



مطالعه‌ی عددی سیکل یکپارچه‌ی تولید گاز از زیست توده و پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای

مهدی برجی بداعی^۱، صبا قربانی، کاظم آتشکاری، آرمین اعتمادی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۱ تیر ۱۳۹۴
بازنگری: ۲۴ شهریور ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۳ آبان ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۲۶ آبان ۱۳۹۴

کلمات کلیدی:

پیل سوختی اکسید جامد
گازی‌سازی
زیست‌توده
بیوگاز

چکیده: در پژوهش حاضر، عملکرد پایای سیستم یکپارچه‌ی متشکل از فرایند گازی‌سازی زیست‌توده و پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای به ازای مقادیر مختلف رطوبت زیست‌توده و مقدار هوای ورودی عامل گازی‌سازی در راکتور مولد گاز به صورت عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. فرآیند تولید گاز در قالب یک راکتور تک‌مرحله‌ای با استفاده از روش ترمودینامیکی تعادلی اصلاح‌شده مدل می‌شود. مدل ارائه‌شده در بخش پیل سوختی، مدلی یک‌بعدی با امکان کنترل دما در راستای محور پیل سوختی است. مدل کامل الکتروشیمیایی در کنار معادلات بقای جرم اجزای گازی و انرژی، شاکله اصلی مدل پیل سوختی را تشکیل می‌دهند. همچنین دو واکنش اصلاح متان به کمک بخار آب و تبدیل آب-گاز منابع تولید و مصرف اجزای گازی را در کانال سوخت تشکیل خواهند داد. مدل دو بخش اصلی سیستم به کمک نتایج آزمایشگاهی و عددی در دسترس ارزیابی شده و سپس اثر پارامترهای یادشده بر عملکرد سیستم یکپارچه تحلیل و تشریح شدند. نتایج نشان می‌دهند که ارزش حرارتی پایینی بیوگاز تولیدی از هر کیلومول چوب با میزان رطوبت ۰/۳، با کاهش نسبت هوای معادل کاهش می‌یابد. طبق نتایج، افزایش میزان رطوبت زیست‌توده، توان تولیدی تک‌سلول پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای را کاهش خواهد داد.

۱- مقدمه

با توجه به بحران انرژی و معضلات متعدد زیست‌محیطی عصر حاضر، یافتن راهکارهای جدید تبدیل انرژی مبتنی بر استفاده از منابع تجدیدپذیر استخراج انرژی، توجه بسیاری از محققین این عرصه را به خود جلب کرده‌است. در این راستا، بهره‌برداری از منابع زیست‌توده^۱ و پسماند مانند زائدات کشاورزی و باغی، زباله و خرده چوب می‌تواند ضمن مطرح شدن به عنوان منبعی جایگزین برای استخراج انرژی، منجر به کاهش انتشار آلاینده‌ها به محیط‌زیست نیز شود. از میان فناوری‌های نوین تبدیل انرژی نهفته در این دست از منابع، سیستم هیبرید فرآیند گازی‌سازی^۲ و پیل سوختی اکسید جامد افق نویدبخشی را ترسیم می‌کند. گازی‌سازی روشی است که طی آن، زیست‌توده به صورت تدریجی و طی چهار گام به گاز مرکبی متشکل از متان، مونوکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، بخار آب و از همه مهمتر هیدروژن تبدیل شده و قابل استفاده برای تولید الکتروسیسته با استفاده از فناوری‌های تولید توان مبتنی بر هیدروژن مانند پیل سوختی می‌باشد. شمایی از گام‌های مختلف گازی‌سازی در یک راکتور تک‌مرحله‌ای در شکل ۱ دیده می‌شود [۱].

اساس کار پیل سوختی بر تولید الکتروسیسته از واکنش الکتروشیمیایی بین هیدروژن و یون منفی اکسیژن استوار است. پیل‌های سوختی دارای

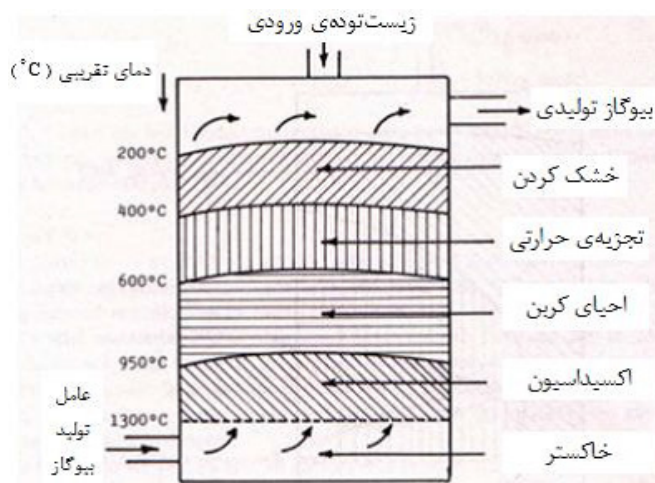


Fig. 1. Schematic of the gasification process

شکل ۱: شمایی از مراحل گازی‌سازی [۱]

شش نوع اصلی می‌باشند و در میان آنها، پیل سوختی اکسید جامد و کربنات مذاب به دلیل دمای عملکردی بالا برای تولید توان در مقیاس نیروگاهی مناسب می‌باشند. شکل ۲ شماتیکی از یک سلول پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای، مکانیزم تولید الکتروسیسته‌ی آن و محل وقوع واکنشها را نشان می‌دهد. با توجه به قابلیت پیل‌های سوختی اکسید جامد در کار با سوخت‌های غیر از هیدروژن خالص (به دلیل دمای عملکردی بالا)، در سال‌های اخیر استفاده از زیست‌توده برای استخراج گاز مرکب و استفاده از آن به جای هیدروژن خالص به عنوان سوخت در پیل سوختی مورد توجه محققین قرار گرفته‌است.

- 1 Biomass
- 2 Gasification

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: b.mehdi@guilan.ac.ir

تغییر پارامترهای عملکردی بر عملکرد سیستم نشان دادند که در فاکتور مصرف سوخت ۰/۷۵، بالاترین راندمان به ازای کمترین تعداد سلول بسته پیل سوختی حاصل می‌شود.

در پژوهش حاضر، عملکرد پایای سیستم یکپارچه‌ی فرآیند گازی‌سازی و پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای مدل‌سازی شده و مورد بررسی پارامتری قرار می‌گیرد. فرآیند گازی‌سازی به صورت صفربعدی و به روش تعادل ترمودینامیکی و تک‌سلول پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای به صورت یک‌بعدی شبیه‌سازی می‌شود. تأثیر مقدار هوای ورودی به راکتور گازی‌سازی و همچنین میزان رطوبت زیست‌توده‌ی ورودی بر ترکیب و ارزش حرارتی بیوگاز تولیدی در راکتور گازی‌سازی و نیز توان تولیدی و توزیع دمای ساختار جامد در پیل سوختی بررسی می‌شوند. مدل ارائه‌شده برای توده پیل سوختی اکسید جامد، مدل گسترده با خواص سیال و جمله‌های اتلاف پتانسیل متغیر با دما و شرایط عملکردی در نظر گرفته می‌شود. همچنین، از ترم‌های اجزای گازی چندجزئی و جمع دو مکانیزم نفوذ نادسن و مولکولی در شبیه‌سازی پیل سوختی استفاده می‌شود. معمولاً در یکپارچه‌سازی‌هایی از این دست از مدل‌های فشرده با خواص ثابت استفاده می‌شود.

۲- مدل‌سازی ریاضی

۲-۱- تولید زیست‌گاز

راکتور گازی‌ساز از نوع بسترتاب فروجریان است. در این نوع راکتور، زیست‌توده و عامل گازی‌ساز، هر دو در یک جهت حرکت می‌کنند و گازهای تولیدشده از منطقه بالا عبور می‌کنند که خود منجر به کاهش شدید محتویات تار نسبت به نوع فراجریان می‌شود. فرآیند گازی‌سازی، فرآیندی پیچیده متشکل از واکنش‌های شیمیایی متعددی است که به دو روش کلی ترمودینامیک تعادلی و نرخ واکنشی مدل‌سازی شده‌است. اگرچه روش مدل‌سازی به کمک نرخ واکنش‌ها اطلاعات ارزشمندی در خصوص نرخ انجام واکنش‌ها و مکانیزم آنها در اختیار می‌گذارد، ولی وابستگی این روش به تعداد زیادی از عوامل دخیل، کاربرد آن را در شبیه‌سازی سیستم‌های توان یکپارچه‌ای از این دست محدود می‌کند. در مقابل، روش تعادل ترمودینامیکی که مستقل از طراحی راکتور است، برای مطالعه پارامترهای مهم عملکردی سیستم‌های یکپارچه تولید توان و حرارت، بدون پرداختن به جزئیات گاه دست و پا گیر، مناسب‌تر خواهد بود [۱۰]. در حالت تعادل ترمودینامیکی، سیستم در پایدارترین حالت خود می‌باشد که در آن آنتروپی سیستم در بیشینه مقدار خود و یا تابع انرژی آزادگیس سیستم در کمینه مقدار خود قرار دارد. چنین شرایطی، به فرضیات مهمی نیاز خواهد داشت: راکتور به صورت صفربعدی و یا فشرده مدل می‌شود، فرآیند گازی‌سازی به اندازه کافی سریع بوده و زمان لازم برای رسیدن سیستم به حالت تعادل وجود دارد، محتویات تار گاز تولیدشده بسیار ناچیز می‌باشد و تبدیل کامل کربن در راکتور انجام می‌گیرد. در این مطالعه از میان دو روش کلی ترمودینامیک تعادلی؛ استوکیومتریکی و

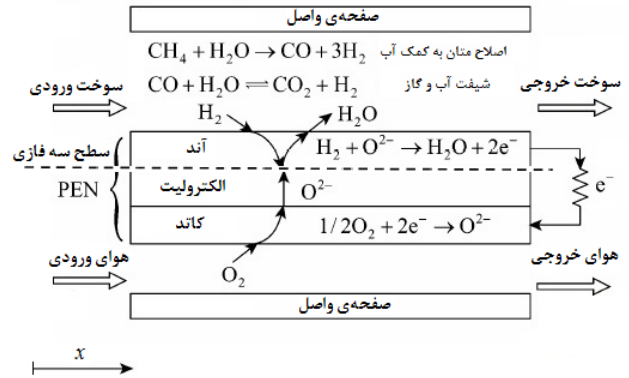


Fig. 2. Sideview of single planar solid oxide fuel cell

شکل ۲: نمای جانبی تک‌سلول پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای

شکل ۳ روند تولید توان از زیست‌توده را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

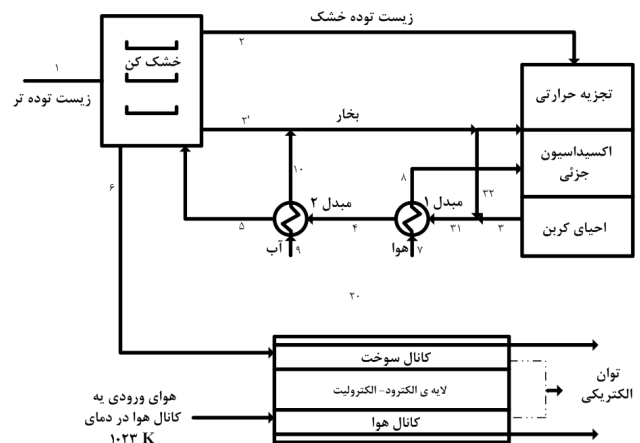


Fig. 3. Schematic of the integrated plant consist of SOFC and biomass gasification process

شکل ۳: شماتیک تبدیل زیست‌توده به توان الکتریکی در سیستم یکپارچه متشکل از فرآیند گازی‌سازی و پیل سوختی

مدل‌های مختلفی از هیبریدهای پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای و فرآیند گازی‌سازی در پژوهش‌های مراجع [۹-۲] دیده می‌شوند. مولر و رکنی [۳] عملکرد ترمودینامیکی سیستم هیبرید فرآیند گازی‌سازی و پیل سوختی اکسید جامد به انضمام چرخه‌ی میکروتوربین گاز را در سه حالت گازی‌سازی و پیل سوختی، گازی‌سازی و میکروتوربین گاز و در نهایت گازی‌سازی، پیل سوختی و میکروتوربین گاز مورد بررسی قرار دادند. ایشان نشان دادند که هیبرید گازی‌سازی و پیل سوختی دارای راندمان بالاتری نسبت به هیبرید گازی‌سازی و میکروتوربین گاز می‌باشد. کلپن و همکاران [۵] تأثیر سه نوع عامل مختلف گازی‌سازی یعنی هوا، بخار آب و ترکیب هوا و بخار آب را بر عملکرد هیبرید برون‌گرمایشی بررسی کردند. نتایج حاکی از بالاترین راندمان الکتریکی (۴۱/۸٪) و نیز پایین‌ترین راندمان مصرف سوخت (۳۹/۱٪) برای بخار آب است. ونگچاناپای و همکاران [۹] پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای و فرآیند گازی‌سازی را با هم ترکیب و با بررسی تأثیر

$$f_1 = n_1 + n_3 + n_4 - 1 = 0 \quad (5)$$

$$f_2 = 2n_2 + 4n_4 + 2n_5 - (m + 2f) = 0 \quad (6)$$

$$f_3 = 2n_1 + n_2 + n_3 + 2n_7 - (p + 2e + f) = 0 \quad (7)$$

$$f_4 = 2n_6 - (q + 2 \times 3.76 e) = 0 \quad (8)$$

دو معادله باقی‌مانده از ثوابت تعادل دو واکنش تشکیل متان^۱ و تبدیل آب-گاز^۲ (روابط (۹) و (۱۰)) نوشته می‌شوند.



ثوابت تعادل به کمک روابط (۱۱) و (۱۲) به کمک تغییر در انرژی آزاد گیبس محاسبه شده‌اند:

$$K_{MR} = \frac{n_4 \cdot n_{tot}}{(n_5)^2} = \exp\left(\frac{2g_{T,H_2}^0 - g_{T,CH_4}^0}{R_U T}\right) \quad (11)$$

$$K_{WGSR} = \frac{n_1 \cdot n_5}{n_3 \cdot n_2} = \exp\left(\frac{g_{T,CO}^0 + g_{T,H_2O}^0 - g_{T,CO_2}^0 - g_{T,H_2}^0}{R_U T}\right) \quad (12)$$

در رابطه فوق، پارامتر n_{tot} به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$n_{tot} = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 \quad (13)$$

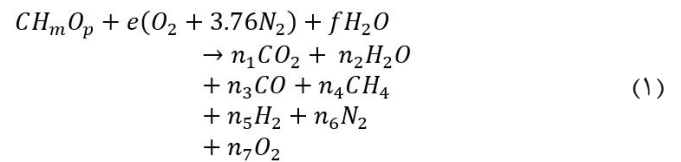
بنابراین می‌توان گفت:

$$f_5 = n_4 \cdot n_{tot} - K_{MR} \cdot (n_5)^2 = 0 \quad (14)$$

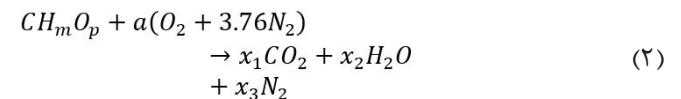
$$f_6 = n_1 \cdot n_5 - K_{WGSR} \cdot n_3 \cdot n_2 = 0 \quad (15)$$

با توجه به فرضیات ساده‌سازی که در روش ترمودینامیک تعادلی تشریح شد، نتایج حاصل از آن در شرایط مختلف با نتایج آزمایشگاهی نظیر، گاه تفاوت‌های زیادی، مخصوصاً در پیش‌بینی مقدار هیدروژن و متان نشان می‌دهد. به این منظور روش‌هایی برای اصلاح نتایج این روش ارائه شده‌است که در مطالعه حاضر از روش مرجع [۱۵] برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها استفاده می‌شود. دو ضریب برای ثوابت تعادل واکنش‌های متان و تبدیل آب-گاز بر اساس مقایسه نتایج با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده در مرجع [۱۶] انتخاب شده‌است. محاسبه ثوابت تعادل، منوط به معلوم بودن دمای راکتور گازی‌ساز می‌باشد. موازنه انرژی این راکتور، دمای نهایی واکنش را خواهد داد. مقدار n_6 با معلوم بودن فرمول تجربی زیست‌توده و مقدار هوای مورد نیاز محاسبه می‌شود. پنج مجهول باقی‌مانده، با حل همزمان پنج معادله؛ (۵)، (۶)، (۸)، (۷) و (۱۵) به روش نیوتن-رافسون حاصل خواهند شد. البته ابتدا یک دما حدس زده شده، سپس ثوابت تعادل محاسبه می‌شوند و در ادامه دمای جدید از طریق معادله انرژی محاسبه می‌شود. این روند تا همگرا شدن دما ادامه

غیراستوکیومتریک، روش اول به کار رفته‌است که در آن فقط واکنش‌هایی که با اجزای گازی قابل ملاحظه به لحاظ کمیت درگیر هستند، در نظر گرفته می‌شوند. نشان داده شده‌است که تمام اجزای زیست‌گاز تولیدشده، در فاز گازی هستند و زیست‌گاز از اجزای شیمیایی با وزن مولکولی کوچک‌تر، به خصوص؛ مونواکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، بخارآب، هیدروژن، نیتروژن و متان تشکیل می‌شود [۱۱]. واکنش کلی راکتور گازی‌ساز به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:



ضرایب e و f تعداد مول‌های هوا و بخارآب در طی فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده را نشان می‌دهند. این دو پارامتر به کمک دو متغیر نسبت هوای معادل اصلاح‌شده و نسبت هوا به بخارآب محاسبه می‌شوند. فرمول تجربی زیست‌توده‌ی مورد مطالعه که از منابع موجود برداشت شده است به صورت $CH_{1.47}O_{0.67}$ انتخاب می‌شود که مربوط به زیست‌توده از نوع براده‌های چوبی و ضایعات چوبی جنگلی است [۱۲]. در فرآیندی نظیر فرآیند گازی‌سازی که در آن اکسیدکننده، مخلوطی از هوا و بخارآب است، نسبت هوای معادل اصلاح‌شده به صورت نسبت اکسیژن استوکیومتریک به اکسیژن تأمین شده توسط هوا تعریف می‌شود [۱۳]:



$$ER_m = \frac{2a}{2e + f} \quad (3)$$

میزان رطوبت زیست‌توده‌ی ورودی نیز نقش مهمی در عملکرد سیستم ایفا کرده و با توجه به نسبت جرمی رطوبت زیست‌توده به جرم کل زیست‌توده‌ی مرطوب ورودی به راکتور به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MC = \frac{M_{H_2O} f}{M_{H_2O} f + M_{CH_m O_p N_q}} \quad (4)$$

که در آن M_{H_2O} جرم مولکولی آب و $M_{CH_m O_p N_q}$ جرم یک مول زیست‌توده‌ی خشک می‌باشند. از آنجایی که در فرآیند گازی‌سازی کمتر از ۴۰ درصد هوای استوکیومتریک به کار می‌رود، مقدار اکسیژن موجود در گازهای تولیدشده را می‌توان ناچیز در نظر گرفت [۱۴]. بنابراین می‌توان گفت $n_7=0$. با توجه به واکنش شیمیایی رابطه (۱) شش معادله برای محاسبه شش مجهول طرف دوم واکنش مورد نیاز خواهند بود. چهار معادله از شش معادله مورد نیاز از بالانس اتمی اجزای کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن، به ترتیب به صورت زیر نوشته می‌شوند:

1 Methane Reaction (MR)

2 Water-Gas Shift Reaction (WGSR)

خواهد یافت.

جدول ۲: مقدار تک سلول پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای

Table 2. The geometrical parameters of the single planar solid oxide fuel cell

مقدار	پارامتر
۵۰۰ میکرومتر	ضخامت آند
۵۰ میکرومتر	ضخامت کاتد
۲۰ میکرومتر	ضخامت الکترولیت
۵۰۰ میکرومتر	ضخامت قطعه اتصال
۴ سانتیمتر	طول سلول
۱۰ سانتیمتر	عرض سلول
۱ میلیمتر	ارتفاع سلول سوخت
۱ میلیمتر	ارتفاع کانال هوا

جدول ۳: خواص مواد سازنده سلول پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای

Table 3. Material properties of the single planar solid oxide fuel cell

مقدار	پارامتر
۰/۳	ضریب تخلخل الکترودها
۶	ضریب پیچش الکترودها
۰/۵ میکرومتر	شعاع میانگین خلل و فرج
۲ وات بر متر کلونین	ضریب رسانش ساختار PEN
۲۵ وات بر متر کلونین	ضریب رسانش قطعه اتصال
۰/۵	ضریب صدور ساختار PEN
۰/۱	ضریب صدور قطعه اتصال

در رابطه بالا پارامتر $F=96485/C.mol^{-1}$ ثابت فارادی و $R=8/3145 mol^{-1}.K^{-1}$ ثابت جهانی گاز است. در رابطه (۱۶) بیشترین ولتاژ ممکن محاسبه می‌شود. حال آنکه ولتاژ عملکردی به دلیل مقاومت‌های داخلی، همواره از مقدار بالا کمتر خواهد بود. ولتاژ خروجی پیل سوختی از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$E_{cell} = E^{REV} - (\eta_{ohm} + \eta_{act,ct} + \eta_{act,an} + \eta_{conc,ct} + \eta_{conc,an}) \quad (17)$$

که در آن پارامترهای η_{ohm} ، $\eta_{act,ct}$ ، $\eta_{act,an}$ ، $\eta_{conc,ct}$ و $\eta_{conc,an}$ به ترتیب افت‌های ولتاژ مقاومتی، فعال‌سازی و افت‌های غلظتی سمت کاتد و آند می‌باشند.

افت ولتاژ مقاومتی به دلیل مقاومت الکترودها و الکترولیت در مقابل عبور الکترون و یون به وجود می‌آید که به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\eta_{ohm} = jR_{ohm} \quad (18)$$

$$R_{ohm} = t_{an} \cdot \theta_{an} + t_{ct} \cdot \theta_{ct} + t_{elec} \cdot \theta_{elec} \quad (19)$$

مقاومت الکترودها در مقابل عبور الکترون (θ_{ct} و θ_{an}) و نیز مقاومت الکترولیت در مقابل عبور یون (θ_{elec}) طبق روابط مرجع [۱۸] می‌باشند. لازمه

۲-۲- پیل سوختی اکسید جامد

نمای پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای حمایت شده توسط آند و جریان همسو در شکل ۴ نشان داده شده‌است. این پیل از دو کانال برای عبور جریان‌های هوا و سوخت، یک ساختار الکتروکاتود-الکترولیت که خود متشکل از دو الکتروکاتود، کاتد و الکترولیت جامد می‌باشد و نیز ساختار قطعات اتصال تشکیل می‌شود. در مدل‌سازی پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای از افت فشار در راستای کانال‌های عبور جریان صرف‌نظر شده و میدان جریان در این کانال‌ها به کمک قانون بقای جرم مدل می‌شود [۱۷].

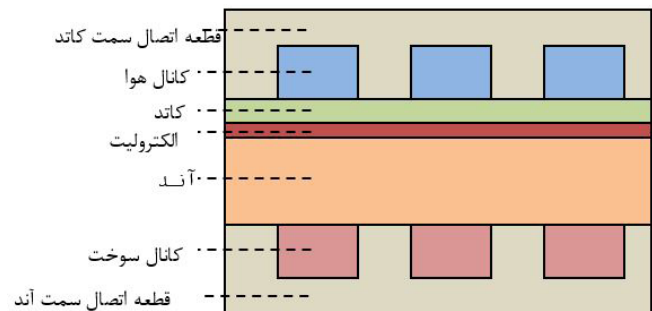


Fig. 4. Schematic view of the single planar cell

شکل ۴: شماتیک سلول پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای

هوا که شامل اکسیژن و نیتروژن است، وارد کانال هوا می‌شود و زیست‌گاز تولیدی توسط بخش بالادستی، وارد کانال سوخت خواهد شد. سه واکنش غالب، طبق جدول ۱ در مدل‌سازی این بخش به کار می‌روند. فرض بر این است که فقط هیدروژن در واکنش الکتروشیمیایی شرکت کرده و واکنش تبدیل آب-گاز همواره در حالت تعادل است.

جدول ۱: واکنش‌های غالب در پیل سوختی

Table 1. The main reactions of the fuel cell

معادله واکنش	نام واکنش
$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2$	واکنش اصلاح متان (MSRR)
$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$	واکنش تبدیل آب-گاز (WGSR)
$H_2 + (1/2)O_2 \rightleftharpoons H_2O$	واکنش الکتروشیمیایی

خواص گاز و مشخصات هندسی تک‌سلول پیل سوختی اکسید جامد شبیه‌سازی شده طبق آنچه در جدول ۲ و ۳ آمده است می‌باشد.

در پیل سوختی، ولتاژ ترمودینامیکی به کمک معادله نرنست محاسبه می‌شود. این ولتاژ که ولتاژ برگشت‌پذیر نیز نامیده می‌شود، به صورت زیر محاسبه خواهد شد [۱۷]:

$$E^{REV} = \frac{\Delta G^0}{2F} - \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2O}^{fc}}{P_{H_2}^{fc} \cdot (P_{O_2}^{ac})^{0.5}} \right] \quad (16)$$

1 Methane Steam Reforming Reaction (MSRR)

نرخ واکنش‌های تبدیل آب-گاز (r_{WGSR})، اصلاح متان (r_{MSRR}) و الکتروشیمیایی (r_{elec}) به صورت زیر می‌باشند [۱۸]:

$$\dot{r}_{WGSR} = k_{WGSR} P_{CO} \left[1 - \frac{1}{K_{eq,S}} \left(\frac{P_{CO_2} P_{H_2}}{P_{CO} P_{H_2O}} \right) \right] \quad (31)$$

$$\dot{r}_{MSRR} = k_0 P_{CH_4} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \dot{r}_{elec} = \frac{j}{2F} \quad (32)$$

با فرض انجام واکنش‌های اصلاح متان و تبدیل آب-گاز در کانال سوخت و واکنش الکتروشیمیایی در ساختار الکتروکاتود، می‌توان موازنه انرژی برای چهار بخش؛ کانال‌های سوخت و هوا، ساختار الکتروکاتود و قطعه اتصال به منظور محاسبه دمای آنها را نوشت:

$$\rho_a u_a C_{p,a} V_{ac} \frac{dT_{ac}}{dx} = h_{c,PEN-a} A_{PEN,S} (T_{PEN} - T_{ac}) + h_{c,int-a} A_{int,S} (T_{int} - T_{ac}) \quad (33)$$

$$\rho_f u_f C_{p,f} V_{fc} \frac{dT_{fc}}{dx} = h_{c,PEN-f} A_{PEN,S} (T_{PEN} - T_{fc}) + h_{c,int-f} A_{int,S} (T_{int} - T_{fc}) - A_{re} (\dot{r}_{MSRR} \Delta H_{MSRR} + \dot{r}_{WGSR} \Delta H_{WGSR}) \quad (34)$$

$$0 = V_{PEN} K_{PEN} \frac{d^2 T_{PEN}}{dx^2} - h_{c,PEN-f} A_{PEN,S} (T_{PEN} - T_{fc}) - h_{c,PEN-a} A_{PEN,S} (T_{PEN} - T_{ac}) - A_{re} \dot{r}_{elec,H_2} \Delta H_{elec,H_2} - j_{cell} E_{cell} A_{re} - E_{rad}'' A_{re} \quad (35)$$

$$0 = V_{int} K_{int} \frac{d^2 T_{int}}{dx^2} - h_{c,int-f} A_{int,S} (T_{int} - T_{fc}) - h_{c,int-a} A_{int,S} (T_{int} - T_{ac}) - E_{rad}'' A_{re} \quad (36)$$

در روابط بالا، انتقال حرارت‌های جابجایی بین جریان سوخت و دیواره الکتروکاتود و قطعه اتصال، جریان هوا و دیواره الکتروکاتود و قطعه اتصال و نیز انتقال حرارت تابشی بین دو ساختار جامد الکتروکاتود-الکترولیت و قطعه اتصال در نظر گرفته شده‌اند.

شرایط مرزی برای حل معادله‌ی انرژی، برای سه لایه‌ی مختلف پیل سوختی متفاوت می‌باشد. در ورودی کانال‌های سوخت و هوا، شرط مرزی دما ثابت و در ورودی لایه‌ی الکتروکاتود/الکترولیت شرط مرزی آدیاباتیک در نظر گرفته می‌شود. دمای هوای ورودی به کانال هوا ۱۰۲۳ K بوده و دمای سوخت ورودی به کانال سوخت تابع شرایط خروجی راکتور گازی‌ساز می‌باشد. همچنین برای حل معادلات بقای جرم اجزاء، ترکیب جریان‌های ورودی کانال‌های سوخت و هوا با توجه به ترکیب بیوگاز حاصل از گازی‌سازی دارای مقادیر مشخص می‌باشند. دمای سوخت و هوا و ترکیب گاز خروجی پیل سوختی در خروجی کانال‌ها و لایه‌ی الکتروکاتود/الکترولیت از طریق حل معادلات حاکم مشخص می‌شوند.

انجام واکنش الکتروشیمیایی، عبور اجزای واکنش‌دهنده (اکسیژن و هیدروژن) از محیط متخلخل الکتروکاتودها و رسیدن آنها به سطح تماس مشترک الکتروکاتودها و الکترولیت در دو سوی الکترولیت و نیز عبور محصول واکنش (آب) از این سطح مشترک به کانال جریان سوخت است. این جریان‌ها تحت تأثیر مقاومت الکتروکاتودهای متخلخل در مقابل جریان اجزای گازی قرار گرفته و افت نفوذ و غلظت در پتانسیل برگشت‌پذیر را موجب خواهند شد که با استفاده از روابط (۲۰) و (۲۱) محاسبه می‌شوند [۱۷].

$$\eta_{conc,an} = -\frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{X_{H_2}^{TPB} \cdot X_{H_2O}^{fc}}{X_{H_2}^{fc} \cdot X_{H_2O}^{TPB}} \right] \quad (20)$$

$$\eta_{conc,ct} = -\frac{RT}{4F} \ln \left[\frac{X_{O_2}^{TPB}}{X_{O_2}^{ac}} \right] \quad (21)$$

مقاومت فعال‌سازی در رابطه (۱۷) ریشه در انرژی فعال‌سازی برای انجام هر واکنش شیمیایی دارد. این دسته از تلفات به کمک رابطه باتلر-والمر محاسبه می‌شوند [۱۲].

$$j = j_{0,ct} \cdot \left[\exp\left(\frac{F\eta_{act,ct}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{F\eta_{act,ct}}{RT}\right) \right] \quad (22)$$

$$j = j_{0,an} \cdot \left[\exp\left(\frac{2F\eta_{act,an}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{F\eta_{act,an}}{RT}\right) \right] \quad (23)$$

معادله بقای جرم اجزای گازی در کانال‌های جریان سوخت و هوا با فرض جریان پلاگ، تغییرات غلظت این اجزاء را به صورت زیر نتیجه می‌دهد:

$$\frac{d\rho_{N_2}}{dx} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{d\rho_{O_2}}{dx} = -\frac{1}{2u_a} \cdot \frac{A_{re} \cdot M_{O_2} \cdot \dot{r}_{elec}}{V_{ac}} \quad (25)$$

$$\frac{d\rho_{CH_4}}{dx} = -\frac{1}{u_f} \cdot \frac{A_{re} \cdot M_{CH_4} \cdot \dot{r}_{MSRR}}{V_{fc}} \quad (26)$$

$$\frac{d\rho_{H_2}}{dx} = \frac{1}{u_f} \cdot \frac{A_{re} \cdot M_{H_2} \cdot (3\dot{r}_{MSRR} + \dot{r}_{WGSR} - \dot{r}_{elec})}{V_{fc}} \quad (27)$$

$$\frac{d\rho_{CO}}{dx} = \frac{1}{u_f} \cdot \frac{A_{re} \cdot M_{CO} \cdot (\dot{r}_{MSRR} - \dot{r}_{WGSR})}{V_{fc}} \quad (28)$$

$$\frac{d\rho_{CO_2}}{dx} = \frac{1}{u_f} \cdot \frac{A_{re} \cdot M_{CO_2} \cdot (\dot{r}_{WGSR})}{V_{fc}} \quad (29)$$

$$\frac{d\rho_{H_2O}}{dx} = \frac{1}{u_f} \cdot \frac{A_{re} \cdot M_{H_2O} \cdot (-\dot{r}_{MSRR} - \dot{r}_{WGSR} + \dot{r}_{elec})}{V_{fc}} \quad (30)$$

جریان الکتریکی میانگین نشان می‌دهد. بیشترین خطا در نمودار شکل ۵ کمتر از ۱۰٪ بوده و گویای این واقعیت است که الگوریتم حل معادلات الکتروشیمیایی پیل قادر به پیش‌بینی صحیح عملکرد الکتروشیمیایی آن می‌باشد.

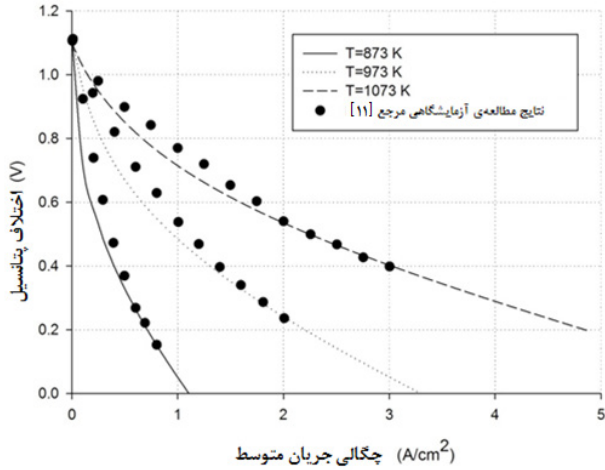


Fig. 5. Comparison between current simulation and experimental results of Zhao et al. [20]

شکل ۵: مقایسه‌ی نتایج مدل الکتروشیمیایی پیل با داده‌های بررسی تجربی مرجع [۲۰]

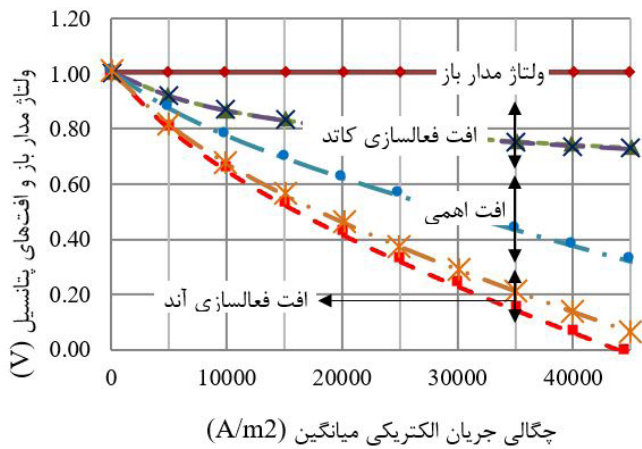


Fig. 6. Effect of the average current density on the different voltage losses

شکل ۶: اثر چگالی جریان میانگین الکتریکی بر بخش‌های مختلف اتلاف پتانسیل الکتریکی

همچنین درستی الگوریتم حل همزمان معادلات بقای حاکم بر پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای (بقای غلظت اجزا و انرژی)، از طریق مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی پژوهش حاضر با نتایج مرجع [۱۷] بررسی می‌شود. پروفیل غلظت هر یک از اجزای گازی کانال سوخت در راستای جریان در نمودار شکل ۷ و تغییرات دمای محوری کانال سوخت و ساختار الکتروود-الکتروپیل در راستای جریان در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

۳-۲ پارامترهای عملکردی مدل

دو پارامتر مهم و کلیدی پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای توان و راندمان الکتریکی آن و نیز پارامتر مهم لایه مولد گاز راندمان تولید گاز است که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$P_{SOFC} = j_{avg} E_{cell} \quad (37)$$

$$\eta_{SOFC} = \frac{j_{avg} E_{cell} L W}{(X_{CH_4}^0 LHV_{CH_4}^0 + X_{H_2}^0 LHV_{H_2}^0 + X_{CO}^0 LHV_{CO}^0) \dot{N}_f^0} \quad (38)$$

$$\eta_{CG} = \frac{LHV_{gas}}{LHV_{Biomass}} \quad (39)$$

۳-۳ اعتبارسنجی

معادلات حاکم بر فرآیند گازی‌سازی به روش کدنویسی در محیط برنامه‌نویسی فرترن ۹۰ و با استفاده از الگوریتم حل نیوتون-رافسون حل شده‌اند. جدول ۴ نتایج حاصل از الگوریتم حل این معادلات را با داده‌های تجربی پژوهش مرجع [۱۹] در شرایط عملکردی یکسان مقایسه می‌کند. طبق جدول ۴، تطبیق خوبی بین کسرهای مولی تحلیل خشک حاصل از مدل‌سازی و نتایج مربوط به راکتور گازی‌سازی مرجع [۱۹] وجود دارد. درصدهای مولی نیتروژن و مونوکسیدکربن به ترتیب با ۹۰٪ و ۸۱٪- خطا دارای بیشترین انحراف از داده‌های آزمایشگاهی بوده و با توجه به تخمین مونوکسیدکربن کمتر، ارزش حرارتی کمتر از داده‌های آزمایشگاهی بوسیله‌ی الگوریتم حل منطقی می‌باشد.

جدول ۴: مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی راکتور گازی‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۱۹]

Table 4. Comparison between results of the current gasification reactor model with experimental results of [19]

خطای نسبی (%)	نتایج پژوهش حاضر	داده‌های آزمایشگاهی	
-۲/۵۹	۱/۱۳	۱/۱۶	درصد مولی متان
-۳/۸۷	۲۹/۳۲	۳۰/۵	درصد مولی هیدروژن
-۸/۹۸	۱۷/۸۴	۱۹/۶	درصد مولی مونوکسید کربن
+۰/۰۶	۱۵/۴۱	۱۵/۴	درصد مولی دی‌اکسید کربن
+۹/۰۴	۳۶/۳۱	۳۳/۳	درصد مولی نیتروژن
-۸/۸۷	۵/۶۵	۶/۲	ارزش حرارتی پایین (MJ/kg)
-۴/۲۴	۸۹/۰۶	۹۳	راندمان تولید گاز

معادلات حاکم بر پیل سوختی با استفاده از روش تفاضل محدود و در محیط فرترن ۹۰ حل شده‌اند. پاسخ مدل الکتروشیمیایی در سه دمای عملکردی با نتایج بررسی تجربی ژائو و ویرکار [۲۰] مقایسه و در نمودار ولتاژ-چگالی جریان شکل ۵ به تصویر کشیده شده‌است. همچنین شکل ۶ نمودار ولتاژ مدار باز تولیدی و افت‌های پتانسیل را در مقادیر مختلف چگالی

وابسته به دما بر ترکیب مخلوط گازی دارد. همچنین، عملکرد الکتریکی پیل سوختی، یعنی شدت جریان و پتانسیل الکتریکی آن، به طریقی مشابه بر ترکیب سوخت موثر هستند. لذا ترکیب مخلوط گازی نیز بر عملکرد الکتریکی پیل سوختی موثر خواهد بود. به محض ورود مخلوط گازی به کانال جریان سوخت، واکنش به شدت گرماگیر اصلاح متان به کمک بخار آب شروع می‌شود. نرخ این واکنش در ورودی کانال سوخت به دلیل غلظت بالای متان در این محل، بسیار سریع بوده و در نتیجه اثر خنک‌کاری این واکنش در این بخش از پیل سوختی غالب خواهد بود. از سوی دیگر، غلظت پایین هیدروژن در بخش آغازین پیل سوختی، مسؤول پایین بودن شدت جریان الکتریکی پیل سوختی و در نتیجه آن، نرخ پایین تولید حرارت به واسطه واکنش‌های الکتروشیمیایی در این بخش می‌باشد. با مصرف متان، هیدروژن و مونو اکسید کربن تولید شده و در نتیجه آب مصرف می‌شود (واکنش اصلاح متان). تقریباً، متان تا $(x/L_c)=0.7$ به صورت کامل مصرف شده و هیدروژن در $(x/L_c)=0.31$ به بیشترین مقدار خود نزدیک می‌شود. در این نقطه نرخ واکنش الکتروشیمیایی بیشینه شده و در نتیجه نرخ مصرف هیدروژن و به دنبال آن نرخ تولید آب شدت می‌گیرد. بعد از این نقطه، کسرهای مولی هیدروژن و آب به ترتیب روندهای نزولی و صعودی نشان می‌دهند. از طرف دیگر، هر گونه افزایش در نرخ واکنش الکتروشیمیایی، همراه با تولید بیشتر حرارت در پیل سوختی بوده و در نتیجه درجه حرارت لایه‌های چهارگانه در پیل سوختی روندی افزایشی خواهند داشت. ناگفته نماند که کاهش شدت جریان الکتریکی محلی در انتهای پیل سوختی ریشه در کاهش غلظت واکنش‌گرها دارد. از بحثی که گذشت، می‌توان چنین نتیجه گرفت که تولید غیر یکنواخت حرارت در راستای محوری پیل سوختی، دلیل اصلی تغییرات دما در این راستا می‌باشد. کاهش ملایم دما در هر چهار لایه، از جمله دمای کانال سوخت و ساختار الکتروود-الکترولیت، در بخش نزدیک به ورودی پیل سوختی (شکل ۸)، بیش از هر چیز به نرخ بالای واکنش اصلاح متان در این محل مربوط می‌شود.

اما رفته‌رفته و با کاهش نرخ این واکنش از یک سو و افزایش نرخ واکنش الکتروشیمیایی از سوی دیگر، توزیع دمای محوری در هر چهار لایه، رو به افزایش می‌گذارد. بیشترین انحراف در نتایج دمای پیش‌بینی شده دو مدل برای کانال‌های عبور هوا، سوخت، لایه الکتروود-الکترولیت و قطعه اتصال به ترتیب برابر 0.189 ، 0.15 ، 0.181 و 0.12 درصد می‌باشد. همچنین بیشترین افزایش دما مربوط به ساختار الکتروود-الکترولیت از 981.72 تا 1128.70 کلوین معادل 146.98 کلوین می‌باشد. پروفیل دمای کانال هوا نیز تحت تأثیر مکانیزم انتقال حرارت جابجایی با لایه‌ی الکتروود-الکترولیت، ابتدا از مقدار 1023 K در ورودی به 984 K نزول کرده و سپس تا 1107 K افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از حل معادله‌ی انرژی برای کانال هوا نیز تطبیق خوبی با نتایج بارمن و همکاران [۱۶] دارند.

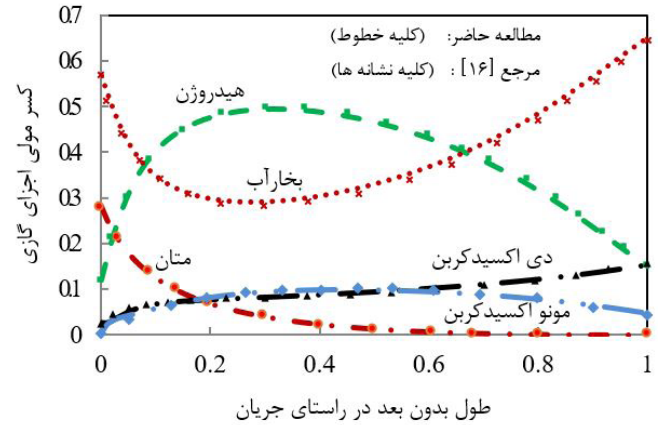


Fig. 7. Concentration of the gaseous species in the fuel channel

شکل ۷: پروفیل غلظت اجزای گازی در کانال سوخت

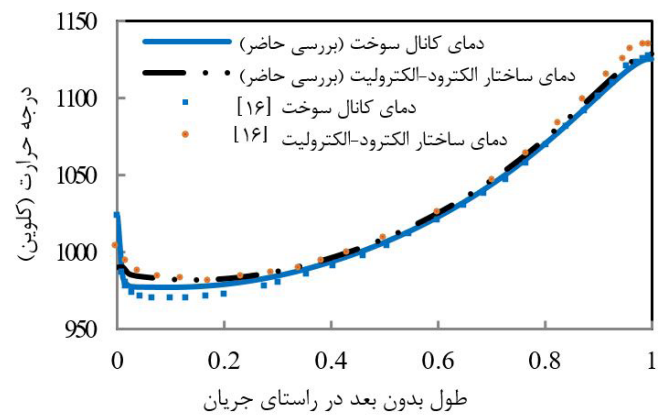


Fig. 8. PEN structure and fuel channel temperature profiles along the cell length

شکل ۸: توزیع محوری دمای ساختار جامد الکتروود-الکترولیت و جریان سوخت

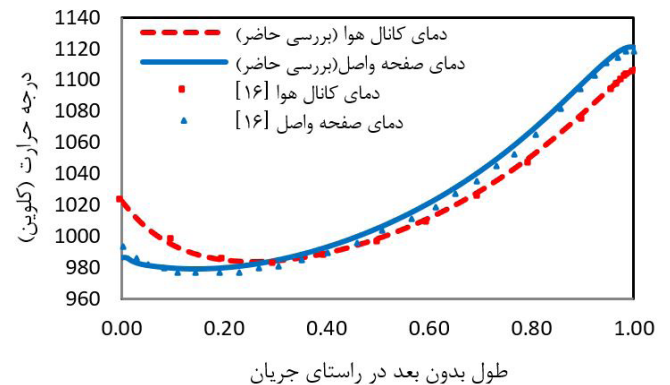


Fig. 9. Interconnect and air channel temperature profiles along the cell length

شکل ۹: توزیع محوری دمای ساختار جامد صفحات واصل و جریان هوا

حضور همزمان سه واکنش؛ اصلاح متان به کمک بخار آب، تبدیل آب-گاز و واکنش الکتروشیمیایی معرف تولید و یا مصرف هر جزء گازی است. از طرفی، درجه حرارت موضعی اثری غیرمستقیم از طریق نرخ‌های واکنش

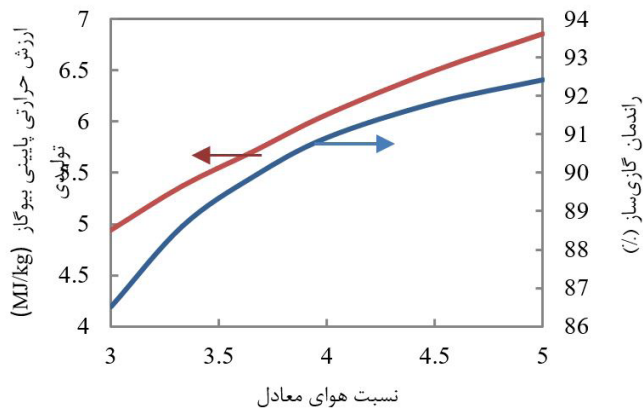


Fig. 11. Low heating value of producer gas and cooled gas efficiency of gasification process for different equivalence ratio

شکل ۱۱: ارزش حرارتی پایینی بیوگاز تولیدی و راندمان گازی‌سازی برای مقادیر مختلف نسبت هوای معادل

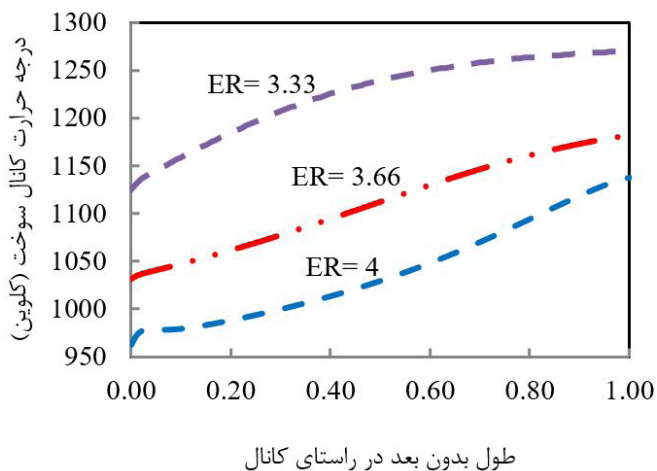


Fig. 12. Fuel channel temperature for different equivalence ratio

شکل ۱۲: دمای جریان سوخت در کانال سوخت پیل سوختی برای مقادیر مختلف نسبت هوای معادل

کاهش نسبت هوای معادل، علاوه بر تغییر ترکیب بیوگاز تولیدی، دمای بیوگاز ورودی به پیل را نیز افزایش داده و منجر به بالا رفتن پروفیل دمای کانال سوخت می‌شود. همین مسئله باعث شده است که این افت انرژی در پروفیل دمای سوخت مربوط به نسبت‌های هوای معادل کمتر مشاهده نشود. بر همین اساس توزیع دمای لایه‌ی الکتروود-الکترولیت در نتیجه انتقال حرارت جابجایی با جریان سوخت مطابق شکل ۱۳ محاسبه می‌شود. بیشترین اختلاف دما در این لایه با ۱۷۳ K مربوط به نسبت هوای معادل ۴ بوده و کمترین اختلاف دما با ۱۲۸ K، به نسبت هوای معادل ۳/۳۳ اختصاص دارد.

در شکل ۱۴، توان و راندمان مصرف سوخت تک‌سلول پیل سوختی اکسید جامد در نسبت‌های هوای معادل مختلف ترسیم شده‌اند. با توجه به این نمودار، توان تولیدی با کاهش نسبت هوای معادل از ۴ به ۳/۶۶ افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته و مقدار آن از ۱۳۱۲ kW به ۱۴۹۱ kW می‌رسد.

۴- بررسی پارامتریک

۴-۱- تأثیر مقدار هوای ورودی به راکتور گازی‌ساز

تأثیر میزان هوای ورودی به راکتور گازی‌ساز (به عنوان عامل گازی‌سازی) بر ترکیب بیوگاز تولیدی و نیز عملکرد پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۰ ترکیب حاصل از آنالیز خشک بیوگاز تولیدی از هر کیلومول چوب با میزان رطوبت ۳۰٪ را در نسبت‌های هوای معادل مختلف نشان می‌دهد. دیده می‌شود، کاهش نسبت هوای معادل از ۵ به ۳، کاهش درصد مولی مبنای خشک متان از ۳۱/۳۶٪ تا ۲۳/۲۹٪ و افزایش درصد مولی مونوکسیدکربن از ۱۸٪ تا ۲۲/۵۴٪ را به دنبال دارد.

همانگونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است، با کاهش نسبت هوای معادل از ۵ به ۳، ارزش حرارتی پایین بیوگاز تولیدی از ۶/۸۶ MJ/kg به ۵/۳۷ MJ/kg کاهش می‌یابد. کاهش ارزش حرارتی بیوگاز تولیدی نتیجه‌ی کاهش شدید غلظت متان و هیدروژن در اثر کاهش نسبت هوای معادل است. با توجه به کاهش ارزش حرارتی بیوگاز تولیدی، کاهش راندمان گازی‌سازی از ۹۲/۴۱٪ در نسبت هوای معادل ۵ به ۸۸/۶۱٪ در نسبت هوای معادل ۳ دیده می‌شود. همچنین دمای بیوگاز تولیدی، با کاهش نسبت هوای معادل از ۵ به ۳، از ۸۷۷ K به ۱۱۲۵ K رسیده و به میزان ۲۴۸ کلوین افزایش می‌یابد. پروفیل دمای کانال سوخت در پیل سوختی برای مقادیر مختلف نسبت هوای معادل در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است. در نسبت هوای معادل ۴ افتی در پروفیل دمای کانال سوخت دیده می‌شود. این افت به دلیل مصرف انرژی واکنش گرم‌گیر اصلاح سوخت به وجود می‌آید. از آنجایی که با کاهش نسبت هوای معادل، میزان متان موجود در بیوگاز کاهش می‌یابد، در نسبت‌های هوای معادل پایین‌تر، متان کمتری وارد کانال سوخت شده و نرخ واکنش اصلاح متان کاهش می‌یابد.

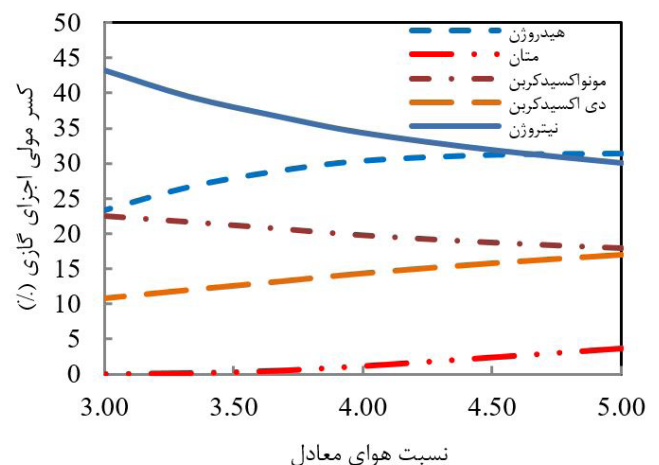


Fig. 10. Composition of the producer gas for different equivalence ratio

شکل ۱۰: ترکیب بیوگاز تولیدی از چوب در مقادیر مختلف نسبت هوای معادل

با افزایش میزان رطوبت درصد مولی متان و هیدروژن افزایش یافته‌اند، اما در فاصله‌ی مقادیر ۰/۴ تا ۰/۵ برای میزان رطوبت، درصد مولی آنها دچار کاهش شده است.

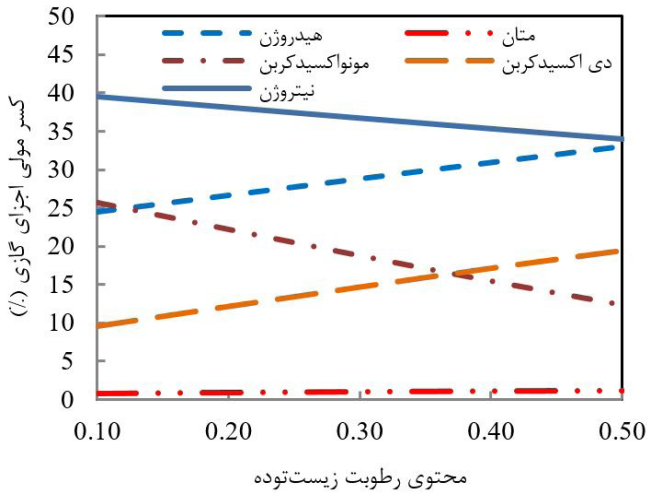


Fig. 15. Composition of the producer gas for different moisture content of the biomass

شکل ۱۵: ترکیب بیوگاز تولیدی از چوب برای مقادیر مختلف میزان رطوبت زیست توده

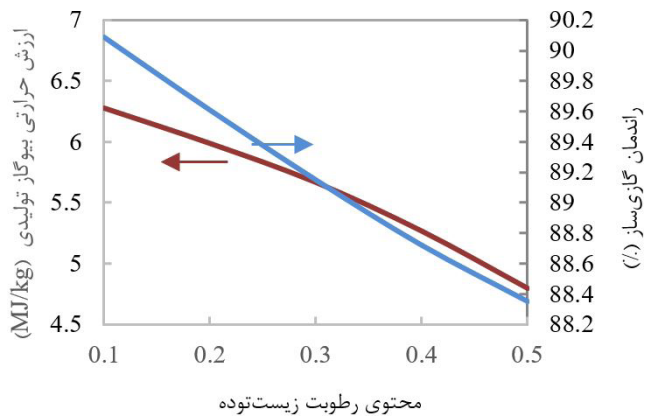


Fig. 16. Low heating value of producer gas and cooled gas efficiency of gasification process for different moisture content of the biomass

شکل ۱۶: ارزش حرارتی پایینی بیوگاز تولیدی و راندمان گازی سازی برای مقادیر مختلف میزان رطوبت زیست توده

دلیل این امر، نه کاهش کیلومول متان و هیدروژن تولیدشده بلکه افزایش کیلومول بخار آب در بیوگاز تولیدی است که از بالا رفتن میزان رطوبت زیست توده‌ی ورودی در مقادیر ۰/۴ تا ۰/۵ نشأت گرفته است. شکل ۱۶ ارزش حرارتی بیوگاز تولیدی و راندمان گازی سازی در مقادیر مختلف میزان رطوبت زیست توده‌ی ورودی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل با افزایش میزان رطوبت از ۰/۱ تا ۰/۵، ارزش حرارتی بیوگاز تولیدی از ۶/۲۸ تا ۴/۸۰ MJ/kg کاهش می‌یابد. در واقع، منشأ این کاهش ارزش حرارتی پایین بیوگاز تولیدی را می‌توان همان کاهش شدید کیلومول مونوکسیدکربن

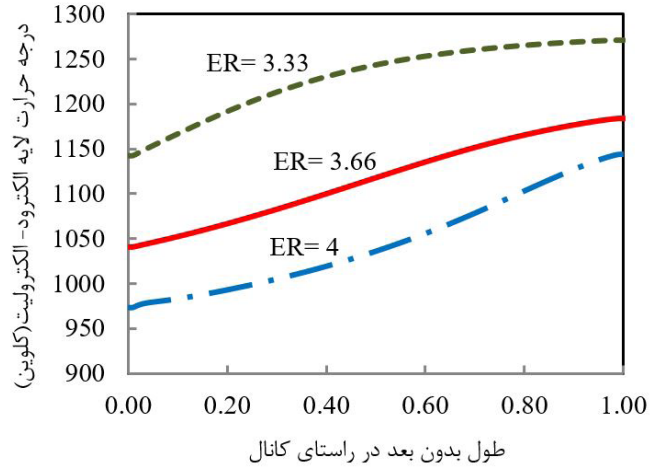


Fig. 13. PEN structure temperature for different equivalence ratio
شکل ۱۳: دمای ساختار الکتروود- الکترولیت پیل سوختی برای مقادیر مختلف نسبت هوای معادل

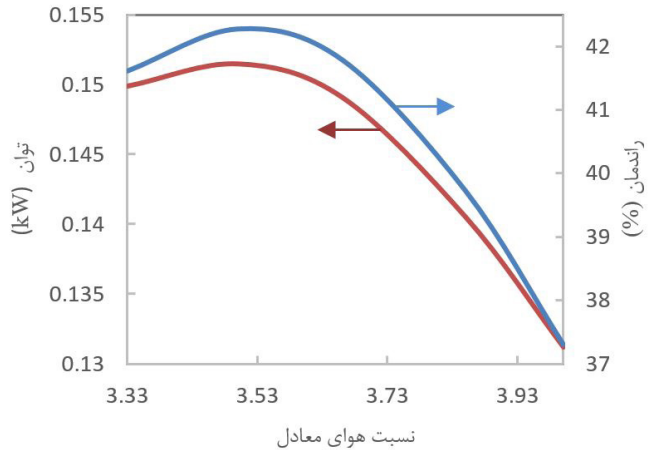


Fig. 14. Electric power and efficiency of the single cell for different equivalence ratio

شکل ۱۴: توان و راندمان مصرف سوخت تک سلول پیل سوختی اکسید جامد در مقادیر مختلف نسبت هوای معادل

با کاهش بیشتر نسبت هوای معادل تا ۳/۳۳، توان تولیدی ابتدا افزایش اندکی دارد، به نحوی که در حوالی نسبت هوای معادل ۳/۵ به بیشترین مقدار رسیده و سپس کاهش می‌یابد. در این نمودار همچنین راندمان مصرف سوخت تک سلول پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای نیز نشان داده شده است. بر این اساس، بیشترین راندمان مصرف سوخت مربوط به نسبت هوای معادل ۳/۵ و کمترین مقدار آن مربوط به نسبت هوای معادل ۴ است.

۴-۲- تأثیر رطوبت زیست توده‌ی ورودی بر عملکرد سیستم یکپارچه

تأثیر میزان هوای ورودی به راکتور گازی ساز (به عنوان عامل گازی سازی) بر ترکیب بیوگاز تولیدی و نیز عملکرد پیل مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۵ ترکیب آنالیز خشک بیوگاز تولیدی از هر کیلومول چوب، در دمای ۱۰۷۳ K را در مقادیر مختلف میزان رطوبت نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، اگرچه

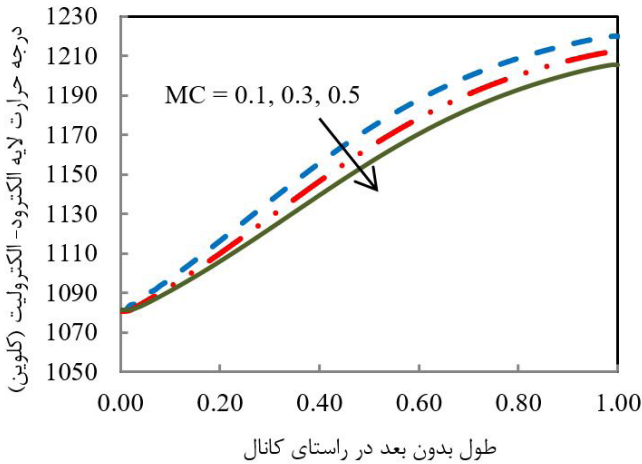


Fig. 18. PEN structure temperature for different moisture content of the biomass

شکل ۱۸: دمای ساختار الکتروتود-الکترولیت پیل سوختی برای مقادیر مختلف میزان رطوبت زیست توده

در شکل ۱۹، توان تولیدی و راندمان مصرف سوخت تک سلول پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای، در مقادیر مختلف میزان رطوبت زیست توده‌ی ورودی، به تصویر کشیده شده‌اند. با توجه به این شکل، توان تولیدی تک سلول با افزایش میزان رطوبت کاهش یافته و از 0.1537 kW در میزان رطوبت 0.1 ، به میزان 0.1484 kW در میزان رطوبت 0.5 می‌رسد. کاهش توان تولیدی ناشی از افت پروفیل دمای تک سلول و در نتیجه افزایش افت‌های پتانسیل است. با توجه به کاهش توان (نامطلوب) و نیز کاهش حداکثر اختلاف دمای پیل (مطلوب) با افزایش میزان رطوبت زیست توده‌ی ورودی، مقدار بهینه‌ی میزان رطوبت، به منظور عملکرد بهینه‌ی پیل می‌تواند به عنوان مسئله‌ی طراحی هیبرید مورد بررسی قرار داده شود.

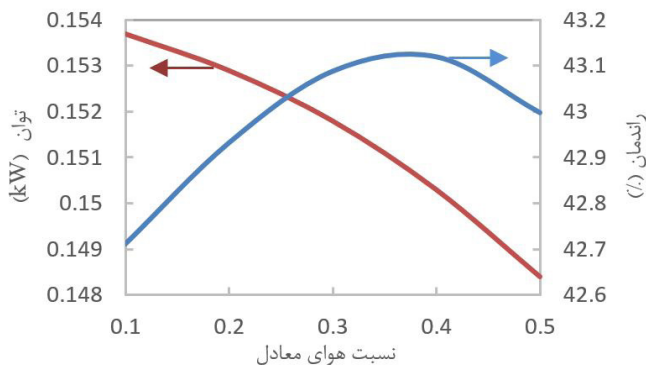


Fig. 19. Electric power and efficiency of the single cell for different moisture content of the biomass

شکل ۱۹: توان و راندمان مصرف سوخت تک سلول پیل سوختی اکسید جامد برای مقادیر مختلف میزان رطوبت زیست توده

همچنین در شکل ۱۹، مشاهده می‌شود که اگرچه راندمان مصرف سوخت تک سلول پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای مدنظر، با افزایش میزان رطوبت تا مقدار 0.4 افزایش می‌یابد، اما با افزایش میزان رطوبت از 0.4 تا

تولید شده در اثر افزایش میزان رطوبت از 0.1 تا 0.5 دانست؛ مسئله‌ای که با توجه به تقریباً ثابت ماندن کیلومول متان تولیدی و نیز بیشتر بودن ارزش حرارتی هر کیلومول مونوکسید کربن نسبت به هر کیلومول هیدروژن منجر به کاهش ارزش حرارتی پایینی بیوگاز تولیدی شده است. با توجه به اینکه بخشی از حرارت تولیدی، صرف تبخیر آب می‌شود، می‌توان بدین صورت تعبیر کرد که هرچه میزان رطوبت زیست توده‌ی ورودی بالاتر باشد، ارزش حرارتی بیوگاز تولیدی کمتر می‌شود.

راندمان گازی سازی نیز با توجه به کاهش ارزش حرارتی بیوگاز تولید شده با افزایش میزان رطوبت از 0.1 تا 0.5 ، از 90.09% تا 88.35% کاهش می‌یابد. شکل ۱۷، پروفیل دمای کانال سوخت را در میزان رطوبت‌های مختلف زیست توده‌ی ورودی نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، افزایش میزان رطوبت زیست توده‌ی ورودی منجر به پایین آمدن پروفیل دمای کانال شده و دمای سوخت را کاهش می‌دهد. این مسئله ناشی از افزایش متان ورودی و در نتیجه بیشتر انجام شدن واکنش گرماگیر اصلاح می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که سوخت در میزان رطوبت 0.1 ، با دمای 1219 K و در میزان رطوبت 0.5 ، با دمای 1204 K از کانال خارج می‌شود. پایین آمدن پروفیل دما نتیجه‌ایست که با افزایش میزان رطوبت، برای ساختار جامد الکتروتود-الکترولیت نیز حاصل می‌شود. شکل ۱۸، به وضوح این مسئله را به تصویر می‌کشد. پروفیل دمای لایه‌ی پن متأثر از پروفیل دمای کانال سوخت، از طریق مکانیزم انتقال حرارت جابجایی، پایین می‌آید. در این نمودار دیده می‌شود که با افزایش میزان رطوبت از 0.1 تا 0.5 ، حداکثر اختلاف دمای لایه‌ی الکتروتود-الکترولیت از 138 K به 123 K کاهش می‌یابد. از آنجا که با افزایش میزان رطوبت، حداکثر اختلاف دمای لایه‌ی الکتروتود-الکترولیت کاهش می‌یابد، از شدت تنش‌های حرارتی ایجاد شده کاسته می‌شود. نکته‌ای که با توجه به بحث مربوط به شکست احتمالی ساختار جامد الکتروتود-الکترولیت، می‌تواند در بهبود شرایط کارکردی پیل و افزایش عمر آن مؤثر باشد.

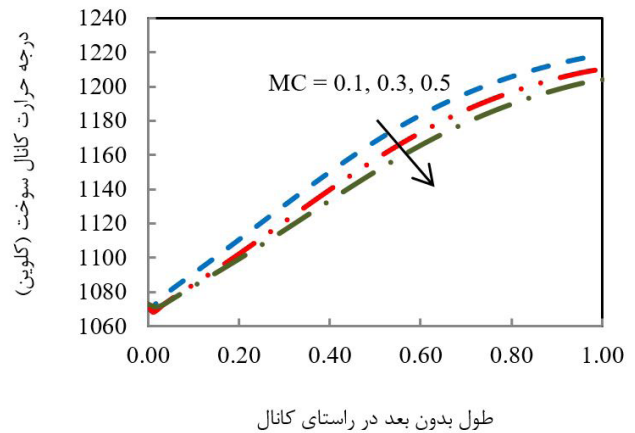


Fig. 17. Fuel channel temperature for different moisture content of the biomass

شکل ۱۷: دمای جریان سوخت در کانال سوخت پیل سوختی برای مقادیر مختلف میزان رطوبت زیست توده

6809-25.

- [3] Bang-Møller, C. and M. Rokni, "Thermodynamic performance study of biomass gasification, solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid systems". *Energy Conversion and Management*, 51 (2010): 2330-9.
- [4] Toonssen, R., S. Sollai, P. V. Aravind, N. Woudstra and A. H. M. Verkooijen, "Alternative system designs of biomass gasification SOFC/GT hybrid systems". *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (2011): 10414-25.
- [5] Colpan, C. O., F. Hamdullahpur, I. Dincer and Y. Yoo, "Effect of gasification agent on the performance of solid oxide fuel cell and biomass gasification systems". *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (2010): 5001-9.
- [6] Colpan, C. O., A. S. Fung and F. Hamdullahpur, "Modeling of an integrated two-stage biomass gasifier and solid oxide fuel cell system". *Biomass and Bioenergy*, 42 (2012): 132-42.
- [7] Bang-Møller, C., M. Rokni, B. Elmegaard, J. Ahrenfeldt and U. B. Henriksen, "Decentralized combined heat and power production by two-stage biomass gasification and solid oxide fuel cells". *Energy*, 58 (2013): 527-37.
- [8] Campitelli, G., S. Cordiner, M. Gautam, A. Mariani and V. Mulone, "Biomass fueling of a SOFC by integrated gasifier: Study of the effect of operating conditions on system performance". *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (2013): 320-7.
- [9] Wongchanapai, S., H. Iwai, M. Saito and H. Yoshida, "Performance evaluation of an integrated small-scale SOFC-biomass gasification power generation system". *Journal of Power Sources*, 216 (2012): 314-22.
- [10] Puig-Arnavat, M., J. C. Bruno and A. Coronas, "Review and analysis of biomass gasification models". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 14 (2010): 2841-51.
- [11] Silva, V. B. and A. Rouboa, "Using a two-stage equilibrium model to simulate oxygen air enriched gasification of pine biomass residues". *Fuel Processing Technology*, 109 (2013): 111-7.
- [12] Zainal, Z. A., R. Ali, C. H. Lean, K. N. Seetharamu, "Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials". *Energy Conversion and Management*, 42 (2001): 1499-515.
- [13] Gordillo, G., K. Annamalai and N. Carlin, "Adiabatic fixed-bed gasification of coal, dairy biomass, and feedlot biomass using an air-steam mixture as an oxidizing

از مقدار آن کاسته می‌شود. راندمان مصرف سوخت در میزان رطوبت ۰/۵ برابر ۴۲/۷۱٪، در میزان رطوبت ۰/۵ معادل ۴۲/۹۹٪ و در بیشترین مقدار در میزان رطوبت ۰/۴ برابر ۴۳/۱۲٪ می‌باشد. با افزایش میزان رطوبت از ۰/۱ تا ۰/۴، برخلاف کاهش توان تولیدی، راندمان مصرف سوخت بر اثر کاهش ارزش حرارتی سوخت ورودی با شیب بسیار کمی افزایش می‌یابد. با افزایش میزان رطوبت از ۰/۴ تا ۰/۵ آنطور که از روند کاهشی منحنی توان تولیدی برمی‌آید، کاهش توان تولیدی به قدری است که برخلاف کاهش ارزش حرارتی سوخت ورودی به پیل، راندمان مصرف سوخت را کاهش می‌دهد؛ هرچند مطابق شکل ۱۹ این کاهش بسیار اندک است.

۵- نتیجه‌گیری

سیکل یکپارچه‌ی تولید گاز از زیست‌توده، در کنار پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای به روش عددی مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر نسبت هوای معادل و رطوبت زیست‌توده بر مهم‌ترین پارامترهای عملکردی راکتور گازی‌سازی و نیز تک سلول پیل سوختی از جمله ترکیب و ارزش حرارتی بیوگاز تولیدی، توان تولیدی، راندمان مصرف سوخت و پروفیل دمای ساختار جامد الکتروود-الکتروولیت بررسی شد.

بر اساس نتایج بررسی پارامتری، ارزش حرارتی پایینی بیوگاز تولیدی از هر کیلومول چوب با میزان رطوبت ۰/۳، با کاهش نسبت هوای معادل از ۵ به ۳ دچار کاهش شده و از ۶/۸۶ به ۵/۳۷ MJ/kg می‌رسد. راندمان گازی‌سازی از ۹۲/۴۱٪ در نسبت هوای معادل ۵ به ۸۸/۶۱٪ در نسبت هوای معادل ۳ کاهش می‌یابد. بیشترین اختلاف دما در ساختار جامد الکتروود-الکتروولیت با ۱۷۳ K مربوط به نسبت هوای معادل ۴ بوده و کمترین اختلاف دما با ۱۲۸ K، به نسبت هوای معادل ۳/۳۳ اختصاص دارد. با کاهش نسبت هوای معادل از ۴ به ۳/۳۳، توان تولیدی پیل در نسبت هوای معادل ۳/۵ به بیشترین مقدار می‌رسد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش میزان رطوبت از ۰/۱ تا ۰/۵، ارزش حرارتی بیوگاز تولیدی از ۶/۲۸ تا ۴/۸۰ MJ/kg کاهش می‌یابد. حداکثر اختلاف دمای ساختار جامد الکتروود-الکتروولیت با افزایش میزان رطوبت زیست‌توده از ۰/۱ تا ۰/۵، ۱۵ K کاهش می‌یابد. با افزایش میزان رطوبت زیست‌توده‌ی ورودی از ۰/۱ تا ۰/۵، توان تولیدی W ۵/۳ کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار راندمان مصرف سوخت پیل در بازه‌ی تغییرات ۰/۱ تا ۰/۵ برای میزان رطوبت زیست‌توده برابر ۴۳/۱۲٪ و مربوط به میزان رطوبت ۰/۴ است.

منابع

- [1] Rajvanshi, A. K., "BIOMASS GASIFICATION". *Alternative Energy in Agriculture*.
- [2] Nagel, F. P., T. J. Schildhauer and S. M. A. Biollaz, "Biomass-integrated gasification fuel cell systems – Part 1: Definition of systems and technical analysis". *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (2009):

- state performance". *Journal of Power Sources*, 138 (2004): 120-36.
- [18] Iwai, H., Y. Yamamoto, M. Saito and H. Yoshida, "Numerical simulation of intermediate-temperature direct-internal-reforming planar solid oxide fuel cell". *Energy*, 36 (2011): 2225-34.
- [19] Jesper Ahrenfeldt U. H., K. J. Torben, Benny Gøbel, Lars Wiese and H. E. Alphons Kather, "Validation of a Continuous Combined Heat and Power (CHP) Operation of a Two-Stage Biomass Gasifier". *Energy & Fuels*, 20 (2006): 9.
- [20] Zhao, F. and A. V. Virkar, "Dependence of polarization in anode-supported solid oxide fuel cells on various cell parameters". *Journal of Power Sources*, 141 (2005): 79-95.
- agent". *Renewable Energy*, 34 (2009): 2789-97.
- [14] Melgar, A., J. F. Pérez, H. Laget and A. Horillo, "Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process". *Energy Conversion and Management*, 48 (2007): 59-67.
- [15] Jarunthammachote, S. and A. Dutta, "Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier". *Energy*, 32 (2007): 1660-9.
- [16] Barman, N. S., S. Ghosh, S. De, "Gasification of biomass in a fixed bed downdraft gasifier – A realistic model including tar". *Bioresource Technology*, 107 (2012): 505-11.
- [17] Aguiar, P., C. S. Adjiman and N. P. Brandon, "Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: model-based steady-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Borji, S. Ghorbani, K. Atashkari, A. Etemadi, "Numerical investigation of integrated biomass gasification and planar solid oxide fuel cell power plant", *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(1) (2017) 219-230.
DOI: 10.22060/mej.2016.669

