

مدلسازی سیستم تبدیل انرژی از پسماندهای شهری با بهره گیری از سیستم هیبریدی گازی سازی-پیل سوختی کربنات مذاب

زیست توده یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر، است. استفاده از گاز سنتز ناشی از گازی سازی پسماندها در یک سیستم پیل سوختی دما بالا می تواند منجر به افزایش سهم تولید انرژی از زیست توده شود. همچنین می تواند باعث کاهش هزینه های دفن و اثرات مخرب زیست محیطی گردد. در این مقاله از زباله شهر تهران به عنوان سوخت سیستم استفاده شده است که خود می تواند یک ایده جدید برای استفاده از زباله شهر تهران باشد. در این تحقیق یک مدل ترمودینامیکی برای سیستم هیبریدی گازی سازی- پیل سوختی بر اساس شرایط پسماندهای شهر تهران ارائه شده است. ابتدا یک مدل برای سیستم گازی سازی بر پایه ثابت های تعادل واکنش های معروف گازی سازی ارائه شده است و به بررسی اثر رطوبت زائدات روی ترکیب گاز سنتز خروجی، ارزش حرارتی گاز سنتز و دمای تعادل پرداخته شده است. سپس یک مدل ترمودینامیکی برای پیل سوختی کربنات مذاب ارائه شده است. در نهایت آنالیز اقتصادی برای نیروگاه هیبریدی گازی سازی- پیل سوختی با ظرفیت ۱۴ مگاوات و ۲۰ مگاوات انجام شده است. نتایج طرح پیشنهادی، بر اساس ارزش حرارتی گاز سنتز بدست آمده، میزان توان قابل استحصال و آنالیز اقتصادی سیستم هیبریدی گازی سازی - پیل سوختی برای زباله شهر تهران ارائه شده است.

پیام هوشمند^۱

دانشجوی دکترا

فرید سیدین^۲

کارشناسی ارشد

رامین روشندل^۳

دانشیار

واژه های راهنما: سیستم تبدیل انرژی، گازی ساز پایین سو، پیل سوختی کربنات مذاب، زباله های جامد شهری، ترکیب گاز سنتز

۱- مقدمه

براساس تحقیقات جاری، نرخ رشد سالیانه جمعیت جهانی در حدود ۰.۲٪ تخمین زده می شود. این میزان رشد جمعیت، تقاضا و مصرف زیاد انرژی در کشورهای مختلف دنیا را در پی خواهد داشت. امروزه زیست توده به عنوان بزرگترین منبع تجدیدپذیر در تأمین انرژی اولیه جهان شناخته می شود؛ حدود ۸ درصد از کل انرژی اولیه مصرفی جهان در سال (۲۰۱۰) به وسیله منابع انرژی تجدیدپذیر فراهم شده است. منابع زیست توده بر

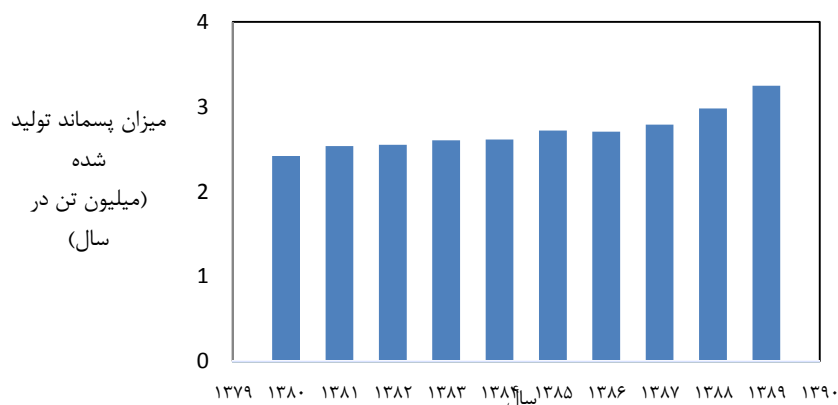
^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

^۳ نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف Roshandel@sharif.edu

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۷/۲۸، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۱/۱۸

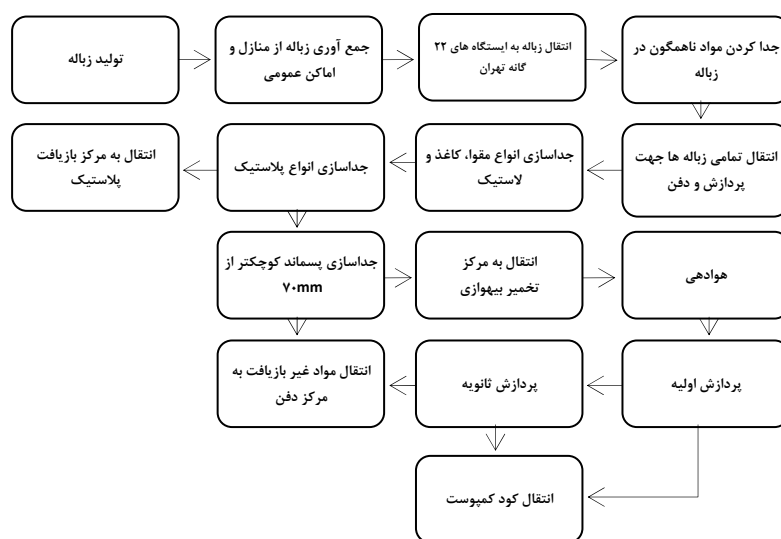
اساس همین آمارگیری و برآورد در سال (۲۰۱۰) حدود ۶ درصد از کل انرژی اولیه جهان را فراهم کرده است [۳]. یکی از انواع ترکیبات زیست توده، زباله‌های شهری یا پسماند می‌باشد [۱]. مدیریت زباله‌های شهری می‌تواند یک معضل بزرگ برای یک کشور باشد، اما در عین حال می‌تواند یک منبع تولید انرژی به حساب آید. میزان زباله تولید شده در شهر تهران روزانه بیش از ۷۵۰۰ تن می‌باشد. در شکل (۱) میزان پسماند تولید شده از سال (۱۳۸۰) تا سال (۱۳۸۹) بر اساس آمار گرفته شده از سازمان مدیریت پسماند شهر تهران نشان داده است.



شکل ۱- میزان پسماند تولید شده از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۹ در تهران

۱-۱- مدیریت پسماند

مدیریت پسماند شامل مراحل جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، انتقال و دفن پسماندها می‌باشد. فرآیند مدیریت پسماند در شهر تهران در شکل (۲) نشان داده شده است [۱]. زباله شهر تهران به علت وجود رطوبت بالا امکان تولید کود کمپوست از آن وجود دارد از این رو قسمتی از آن جهت تبدیل به کمپوست پردازش می‌شود، اما قسمت اعظم آن در این مرکز دفن می‌شود.



شکل ۲- فرآیند مدیریت پسماند در شهر تهران

۱-۲- فرآیندهای تولید انرژی از پسماند یا زیست توده

فرآیندهایی که برای تبدیل زیست توده به انرژی به کار برده می شوند شامل فرآیندهای احتراق مستقیم، فرآیندهای ترموشیمیایی، فرآیندهای بیوشیمیایی می باشند. گازی سازی در مجموعه فرآیندهای ترموشیمیایی دسته بندی می شود.

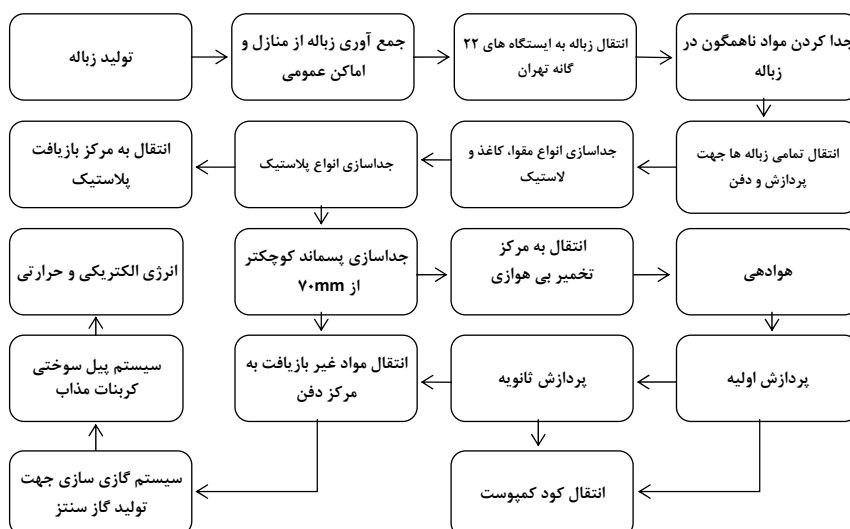
۱-۳- سیستم های بازیافت انرژی از زیست توده

از 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، می توان به کمپوست سازی، سوزاندن در زباله سوز و بازیابی انرژی، پیرولیز، گازی سازی، تولید بیوگاز و بازیافت و استفاده مجدد از مواد زائد اشاره نمود. سیستم گازی سازی جهت تولید انرژی می تواند با بعضی از سیستم های دیگر نظیر پیل سوختی به صورت هیبریدی ترکیب شود. سیستم هیبرید گازی سازی-پیل سوختی می تواند یک روش مناسب برای مدیریت پسماند و کاهش میزان پسماند تولید شده به حساب آید. در ابتدای تحقیق به تشریح سیستم گازی سازی، انواع فرآیندهای آن و دسته بندی آنها پرداخته می شود. فرآیندهای گازی سازی از نظر روش تبادل جرم به سه گروه اساسی دسته بندی می شوند [۴]:

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

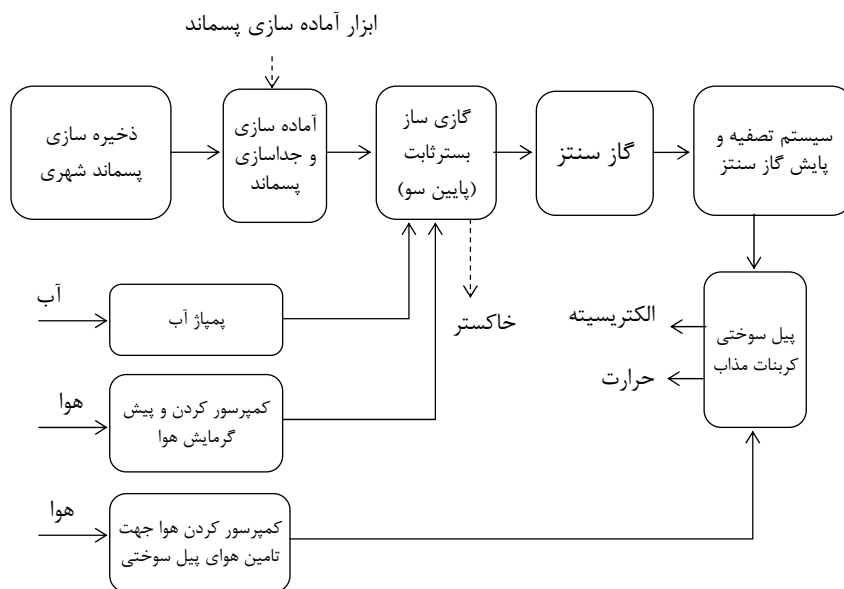
گازی سازی بستر ثابت به دو نوع پایین سو و بالاسو تقسیم بندی می شوند و گازی سازی بستر سیال به دو نوع حبابی و بازگردشی تقسیم بندی می شوند. گازی سازی بستر ثابت دارای ساختار و تکنولوژی ساده تر می باشد که واکنش ها در یک بستر ثابت و به دور از جریان سیالی رخ می دهد. گازی سازی بستر سیال از طریق ترکیب شدن مواد بستر راکتور، نظیر شن یا ماسه و خوراک در دمای بالا عمل می کنند. در گازی سازی نوع سوم خوراک و اکسید کننده در یک جهت و همزمان وارد راکتور می شوند. این نوع از راکتور دارای دمای عملیاتی بالا و انتقال حرارت بالا و در نتیجه قابلیت تبدیل کربن بالایی می باشند [۵، ۶].

پیل های سوختی، دستگاه های مبدل انرژی الکتروشیمیایی هستند که متداول ترین آنها بر پایه هیدروژن، متان و متانول عمل نموده و جهت تولید انرژی به کار می روند. در این خصوص، می توان به تکنولوژی پیل سوختی کربنات مذاب و یا اکسید جامد اشاره نمود. این نوع پیل سوختی به دلیل عملکرد در دما و فشار بالا، به عنوان یکی از تکنولوژی های نوین و پر اهمیت تولید انرژی در نظر گرفته می شود. با بهره گیری از سیستم هیبرید گازی سازی و پیل سوختی در شکل (۳) بهترین مکان بکارگیری فناوری هیبرید گازی سازی-پیل سوختی به دلیل پتانسیل موجود در سیستم مدیریت پسماند شهر تهران نشان داده شده است.



شکل ۳- سیستم مدیریت پسماند جامد در شهر تهران با به کارگیری سیستم هیبریدی گازی‌سازی- پیل سوختی

در این تحقیق طرحواره کلی سیستم هیبریدی گازی‌سازی- پیل سوختی کربنات مذاب با بهره‌گیری از پسماند شهری در شکل (۴) مشخص شده و نحوه تامین و پردازش سوخت تا استحصال الکتریسیته و حرارت نشان داده شده است. به نحوی که پسماند پس از جداسازی جهت تولید گاز سنتز به سیستم گازی سازی هدایت می‌شود. پس از پایش گاز سنتز بر اساس استانداردهای پیل، اجازه ورود به آن را پیدا می‌کند.



شکل ۴- طرحواره کلی سیستم هیبریدی گازی‌سازی- پیل سوختی کربنات مذاب با بهره‌گیری از پسماند شهری

۴-۱- تحقیقات و دستاوردهای گذشته

روش گازی‌سازی- پیل سوختی اخیراً در بسیاری از مقالات و تحقیقات به یکی از جذاب‌ترین مباحث تبدیل شده است [۶-۹]. از طرفی پیدا کردن یک روش جدید تولید انرژی و دوست‌دار محیط زیست حائز اهمیت می‌باشد. به دلیل یکسان نبودن خصوصیات پسماند شهر تهران با سایر پسماند شهرها و مناطق دیگر بر اساس متفاوت بودن مسائل فرهنگی، اقتصادی، جغرافیایی و ... می‌تواند منحصر به فرد باشد. در این بخش به تحقیقات انجام گرفته پیرامون مبحث تولید انرژی از زیست توده توسط پیل سوختی و موارد مشابه پرداخته می‌شود. مولر و رکنی به مدلسازی سیستم‌های متفاوت تولید انرژی از جمله پیل سوختی و میکروتوربین بر اساس گازی کردن مواد زیست توده پرداختند که در حالت اول به مدلسازی میکروتوربین بر اساس گاز سنتز ناشی از زیست توده و در حالت دوم به مدلسازی پیل سوختی اکسید جامد بر اساس گاز سنتز ناشی از زیست توده پرداختند که نتایج نشان دهنده عملکرد مناسب پیل سوختی بود [۷]. کیریل و همکارانش به مدلسازی سیستم‌های تولید انرژی از جمله پیل سوختی کربنات مذاب و توربین گاز بر اساس گازی کردن مواد زیست توده و آنالیز سیستم‌ها پرداختند که آنالیزهای انجام گرفته عملکرد مناسب پیل سوختی کربنات مذاب را تایید می‌نمود [۶]. آلونی و همکارانش یک مدل تحلیلی در زمینه اثرات انواع سوخت بر کارایی پیل سوختی دما بالا ارائه دادند و نتایج نشان می‌دهد که حضور ۲۴٪ مونوکسید کربن در گاز سنتز عملکرد پیل سوختی اکسید جامد را در مقایسه با آنچه از عملکرد گاز هیدروژن بدست می‌آید تا ۲۳٪ افزایش می‌دهد [۸]. موریتا و همکارانش به مدلسازی و امکان‌سنجی یک سیستم تولید انرژی هیبریدی گازی‌سازی زیست توده-پیل سوختی پرداخته و پارامترهای متفاوت از جمله فشار و تاثیر محتوای رطوبت سوخت بر بازده را بررسی نمودند، نتایج نشان می‌دهد که رطوبت باید در یک محدوده مشخصی تغییر نماید و میزان رطوبت تاثیر زیادی بر روی بازده سیستم پیل سوختی ندارد [۹]. مرکز تحقیقاتی تریسایای ایتالیا بر روی تولید انرژی از سوخت‌های زیستی فعالیت می‌کند و یکی از پروژه‌های آنها تولید انرژی از زباله با بهره‌گیری از سیستم هیبرید گازی‌سازی - پیل سوختی کربنات مذاب می‌باشد که این سیستم در حال تست و فعالیت است و نتایج حاکی از مثبت بودن ارائه طرح، براساس امکان تولید توان با راندمان مناسب از زباله‌های شهری می‌باشد [۱۰]. مطالعات مذکور به صورت استوکیومتریکی انجام شده است. به عقیده بسیاری از محققان [۱۱] و [۱۲] هر دو روش استوکیومتریکی و غیر استوکیومتریکی از لحاظ ارزش مدلسازی معادل یکدیگر می‌باشند؛ در این مدلسازی از روش استوکیومتریکی و از نوع تعادل ترمودینامیکی استفاده شده است.

۲- هدف و ویژگی تحقیق

آنچه در این تحقیق به عنوان هدف و ویژگی مد نظر بوده به شرح زیر می‌باشد:

- در این تحقیق با استفاده از مدلسازی ترمودینامیکی تعادلی به پیش بینی رفتار یک سیستم گازی‌ساز پائین‌سو در ترکیب با پیل سوختی کربنات مذاب با خوراک زباله شهری پرداخته شده است. به وسیله این مدل، آنالیز پارامترهای مختلف ممکن می‌گردد در صورتی که ساخت و آزمایش عملی یک گازی‌ساز واقعی جهت آنالیز پارامترها بسیار هزینه بر و زمان بر است. همچنین این طرح می‌تواند به عنوان مسیر نوینی جهت استفاده از زباله جهت تولید انرژی مطرح شده و اجرایی گردد.

- مطابق آمار شهرداری تهران، سالانه هزینه گزافی صرف جمع‌آوری زباله از سطح شهر تهران می‌شود که بایستی هزینه پردازش، حمل و نقل و دفع این مواد نیز به آن اضافه گردد؛ بر اساس برآوردهای به عمل آمده در سال (۱۳۸۹) هر کیلوگرم پسماند برای شهرداری تهران با احتساب هزینه‌های جمع‌آوری و دفن، هزینه‌ای معادل ۳۲۰ ریال در بر دارد. با یک حساب ساده می‌توان نتیجه گرفت که بر اساس اینکه روزانه در شهر تهران حدوداً ۷۵۰۰ تن زباله شهری تولید می‌شود، در مجموع روزانه ۲/۴ میلیارد ریال توسط شهرداری تهران هزینه می‌شود. لذا گزافی‌سازی زیست توده و تولید انرژی در یک سیستم پیل سوختی کربنات مذاب، یک راه حل مناسب برای صرفه‌جویی در بخشی از هزینه‌ها است [۲].
 - این پژوهش مقدمه‌ای برای طراحی، ایجاد و بهینه‌سازی فناوری‌های نوین از جمله سیستم گزافی‌سازی - پیل سوختی با هدف تولید توان خواهد بود، همچنین می‌تواند در راستای مدیریت زائدات شهری، بسیار مفید واقع شود.
- محورهای مورد بررسی در این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:
- بررسی اثر مقدار رطوبت زباله بر ترکیب گاز خروجی از گزافی‌سازی، با توجه به موثر بودن پارامتر رطوبت بر عملکرد گزافی‌ساز و پیل سوختی
 - بررسی افت‌های ولتاژ در پیل سوختی کربنات مذاب
 - بررسی میزان انرژی الکتریکی استحصال شده از پیل سوختی کربنات مذاب با فرض تامین سوخت پیل سوختی از گاز سنتز ناشی از گزافی‌سازی پسماند
 - بررسی جریان انرژی سیستم هیبرید گزافی‌سازی - پیل سوختی کربنات مذاب
 - بررسی شرایط حاکم بر زباله شهر تهران و استفاده از سیستم های نوین گزافی‌سازی و پیل سوختی کربنات مذاب

۳- مدل سازی ریاضی

برای سیستم هیبرید گزافی‌سازی - پیل سوختی موارد زیر مفروض است [۱۳]:

- راکتور گزافی‌ساز بدون بعد فرض می‌شود و جزئیات طراحی آن در نظر گرفته نشده است؛
- گزافی‌ساز کاملاً عایق‌بندی شده فرض می‌شود و اتلاف حرارت در آن ناچیز در نظر گرفته می‌شود؛
- اختلاط مواد، کامل و توزیع دما یکنواخت فرض می‌شود؛
- نرخ واکنش گزافی‌سازی، سریع و زمان ماند جهت رسیدن به حالت تعادل کافی در نظر گرفته می‌شود؛
- مقدار قطران ناچیز در نظر گرفته می‌شود؛
- دما و فشار محیط ثابت در نظر گرفته می‌شود؛
- شرایط پایا برای تمام اجزاء گزافی‌ساز و پیل سوختی در نظر گرفته می‌شود؛
- هوا، یک گاز ایده‌آل با ترکیب ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن در نظر گرفته می‌شود.

۳-۱- معادلات حاکم بر گازی سازی

گازی سازی یک فرآیند شیمیایی پیچیده می باشد و در حالت کلی شامل مراحل خشک کردن و تبخیر زیست توده از طریق فرآیند پیرولیز و در نهایت فرآیند اکسایش و کاهش می باشد.

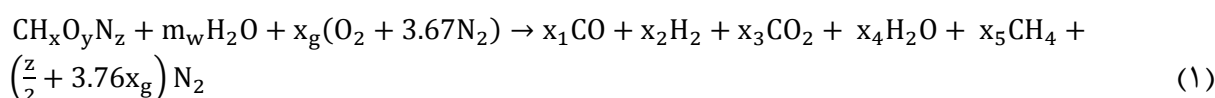
۳-۱-۱- معرفی مدل

نسبت اجزای شیمیایی زیست توده (فرمول شیمیایی خوراک) را می توان بصورت $CH_xO_yN_z$ 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. آنالیز نهایی زیست توده مورد استفاده در این مدلسازی که یک نوع زائدات شهری شهر تهران می باشد در جدول (۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود مقدار گوگرد ناچیز 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 آنگاه واکنش کلی گازی سازی را می توان به صورت واکنش زیر بیان نمود [۱۱].



در این واکنش، خوراک در داخل راکتور گازی ساز در حضور حرارت با رطوبت و هوا واکنش می دهد و در نتیجه انجام واکنش های گازی سازی، گازهایی از جمله هیدروژن، مونوکسید کربن، دی اکسید کربن، متان و نیتروژن حاصل می گردد. ترکیب این گازها به نوع خوراک، میزان رطوبت، نوع گازی ساز و غیره بستگی دارد. در واکنش (۱)، x_g معرف مقدار هوا در هر کیلو مول خوراک است. در سمت راست معادله، x_i معرف تعداد مول اجزای گاز خروجی از گازی ساز می باشند که مجهول هستند و هدف از انجام مدلسازی، محاسبه این مقادیر می باشد. کلیه ورودی ها در سمت چپ واکنش فوق در دمای ۲۵ درجه سلسیوس تعریف شده اند. از مقدار گوگرد به دلیل ناچیز بودن مقدارش صرف نظر می شود [۱۱]. مقدار m_w که میزان کیلوگرم رطوبت موجود در هر کیلو مول خوراک می باشد، به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$m_w = \frac{(M_{bio}m)}{18(1-m)} \quad (2)$$

که در آن m درصد رطوبت موجود در خوراک و M_{bio} جرم مولکولی خوراک بر حسب کیلوگرم بر کیلومول را نشان میدهد.

۳-۱-۱-۳- موازنه جرم

برای یافتن پنج x_i مربوط به اجزای گاز تولیدی، نیاز به پنج معادله می‌باشد که این معادلات با نوشتن معادله موازنه جرم و نوشتن ثابت تعادل برای معادله اصلی بدست می‌آید. سه معادله اول از بالانس جرم کربن، هیدروژن و اکسیژن بدست می‌آیند. معادلات زیر به ترتیب برای موازنه‌ی مولی کربن، هیدروژن و اکسیژن بکار می‌روند:

$$X_1 + X_3 + X_5 = 1 \quad (۳)$$

$$x + 2m_w = 2X_2 + 2X_4 + 4X_5 \quad (۴)$$

$$y + m_w + 2X_g = X_1 + 2X_3 + X_4 \quad (۵)$$

۳-۱-۲- تعادل ترمودینامیکی

تعادل شیمیایی را می‌توان هم از طریق کمینه سازی انرژی آزاد گیبس و هم ثابت تعادل بیان نمود. برای کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس از روش‌های محدود بهینه‌سازی استفاده می‌کنند. 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 ناحیه گازی‌سازی به ترتیب زیر استفاده می‌شود، واکنش اصلی درون راکتور به قرار زیر است:



از ترکیب دو معادله‌ی فوق رابطه زیر بدست می‌آید: [۱۱، ۱۳]



واکنش مهم دیگر در فرآیند گازی‌سازی، واکنش تشکیل متان است که به شکل زیر بیان می‌شود:



با توجه به فرض اولیه مبنی بر اینکه تمامی واکنش‌های ناحیه گازی‌سازی دارای تعادل ترمودینامیکی بوده و تمامی واکنش‌ها در فشار ۱ اتمسفر اتفاق می‌افتد، برای واکنش جابجایی آب-گاز و واکنش متان، ثابت تعادل تعریف می‌گردد و می‌توان به معادلات چهارم و پنجم دست یافت. ثابت تعادل برای دو معادله فوق بصورت تابعی از نسبت اجزای مولی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$K_1 = \frac{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}} = \frac{n_{CO_2} \cdot n_{H_2}}{n_{CO} \cdot n_{H_2O}} = \frac{x_3 x_2}{x_1 x_4} \quad (۱۱)$$

$$K_2 = \frac{P_{CH_4}}{(P_{H_2})^2} = \frac{n_{CH_4} \cdot n_{tot}}{n_{H_2}^2} = \frac{x_5}{x_2^2} n_{tot} \quad (۱۲)$$

که در آن فشار جزئی اجزا، n_i تعداد مول‌های اجزا مختلف و X_i نسبت اجزای مولی را نشان می‌دهد.

۳-۱-۱-۳- موازنه انرژی

برای بدست آوردن ثابت‌های تعادل نیاز به محاسبه دمای گازی‌سازی T می‌باشد، برای اینکار از موازنه انرژی در ناحیه گازی‌سازی که عموماً شرایط بی دررو فرض می‌شود، استفاده می‌شود [۱۴]. اگر دمای ناحیه گازی‌سازی T باشد و دمای ناحیه ورودی ۲۹۸ درجه کلونین فرض شود، موازنه انرژی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sum_{i=\text{react}} H_{f,i}^0 = \sum_{i=\text{prod}} n_i (H_{f,i}^0 + \Delta H_{T,i}^0) \quad (13)$$

در این معادله $H_{f,i}^0$ آنتالپی تشکیل واکنش دهنده‌ها و محصولات را نشان می‌دهد. با موازنه‌ی آنتالپی درون گازی‌ساز محتوای آنتالپی کل در هر گونه‌ی شیمیایی برابر با مجموع آنتالپی شیمیایی و آنتالپی محسوس و طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} H_{f-\text{biomass}}^0 + m_w (H_{f\text{H}_2\text{O}(l)}^0 + H_{\text{vap}}) + x_g (H_{f\text{O}_2}^0 + 3.7H_{f\text{N}_2}^0) = x_1 (H_{f\text{CO}}^0 + \int_{298}^{T_g} C_{\text{PCO}} dT) \\ + x_2 (H_{f\text{H}_2}^0 + \int_{298}^{T_g} C_{\text{PH}_2} dT) + x_3 (H_{f\text{CO}_2}^0 + \int_{298}^{T_g} C_{\text{PCO}_2} dT) + x_4 (H_{f\text{H}_2\text{O}}^0 + \int_{298}^{T_g} C_{\text{PH}_2\text{O}} dT) \\ + x_5 (H_{f\text{CH}_4}^0 + \int_{298}^{T_g} C_{\text{PCH}_4} dT) + \left(\frac{z}{2} + x_g 3.76\right) \int_{298}^{T_g} C_{\text{PN}_2} dT \end{aligned} \quad (14)$$

معادله (۱۵) رابطه محاسبه اختلاف آنتالپی را نشان می‌دهد.

$$\Delta \bar{h}_T = \int_{298}^T C_p(T) dT \quad (15)$$

مقدار C_p که ظرفیت حرارتی ویژه در فشار ثابت است، توسط رابطه (۱۶) برای طیف وسیعی از دما محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$C_p(T) = C_1 + C_2 T + C_3 T^2 + C_4 T^3 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) \quad (16)$$

از رابطه ارزش حرارتی بالا^۱ برای محاسبه نسبت اجزای گاز سنتز حاصل از زیست توده و از رابطه ارزش حرارتی پایین^۲ برای محاسبه گرمای تشکیل استفاده می‌شود. گرمای تشکیل پسماند (سوخت) طبق معادله زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$H_{f,\text{bio}}^0 = \text{LHV} + \sum_{i=1}^n n_i p_i \quad (17)$$

^۱ Higher Heating Value

^۲ Lower Heating Value

LHV بر مبنای خشک پسماند، ارزش حرارتی پائین سوخت می باشد و از طریق معادله زیر محاسبه می گردد [۱۵]:

$$\text{LHV} = 4.187(81C + 300H - 26(O - S) - 6(9H + m)) \quad (18)$$

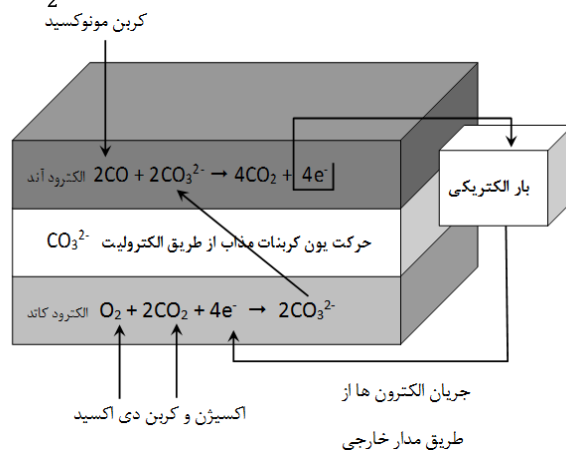
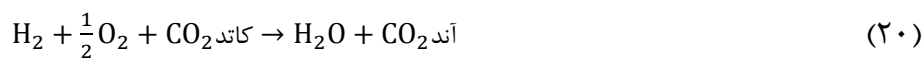
در نهایت، برای محاسبه خطا بین نتایج مدل و نتایج تجربی از پارامتر میانگین مربعات ریشه^۱ استفاده شده است که نحوه محاسبه آن در معادله (۱۹) بر اساس نتایج بدست آمده از مدل و نتایج تجربی نشان داده شده است [۱۱]:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_i^N (\text{Experiment}_i - \text{Model}_i)^2}{D}} \quad (19)$$

۲-۳- معادلات حاکم بر پیل سوختی کربنات مذاب

اجزاء اصلی تشکیل دهنده سیستم پیل سوختی شامل الکترود آند، الکترود کاتد و الکترولیت می باشد. در الکترود آند، سوخت اکسید شده به الکترون و پروتون تبدیل می شود. الکترون تولید شده وارد مدار خارجی می شود و به سمت کاتد می رود. پروتون تولید شده از الکترولیت عبور کرده و به سمت کاتد می رود و با اکسیژن و الکترون ورودی از مدار خارجی در حضور کاتالیست واکنش می دهد. در این واکنش، گرما و آب تولید می شود.

مهمترین دلیل انتخاب پیل کربنات مذاب این است که این نوع پیل سوختی توانایی استفاده از سوخت حاوی مونوکسید کربن بطور مستقیم، بازیافت داخلی سوخت های هیدروکربنی و همچنین استحصال دی اکسید کربن را با هزینه کمتر و در دمای پایین تری دارد. واکنش ها در هر الکترود و الکترولیت در صورت عرضه کربن مونوکسید به الکترود آند در شکل (۵) نشان داده شده است. واکنش کلی پیل سوختی کربنات مذاب به شرح زیر است [۱۶]:



شکل ۵- واکنش آند و کاتد پیل سوختی کربنات مذاب با عرضه سوخت کربن مونوکسید به الکترود آند

¹ root-mean-square

پتانسیل هر سلول برای پیل سوختی کربنات مذاب با استفاده از معادله نرنست، بر اساس انتقال دی اکسید کربن، از رابطه (۲۱) بدست می‌آید. این معادله رابطه بین پتانسیل تعادلی سلول (E_{eq}) و پتانسیل استاندارد سلول (E°) را نشان می‌دهد.

$$E_{eq} = E^\circ + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{CO_2c}}{P_{CO_2a}} \right) \quad (21)$$

که در این معادله اندیس‌های c و a به ترتیب مربوط به جریان گاز کاتد و آند می‌باشد. زمانی که فشارهای جزئی گاز کربن دی اکسید در آند و کاتد با هم برابر و نیز الکترولیت ثابت باشد، پتانسیل پیل سوختی کربنات مذاب فقط به فشار جزئی گازهای هیدروژن و اکسیژن بستگی دارد. معمولاً فشار جزئی گاز کربن دی اکسید در دو الکترود یکسان است بنابراین پتانسیل پیل تحت تاثیر اختلاف این دو فشار قرار می‌گیرد. در صورت اختلاف فشار از P_1 به P_2 بین آند و کاتد اختلاف پتانسیل از رابطه (۲۲) بدست می‌آید.

$$\Delta V_p = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{1,a}}{P_{2,a}} \right) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{2,c}^{3/2}}{P_{1,c}^{3/2}} \right) \quad (22)$$

میزان اختلاف پتانسیل بدست آمده در اثر اختلاف دما بین بازه‌های دمایی متفاوت به ترتیب از روابط زیر بدست می‌آید.

$$\Delta V_T (\text{mV}) = 1.40(T_2 - T_1) \quad 600^\circ\text{C} \leq T < 650^\circ\text{C} \quad (23)$$

$$\Delta V_T (\text{mV}) = 0.25(T_2 - T_1) \quad 650^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C} \quad (24)$$

میزان تغییر اختلاف پتانسیل تحت تاثیر عوامل دیگری می‌باشد که می‌توان به ساختار گاز ورودی، ناخالصی‌ها، چگالی جریان، عمر سلول‌ها و ... اشاره نمود. E° پتانسیل بازگشت پذیر یا استاندارد هر سلول پیل سوختی می‌باشد که مقدار آن برای یک پیل سوختی کربنات مذاب در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار یک اتمسفر برابر ۱/۰۲ ولت می‌باشد که مقدار آن از رابطه (۲۵) بدست می‌آید.

$$E^\circ = \frac{-\Delta g_f}{zF} \quad (25)$$

که در آن Δg_f انرژی تشکیل آزاد گیبس، z تعداد الکترونهای منتقل شده به ازای هر مول سوخت و F ثابت فارادی می‌باشد. ولتاژ حاصل شده از هر سلول پیل سوختی از رابطه (۲۶) محاسبه خواهد شد.

$$V_{cell} = E_{eq} - i(R_{ohmic} + \eta_{anode} + \eta_{cathode}) \quad (26)$$

که در آن E_{eq} پتانسیل تعادلی هر سلول پیل سوختی می‌باشد که مقدار آن از رابطه (۲۱) محاسبه شده است. i چگالی متوسط جریان می‌باشد و R_{ohmic} افت پتانسیل اهمی هر سلول است که مقدار آن از معادلات تجربی بدست می‌آید. η_{anode} و $\eta_{cathode}$ به ترتیب افت پتانسیل غلظتی و افت پتانسیل

فعال سازی می باشد که تابعی از دما و فشار جزئی هستند. معادلات تجربی افت اهمی، افت پتانسیل غلظتی و افت پتانسیل فعال سازی به ترتیب در قالب معادلات (۲۷)، (۲۸) و (۲۹) بیان شده است.

$$R_{ohmic} = 0.5 \times 10^{-4} \exp \left[3016 \left(\frac{1}{T_{FC}} - \frac{1}{923} \right) \right] \quad (27)$$

$$\eta_{anode} = 2.27 \times 10^{-9} \exp \left(\frac{6435}{T_{FC}} \right) P_{H_2}^{-0.42} P_{CO_2}^{-0.17} P_{H_2O}^{-1.0} \quad (28)$$

$$\eta_{cathode} = 7.505 \times 10^{-10} \exp \left(\frac{9298}{T_{FC}} \right) P_{O_2}^{-0.43} P_{CO_2}^{-0.09} \quad (29)$$

در معادلات بالا P_i بیانگر فشار جزئی هر کدام از اجزای بیان شده است. این معادلات تجربی برای دمای بین ۶۰۰-۷۰۰ درجه سانتی گراد معتبر می باشند. بر اساس مقادیر بدست آمده از معادلات فوق، میزان توان خروجی از پیل سوختی را می توان مطابق با معادله (۳۰) بدست آورد.

$$\text{Power Output}_{FC} = I_{total} V_{cell} \quad (30)$$

که I_{total} جریان کل عبوری از هر سلول و V_{cell} پتانسیل هر سلول می باشد. مشخصات پیل سوختی مدل شده به منظور داشتن یک مرجع برای مقایسه نتایج حاصل، در جدول (۲) ذکر شده است. در اینجا دمای پیل سوختی، جزو متغیرهای مورد بررسی رفتار پیل سوختی و بر اساس مرجع [۱۹] فرضیات مربوطه انجام گرفته و مطابق مرجع [۲۱] کنترل می شود. در نهایت، جزئیات فرایند محاسبات در شکل (۶) نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات پیل سوختی کربنات مذاب مدل شده

مقادیر	مشخصات پیل سوختی کربنات مذاب
۶۵۰	دمای سلول (درجه سلسیوس)
۷۵	ضریب بهره گیری از سوخت (درصد)
۰/۱۶۵	مساحت موثر سلول (متر مربع)
۱۲۰۰	جریان نامی (آمپر)
۳/۵	فشار (بار)

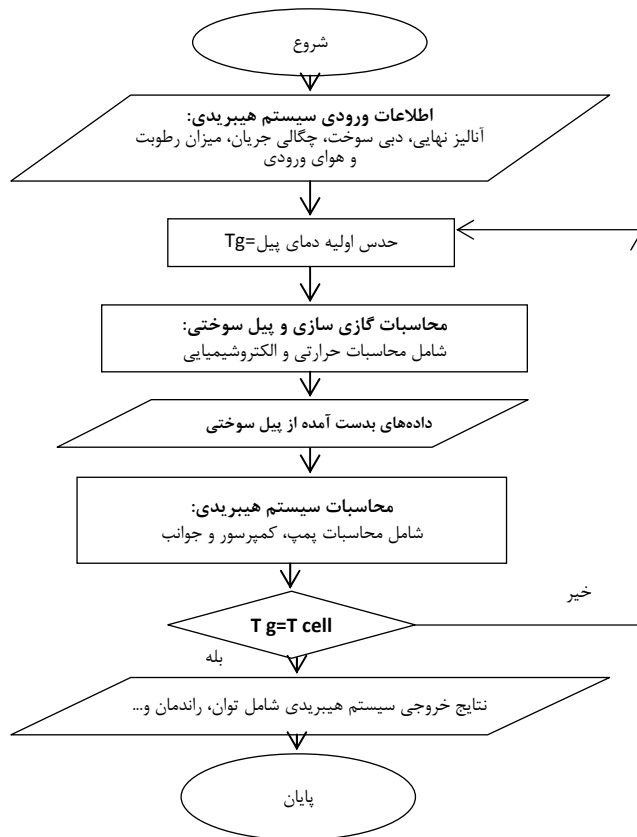
۳-۲-۱- موازنه انرژی

اگر حجم کنترل سیستم پیل سوختی مدل شده در قالب شکل (۷) در نظر گرفته شود، معادله موازنه انرژی مطابق قانون اول ترمودینامیک از رابطه (۳۱) بدست می آید. جریان های ورودی به حجم کنترل، گازهای ورودی به آند و کاتد می باشند. جریان های خروجی نیز گازهای خروجی از آن می باشند. انرژی الکتریکی و حرارت تولید شده از مرزهای سیستم عبور می کنند.

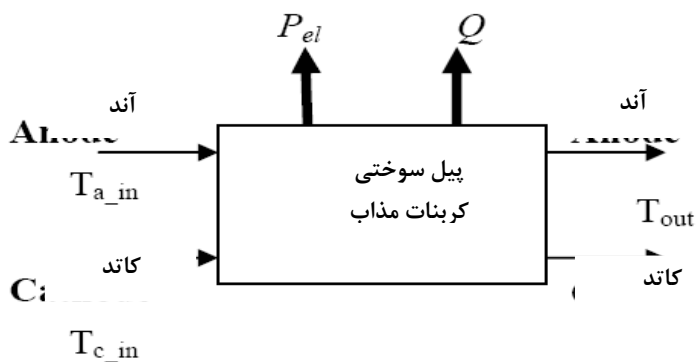
$$Q + P_{el} = h_{a-in}(T_{a-in})n_{a-in} + h_{c-in}(T_{c-in})n_{c-in} - h_{a-out}(T_{a-out})n_{a-out} - h_{c-out}(T_{c-out})n_{c-out} \quad (31)$$

P_{el} انرژی الکتریکی تولید شده و Q نرخ انتقال حرارت بین سیستم و پیل سوختی می‌باشد. اندیس های a و c به ترتیب مربوط به گازهای آند و کاتد می‌باشد. در صورت آدیباتیک بودن سیستم، نرخ انتقال حرارت نادیده در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن دمای خروجی مشابه برای گازهای آند و کاتد قانون اول ترمودینامیک از معادله (۳۲) بیان می‌شود [۲۱].

$$P_{el} = h_{a-in}(T_{a-in})n_{a-in} + h_{c-in}(T_{c-in})n_{c-in} - h_{a-out}(T_{out})n_{a-out} - h_{c-out}(T_{out})n_{c-out} \quad (32)$$



شکل ۶- فرایند محاسبات برای حل معادلات



شکل ۷- شماتیک حجم کنترل سیستم پیل سوختی

۴- نتایج

۴-۱- اعتبار سنجی مدل گازی ساز پایین سو

در ابتدا به اعتبار سنجی کد محاسباتی پرداخته می‌شود. به دلیل استفاده از پسماند جامد شهری شهر تهران به عنوان ورودی سیستم و متفاوت بودن خصوصیات آن با خصوصیات سایر پسماندها و کمبود نتایج آزمایشگاهی در این زمینه، ابتدا به اعتبار سنجی گاز تولید شده از گازی‌ساز پرداخته شده است و سپس به اعتبار سنجی داده‌های بدست آمده از مدلسازی سیستم گازی‌سازی-پیل سوختی پرداخته می‌شود. جدول (۳) نتایج مدل و مقایسه نتایج با نتایج آزمایشگاهی جایا و همکارانش در سال (۲۰۰۳) را نشان می‌دهد. در این جدول میزان اختلاف بین داده‌های تجربی و داده‌های بدست آمده از مدل به کمک پارامتر میانگین مربعات ریشه بیان شده است. مقدار بدست آمده توسط این پارامتر نشان از کوچک بودن مقدار خطا و معتبر بودن مدل دارد.

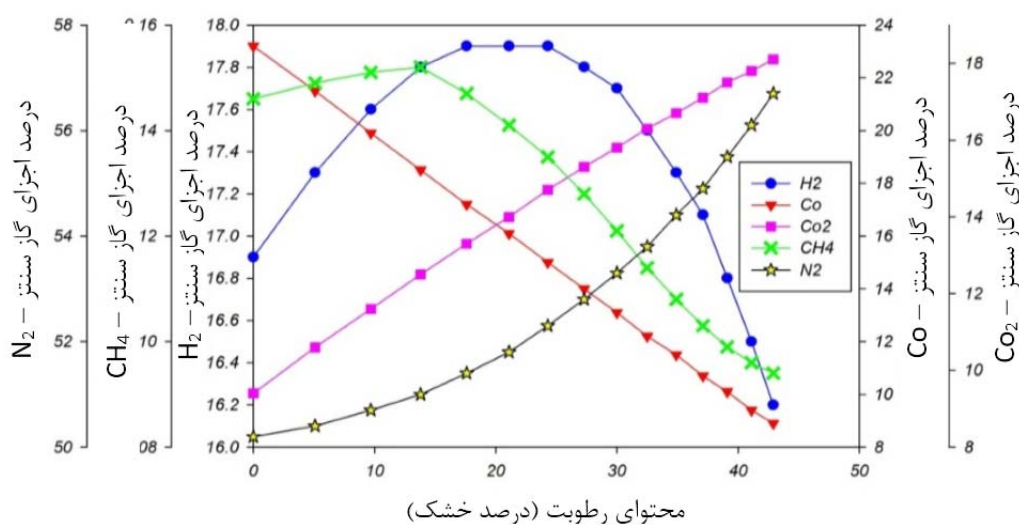
جدول ۳- نتایج مدل ترمودینامیکی گاز سنتز خروجی از گازی‌ساز در مقادیر متفاوت رطوبت و مقایسه آن با نتایج تجربی [۵]

محتوای رطوبت (درصد رطوبت)	هیدروژن (درصد حجمی)		مونوکسید کربن (درصد حجمی)		متان (درصد حجمی)	
	نتایج مدل	نتایج تجربی	نتایج مدل	نتایج تجربی	نتایج مدل	نتایج تجربی
۱۴	۱۷/۷	۱۲/۵۰	۱۷/۵	۱۸/۹	۰/۱۵	۱/۲
۱۶	۱۷/۹	۱۷	۱۶/۱	۱۸/۴۰	۰/۱۵	۱/۳
میانگین مربعات ریشه	۳/۷۳		۱/۹۰		۱/۱۰	

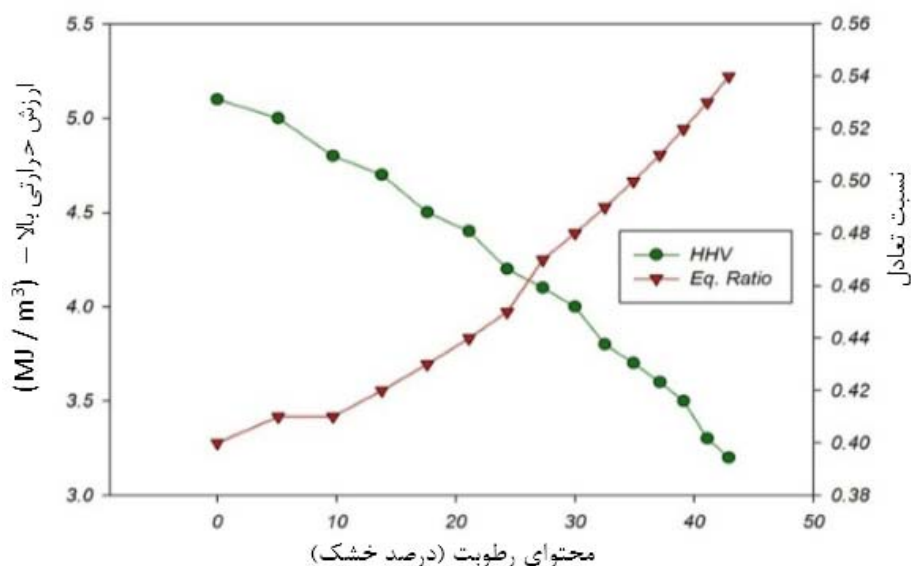
۴-۲- نتایج مدل گازی ساز پائین سو

در این بخش با استفاده از مدلی که از توسعه کد محاسباتی حاصل شده است به شبیه‌سازی الگوریتم مساله پرداخته می‌شود و نتایج به صورت زیر در قالب شکل‌های مستخرج از کد ارائه داده می‌شود. شکل (۸) ترکیب اجزای گازی شکل خروجی را به ازای درصد رطوبت‌های مختلف نشان می‌دهد. محدوده بررسی رطوبت از حالت خشک تا رطوبت ۴۰٪ در نظر گرفته شده است. در اثر افزایش رطوبت، مقدار هیدروژن خروجی تا ۱۷/۹٪ گاز خروجی، افزایش می‌یابد. میزان مونوکسید کربن تولید شده در بیشینه مقدار هیدروژن دارای مقدار ۱۷/۲٪ می‌باشد. با افزایش رطوبت از صفر تا ۴۰٪، مقدار مونوکسید کربن از ۲۳/۳٪ به ۶٪ می‌رسد. دی اکسید کربن و نیتروژن نیز با افزایش میزان رطوبت، مقدارشان در گاز خروجی افزایش می‌یابد. شکل (۹) میزان ارزش حرارتی گاز خروجی از گازی‌سازی را نشان می‌دهد. با افزایش رطوبت خوراک از ۰ تا ۴۰ درصد، میزان ارزش حرارتی گاز خروجی از گازی‌سازی از ۵/۲ تا ۳/۲ (مگاژول بر متر مکعب) کاهش می‌یابد و این امر نشان دهنده تاثیر منفی وجود رطوبت در خوراک می‌باشد. در این نمودار نحوه تغییر ثابت تعادل که معرف نسبت هوا به سوخت واقعی به نسبت هوا به سوخت استوکیومتریکی می‌باشد، نشان داده شده است که در در محدوده تغییرات رطوبت، این نسبت از مقدار ۰/۳۹ تا ۰/۵۴ افزایش می‌یابد. شکل (۱۰) نیز اثر دما بر غلظت گاز سنتز را نشان می‌دهد که محدوده دما در ناحیه گازی‌سازی از ۶۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است و روند افزایشی یا کاهشی غلظت گازهای خروجی از

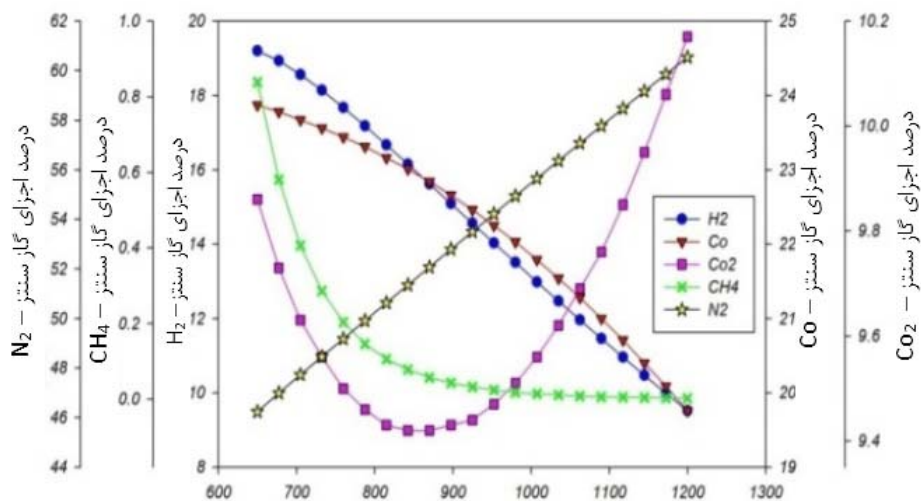
گازی سازی را نشان می دهد. دمای تعادلی برای ناحیه گازی ساز در حدود ۱۰۷۳ درجه کلوین (۸۰۰ درجه سانتی گراد) بدست آمد. میزان غلظت هیدروژن در این محدوده دما از ۱۹٪ تا ۱۰٪ کاهش می یابد و میزان غلظت مونوکسیدکربن در این محدوده دمایی از ۲۳/۵٪ تا ۲۰٪ کاهش می یابد. گازهای هیدروژن و مونوکسید کربن به دلیل ارزش حرارتی که دارند. در یک گازی ساز واقعی، ساختار گاز سنتز و غلظت گاز تولید شده به طراحی گازی ساز و نوع گازی ساز بستگی دارد. از فاکتورهای موثر بر ساختار و غلظت گاز سنتز میتوان به توزیع دمایی در گازی ساز، زمان ماند گاز سنتز، درصد رطوبت پسماند، سایز پسماند ورودی اشاره نمود [۱۷].



شکل ۸- تاثیر میزان رطوبت خوراک ورودی به گازی ساز بر ترکیب اجزای گاز سنتز خروجی

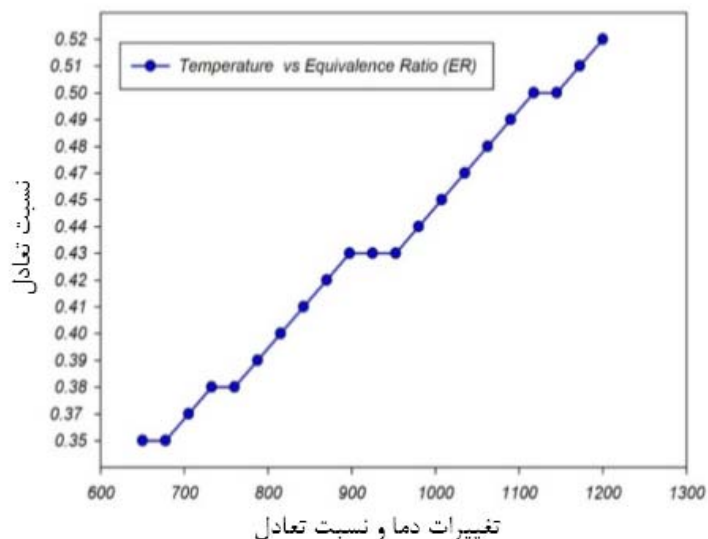


شکل ۹- تاثیر میزان رطوبت بر ارزش حرارتی گاز سنتز خروجی از گازی ساز و نسبت تعادل در شرایط آدیباتیک



محتوای رطوبت (درصد خشک)

شکل ۱۰- تاثیر دما بر گاز سنتز خروجی از گازی‌ساز



تغییرات دما و نسبت تعادل

شکل ۱۱- اثر دما بر نسبت تعادلی در شرایط آدیاباتیک

۳-۴- نتایج مدل پیل سوختی کربنات مذاب

این مرحله فرض شده است گاز سنتز خروجی از گازی‌ساز پس از تصفیه و مطابق با داده‌های جدول (۴) وارد یک سیستم پیل سوختی کربنات مذاب جهت تولید انرژی شود. ساختار گاز سنتز ورودی به پیل کربنات مذاب جهت تولید انرژی، مطابق جدول (۴) می‌باشد.

جدول ۴- میانگین ترکیب اجزای گاز سنتز خشک در ورود به پیل سوختی کربنات مذاب

عناصر	میانگین ترکیب اجزای گاز سنتز خشک
CO	۱۶/۰۳
CO ₂	۱۳/۹۵
H ₂	۱۷/۹۴
CH ₄	۰/۱۴
N ₂	۵۱/۷۰

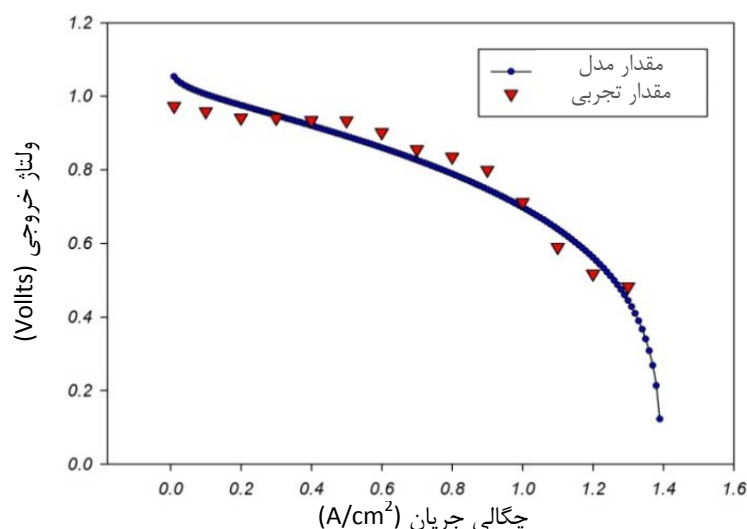
در ابتدا به تحلیل نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی پرداخته شده است. شکل (۱۲) منحنی پلاریزاسیون یا قطبیت برای مجموعه پیل سوختی کربنات مذاب با تغذیه از گاز سنتز ناشی از گازی سازی پسماندها و مقایسه آن با نتایج تجربی را نشان می‌دهد. شکل (۱۲) بر اساس محاسبه سه افت غلظتی، افت فعال سازی و افت اهمی رسم شده است. عوامل عمده کاهش عملکرد مطلوب در واقع سه نوع قطبش یا افت غلظتی^۱، افت فعال سازی^۲ و افت اهمی^۳ می‌باشند که باعث کاهش پتانسیل پیل سوختی نسبت به مقدار ایده آل آن می‌شوند. ولتاژ مدار باز و یا ولتاژ ترمودینامیکی مربوط به حالت مدار باز است. پیل سوختی بر اساس شرایط عملکردی دارای افت های متفاوتی است، یکی از این افت‌ها، افت ناشی از فعال سازی می‌باشد. واکنش‌های انجام شده در پیل سوختی برای شروع نیاز به مقداری انرژی فعال سازی دارند. بنابراین مقداری از انرژی، صرف فعال سازی واکنش دهنده‌ها و شروع واکنش‌های شیمیایی می‌شود. در چگالی جریان‌های کمتر افت فعال سازی تاثیر بیشتری دارد. افت دیگر، افت ناشی از مقاومت در برابر حرکت الکترون‌ها و یون‌ها است. این افت معروف به افت اهمی می‌باشد. برطبق قانون اهم هرچه چگالی جریان بیشتر شود مقاومت در برابر مهاجرت الکترون‌ها و یون‌ها نیز بیشتر می‌گردد. رفتار این افت تقریباً خطی است و با زیاد شدن چگالی جریان، میزان این افت نیز بیشتر می‌شود. یکی دیگر از افت‌ها، افت ناشی از محدودیت در انتقال واکنش دهنده‌ها است. لایه‌های کاتالیزور و نفوذ گاز، در هنگام عبور از این لایه‌ها دچار افت در فشار و سرعت می‌شوند. هرچه چگالی جریان بیشتر باشد، شدت واکنش انجام یافته در سطح لایه کاتالیزور بیشتر می‌شود، این افزایش باعث افزایش مصرف واکنش دهنده‌ها می‌گردد، لذا واکنش دهنده‌ها می‌بایست با سرعت بیشتری به سمت سطح لایه کاتالیزور هدایت شوند، اما به علت متخلخل بودن لایه‌ها، سرعت انتقال واکنش دهنده‌ها دارای محدودیت است. این افت در چگالی جریان‌های بالا نمایان می‌شود و محدودیتی برای نفوذ سیال بوجود می‌آورد.

در چگالی جریان‌های کم افت ولتاژ غالباً به علت انرژی فعال سازی می‌باشد و هر چه واکنش به انرژی فعال سازی بالاتری نیاز داشته باشد افت بیشتری رخ می‌دهد و سطح نمودار پایین تر می‌آید. دو عامل اصلی باعث می‌گردد که داده های تجربی در چگالی جریان های کم پایین تر از داده های مدل سازی باشد، اول آنکه در مدل سازی فرض می‌گردد سطح قابل دسترس کاتالیست کاملاً در اختیار واکنش دهنده قرار بگیرد در صورتیکه در عمل می‌تواند در بدو ورود گاز سنتر بخشی از سطح کاتالیست توسط ذرات جامد در گاز پوشانده شود. در چگالی جریان‌های متوسط که عمدتاً افت ولتاژ اهمیت غالب است، در واقع بالاتر بودن مقادیر تجربی به معنای آن است که الکترولیت مقاومت کمتری در برابر عبور یون‌ها از خود نشان داده است که این امر نشان می‌دهد با افزایش دما در خلال انجام واکنش شرایط بهتری برای عبور یون‌ها فراهم شده و میزان افت ولتاژ کمتر خواهد بود. تطابق نتایج مدل و نتایج تجربی حاکی از معتبر بودن مدل می‌باشد، میانگین مربعات ریشه بین نتایج تجربی و نتایج مدل مقدار 0.05 محاسبه شد که نشان دهنده تطابق نتایج تجربی و نتایج مدل می‌باشد [۱۸].

¹ Concentration Polarization

² Activation Polarization

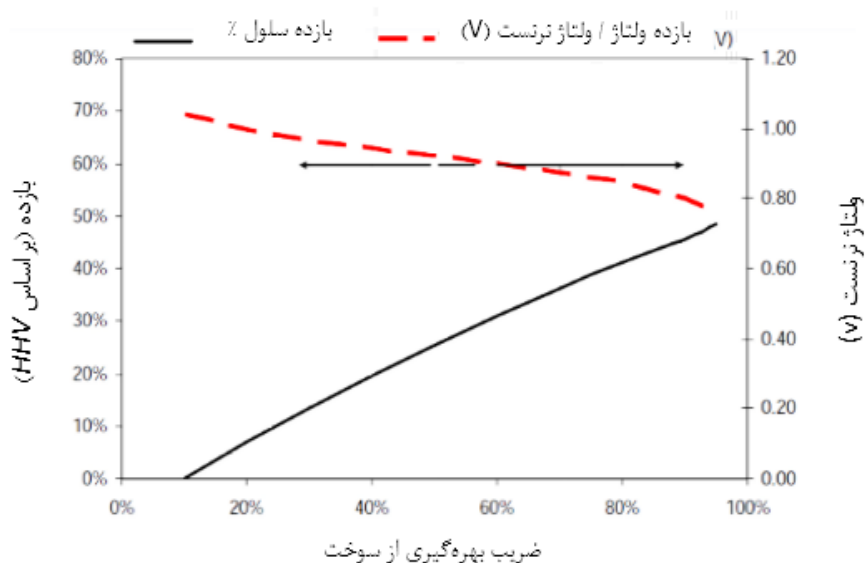
³ Ohmic Polarization



شکل ۱۲- منحنی پلاریزاسیون برای مجموعه پیل سوختی کربنات مذاب و مقایسه آن با نتایج تجربی [۱۸]

بازده سیستم بر اساس روابط، بین ضریب بهره‌گیری از سوخت در پیل سوختی، بازدهی سیستم و ولتاژ خروجی از هر سلول بررسی شده است. بازده کلی سیستم از معادله (۲۵) محاسبه شده است. نتایج آن در قالب شکل (۱۳) استخراج شده است. بر اساس توسعه معادله (۲۵) و روابط ترمودینامیکی حاکم، می‌توان دریافت که یک رابطه بین بازده پیل و ولتاژ خروجی از پیل وجود دارد. میزان بهره‌گیری از سوخت در پیل‌های سوختی می‌تواند به طور مستقیم بر راندمان پیل و جنبه اقتصادی آن تاثیرگذار باشد که محدوده معمول تغییر آن در سیستم با فلش نشان داده شده است. با در نظر گرفتن ضریب بهره‌گیری ۰/۸ مقدار بازده پیل سوختی ۴۱٪ محاسبه می‌شود، که در مقایسه با سایر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه نتیجه مطلوبی بدست آمده است [۱۹].

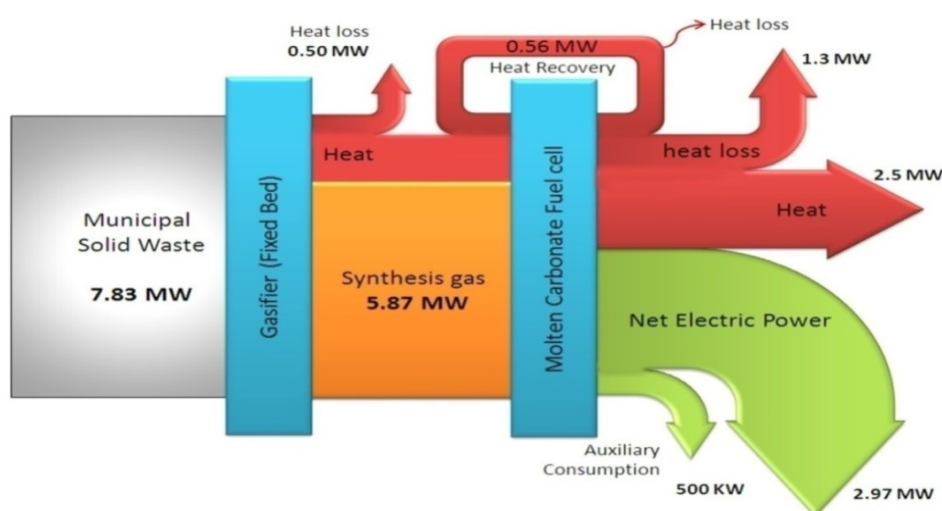
$$\eta = \frac{\text{Useful energy}}{\Delta H} \quad (33)$$



شکل ۱۳- بازده سیستم پیل سوختی بر اساس سوخت ورودی

۴-۴- نمودار جریان انرژی سیستم

نمودار جریان انرژی در یک سیستم بیانگر مسیر جریان‌های انرژی بوده و دیدی کلی از نحوه مصرف و میزان اتلاف هر یک حامل‌های انرژی در بخش‌های مختلف ارائه می‌کند. این نمودار بیانگر عملکرد کلی سیستم است. از روی مقادیر بدست آمده در این شکل می‌توان بازده الکتریکی یا حرارتی کل سیستم را بدست آورد. در شکل (۱۴)، میزان انرژی قابل دسترسی در هر بخش، میزان اتلاف و نیز مسیر جریان به نمایش در آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود در ابتدا میزان ۲۰۰۰ کیلوگرم پسماند با میزان رطوبت ۲۰٪ وارد سیستم می‌شود که با کسر میزان درصد رطوبت از میزان کل پسماند، مقدار پسماند خشک که قابلیت تولید انرژی را دارد بدست می‌آید. میزان ارزش حرارتی پسماند با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ارزش حرارتی در پژوهشکده علوم و فناوری انرژی شریف به صورت تجربی ۱۷۶۲۰ کیلوژول بر کیلوگرم بدست آمد که می‌توان این مقدار را جهت تولید انرژی بسیار مناسب ارزیابی کرد. میزان کل توان موجود برای تبدیل به انرژی الکتریکی و حرارتی، ۷/۸۳ مگاوات می‌باشد. پسماندها پس از ورود به سیستم گازی‌سازی، مقداری از انرژی را به شکل انرژی گرمایی (پدیده انتقال حرارت) از دست می‌دهند و مقداری گرما به دلیل انجام واکنش‌های شیمیایی، تولید می‌شود. میزان ارزش گاز سنتز حاصله از فرآیند گازی‌سازی که ناشی از ارزش حرارتی گازهای هیدروژن، مونوکسید کربن و متان می‌باشد به میزان ۵/۸۷ مگاوات می‌باشد. میزان بازده سیستم گازی‌سازی در حدود ۷۴٪ محاسبه شد. سپس گاز سنتز حاصله وارد سیستم پیل سوختی کربنات مذاب می‌شود، از این رو در اثر انجام واکنش‌های شیمیایی در پیل، میزان ۳/۴۷ مگاوات انرژی الکتریکی از پیل تولید می‌شود که با در نظر گرفتن مصارف الکتریکی جانبی از قبیل کمپرسور، دمنده، پمپ و غیره به میزان ۵۰۰ کیلووات، میزان تولید خالص انرژی الکتریکی ۲/۹۷ مگاوات می‌باشد. بازده الکتریکی سیستم عبارت است از نسبت مقدار انرژی الکتریکی خالص تولیدی بر مقدار کل انرژی ورودی زیست توده، که برابر ۳۸٪ است. شکل (۱۴) بر اساس محاسبات انجام گرفته و همچنین مرجع [۱۹] رسم شده است.



شکل ۱۴- نمودار سنکی جریان انرژی سیستم هیبرید گازی‌سازی- پیل سوختی کربنات مذاب

جدول ۵- هزینه های سرمایه گذاری بر حسب دلار برای اجزای نیروگاه در دو ظرفیت متفاوت

هزینه بخش‌های مختلف نیروگاه	هزینه سرمایه گذاری در واحد ۱۴ مگاواتی	هزینه سرمایه گذاری در واحد ۲۰ مگاواتی
سیستم گازی‌سازی و تصفیه گاز سنتز(دلار)	+۱۸,۳۰۰,۰۰۰	+۲۵,۲۰۰,۰۰۰
سیستم پیل سوختی(دلار)	+۲۸,۰۰۰,۰۰۰	+۴۰,۰۰۰,۰۰۰
آماده سازی پسماند(دلار)	+ ۴,۴۰۵,۶۰۶	+ ۶,۷۵۵,۶۵۱
کل هزینه سرمایه گذاری(دلار)	+ ۵۰,۷۰۵,۶۰۶	+ ۷۱,۹۵۵,۶۵۱
متوسط هزینه فروش برق(دلار بر کیلووات ساعت)	+ ۰,۱۱	+ ۰,۱۱
درآمد سالیانه(دلار)	+ ۱۳,۳۰۵,۶۰۰	+ ۱۹,۰۰۸,۰۰۰
انتقال پسماند(دلار)	- ۳۳۰,۷۵۱	- ۵۰۷,۱۸۱
هزینه های عملیاتی(دلار)	- ۷,۶۰۵,۸۴۰	- ۱۰,۷۹۳,۳۴۸
هزینه های دفع(دلار)	+ ۸۲۶,۸۷۸	+ ۱,۲۶۷,۹۵۲
درآمد خالص سالیانه(دلار)	۶,۱۹۵,۸۸۷	+۸,۹۷۵,۴۲۳
بازگشت سرمایه ^۱ (سال)	۸,۲ سال	۸,۱ سال

۴-۵- تحلیل اقتصادی

برای تحلیل اقتصادی نیروگاه هیبریدی گازی‌سازی-پیل سوختی، میزان هزینه سرمایه‌گذاری جهت خرید تجهیزات شامل سیستم گازی‌سازی، سیستم تصفیه، پیل سوختی و سایر واحدها حساب می‌شود. بنابراین در ابتدا میزان هزینه سرمایه‌گذاری کل محاسبه شده است، سپس بر اساس میزان درآمد نیروگاه و سود دهی پروژه ناشی از فروش برق و سایر فرآورده‌ها، میزان بازگشت سرمایه محاسبه شده است. برای تحلیل بهتر مساله و امکان ایجاد مقایسه دو ظرفیت ۱۴ مگاوات و ۲۰ مگاوات برای نیروگاه در نظر گرفته شده است. تحلیل اقتصادی بر اساس داده‌های موجود در سال (۲۰۱۱) و بدون در نظر گرفتن نرخ تورم و با هدف محاسبه دوره بازگشت سرمایه ساده انجام گرفته است. درآمد سالیانه نیروگاه بر حسب اینکه نیروگاه در ۳۶۰ روز در سال به صورت ۲۴ ساعت فعالیت می‌کند محاسبه شده است. جدول (۵) میزان هزینه‌های سرمایه‌گذاری و درآمدهای نیروگاه را تشریح می‌کند که در نهایت به کمک معادله (۳۴) به محاسبه بازگشت سرمایه پرداخته شده است [۲۰].

$$\text{Pay back Time} = \frac{\text{Investment cost}}{\text{Yearly cash flow}} \quad (34)$$

¹ Payback period

از طرفی دیگر معادله (۳۵)، معادله ارزش کنونی سرمایه را نشان می دهد که با صفر قرار دادن ارزش کنونی سرمایه، زمان بازگشت سرمایه بدست می آید.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1+i)^t} \quad (35)$$

با محاسبه میزان درآمد واحد می توان سال سود دهی پروژه و میزان بازگشت سرمایه را حساب نمود. همانطور که نتایج نشان می دهد بازگشت سرمایه برای واحد ۱۴ مگاواتی ۸.۲ سال است. در حالیکه این زمان برای نیروگاه ۲۰ مگاواتی برابر ۸.۱ سال است. بنابراین نیروگاه ۲۰ مگاواتی از لحاظ اقتصادی شرایط بهتری دارد. البته ذکر این نکته ضروری است که برای چنین طرحی تنها بازگشت سرمایه مهم نیست و با توجه به مزیت های زیست محیطی آن، می توان چنین طرحی را مناسب دانست.

۵- نتیجه گیری

با توجه به روند رو به رشد مصرف انرژی در جهان استفاده از روش ها و سیستم های جدید تولید انرژی با بازدهی بالا و آلایندهی پایین تر نظیر سیستم های پیل سوختی در اولویت قرار گرفته شده است. در این مقاله یکی از سیستم های تولید انرژی از پسماندها با تلفیق سیستم گازی سازی و پیل سوختی کربنات مذاب ارائه شده است. که به دلیل امکان استحصال دی اکسید کربن از پیل سوختی کربنات مذاب در آینده از این نوع پیل استفاده می شود. با استفاده از آنالیز شیمیایی زباله شهر تهران در ابتدا به بررسی پسماند شهر تهران پرداخته شده است و میزان ارزش حرارتی آن در پژوهشکده علوم و فناوری انرژی شریف با استفاده از دستگاه اندازه گیری ارزش حرارتی ۱۷۶۲۰ کیلوژول بر کیلوگرم بدست آمد که می توان این مقدار را جهت تولید انرژی بسیار مناسب ارزیابی کرد. سپس یک مدل ترمودینامیکی برای یک سیستم گازی ساز پایین سو ارائه شد و به بررسی ترکیب گاز خروجی از گازی ساز و تاثیر مقدار رطوبت بر ترکیب گاز سنتز خروجی و ارزش حرارتی گاز سنتز خروجی از گازی ساز پرداخته شد که با افزایش دمای داخل راکتور، غلظت گاز هیدروژن به دلیل تبخیر رطوبت کاهش و غلظت نیتروژن به دلیل افزایش میزان هوای ورودی به راکتور با افزایش میزان دمای راکتور، افزایش یافت. از بین سیستم های مختلف تولید انرژی از گاز سنتز سیستم پیل کربنات مذاب به دلیل آلایندهی پایین انتخاب شد. یک مشخصه بارز پیل کربنات مذاب، استفاده همزمان هیدروژن و مونوکسید کربن به عنوان سوخت است. یک مدل ترمودینامیکی برای آن بر اساس تغذیه از گاز سنتز ارائه شد که آنالیز گاز سنتز ورودی به پیل سوختی ارائه شد و به بررسی نمودار ولتاژ-جریان پرداخته شد. نکته ای که در طراحی پیل برای تولید پایدار حائز اهمیت است، این است که چگالی شدت جریان گرفته شده در نقطه طراحی باید در ناحیه افت های ناشی از مقاومت و به دور از ناحیه غلظت باشد. بر اساس بررسی های انجام گرفته هر چه رطوبت زیست توده ورودی به گازی ساز بالاتر باشد ارزش حرارتی گاز سنتز خروجی از گازی ساز و انرژی خروجی از پیل سوختی کمتر می باشد. همچنین با افزایش دمای گازی ساز، انرژی خروجی از پیل سوختی کاهش پیدا می کند و باید محدوده دمایی ناحیه گازی ساز بر اساس ارزش حرارتی گاز سنتز تولید شده تعیین گردد. نتایج حاکی از مثبت بودن ارائه طرح، مبنی بر امکان پذیر بودن تولید انرژی از زباله های شهر تهران با بهره گیری از سیستم هیبریدی گازی ساز-پیل سوختی با بازده الکتریکی ۳۸٪

می‌باشد. سرانجام آنالیز اقتصادی برای پروژه انجام شد. نتایج حاکی از بازگشت سرمایه ۸.۲ سال برای نیروگاه با ظرفیت ۱۴ مگاوات و ۸.۱ سال برای نیروگاه با ظرفیت ۲۰ مگاوات است.

مراجع

- [۱] عمرانی، قاسمعلی، مواد زائد جامد، مرکز انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی، جلد ۱ و ۲، تهران، (۱۳۸۳).
- [۲] فصلنامه آماري مدیریت مواد زائد جامد شهر تهران، سازمان بازیافت و تبدیل مواد، شماره دوم، تابستان (۱۳۸۲).
- [3] www.bp.com/liveassets/bpinternet/globalbp/globalbpukenglish/reportsandpublications/statistical/energy-review, May (2012).
- [4] Visvanathan, C., Trankler, J., Kuruparan, P., Basnayake, B.F., Chiemchaisri, C., Kurian, J., and Gonming, Z., "Asian Regional Research Programme on Sustainable Solid Waste Landfill Management in Asia", Proceedings Sardinia, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Environmental Sanitary Engineering Center, Italy, (2005).
- [5] Puig Arnavat, M., Coronas, A., and Carless Bruno, J., "Performance Modeling and Validation of Biomass Gasifiers for Trigeneration Plants", Department of Mechanical Engineering, Universitat Rovirai Virgili, Tarragona, October, (2011).
- [6] Kirill, V.L., and Horst, J.R., "An Advanced Integrated Biomass Gasification and Molten Fuel Cell Power System", Energy Conversion and Management, Vol. 39, No. 16-18, pp. 1931-1943, (1988).
- [7] Bang Moller, C., and Rokni, M., "Thermodynamic Performance Study of Biomass Gasification, Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid Systems", Energy Conversion and Management, Vol. 51, Issue. 11, pp. 2330-2339, (2010).
- [8] Aloui, T., and Halouani, K., "Analytical Modeling of Polarizations in a Solid Oxide Fuel Cell using Biomass Syngas Product as Fuel", Applied Thermal Engineering, Vol. 27, Issue. 4, pp. 731-737, (2007).
- [9] Morita, H., Yoshiba, F., Woudstra, V., Hemmes, K., and Spliethoff, H., "Feasibility Study of Wood Biomass Gasification/Molten Carbonate Fuel Cell Power System-comparative Characterization of Fuel Cell and Gas Turbine Systems", Journal of Power Sources, Vol. 138, pp. 31-40, (2004).
- [10] Kumar Sharma, V., "Research and Development Activities on Biofuels", Expert Group Meeting on Biofuels and Bio Based Chemicals: An Opportunity for Developing Countries? Organized by ICS-UNIDO, Trieste, Italy, 9-11 May 2011, Enea Research Center Trisaia, Trieste, Italy, (2011).

- [11] Jarungthammachote, S., and Dutta, A., "Thermodynamic Equilibrium Model and Second Law Analysis of a Downdraft Waste Gasifier", *Energy Journal*, Elsevier, Vol. 32, No. 6, pp. 1660-1669, (2007).
- [12] Smith, W.R., and Missen, R.W., "*Chemical Reaction Equilibrium Analysis: Theory and Algorithms*", Wiley, New York, USA, (1982).
- [13] Perlack, R.D., Wright, L.L., and Turhollow, A.F., "Biomass as Feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry: The Technical Feasibility of a Billion-Ton Annual Supply", The United States Department of Agriculture (USDA) and the United States Department of Energy (DOE) Prepared by Oak Ridge National Lab, Oak Ridge, The Technical Feasibility, (2005).
- [14] Zainal, Z.A., Ali, R., Lean, C.H., and Seetharamu, K.N., "Prediction of the Performance of a Downdraft Gasifier using Equilibrium Modeling for Different Biomass Materials", *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, pp. 1499-1515, (2001).
- [15] Higman, C., and Van Der Burgt, M.J., "*Gasification, USA*: Gulf Professional Pub", (2003).
- [16] Rashidi, R., Berg, P., and Dincer, I., "Performance Investigation of a Combined MCFC System", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 4395-4405, (2009).
- [17] Gomez-Barea, A., and Leckner, B., "Modeling of Biomass Gasification in Fluidized Bed", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 36, pp. 444-509, (2010).
- [18] Subramanian, N., Haran, B.S., White, R.E., and Popov, B.N., "Full Cell Mathematical Model of a MCFC", *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 150, No. 10, pp. 1360-1367, (2003).
- [19] Donolo, G., De Simonb, G., and Fermeglia, M., "Steady State Simulation of Energy Production from Biomass by Molten Carbonate Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 158, pp. 1282-1289, (2006).
- [20] Stauff, C., Heynen, Ch., Gregory, J., Abernethy, J., and Krishnamoorthy, A., "Green Lane Landfill Waste Reduction Proposal", The University of Western Ontario, Faculty of Engineering, GPE 4484A-Green Fuels and Chemicals, Industrial Proposal, (2011).
- [21] Au, B., McPhail, S., Woudstra, N., and Hemmes, K., "The Influence of Operating Temperature on the Efficiency of a Combined Heat and Power Fuel Cell Plant", *Journal of Power Sources*, Vol. 122, pp. 37-46, (2003).

فهرست نمادهای انگلیسی

نسبت جرمی اتم کربن	C
ظرفیت حرارتی ویژه در فشار ثابت	C_p
پتانسیل تعادلی سلول	E_{eq}
پتانسیل استاندارد سلول	E°
ثابت فارادی	F
جریان کل عبوری از هر سلول	I_{total}
نسبت جرمی اتم هیدروژن	H
ارزش حرارتی بالا	Higher Heating Value
آنتالپی تشکیل واکنش دهنده‌ها و محصولات	$H_{f,i}^0$
ارزش حرارتی پایین	Lower Heating Value
جرم مولکولی خوراک بر حسب کیلوگرم بر کیلومول	M_{bio}
درصد رطوبت موجود در خوراک	m
کیلوگرم رطوبت موجود در هر کیلو مول خوراک	m_w
نسبت جرمی اتم نیتروژن	N
ارزش حال حاضر	NPV
تعداد مول های اجزا مختلف	n_i
نسبت جرمی اتم اکسیژن	O
فشار جزئی اجزا	P_i
انرژی الکتریکی تولید شده	P_{el}
نرخ انتقال حرارت بین سیستم و پیل	Q
مقاومت یا قطبش اهمیک هر سلول	R_{ohmic}
میانگین مربعات ریشه	RMS
نسبت جرمی اتم سولفور	S
دمای ناحیه گازی سازی	T
پتانسیل هر سلول	V_{cell}
نسبت اجزای مولی	X_i
نسبت مولی هیدروژن به کربن	x
مقدار هوا در هر کیلو مول خوراک	x_g
تعداد مول اجزای گازی	x_i
نسبت مولی اکسیژن به کربن	y
نسبت مولی نیتروژن به کربن	z
انرژی تشکیل آزاد گیبس	Δg_f
بازدهی	η
قطبش غلظتی	η_{anode}
قطبش فعال سازی	$\eta_{cathode}$

Abstract

Biomass is one of the most commonly used renewable energy sources. Using synthesis gas that is generated from gasification of municipal solid waste in a high temperature fuel cell system can lead to an increase in the contribution of biomass in the future global energy supply. In addition it can cause a significant reduction in waste disposal costs and adverse environmental effects. In this paper municipal solid waste of Tehran is considered as the main feed of the proposed system. The proposed system can be considered as a new idea for using the municipal waste of Tehran. In this study, a thermodynamic equilibrium model was developed based on hybrid gasifier-molten carbonate fuel cell to evaluate the effect of waste moisture content on synthesis gas composition. In addition, equilibrium temperature and heating value of synthesized gas have been analyzed. Then, a thermodynamic model is presented for MCFC. The modeling results showed reasonable agreement with the experiment. The results showed a promising performance based on the heating value of synthesized gas, power production and economic analysis for gasification-MCFC power plant in Iran. Finally, an economic analysis for gasification-MCFC power plant with a capacity of 14 MW and 20 MW is presented.