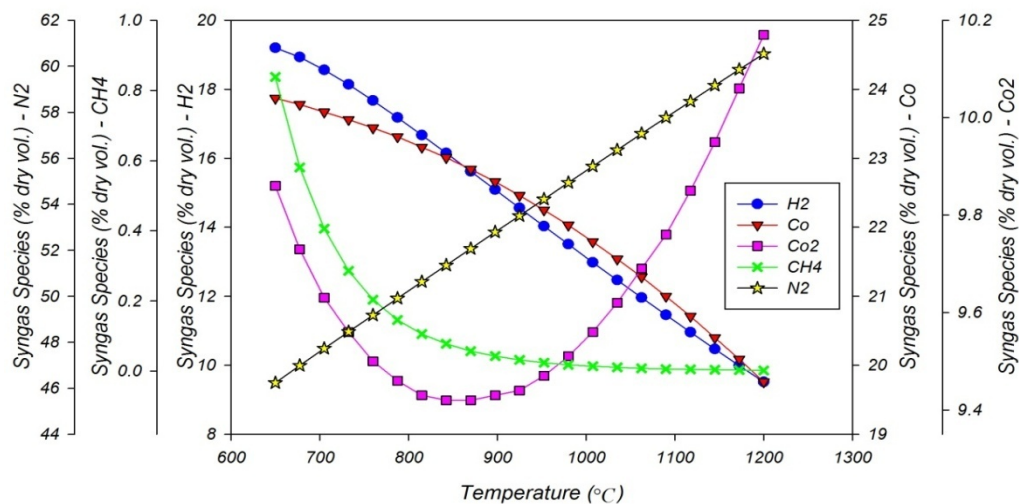
شکل ۱): اثر محتوای رطوبت بر ترکیب اجزای گاز سنتز

شکل ۲ 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 می باشد بنابراین، برای جلوگیری از این روند کاهش 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 می دهد که با افزایش رطوبت این میزان از ۰,۳۹ تا ۰,۵۴ روند افزایشی دارد.



شکل ۳: (HHV)

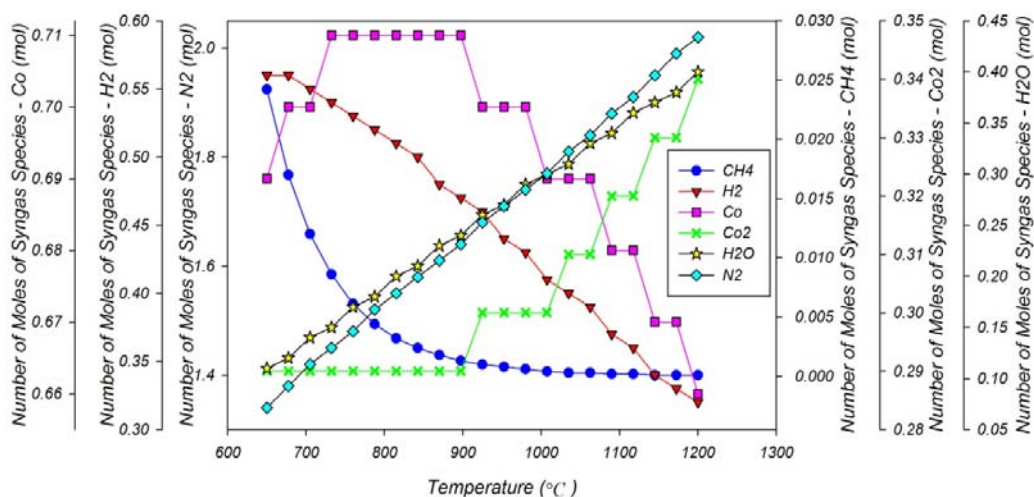
شکل ۳ نیز اثر دما بر غلظت گاز سنتز را نشان می دهد که محدوده دما در ناحیه گازی سازی از ۶۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است. دمای تعادلی برای ناحیه گازی ساز در حدود ۱۰۷۳ درجه کلوین (۸۰۰ درجه سانتی گراد) به دست آمد. شکل ۳ روند افزایشی یا کاهش غلظت گازهای خروجی از گازی سازی را نشان می دهد.



شکل ۴: اثر دما بر غلظت گاز سنتز 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

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 می‌گیرد. علت بررسی گازهای هیدروژن و مونوکسید کربن موجود در گاز سنتز این است که این گازها ارزش حرارتی دارند و می‌توانند در سیستم‌های تولید انرژی نظیر پیل سوختی، موتور احتراق داخلی، توربین گاز و ... تولید انرژی نمایند.



شکل ۴: اثر دما بر تعداد مول‌های گاز سنتز خروجی از گازی ساز

### نتیجه‌گیری

از آنجا که انرژی منشاء اصلی و اساس زندگی انسانهاست، نیاز به تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک به منظور کاهش بحران مصرف انرژی بسیار حیاتی می‌باشد. امروزه بیوماس به عنوان بزرگترین منبع تجدیدپذیر در مقایسه با سایر منابع تجدیدپذیر، در تأمین انرژی اولیه جهان شناخته می‌شود. استفاده از گاز سنتز ناشی از گازی سازی زباله‌های شهری در ایران می‌تواند منتج به افزایش سهم تولید برق و انرژی و کاهش هزینه‌های 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 می‌باشد. در این تحقیق، یک مدل ترمودینامیکی بر اساس ثابت‌های تعادل واکنش‌های 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 می‌دهد که با افزایش میزان رطوبت زباله، مقدار هیدروژن تا ۱۷٫۹٪ روند افزایشی دارد. در کل، نتایج حاکی از مثبت بودن ارائه طرح می‌باشد.

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 ... می تواند 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](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] Jarunthammachote 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) 2011 vol. 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”.

- [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.