

مدل سازی گرماپویایی فرایند گازی سازی پسماند شهری با پلاسمای حرارتی

آرمین اوکاتی^۱، محمدرضا خانی^{۲*}، بابک شگری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فناوری پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی

۲- استادیار فوتونیک، دانشگاه شهید بهشتی

۳- استاد فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی

پیام‌نگار: m_khani@sbu.ac.ir

چکیده

گازی سازی به کمک پلاسمای حرارتی یک روش نوین و خلاقانه در مدیریت پسماند است. در این مطالعه فرایند گازی سازی پسماند جامد شهری در واکنشگاه پلاسمای حرارتی با استفاده از روش کمینه سازی انرژی آزاد گیبس، به کمک نرم افزار اسپن پلاس شبیه سازی شده و با داده های موجود در منابع علمی اعتبارسنجی شده است. بیشتر شاخص های اجرایی مانند نسبت هوا به پسماند، دمای واکنشگاه، نسبت فشار به پسماند و ارزش حرارتی کمتر گاز با توصیف سین گاز تولیدی مطالعه شده است، بیشترین میزان هیدروژن ۶۷٪ به دست آمد که برای گازی سازی با پلاسمای بخار بوده است و بیشترین ارزش حرارتی کمتر گاز متناسب با آن $11/6 \text{ (MJ/Nm}^3\text{)}$ حساب شد. با توجه به دمای بسیار بالایی که پلاسما ایجاد می کند بسیاری از آلاینده هایی که در فعالیت روش های معمول خلل ایجاد می کنند، تأثیری بر این فرایند ندارند.

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۲۷

شماره صفحات: ۶۱ تا ۷۰

کلیدواژه ها: گازی سازی، اسپن پلاس، پلاسمای حرارتی، گاز همنهشت، مدل سازی

۱. مقدمه

میزان تولید پسماند جامد شهری^۱ (MSW) به شدت با شهرنشینی و رشد جمعیت جهانی در حال افزایش است و کشور ما نیز بیرون از این مسأله نیست و روزبه روز به میزان تولید پسماندها افزوده می شود، افزون بر این، زدایش MSW به مسأله ای وخیم و دشوار تبدیل شده است؛ روش سنتی دفن پسماند، به فضای باز گسترده نیاز دارد که شوربختانه آلودگی هوا، آب و خاک را در پی دارد؛ سوزاندن

نیز چالش هایی همچون انتشار گازهای زیان بار اسیدی (SO_x، NO_x، HCL، etc.)، دی اکسین^۲ و فلزات سنگین سمی را به همراه دارد. در این راستا بررسی های بسیاری بر روی گازی سازی^۳ انجام شده که قابلیت آن را به عنوان جایگزینی مناسب برای روش های سنتی به اثبات رسانده است؛ بنابراین می توان از پسماند، سین گاز^۴ یا گاز همنهشت (سنتز گاز)^۵ مفید را تولید، و آلودگی را کنترل کرد [۱ و ۲].

2. Dioxin
3. Gasification
4. Syngas
5. Synthesis Gas

* تهران، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما
1. Municipal Solid Waste

فرایند گازی سازی، یک فرایند بسیار پیچیده است، که در آن چندین واکنش به طور همزمان اتفاق می افتد که بررسی آن را مشکل می کند. مطالعات بسیاری بر روی مدل سازی گازی سازی انجام شده است [۷]. به طور کلی این مدل ها برای ساده سازی و ایجاد امکان مدل سازی، دو روش اصلی را به کار می برند؛ روش اول بر اساس تعادل گرماپویایی و روش دوم بر اساس داده های جنبش شناختی واکنش ها است [۸]، که روش دوم برای بسیاری از مطالعات محدودیت هایی را ایجاد می کند؛ چرا که نمی توان داده های گرماپویایی مورد نیاز آن را به دست آورد، البته برای زیست توده ها، به دلیل تحقیقات فراوانی که انجام شده، این مشکل کمتر مطرح است، ولی برای دیگر پسماندها، مانند پسماند جامد شهری، این داده ها وجود ندارد [۹]. در این بین نرم افزارهای تجاری هم هستند که می توانند در شبیه سازی کمک کنند، در بین این نرم افزارها، اسپن پلاس^۹ و فلوئنت انسیس^{۱۰} نرم افزارهایی هستند که در منابع علمی بیشتر از آن ها استفاده شده است [۱۰-۱۲]. مدل هایی که در آن فرایند گازی سازی با کمک پلاسمای حرارتی را شبیه سازی کنند، به مراتب کمتر هستند؛ اما مقالاتی هم هستند که به این موضوع پرداخته اند، برای مثال ژانگ^{۱۱} و همکاران مدل دو بعدی اویلری را برای شبیه سازی فرایند استفاده کرده اند، که توافق خوبی با داده های تجربی داشته و تأثیر شرایط اجرایی بر عملکرد واکنشگاه را مورد بحث قرار داده است [۱۳].

و یا ابراهیم اوغلو^{۱۲} و همکاران، مدل سه بعدی اویلر- لاگرانژی را با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت ایجاد کرده اند، و توانسته اند تأثیر زمان اقامت پسماند، تابش پلاسمای و سرعت شار ورودی بر پلاسمای هم بررسی کنند [۱۴].

همچنین سربین^{۱۳} و همکاران، مدل محاسباتی دینامیک سیال^{۱۴} (CFD)، سه بعدی را برای مطالعه هندسه واکنشگاه گسترش داده اند، که نسبت به سایر مطالعات پیچیدگی کمتری دارد [۱۵].

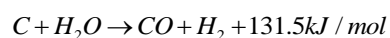
اما در این مقالات به ندرت از نرم افزار اسپن پلاس برای شبیه سازی استفاده شده است. اسپن پلاس به دلیل پایگاه داده قوی گرماپویایی که دارد، برای شبیه سازی فرایندهای شیمیایی بسیار مناسب است،

گازی سازی یکی از روش های ترموشیمیایی است که در آن مواد آلی به طور جزئی اکسیده می شوند و به شکل گاز (گاز همنهشت) در می آیند و مواد آلی به شکل خاکستر^۱ شیشه مانندی در می آید که برای طبیعت زبانی ندارد و حتی می توان آن را در صنایع دوباره به کار برد؛ اما دمای پائین گازی سازی های معمول محصولات جانبی، مانند تار^۲ را در سین گاز افزایش می دهد، در این میان پلاسمای با تولید دمای بسیار بالا، تولید آلاینده ها را به کمترین میزان خود می رساند و امکان زدایش پسماندهای خطرناک و سمی را نیز مهیا می کند [۳].

پلاسمای حالت چهارم ماده است؛ که بخشی از اتم های آن یونیزه و باردار می شوند، و به دلیل این بار با ذرات همسایه خود برهمکنش می دهد. پلاسمایی که در گازی سازی استفاده می شود اغلب قوس^۳ الکتریکی است که دمای بسیار بالایی را می تواند برای فرایند ایجاد کند و البته برای تولید آن نیاز به انرژی برقی زیادی است [۴ و ۵].

برخی از واکنش های شیمیایی را که در گازی سازی اتفاق می افتد می توان چنین نام برد [۶]:

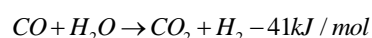
واکنش ۱ آب گاز^۴:



واکنش ۲ بودوارد^۵:



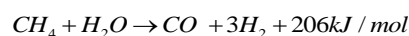
واکنش ۳ شیفیت آب-گاز^۶:



واکنش ۴ متان سازی^۷:



واکنش ۵ اصلاح بخار^۸:



انجام آزمایش و اجرای فرایند گازی سازی همواره برای بررسی فرایند مقدر نیست و گاهی تبدیل به کاری پرهزینه، زمان بر و یا خطرناک می شود. در این میان شبیه سازی می تواند از هزینه و زمان مصرفی بکاهد و در پیدا کردن شرایط بهینه برای اجرای فرایند کمک کند.

1. Slag
2. Tar
3. Arc
4. Water Gas
5. Boudward
6. Water-Gas Shift
7. Methanation
8. Steam Reforming

9. Aspen Plus
10. Fluent Ansys
11. Zhang
12. Ibrahimoglu
13. Serbin
14. Computational Solid Dynamic

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

با استفاده از فرمول بالا و معادلاتی که بر مبنای پایستگی جرم و انرژی به دست می آید، دستگاه معادلاتی حاصل می شود، که با حل این دستگاه معادلاتی می توان درصد مولی فرآورده ها را حساب کرد. اطلاعات بیشتر پیرامون روش مدلسازی از راه تعادل گرمای پویایی در مطالعات زینال^۱ و همکاران، به خوبی بیان شده است [۱۶ و ۴].

۲-۱ توصیف مدل

نرم افزار اسپن پلاس برای شبیه سازی فرایند گازی سازی تجهیز مناسبی ندارد، اما می توان با استفاده از برخی از بلاک های نرم افزار این فرایند را شبیه سازی کرد. صفحه جریان ایجاد در نرم افزار اسپن برای شبیه سازی فرایند در شکل (۱) دیده می شود. جریان پسماند از راه جریان FEED وارد DECOMP که پیرولیز را شبیه سازی می کند، می شود؛ در این بلاک که در واقع واکنشگاه RYIELD در اسپن پلاس است، محاسبات به وسیله بلاک محاسباتی^۲ YIELD CALCULATOR که با کد فرتن نوشته شده است، با توجه به تجزیه نهایی پسماند، انجام و پسماند به عناصر تشکیل دهنده اش (C,H,N,O,S, ASH, H₂O) تجزیه می شود و سپس از راه جریان TO-GASI به GASIFI که بلاک RGIBBS در اسپن پلاس است وارد می شود که در آن فرایند گازی سازی شبیه سازی می شود؛ در واقع بخش اصلی مدل است، که دستگاه معادلات گفته شده در آن حل می شود، و هوا از راه جریان AIR، و بخار از راه STEAM وارد TORCH می شوند، که برای شبیه سازی پلاسمای در نظر گرفته شده که بلاک Heater در نرم افزار اسپن پلاس است. سپس محصولات گازی سازی از راه جریان PRODUCT وارد SEP می شود که در واقع بلاک SSPLIT در اسپن پلاس است و گازهای محصولات از مواد جامد جدا و در جریان GASES وارد می شوند. همچنین مواد جامدی همچون خاکستر^۳ و کربن های واکنش نداده که همان اسلگ^۴ هستند، به جریان SOLIDS وارد می شوند.

که در این مطالعه از آن استفاده شده است. هدف این مطالعه گسترش مدلی است که در کنار سادگی می تواند عملکرد حالت پایای فرایند گازی سازی با پلاسمای حرارتی را با دقت مناسبی پیش بینی کند، و تأثیر شاخص های اجرایی همچون دما، نسبت هوا به سوخت و غیره را به روش تعادل گرمای پویایی بررسی و نقاط بهینه شاخص های اجرایی را نیز پیش بینی کند.

۲. روش محاسباتی شبیه سازی

همان گونه که پیشتر اشاره شد، با توجه به واکنش های پیچیده ای که در فرایند اتفاق می افتد، مدل سازی جنبش شناختی آن بسیار دشوار است، بنابراین شبیه سازی فرایند گازی سازی پلاسمایی بر اساس تعادل گرمای پویایی و به کمک کمینه سازی انرژی آزاد گیبس انجام می گیرد. به طور خلاصه اساس روش کمینه سازی این است که در حالت تعادل، انرژی آزاد گیبس به کمینه مقدار خود می رسد، انرژی آزاد گیبس را می توان به صورت زیر بیان کرد [۴]:

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

که در آن n_i تعداد مول ها و μ_i پتانسیل شیمیایی گونه i هستند. با فرض آرمانی بودن گازهای تولیدی پتانسیل شیمیایی به صورت زیر تعریف می شود:

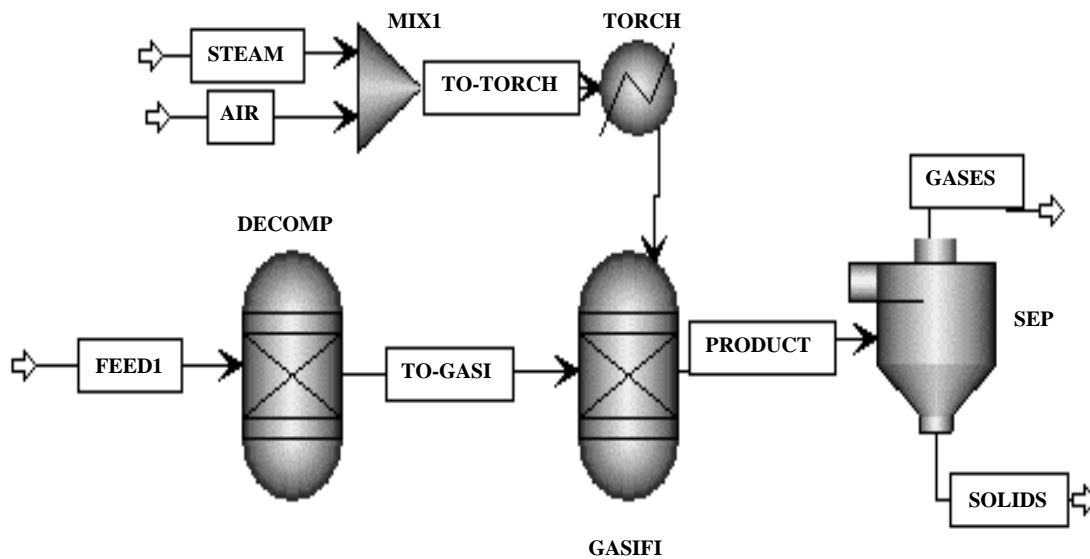
$$\mu_i = G_i^0 + RT \ln(f_i / f_i^0) \quad (2)$$

R و T ثابت جهانی گازها و دمای دما هستند، f_i فوگاسیتی گونه i ، G_i^0 انرژی آزاد گیبس استاندارد و f_i^0 فوگاسیتی استاندارد گونه i است. اگر فشار یک هواکره باشد:

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

که y_i کسر مولی گاز گونه i و ΔG_i^0 انرژی آزاد گیبس تشکیل برای گونه i است. با جای گذاری ۳ در ۱ و اعمال روش ضرایب لاگرانژ، می توان n_i هایی را یافت که در آن انرژی آزاد گیبس کمینه می شوند:

1. Zainal
2. Computational Block
3. ASH
4. Slag



شکل ۱. صفحه جریان^۱ ایجادشده در نرم افزار اسپین پلاس.

پلازما در گازی سازی، که موجب تولید دمای بسیار بالا می شود، منجر به رسیدن به حالت تعادل در کمترین زمان و تولید تار بسیار کم می شود، که به فرضیات مسأله نزدیک است.

۳. مواد و روش ها

۳-۱ سوخت

سوخت و خاکستر^۴ به صورت جامد نامتعارف به نرم افزار معرفی می شود و از مدل های HCOALGEN و DCOALIGT برای محاسبه چگالی و گرمای سوختن پسماند در نرم افزار استفاده می شود، که تیم نرم افزاری آن را توصیه کرده است [۴]. ویژگی های پسماندی که در این شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت، در جدول (۱) دیده می شود. پسماندهای جامد شهری معمولاً دارای ساختار و ویژگی های پایدار و یکسانی نیستند؛ با این حال، بیشترشان ساختاری تا اندازه ای مشابه دارند. اطلاعات مربوط به این پسماند متعلق به هی^۵ و همکاران است که این پسماند را با استفاده از فرایند گازی سازی به روش تجربی مورد مطالعه قرار داده اند، میزان شار ورودی پسماند یک کیلوگرم بر ساعت در نظر گرفته شد [۱].

۲-۲ فرضیات

- در این شبیه سازی از وابستگی مکانی چشم پوشی شده است؛ به عبارت دیگر به صورت صفر بعدی انجام شده است.
- زمان به گونه ای فرض شده که برای رسیدن به تعادل کافی باشد.
- ASH به عنوان جامد نامتداول^۲ در نظر گرفته شده است.
- از تشکیل تار^۳ چشم پوشی شده است.
- فرایند در حالت پایا و همدمای انجام می شود.
- گازهای تشکیل شده از معادله حالت گاز آرمانی پیروی می کنند.
- اسلگ به صورت کرین باقی مانده از گازی سازی و خاکستر در نظر گرفته شده است [۴].

ایجاد مدل با وابستگی مکانی یعنی ابعاد بالاتر، نیازمند اطلاعات جنبش شناختی واکنش ها است، که در مورد پسماند جامد شهری این اطلاعات بسیار کم است، و باید با فرض تعادل گرمایی و حالت پایا انجام شود. افزون بر این، مدل صفر بعدی، امکان ارزیابی شاخص های ضروری را به خوبی مهیا می کند. همچنین استفاده از

4. Ash
5. He

1. Flowsheet
2. Nonconventional
3. Tar

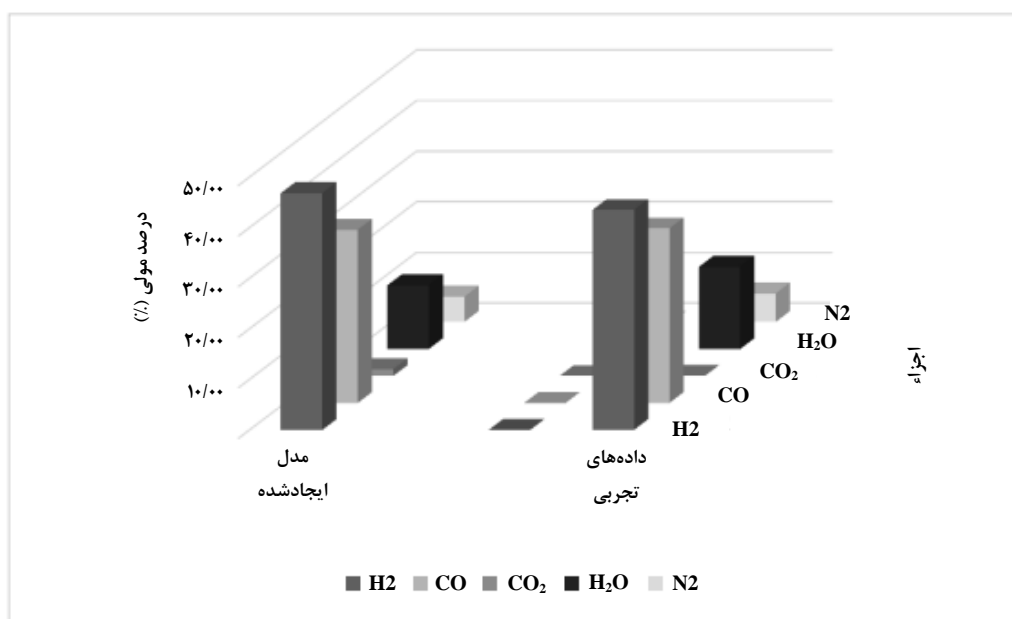
جدول ۱. ویژگی‌ها و ساختار پسماند استفاده شده

تجزیه نهایی ^۲		تجزیه تقریبی ^۱	
C	۵۱/۸۱ Wt%	مواد فرار ^۳	۸۲/۲۸ Wt%
H	۵/۷۶ Wt%	کربن ثابت ^۴	۱۱/۷۹ Wt%
O	۳۵/۸۱ Wt%	خاکستر ^۵	۵/۹۳ Wt%
N	۰/۲۶ Wt%	ارزش حرارتی کمتر ^۶	۲۱۳۰۶ kJ/kg
S	۰/۳۶ Wt%	چگالی ظاهری ^۷	۲۸۰/۵ kg/m ³
		رطوبت ^۸ در پایه خیس	۸/۸ Wt%

۲-۳ اعتبارسنجی

آمده که به مقدار تجربی که ۳۴/۵٪ بود، بسیار نزدیک است. بیشترین اختلاف برای آب در مدل ۱۲/۵۶٪ به دست آمد در حالی که مقدار تجربی آن ۱۶/۲۲٪ گزارش شده است؛ دلیل اختلاف‌ها می‌تواند دور بودن شرایط آزمایش از فرض‌های در نظر گرفته باشد [۱۷].

عملکرد این مدل با اطلاعاتی که جناجره^۹ و همکاران ارائه کرده‌اند، مقایسه شد، که نتایج مقایسه را می‌توانید در شکل (۲) مشاهده کنید. داده‌های مدل در تطابق خوبی با داده‌های تجربی ارائه شده، قرار داشت. کمترین میزان اختلاف برای CO با ۳۴/۲۳٪ به دست



شکل ۲. نمودار داده‌های به دست آمده از مدل مورد مطالعه و داده‌های تجربی.

1. Proximate Analysis
5. ASH
9. Jenajreh

2. Ultimate Analysis
6. Lower Heating Value

3. Volatile Matter
7. Apparent Density

4. Fixed Carbon
8. Moisture

۳-۳ محاسبه میزان خطای نسبی

خطای نسبی را می توان مطابق با فرمول زیر برای مقایسه داده های تجربی با داده های به دست آمده، حساب کرد [۴]:

$$(5) \quad \text{درصد نسبی} (\%) = \frac{\text{مقدار تجربی} - \text{مقدار اسپن پلاس}}{\text{مقدار تجربی}} \times 100 (\%)$$

نتایج به دست آمده در جدول (۲) آورده شده است. همان گونه که مشاهده می شود میزان خطا برای CO₂ بسیار زیاد است؛ زیرا مقدار آن کم است و هنگامی که در مخرج کسر قرار می گیرد، مقدار کسر را نسبت به سایر مقادیر افزایش می دهد و میزان خطا زیاد می شود. با این حال کمترین و بیشترین میزان خطای نسبی به ترتیب برای CO و CO₂ به دست آمده است؛ می توان چنین نتیجه گرفت، که این مدل برای پیش بینی اندازه های کم چندان مناسب نیست.

۴. نتایج و ارزیابی داده ها

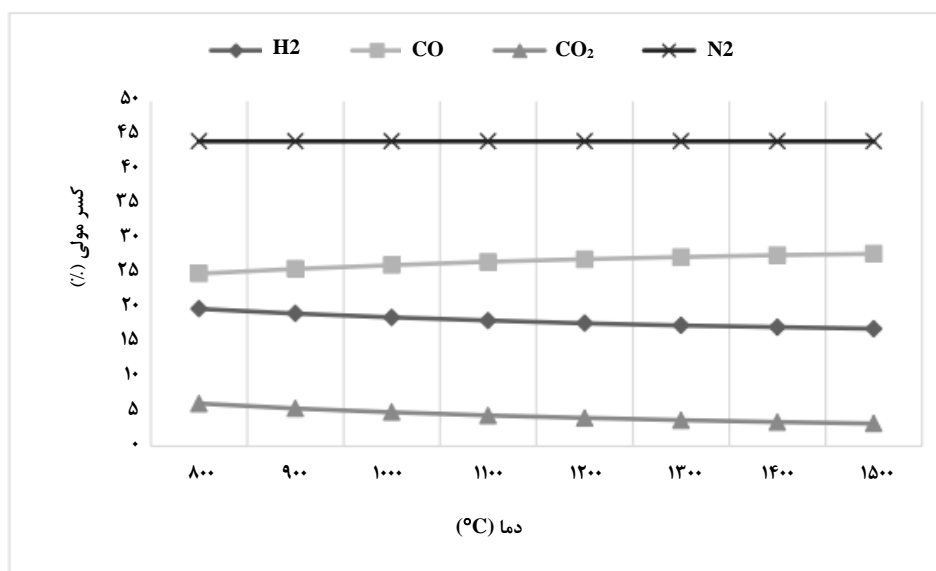
۴-۱ دما

دما یکی از مهم ترین شاخص های گازی سازی است؛ برای بررسی ترکیب گاز در اینجا دما از ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سلسیوس تغییر می کند. نسبت بین هوا و پسماند ۲ در نظر گرفته شده است که

مقدار رایجی در آزمایش ها است. نتایج در شکل (۳) نشان داده شده است؛ مقدار نیتروژن تغییری نمی کند، زیرا مقدار نیتروژن ورودی ثابت و خروجی تنها مولکول نیتروژن است که در واکنش ها شرکت نمی کند، پس طبق پایستگی جرم در فرایند بدون تغییر باقی می ماند. با افزایش دما کسر مولی CO از ۲۵٪ به ۲۸٪ افزایش می یابد و اندازه های H₂ و CO₂ به ترتیب از ۲۰ به ۱۷ و از ۶ به ۳ درصد کاهش می یابند. می توان این گونه دلیل آن را بیان کرد که دمای بالا برای واکنش دهنده های واکنش های گرماده و برای فرآورده های واکنش های گرماگیر مطلوب است؛ بنابراین واکنش های گرماگیر ۱، ۲ و ۵ در دمای بالا قوت می گیرند، که منجر به تولید بیشتر CO و همچنین منجر به کاهش CO₂ می شود [۶].

جدول ۲. درصد خطای نسبی داده های مدل، مطابق با فرمول ۶.

اجزای گاز همزهشت	تجربی
۷/۶	H ₂
-۰/۸	CO
۴۳۹۶/۸	CO ₂
-۲۲/۶	H ₂ O
-۱۱/۹	N ₂



شکل ۳. تأثیر دما بر کیفیت سین گاز.

۲-۴ نسبت اکسنده به پسماند

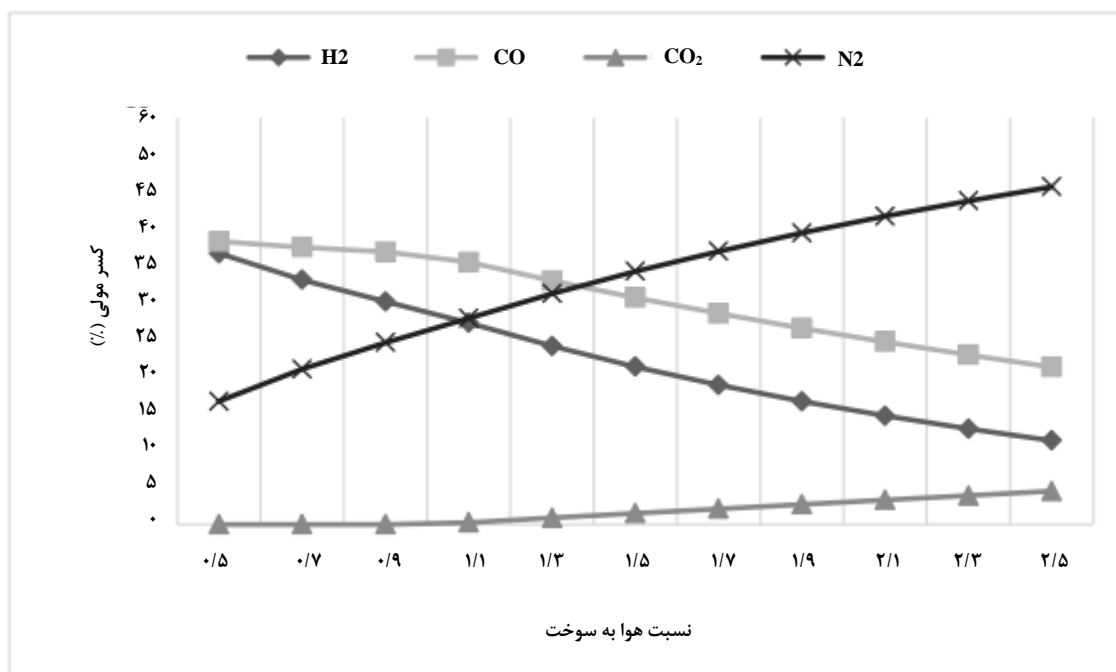
نسبت سوخت به اکسنده یکی از شاخص‌های مهمی است که فرایند گازی‌سازی را از دیگر فرایندهای ترموشیمیایی^۱ متفاوت می‌کند؛ اگر اکسیژن به اندازه کافی به پسماند برسد، فرایند به سوختن تبدیل می‌شود. برای بررسی این نسبت، دمای واکنشگاه ۱۵۰۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد، که در فرایند گازی‌سازی پلاسمایی رایج است و نسبت اکسنده به پسماند از ۰/۵ تا ۲/۵ تغییر می‌کند. همچنین در اینجا هوا به عنوان اکسنده در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود با افزایش این نسبت میزان CO₂ و N₂ به ترتیب از ۰/۰۲ به ۴/۸۹ و ۱۸/۱۵ به ۴۹/۷۸ درصد افزایش می‌یابد و میزان H₂ و CO به ترتیب از ۳۹/۹۶ به ۱۲/۳۷ و ۴۱/۷۳ به ۲۳/۲۰ درصد کاهش می‌یابد. افزایش نیتروژن به علت حضور این عنصر در هوا است و افزایش میزان کربن دی‌اکسید به این علت است که اکسیژن کافی به سوخت می‌رسد و فرایند به سمت سوختن حرکت می‌کند، که از میزان کربن مونوکسید و هیدروژن می‌کاهد.

۳-۴ نسبت بخار به پسماند (S/M)

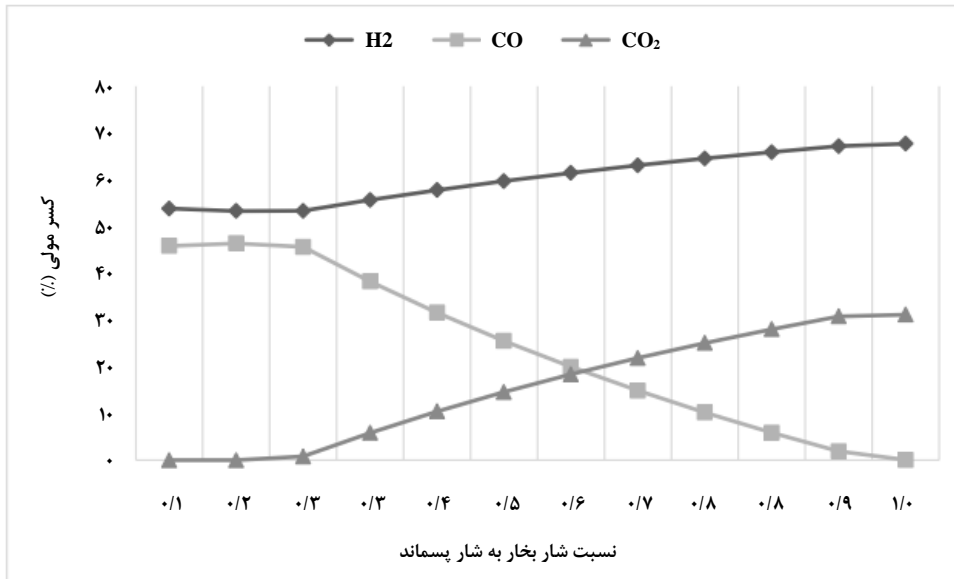
تغییر کسر مولی گازهای مختلف در گاز همنهشت تولیدی باتوجه به نسبت بخار به پسماند در دمای ثابت ۱۵۰۰ درجه سلسیوس در فرمول زیر حساب و در شکل (۵) دیده می‌شود [۴].

$$S/M = \frac{\text{شار بخار}}{\text{شار پسماند}}$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان کسر مولی هیدروژن و کربن دی‌اکسید افزایش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند این باشد که با حضور بخار در واکنش‌های گازی‌سازی باعث تجزیه هیدروکربن‌ها و افزایش H₂ و CO₂ به عنوان فرآورده‌های واکنش می‌شود، که با داده‌های تجربی به دست آمده هم همین نتایج گزارش شده است [۱۳].



شکل ۴. تأثیر نسبت هوا به سوخت بر درصد مولی گازها.



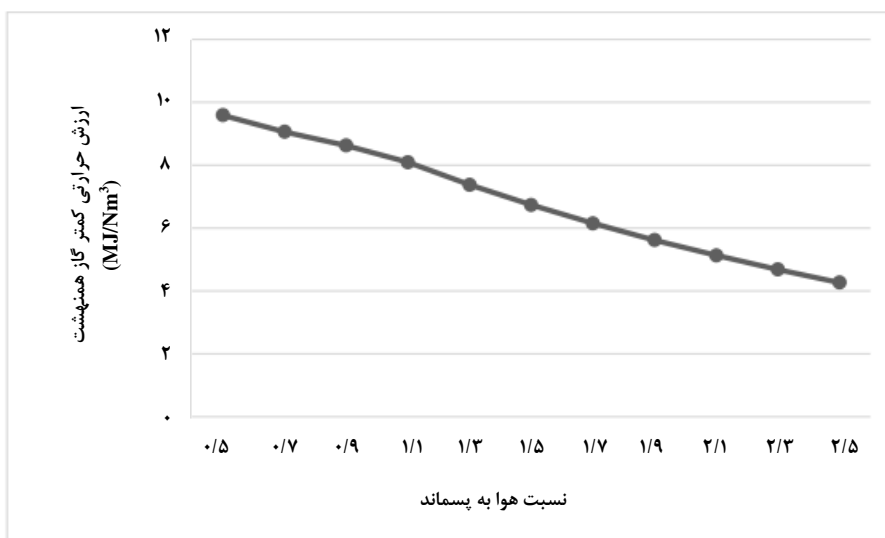
شکل ۵. تأثیر نسبت بخار به پسماند بر درصد مولی گازهای سین گاز.

۴-۴ ارزش حرارتی پایین (LHV)

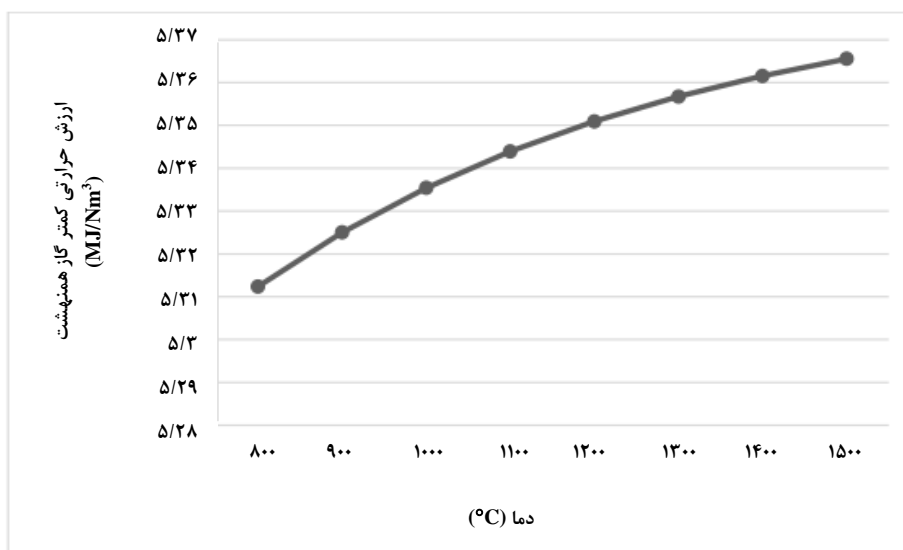
که Y کسر حجمی هر جزء در گاز همنهشت است [۴]. همچنین نمودار تغییرهای ارزش حرارتی پایین نسبت به دما را می‌توان در شکل (۷) دید؛ همان‌گونه که مشاهده می‌شود LHV با افزایش مقدار کسر از ۹/۵۸ به ۴/۲۷ (MJ/Nm^3) کاهش پیدا می‌کند که دلیل اصلی این امر افزایش نیتروژن هوا است که با افزایش کسر هوای بیشتری وارد فرایند می‌شود و این مقدار افزایش پیدا می‌کند.

ارزش حرارتی پایین گاز زمانی که از گاز همنهشت تولیدی برای تولید انرژی در موتورهای تولید برق یا به‌عنوان سوخت برای فرایند سوختن استفاده شود، مهم می‌شود؛ که از فرمول زیر می‌توان آن را حساب کرد. محاسبه برای پلاسمای هوا و نمودار تغییر مقدار آن را نسبت به کسر هوا به پسماند می‌توان در شکل (۶) مشاهده کرد:

$$LHV_{Gas} = 10.79Y_{H_2} + 12.63Y_{CO} + 35.83Y_{CH_4} \quad [MJ/Nm^3]$$



شکل ۶. تأثیر نسبت هوا به پسماند بر ارزش حرارتی کمتر گاز همنهشت (MJ/Nm^3).



شکل ۷. تأثیر دما (C) بر ارزش حرارتی کمتر گاز هم‌نهشت (MJ/Nm^3) تولیدشده.

۵. نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه گازی‌سازی پسماند جامد شهری با پلاسمای حرارتی و در نرم‌افزار اسپین‌پلاس بررسی شد، که از روش کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس استفاده شده است و با نتایج به‌دست‌آمده از داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد که میزان دقت مناسبی را نشان داده است. تأثیر دما بر کیفیت گاز هم‌نهشت تولیدی مطالعه شد و این نتیجه به‌دست آمد که هرچه دما افزایش پیدا کند از میزان کربن دی‌اکسید کاسته می‌شود و بنابراین میزان آلایندگی کمتری تولید می‌شود، همچنین با افزایش دما دی‌اکسید و فوران و تار که از محصولات جانبی گازی‌سازی‌های معمولی است کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. ارزش حرارتی پایین گاز حساب و مشاهده شد که هرچه دما افزایش یابد میزان ارزش حرارتی گاز مادامی‌که از بخار به‌عنوان اکسنده استفاده شود، افزایش پیدا می‌کند. بیشترین مقدار هیدروژن برای اکسنده بخار اتفاق می‌افتد که به‌میزان ۶۷٪ می‌رسد و در این حالت ارزش حرارتی کمتر گاز به $11/6 (MJ/Nm^3)$ می‌رسد. یکی از ویژگی‌های مهم گازی‌سازی با پلاسمای حرارتی میزان بالای دمایی است که می‌توان به‌دست آورد و آن را برای کاهش مقدار تولید آلاینده‌ها به کمترین میزان ممکن استفاده نمود. این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این توانایی را دارد که برای بهینه‌کردن فرایند و پیش‌بینی ترکیب گاز هم‌نهشت تولیدی، نتایج قابل قبولی را ارائه کند.

مراجع

- [1] He, M., Hu, Z., Xiao, B., Li, J., Guo, X., Luo, S., Yang, F., Feng, Y., Yang, G., Liu, S., "Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of municipal solid waste (MSW): Influence of catalyst and temperature on yield and product composition", international journal of hydrogen energy. 34, pp. 195-203, (2009).
- [2] Lin, C., Zhang, J., Zhao, P., Wang, Z., Yang, M., Cui, X., Tian, H., Guo, Q., "Gasification of real MSW-derived hydrochar under various atmosphere and temperature", Thermochemica Acta. 683, p.178470, (2020).
- [3] Panepinto, D., Tedesco, V., Brizio, E., Genon, G., "Environmental performances and energy efficiency for MSW gasification treatment", Waste and Biomass Valorization. 6, pp. 123-135, (2015).
- [4] Tavares, R., Ramos, A., Rouboa, A., "A theoretical study on municipal solid waste plasma gasification", Waste management. 90: pp. 37-45, (2019).
- [5] Fabry, F., Rehm, C., Rohani, V., Fulcheri, L., "Waste gasification by thermal plasma: a review", Waste and Biomass Valorization. 4, pp. 421-439, (2013).
- [6] Shen, L., Gao, Y., Xiao, J., "Simulation of hydrogen production from biomass gasification in interconnected fluidized beds", Biomass and Bioenergy. 32, pp. 120-127, (2008).
- [7] Trninić, M., Stojiljković, D., Manić, N., Skreiberg, Ø., Wang, L., Jovović, A., "A mathematical model of biomass downdraft gasification with an integrated pyrolysis model", Fuel, 265, p. 116867, (2020).

- [8] Xiang, X., Gong, G., Shen, Y., Wang, C., Shi, Y., "A comprehensive mathematical model of a serial composite process for biomass and coal Co-gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*". 44, pp. 2603-2619, (2019).
- [9] Hameed, S., Sharma, A., Pareek, V., Wu, H., Yu, Y., "A review on biomass pyrolysis models: Kinetic, network and mechanistic models", *Biomass and bioenergy*. 123, pp. 104-122, (2019).
- [10] Torres, C., Urvina, L., de Lasa, H., "A chemical equilibrium model for biomass gasification. Application to Costa Rican coffee pulp transformation unit", *Biomass and Bioenergy*. 123, pp. 89-103, (2019).
- [11] Ke, C., Zhang, Y., Gao, Y., Pan, Y., Li, B., Wang, Y., Ruan, R., "Syngas production from microwave-assisted air gasification of biomass: Part 1 model development", *Renewable energy*. 140, pp. 772-778, (2019).
- [12] Ismail, T. M., Monteiro, E., Ramos, A., El-Salam, M. A., Rouboa, A., "An Eulerian model for forest residues gasification in a plasma gasifier", *Energy*. 182, pp. 1069-1083, (2019).
- [13] Ke, C., Zhang, Y., Gao, Y., Pan, Y., Li, B., Wang, Y., Ruan, R., "Syngas production from microwave-assisted air gasification of biomass: Part 1 model development", *Renewable energy*. 140, pp. 772-778, (2019).
- [14] Ibrahimoglu, B., Cucen, A., Yilmazoglu, M. Z., "Numerical modeling of a downdraft plasma gasification reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*", 42, pp. 2583-2591, (2017).
- [15] Serbin, S. I., Matveev, I. B., "Theoretical investigations of the working processes in a plasma coal gasification system", *IEEE Transactions on Plasma Science*. 38, pp. 3300-3305, (2010).
- [16] Zainal, Z. A., Ali, R., Lean, C. H., Seetharamu, K. N., "Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials", *Energy conversion and management*. 42, pp. 1499-1515, (2001).
- [17] Janajreh, I., Raza, S. S., Valmundsson, A. S., "Plasma gasification process: Modeling, simulation and comparison with conventional air gasification", *Energy conversion and management*. 65, pp. 801-809, (2013).