



## Numerical Simulation of Municipal Solid Waste and Biomass Plasma Co-Gasification Process

A. Okati<sup>1</sup>, M. R. Khani<sup>2\*</sup>, B. Shokri<sup>2,3</sup>

1- M. Sc. Student of Physics, Shahid Beheshti University

2. Assistant Professor of Plasma Technology, Shahid Beheshti University

3. Professor of Physics, Shahid Beheshti University

Email: m\_khani@sbu.ac.ir

### Abstract

One of the newest methods of waste management is benefiting from thermal plasma technology in gasification. Plasma gasification is a complicated process that requires much research. Plasma technology, meanwhile, can meet the energy and waste management needs of several communities, but the experimental study is not always feasible. In this study, an Aspen Plus model based on Gibbs free energy minimization is created in order to assess municipal waste and biomass as feedstocks. After validating the model, important parameters were examined which showed that increasing the amount of municipal waste in the feed can help improve the quality of syngas as the product of this process. The best steam to waste ratio for generating the highest amount of hydrogen production was obtained 2. It was also observed that the effect of steam-to-waste ratio on hydrogen production decreases with the increase of temperature above 800 degrees Celsius, and the increase of temperature in low steam-to-waste ratios has a greater effect on the amount of hydrogen production.

Received: 20 April 2022

Accepted: 5 September 2022

Page Number: 110-120

### Keywords:

Gasification,  
Aspen Plus,  
Thermal Plasma,  
Synthesis Gas,  
Simulation

Please Cite this Article Using:

Okati, A., Khani, M. R., Shokri, B., "Numerical Simulation of Municipal Solid Waste and Biomass Plasma Co-Gasification Process", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 22, No. 128, pp. 110-120, In Persian, (2023).



## شبه‌سازی عددی فرایند گازی سازی ترکیبی پلاسمایی پسماندهای شهری و زیست توده

آرمین اوکاتی<sup>۱</sup>، محمدرضا خانی<sup>۲\*</sup>، بابک شکری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فناوری پلاσμα، دانشگاه شهید بهشتی

۲- استادیار فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی

۳- استاد فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی

پیام نگار: [m\\_khani@sbu.ac.ir](mailto:m_khani@sbu.ac.ir)

### چکیده

یکی از روش‌های نوین مدیریت پسماند، بهره‌گرفتن از فناوری پلاسمای حرارتی در گازی‌سازی است. گازی‌سازی پلاسمایی، فرایند پیچیده‌ای است که مطالعات زیادی را طلب می‌کند. در این میان فناوری پلاσμα می‌تواند جواب‌گوی نیاز به انرژی و مدیریت پسماند بسیاری از جوامع باشد که مطالعه تجربی آن همواره میسر نیست. در این تحقیق مدلی در محیط نرم‌افزار اسپن پلاس بر اساس کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس ایجاد شد تا ترکیب پسماندهای شهری و زیست‌توده به‌عنوان خوراک را بررسی کند. پس از اعتبارسنجی مدل که نتایج قابل قبولی از خود نشان داد؛ مشخصه‌های مهمی بررسی شد که نشان‌دهنده افزایش میزان پسماند شهری در خوراک، می‌تواند به بهتر شدن کیفیت گاز سنتزی به‌عنوان محصول این فرایند کمک کند. بهترین نسبت بخار به پسماند برای تولید بیشترین مقدار هیدروژن مقدار ۲ به‌دست آمد. هم‌چنین مشاهده شد که با افزایش دما - بیشتر از ۸۰۰ درجه سلسیوس - اثر نسبت بخار به پسماند بر تولید هیدروژن کاهش می‌یابد و افزایش دما در نسبت‌های پائین بخار به پسماند، به‌مراتب بر تولید هیدروژن اثر بیشتری دارد.

### کلیدواژه‌ها:

گازی‌سازی،  
اسپن پلاس،  
پلاسمای حرارتی،  
گاز سنتز،  
شبه‌سازی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۳۱  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴  
شماره صفحات: ۱۱۰ تا ۱۲۰

\* تهران، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاσμα

استناد به مقاله:

اوکاتی، آ.، خانی، م. ر.، شکری، ب.، "شبه‌سازی عددی فرایند گازی‌سازی ترکیبی پلاسمایی پسماندهای شهری و زیست‌توده"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیست‌ودوم، شماره ۱۲۸، صص. ۱۱۰-۱۲۰، (۱۴۰۲).

## ۱. مقدمه

مصرف سوخت‌های فسیلی، افزایش تقاضای انرژی و گرمایش جهانی بسیاری از محققان را به این سمت کشانده است که تحقیقاتشان را بر سوخت‌های دوستدار محیط زیست جای‌گزین انجام دهند [۱]. یکی از روش‌های امیدوارکننده برای احیای مواد و انرژی، گازی‌سازی پلاسمایی است. گازی‌سازی پلاسمایی از روش‌های پیشرفته‌ای است که در سال‌های اخیر در مرکز توجه قرار گرفته و موجب شده که تحقیقات از روش‌های معمول مانند گازی‌سازی به سمت گازی‌سازی پلاسمایی میل کند [۲]. گازی‌سازی با واکنش دادن سوخت کربنی با مقدار محدود شده‌ای از اکسیژن و گاهی در ترکیب با بخار اتفاق می‌افتد. حاصل این فرایند گاز سنتزی<sup>۱</sup> با ارزش است که برای تولید انرژی و محصولات شیمیایی به کار می‌رود [۳]. معرفی پلاسمای حرارتی به فرایند گازی‌سازی، افق‌های نوینی را برای این فرایند گشوده است؛ پلاسمای قادر است که دمای بسیار بالا و گونه‌های واکنش دهنده<sup>۲</sup> زیادی را تولید کند که می‌تواند بیشتر از ۹۰٪ ترکیبات آلی را به گاز سنتزی تجزیه کند و بدون کاتالیزگر پیوندهای هیدروکربن‌های پیچیده را بشکند [۴]. گازی‌سازی پلاسمای را به سبب ویژگی‌های حرارتی مستقل از سوختی که دارد می‌توان برای پسماندهای با خاکستر بالا مانند پسماند شهری و هم‌چنین پسماندهای خطرناک و سمی به کار برد [۵]. پلاسمای انرژی لازم برای نگره‌داری دمای داخل راکتور را به میزان کافی برای جدایی مولکول‌های گازی ایجاد شده از تجزیه<sup>۳</sup> مواد فراهم می‌کند. مواد غیر آلی پسماندها به شکل خاکستر شیشه‌مانند<sup>۴</sup> دوستدار محیط زیست در می‌آیند که می‌توان در صنایع از آن بهره گرفت [۶]. دوده<sup>۵</sup> و ناخالصی‌های دیگر یکی از چالش‌های فرایند متدوال گازی‌سازی است که می‌تواند به دستگاه‌های تولید الکتروسیته و اتصالات آسیب وارد کند. در گازی‌سازهای پلاسمایی به سبب دمای بالای تولید شده دوده درون گاز سنتزی شکسته می‌شود و منجر به تولید گاز سنتزی تمیزتر می‌شود که هزینه‌های مربوط به پاک‌سازی محصول گازی را کاهش می‌دهد [۷].

گازی‌سازی پلاسمایی جای‌گزینی مطمئن برای روش‌های معمول تبدیل گرما- شیمیایی است؛ چرا که می‌تواند ظرفیت بازتولید و بهره<sup>۶</sup>

بیشتری فراهم کند [۸]. شبیه‌سازی یکی از تلاش‌هایی است که برای بهینه‌کردن این فرایند و آماده‌کردن آن برای استفاده در مقیاس صنعتی انجام می‌شود؛ برای مثال اوکاتی و همکاران، مدل اسپن‌پلاس از گازی‌سازی پلاسمایی را برای پسماندهای پلی‌کلرات بی‌فنیل برای پیش‌بینی ویژگی‌های فرایند و عملکردش ارائه کرده‌اند و به دلیل تولید محصولات گازی اسیدی بخشی برای حذف این گازها ایجاد کرده‌اند [۹].

کاشال<sup>۴</sup> و همکاران، یک مدل گرماپویایی تعادلی از گازی‌سازی زیست‌توده در گازی‌ساز حبابی سیال در اسپن‌پلاس توسعه داده‌اند و یک مدل کوچک‌تر بر اساس معادلات جنبش‌شناختی نیز برای تولید دوده و شکسته‌شدن آن در این مطالعه در نظر گرفته‌اند. این مدل قابلیت بررسی زیست‌توده‌ها و عامل‌های گازی‌ساز مختلف را دارد [۱۰].

ژانگ<sup>۵</sup> و همکاران، مدلی گرماپویایی برای ارزیابی گازی‌سازی پلاسمایی ذوبی<sup>۶</sup> ایجاد کرده‌اند و پس از قسمت‌بندی کردن این فرایند نمودارهای انرژی و اکسرژی را برای بخش‌های مختلف به دست آورده‌اند [۱۱].

سها<sup>۷</sup> و همکاران، مدل تعادلی حالت پایا به کمک اسپن‌پلاس برای تحقیق بر گازی‌سازی با گاز کربن مونوکسید برای کود حیوانی ایجاد و خاطر نشان کردند که زغال<sup>۸</sup> مشتق شده از امحای کود گاوی در دمای ۲۶۰ درجه<sup>۹</sup> سلسیوس بهترین عملکرد را برای تولید گاز سنتزی و ارزش حرارتی کمتر دارد [۱۲].

از پسماندهای رایج در فرایند گازی‌سازی می‌توان به زیست‌توده که در واقع به پسماندهایی گفته می‌شود که از گیاهان به دست آمده باشد - مانند باقی‌مانده‌های محصولات کشاورزی و پسماند جامد شهری<sup>۹</sup> (MSW) - اشاره کرد که پسماند جامد شهری را می‌تواند همانند پسماندهایی که در منازل تولید می‌شود در نظر گرفت.

در این میان استفاده از یک نوع پسماند در گازی‌سازی می‌تواند مشکلاتی را به وجود آورد؛ برای مثال استفاده از زیست‌توده به عنوان خوراک در برخی از فصل‌های سال به مشکل در تأمین بر می‌خورد که با استفاده از ترکیب پسماندها می‌توان بر این مشکلات فائق

4. Kaushal  
 5. Zhang  
 6. Plasma Gasification Melting  
 7. Saha  
 8. Char  
 9. Municipal Solid Waste

1. Synthetic Gas  
 2. Slag  
 3. Tar

که  $y_i$  کسر مولی گاز گونه  $i$  و  $\Delta G_i^0$  انرژی آزاد گیبس تشکیل برای گونه  $i$  است. با جای گذاری معادله (۳) در معادله (۱) و اعمال روش ضرایب لاگرانژ، می‌توان  $n_i$  هایی را یافت که در آن انرژی آزاد گیبس کمینه می‌شود:

$$\frac{dL}{dn_i} = \Delta G_{f,i}^0 + n_i RT \ln\left(\frac{n_i}{n_{tot}}\right) + \sum_{j=1}^k \lambda_j a_{ij} = 0 \quad (4)$$

که  $L$  و  $\lambda_j$  به ترتیب تابع و ضریب لاگرانژ هستند.  $a_{ij}$  تعداد اتم‌ها در عنصر  $j$  در یک مول گونه  $i$  است که در واقع شرط پایستگی مواد است. با استفاده از معادله (۴) برای گونه‌های مختلف  $n_i$  دستگاه معادلاتی ایجاد می‌شود که با حل این دستگاه معادلات، می‌توان درصد مولی گونه‌های گازی تولیدی را حساب کرد. اطلاعات گرمایی شامل ثابت ظرفیت گرمایی مورد نیاز برای محاسبه انرژی آزاد گیبس در پایگاه داده نرم‌افزار اسپن‌پلاس هست و به کمک این اطلاعات و معادله (۴) نرم‌افزار اسپن‌پلاس دستگاه معادله ذکر شده را حساب می‌کند و مقدار کسر مولی محصولات را به دست می‌آورد. اطلاعات بیشتر راجع به روش شبیه‌سازی به روش تعادل گرمایی در مطالعات اوکاتی و همکاران، به خوبی بیان شده است [۵].

## ۲-۱ توصیف نمودار جریان و نحوه قرارگیری تجهیزات

در نرم‌افزار اسپن‌پلاس نمی‌توان به صورت مستقیم فرایند گازی سازی را شبیه‌سازی کرد؛ برای این منظور باید از ترکیب تجهیزهای این نرم‌افزار استفاده کرد. همان‌طور که ذکر شد از روش تعادلی برای شبیه‌سازی فرایند استفاده می‌شود که نحوه قرارگیری تجهیزها و نمودار جریان فرایند (PFD)<sup>۱</sup> در نرم‌افزار اسپن برای شبیه‌سازی فرایند در شکل (۱) قابل رؤیت است. جریان پسماند شهری از راه جریان MSW و پسماند زیست‌توده از راه BIOMASS به ترتیب وارد DECOMP و DECOMP1 می‌شوند که گرماکافت را شبیه‌سازی می‌کنند؛ در واقع مرحله قبل از گازی‌سازی است که در غیاب اکسند و در دمای پائین اتفاق می‌افتد. در این دو تجهیز که نیاز به نسبت دارند، پسماندها به عناصر تشکیل دهنده خود طبق درصدهای مشخص شده در جدول (۱) تجزیه می‌شوند و در قسمت بعد که برای شبیه‌سازی بخش خشک‌شدن ایجاد شده، بخار آب این

1. Process Flow Diagram

شد [۱۳]. محققان پسماندهای مختلفی را برای ترکیب به عنوان خوراک در نظر گرفته‌اند [۱۴، ۱۵]. در این مطالعه سعی شده است تا از ترکیب پسماند جامد شهری و زیست‌توده به عنوان مواد اولیه در فرایند گازی‌سازی ترکیبی با پلاسما استفاده شود. استفاده از پسماند جامد شهری در این فرایند می‌تواند راهی ایمن و کارآمد برای تولید انرژی پاک از این ماده و جلوگیری از آلودگی محیط زیست باشد [۱۶].

در این مطالعه سعی شده است که نقاط بهینه و هم‌چنین مشخصه‌های مهم بر فرایند گازی‌سازی پلاسمایی با استفاده از ترکیب پسماندهای زیست‌توده و پسماند شهری بررسی شود که کمتر مطالعه شده و از پسماندهای رایج در گازی‌سازی هستند تا مشکلات برشمرده در رابطه با استفاده از یک نوع پسماند برطرف شود، هم‌چنین مدلی با دقت مناسب بر پایه محاسبات تعادل گرمایی ایجاد شده است که بتواند مشخصه‌های مختلف اثرگذار بر فرایند را بررسی و ترکیب گاز سنتزی تولیدی را پیش‌بینی کند.

## ۲. روش محاسباتی شبیه‌سازی

این شبیه‌سازی از تعادل گرمایی و کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس کمک می‌گیرد. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که هدف کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس سامانه است؛ چرا که در حالت تعادل این اتفاق می‌افتد. انرژی آزاد گیبس را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۹]:

$$G^T = \sum_{i=1}^N n_i \mu_i \quad (1)$$

که در آن  $n_i$  تعداد مول‌ها و  $\mu_i$  پتانسیل شیمیایی گونه  $i$  است. با فرض ایده‌آل بودن گازهای تولیدی پتانسیل شیمیایی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_i = G_i^0 + RT \ln(f_i / f_i^0) \quad (2)$$

R و T به ترتیب ثابت جهانی گازها و دمای تعادلی سامانه است،  $f_i$  فوگاسیتی گونه  $i$ ،  $G_i^0$  انرژی آزاد گیبس استاندارد و  $f_i^0$  فوگاسیتی استاندارد گونه  $i$  است. اگر فشار یک اتمسفر باشد:

$$\mu_i = \Delta G_i^0 + RT \ln(y_i) \quad (3)$$

جدول ۱. ویژگی‌ها و ساختار پسماندهای استفاده شده.

Table 1. Characteristics and structure of wastes used.

Elements	Biomass(Wt%)	MSW(Wt%)
C	37.6	76.23
H	4.2	5.22
O	31.8	8.02
N	0.2	2.31
S	0.2	1
ASH	26	7.22

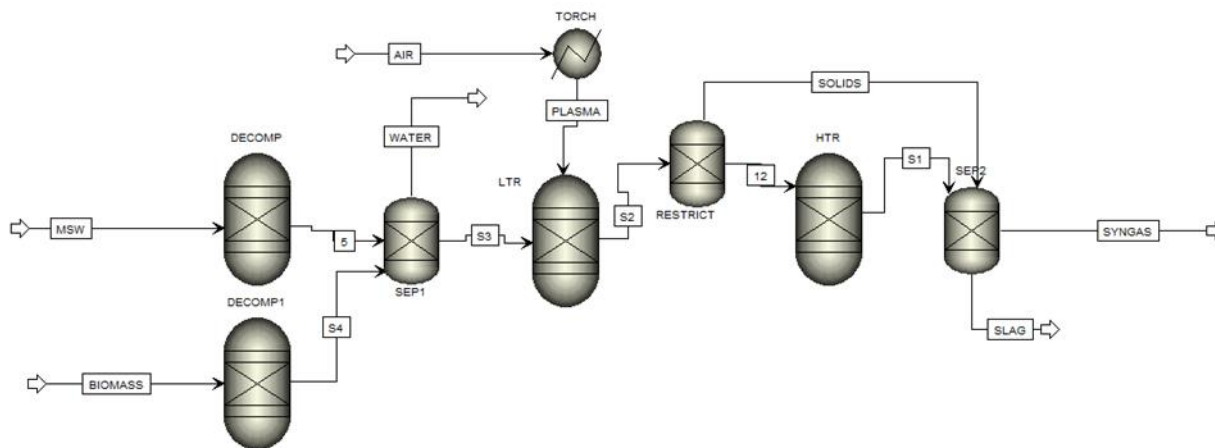
### ۲-۳ اعتبارسنجی

عملکرد مدل ایجادشده با داده‌های جناجره<sup>۲</sup> و همکاران برای گازی‌سازی پلاسمایی پسماند زیست‌توده مقایسه شد که نتایج مقایسه در شکل (۲) پیداست. خروجی‌های مدل، سازگاری قابل قبولی با اطلاعات گزارش شده داشت به‌گونه‌ای که میانگین خطای نسبی برای گونه‌های گازی ۷/۴ درصد به‌دست آمد. کمترین مقدار خطا برای گونه هیدروژن با مقدار ۰/۰۲ درصد و بیشترین مقدار برای گاز کربن‌دی‌اکسید با مقدار ۳۷/۵ درصد به‌دست آمده است. دلیل اختلاف‌ها می‌تواند به‌سبب پیشفرض‌های متفاوت در مدل و تقریب‌های انجام‌شده در محاسبات باشد [۱۷]. فرضیات این شبیه‌سازی را می‌توان در زیر مشاهده کرد:

### ۳. مواد و روش‌ها

#### ۳-۱ سوخت

پسماندها و خاکستر<sup>۱</sup> به‌صورت جامد غیرمتعارف در نرم‌افزار تعریف می‌شوند؛ ویژگی‌های پسماندهایی که در این شبیه‌سازی مطالعه شد، در جدول (۱) پیداست که به‌عنوان ورودی نرم‌افزار استفاده شد. پسماندهای جامد شهری معمولاً دارای ساختار ناهمگون هستند؛ باین‌حال، اکثراً دارای ساختار تا حدودی مشابه هستند [۵]. میزان شار ورودی خوراک ده کیلوگرم بر ساعت در نظر گرفته شد.



شکل ۱. نمودار جریان فرایند ایجادشده در نرم‌افزار اسپن‌پلاس.

Figure 1. Process flow diagram created in Aspen Plus software.

#### ۴. نتایج و ارزیابی داده‌ها

##### ۴-۱ اثر نسبت زیست توده به پسماند شهر

در فرایند گازی‌سازی ترکیبی که در پسماند خوراک از دو یا چند گونه استفاده می‌شود، نسبت‌های استفاده شده برای ترکیب این پسماندها اهمیت دارد. در این بخش نسبت‌های گوناگون زیست‌توده به پسماند جامد شهری بررسی شد و مقدار آن از ۰/۱ تا ۱ تغییر می‌کند. به‌شکلی که مقدار ۱ نشان‌دهنده این است که ترکیب پسماندی کاملاً از زیست‌توده تشکیل شده است. نتایج در شکل (۳) قابل مشاهده است. شکل (۳) نشان می‌دهد که هرچه مقدار زیست‌توده در خوراک افزایش پیدا کند، مقادیر گونه‌های کربن‌دی‌اکسید و بخار آب افزایش پیدا می‌کند که نتیجه غالب شدن واکنش‌های سوختن است و مقدار هیدروژن و کربن‌مونوکسید کاهش پیدا کرده‌اند و می‌تواند به‌سبب مقدار کمتر بودن میزان کربن در زیست‌توده نسبت به پسماند جامد شهری باشد.

- دما و فشار در این شبیه‌سازی به‌شکل یک‌نواخت پایا فرض شده است.
  - همه گازها ایده‌آل در نظر گرفته شده‌اند.
  - از هدر رفت گرما چشم‌پوشی شده است.
  - فرایند در فشار ۱ بار فرض شده و افت فشار در فرایند در نظر گرفته نشده است.
- خطای نسبی به شکل فرمول (۵) حساب شد:

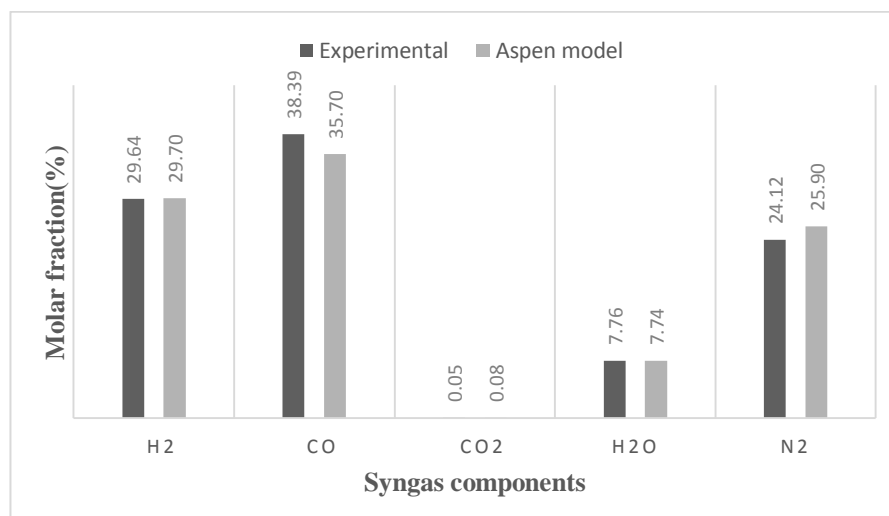
$$(5) \quad \text{خطای نسبی} = \frac{\text{مقدار تجربی} - \text{مقدار نظری}}{\text{مقدار تجربی}}$$

که در جدول (۲) مقدار خطای نسبی برای گونه‌های گاز سنتزی آورده شده است.

جدول ۲. مقدار خطای نسبی برای گونه‌های گاز سنتزی.

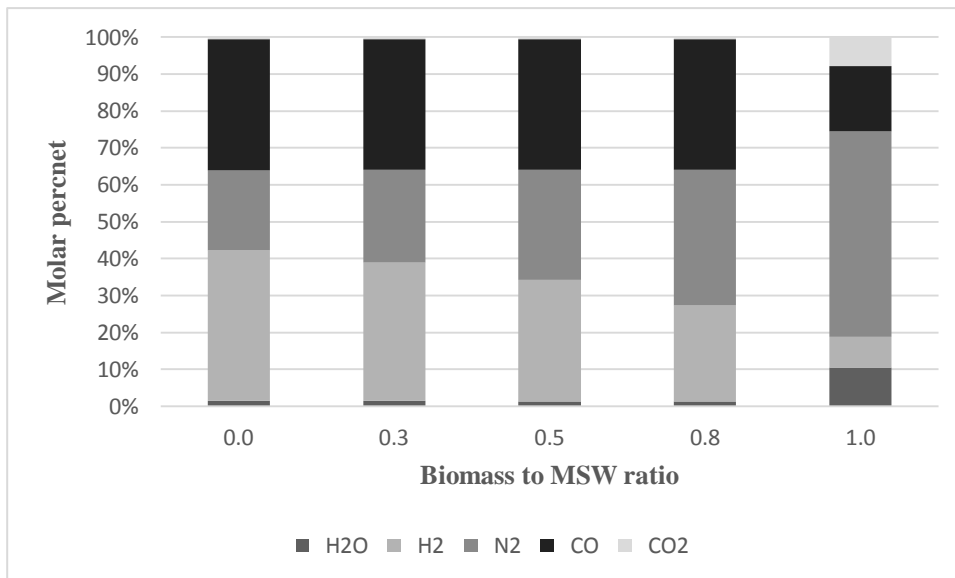
Table 2. Relative error values for synthetic gas species.

Component	Janajreh	This model	Relative error
H <sub>2</sub>	29.64	29.70	0.002
CO	38.39	35.70	0.075
CO <sub>2</sub>	0.05	0.08	0.375
H <sub>2</sub> O	7.76	7.74	0.003
N <sub>2</sub>	24.12	25.90	0.069



شکل ۲. نمودار داده‌های به‌دست‌آمده از مدل مورد مطالعه و داده‌های تجربی.

Figure 2. Comparison of experimental data with created model.



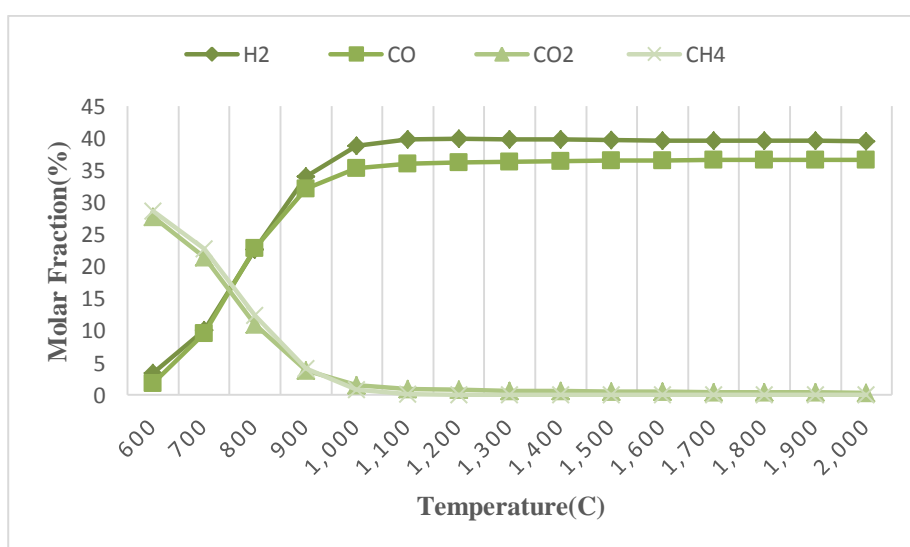
شکل ۳. تأثیر نسبت زیست‌توده به پسماند شهر بر ساختار گاز سنتزی.

Fig 3. Effect of Biomass to MSW ratio on syngas composition.

#### ۲-۴ اثر دما بر اجزای گاز سنتزی

دما یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های گازی‌سازی است؛ برای بررسی اثر دما بر عملکرد فرایند مقدار آن از ۶۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سلسیوس تغییر می‌کند. دمای معمول در فرایندهای پلاسمای حرارتی می‌تواند تا ۱۰۰۰۰ درجه سلسیوس هم بالا برود؛ اما به‌طور معمول تا ۲۰۰۰ درجه سلسیوس بررسی می‌شود [۵]. نسبت بین پسماند شهری به زیست‌توده نیم فرض شد که مقدار مهمی برای ارزیابی سامانه است.

نتایج در شکل (۴) نشان داده شده است. با افزایش دما کسر مولی کربن مونوکسید و هیدروژن افزایش می‌یابند که به‌سبب وجود واکنش‌های گرماگیر در سامانه است؛ اما مقادیر گونه‌های متان و کربن‌دی‌اکسید کاهش می‌یابند که این روندها تا دمای حدود ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد ادامه دارد و بعد از آن مقادیر برای همه گونه‌ها ثابت می‌شود که یکی از علت‌های آن یکسان بودن ثابت‌های ظرفیت گرمایی در پایگاه داده نرم‌افزار است.



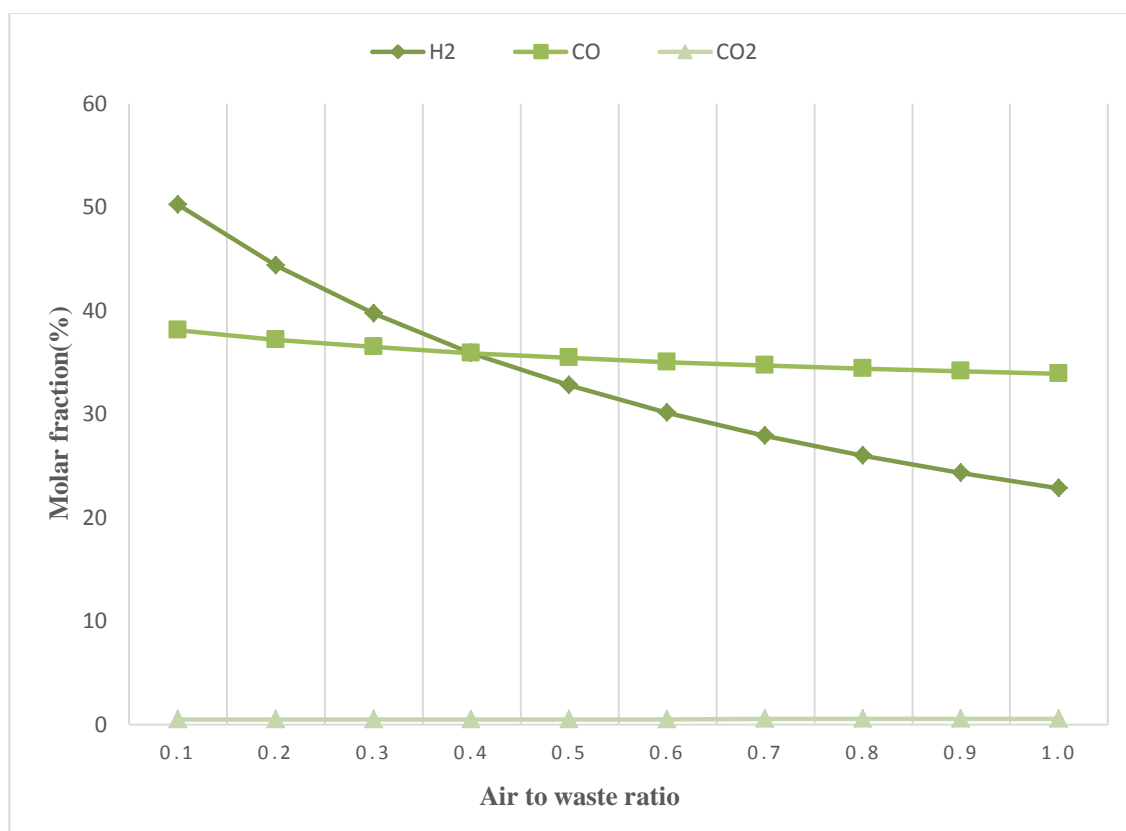
شکل ۴. تأثیر دما بر اجزای گاز سنتزی برای نسبت پسماند شهر به زیست‌توده برابر با ۰/۵.

Figure 4. Effect of temperature on syngas's components with biomass to MSW ratio as 0.5.

موجب افزایش کربن‌دی‌اکسید و کاهش هیدروژن و کربن مونوکسید می‌شود که باید هنگام تنظیم ترکیب خوراک مد نظر قرار گیرد. افزایش میزان ورودی اکسنده در اینجا هوا، باعث پیشرفت واکنش‌هایی مانند سوختن متان و هیدروژن است که باعث می‌شود گاز سنتزی ارزش حرارتی خود را از دست بدهد و همچنین باعث تولید کربن‌دی‌اکسید می‌شود. عمده تفاوت میان شکل‌های (۵) و (۶) به سبب وجود مقدار بیشتر کربن در ساختار پسماند شهری است که موجب می‌شود مقدار اکسنده برای سوختن کافی نباشد و بنابراین مقدار کمتری کربن‌دی‌اکسید تولید می‌شود. این امر در شکل (۵) قابل مشاهده است. در شکل (۶) این مقدار اکسنده برای پیشروی واکنش‌های سوختن کافی است که سبب می‌شود کربن‌دی‌اکسید با روند بیشتری تولید شود.

#### ۳-۴ اثر نسبت اکسنده به پسماند بر اجزای گاز سنتزی

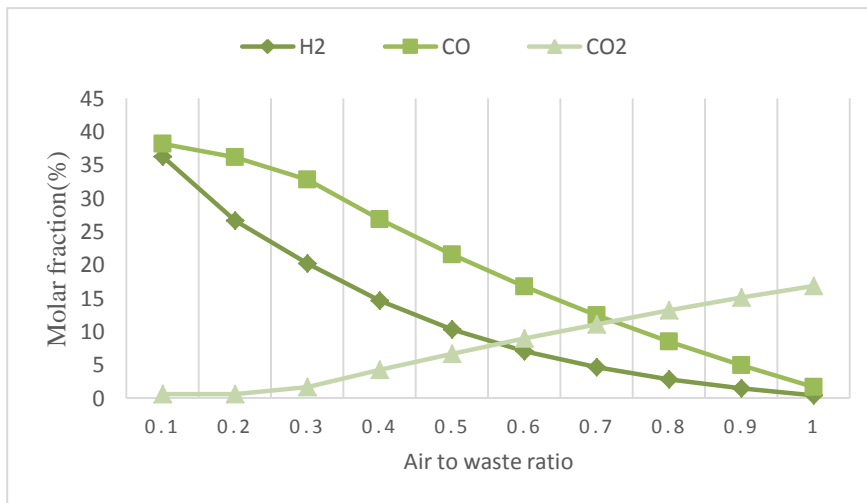
برای این که فرایند گازی‌سازی به سمت سوختن پیش نرود، کنترل مقدار اکسنده بسیار مهم است؛ چرا که مقادیر بالای اکسنده باعث تولید گازهای مضر گلخانه‌ای مانند کربن‌دی‌اکسید می‌شود و همچنین گاز تولیدی ارزش حرارتی خود را از دست می‌دهد. برای بررسی این نسبت دمای راکتور ۱۵۰۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد که در فرایند گازی‌سازی پلاسمایی رایج است و نسبت اکسنده که در این جا هواست به پسماند از ۰/۱ تا ۱ تغییر می‌کند. این اثر برای دو نسبت زیست‌توده به پسماند ۰/۵ و ۱ در نظر گرفته شد که نتایج به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) قابل مشاهده است. نکته مهمی که از مقایسه دو تصویر می‌توان دریافت، این است که اثر این متغیر بر پسماند با نسبت زیست‌توده ۱ بسیار بیشتر است و



شکل ۵. تأثیر نسبت هوا به پسماند بر اجزای گاز سنتزی برای نسبت زیست‌توده به پسماند شهری برابر با ۰/۵.

Figure 5. Effect of air on syngas's components with biomass to MSW ratio equal to 0.5.

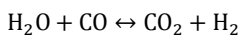




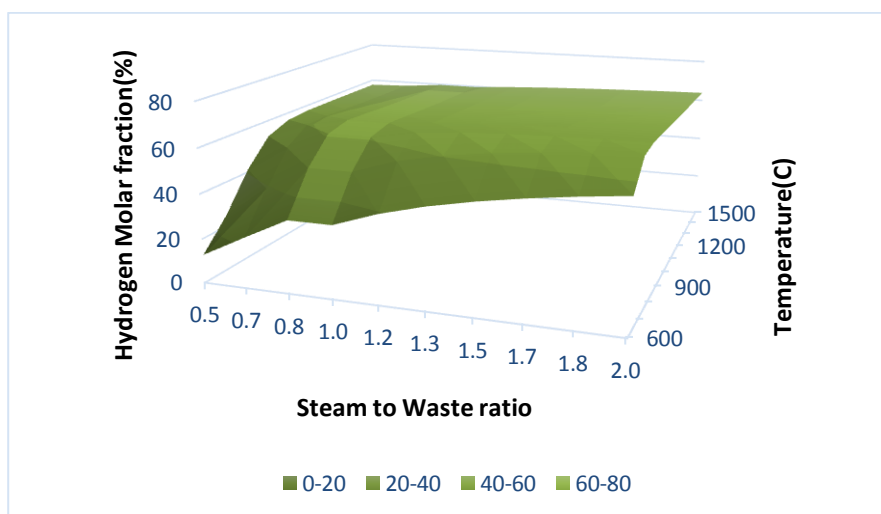
شکل ۶. تأثیر نسبت هوا به پسماند بر اجزای گاز سنتزی برای نسبت زیست‌توده به پسماند شهری برابر با ۱.

Figure 6. The effect of air to waste ratio on syngas components for the ratio of biomass to municipal waste equal to 1.

بیشترین مقدار هیدروژن با در نظر گرفتن این دو متغیر در دمای ۱۵۰۰ درجه سلسیوس و نسبت بخار به پسماند ۲ به دست آمد. همچنین مشاهده شد که اثر بخار بر تولید هیدروژن در دماهای بالاتر از ۸۰۰ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد. یکی از دلایل آن می‌تواند ثابت ماندن ثوابت ترمودینامیکی اجزا در دماهای بالا باشد. تولید هیدروژن از تزریق بخار ممکن است بیشتر به سبب واکنش (۶) باشد که شیفت آب-گاز نام دارد و در زیر آورده شده است:

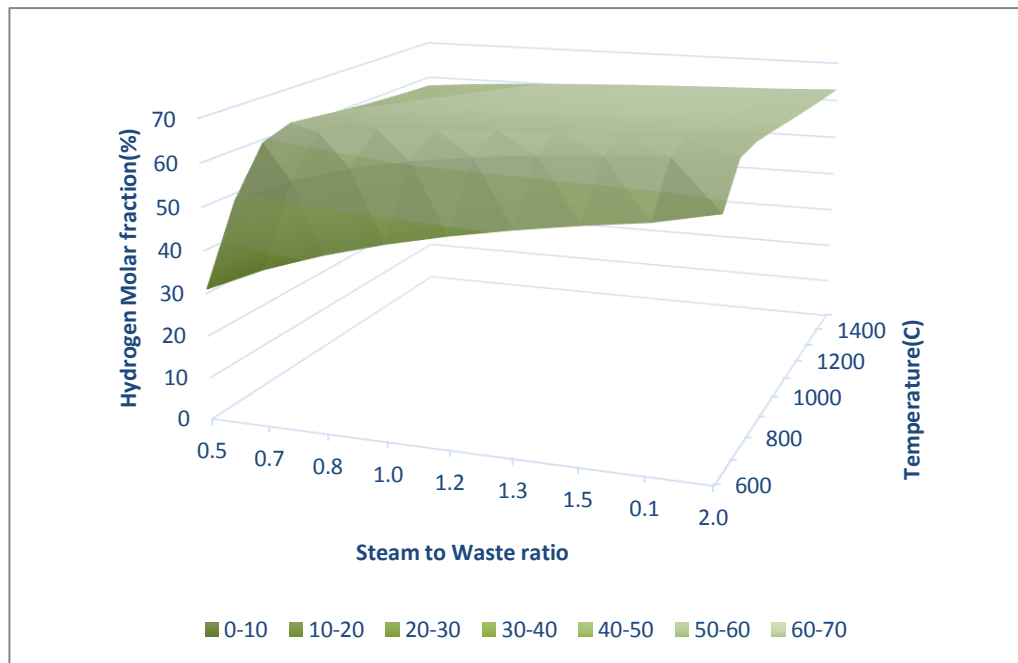


۴-۴ اثر نسبت بخار به پسماند و دما بر تولید هیدروژن  
در فرایندهای گازی‌سازی پلاسمایی استفاده از بخار آب به‌عنوان عامل اکسنده بسیار رایج است؛ چرا که باعث تولید گاز سنتزی غنی از هیدروژن می‌شود. هیدروژن یکی از مهم‌ترین گونه‌های موجود در گاز سنتزی است که کاربرد زیادی در تولید انرژی و مواد شیمیایی دارد. برای این که میزان تولید هیدروژن ارزیابی شود، دما از ۶۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سلسیوس و نسبت بخار به پسماند از ۰/۵ تا ۲ تغییر می‌کند که نتیجه در شکل (۷) و (۸)، به ترتیب برای نسبت زیست‌توده به پسماند ۰/۵ و ۱، قابل مشاهده است. در هر دو شکل



شکل ۷. نسبت بخار به پسماند و دمای سامانه بر تولید هیدروژن در نسبت زیست‌توده به پسماند شهری برابر با ۰/۵.

Figure 7. Effect of steam to waste ratio and temperature on hydrogen production with biomass to MSW ratio as 0.5.



شکل ۸. نسبت بخار به پسماند و دمای سامانه بر تولید هیدروژن در نسبت زیست توده به پسماند شهری برابر با ۱.

Figure 8. Effect of steam to waste ratio and temperature on hydrogen production with biomass to MSW ratio as 1.

## ۵. نتیجه گیری

در این مطالعه سازی پلاسمایی ترکیبی پسماند جامد شهری و زیست توده با مدل های گرمای پویایی در محیط نرم افزار اسپن پلاس بررسی شد. میزان دقت مدل توسعه داده شده با مقادیر گزارش شده در منابع علمی مقایسه شد که نتایج قابل قبولی را به دست آورد. نتایج نشان داد که هرچه مقدار زیست توده در خوراک افزایش پیدا کند، محصولات گازی نامناسبی تولید می شود که برای محیط زیست مضر است. هنگام استفاده بیشتر از مقدار زیست توده در خوراک اکسندۀ اثر بیشتری بر سامانه از خود نشان داد. تولید هیدروژن در دمای بالای ۱۵۰۰ درجه سلسیوس و نسبت بخار به پسماند ۲ بیشینه مقدار خود را دارد و با افزایش دما به بالاتر از ۸۰۰ درجه سلسیوس اثر نسبت بخار به پسماند بر تولید هیدروژن کاهش می یابد؛ هم چنین افزایش دما در نسبت های بخار به پسماند کم قابل توجه است. این شبیه سازی نشان داد که استفاده از پلاسمای فرایند سازی می تواند منجر به تولید گاز سنتزی مرغوب و با بیشینه مقدار هیدروژن ۶۲٪ شود که برای مصارف صنعتی و تولید انرژی مناسب است.

## مراجع

- [1] Rasheed ,T., Anwar T. M., Ahmad, N., Sher, F., Khan, U. S., Ahmad, A., Khan, R., Wazeer, I., "Valorisation and emerging perspective of biomass based waste-to-energy technologies and their socio-environmental impact: A review", Journal of Environmental Management. Vol. 287, p. 112257, (2021).
- [2] Zamri, A. A., Yin, O. M., Nomanbhay, S., Show, L. P., "Microwave plasma technology for sustainable energy production and the electromagnetic interaction within the plasma system: A review", Environmental Research. Vol. 197, p. 111204, (2021).
- [3] Panepinto, D., Tedesco, V., Brizio, E., Genon, G., "Environmental performances and energy efficiency for MSW gasification treatment", Waste and Biomass Valorization. Vol. 6, pp. 123-35, (2015).
- [4] Ma, W. C., Chu, C., Wang, P., Guo, Z., F., Lei, S., J., Zhong, L., Chen G. Y., "Hydrogen-Rich Syngas Production by DC Thermal Plasma Steam Gasification from Biomass and Plastic Mixtures", Advanced Sustainable Systems. Vol. 4, pp. 1-9, (2020).
- [5] Okati, A., Khani, M. R., Shokri, B., "Thermodynamic Modeling Of Municipal Solid Waste Thermal Plasma Gasification Process", Iranian chemical engineering journal. Vol. 18, pp. 61-70, (2019).

- [6] Jiang, P., Parvez, A. M., Meng, Y., Dong, X., Xu, M., Luo, X., Shi, K., Wu, T., "Novel two-stage fluidized bed-plasma gasification integrated with SOFC and chemical looping combustion for the high efficiency power generation from MSW: A thermodynamic investigation", *Energy Conversion and Management*. Vol. 236, p. 114066, (2021).
- [7] Vecten, S., Wilkinson, M., Martin, A., Dexter, A., Bimbo, N., Dawson, R., Herbert, B. M. J., "Experimental study of steam and carbon dioxide microwave plasma for advanced thermal treatment application", *Energy*. Vol. 207, p. 118086, (2020).
- [8] Agon, N., Hrabovský, M., Chumak, O., Hlína, M., Kopecký, V., Mašláni, A., "Plasma gasification of refuse derived fuel in a single-stage system using different gasifying agents", *Waste Management*. Vol. 47, pp. 246–55, (2016).
- [9] Okati, A., Khani, M. R., Shokri, B., Monteiro, E., Rouboa, A., "Numerical modeling of plasma gasification process of polychlorinated biphenyl wastes", *Energy Reports*. Vol. 7(5), pp. 270-285, (2021).
- [10] Kaushal, P., Tyagi, R., "Advanced simulation of biomass gasification in a fluidized bed reactor using ASPEN PLUS", *Renewable Energy*. Vol. 101, pp. 629–36, (2017).
- [11] Zhang, Q., Wu, Y., Dor, L., Yang, W., Blasiak, W., "A thermodynamic analysis of solid waste gasification in the Plasma Gasification Melting process". *Applied Energy*. Vol. 112, pp. 405-413, (2013).
- [12] Saha, P., Helal, U. M., Toufiq, R. M., "A steady-state equilibrium-based carbon dioxide gasification simulation model for hydrothermally carbonized cow manure", *Energy Conversion Management*. Vol. 191, pp. 12–22, (2019).
- [13] Tavares, R., Ramos, A., Rouboa, A., "Microplastics thermal treatment by polyethylene terephthalate-biomass gasification", *Energy Conversion Management*. Vol. 162, pp. 118–31, (2018).
- [14] Wei, J., Guo, Q., He, Q., Ding, L., Yoshikawa, K., Yu, G., "Co-gasification of bituminous coal and hydrochar derived from municipal solid waste: Reactivity and synergy", *Bioresource Technology*. Vol. 239, pp. 482–9, (2017).
- [15] Nanda, S., Okolie, J. A., Patel, R., Pattnaik, F., Fang, Z., Dalai, A. K., Kozinski, J. A., Naik, S., "Catalytic hydrothermal co-gasification of canola meal and low-density polyethylene using mixed metal oxides for hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*. (2021).
- [16] Hu, Y., Pang, K., Cai, L., Liu, Z., "A multi-stage co-gasification system of biomass and municipal solid waste (MSW) for high quality syngas production", *Energy*. Vol. 221, p. 119639, (2021).
- [17] Janajreh, I., Raza, S. S., Valmundsson, A. S., "Plasma gasification process: Modeling, simulation and comparison with conventional air gasification", *Energy Conversion and Management*. Vol. 65, pp. 801-809, (2013).