



## تحلیل ترمودینامیکی و بهینه‌سازی یک سیستم نوین ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد با گازساز زیست توده و لوله‌های حرارتی

پریسا مجاور<sup>1</sup>، شهرام خلیل آریا<sup>2</sup>، عطا چیت‌ساز<sup>3\*</sup>

1- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

2- استاذ، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

\*a.chitsaz@urmia.ac.ir, 1531157561 صندوق پستی

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 دی 1396

پذیرش: 20 بهمن 1396

ارائه در سایت: 11 اسفند 1396

کلید واژگان:

پیل سوختی اکسید جامد

گازساز

زیست توده

لوله حرارتی

روش رویه پاسخ

### چکیده

در تحقیق حاضر، یک سیستم ترکیبی جدید، متشکل از گازساز زیست توده، لوله‌های حرارتی دما بالای سدیم و پیل سوختی اکسید جامد معرفی شده است. سیستم ترکیبی حاصل، به علت بازده و توان بالا به منظور تولید همزمان توان الکتریکی و حرارت مورد توجه قرار گرفته است. از ثابت-های تعادل و قانون بقای جرم و انرژی برای مدل‌سازی سیستم استفاده شده و مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل سیستم در نرم افزار EES انجام گرفته است. پس از حصول اطمینان از صحت مدل‌سازی انجام گرفته در تطابق با نتایج تجربی، اثر *STBR* گازساز، چگالی جریان، ضریب مصرف سوخت و دمای خروجی پیل سوختی به عنوان پارامترهای متغیر بر روی توان تولیدی و بازده کلی سیستم توسط روش رویه پاسخ بررسی گردید. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که پارامترهای ضریب مصرف سوخت (با میزان تاثیرگذاری 53%) و چگالی جریان (با میزان تاثیرگذاری 33%) به ترتیب موثرترین پارامتر بر روی توان خروجی سیستم و بازده انرژی کلی می‌باشند. با افزایش دما، توان سیستم ترکیبی افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش ضریب مصرف سوخت، توان خروجی از سیستم رفتار افزایشی و سپس کاهشی دارد. همچنین افزایش دما و *STBR* سبب افزایش بازده کلی سیستم و افزایش چگالی جریان و ضریب مصرف سوخت موجب کاهش آن می‌شود. نتایج حاصله نشان داد که در بهینه‌ترین حالات با تنظیم صحیح پارامترهای موثر، توان خروجی سیستم و بازده کلی را می‌توان به ترتیب تا مقادیر 300 kW و 90% افزایش داد.

## The thermodynamic analysis and optimization of a novel integrated solid oxide fuel cell system with biomass gasification and heat pipes

Parisa Mojaver, Shahram Khalilarya, Ata Chitsaz\*

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

\*P.O.B. 1531157561, Urmia, Iran. a.chitsaz@urmia.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 24 December 2017

Accepted 09 February 2018

Available Online 02 March 2018

#### Keywords:

Solid oxide fuel cell

Gasifier

Biomass

Heat pipe

Response surface method

### ABSTRACT

In the present study, a novel integrated system containing biomass gasifier, sodium high-temperature heat pipes, and solid oxide fuel cells is introduced. The integrated system is taken into consideration due to its high efficiency and power in order to simultaneous producing electrical power and heat. The modeling of system is performed using equilibrium constants, mass and energy conservation law and the analysis of codes is done in EES software. The effect of gasifier *STBR*, current density, fuel utilization factor, and outlet fuel cell's temperature as variable parameters is investigated on the power and total energy efficiency of integrated system using response surface method; after validation of modeling in comparison to the experimental results. The analysis of variance results indicate that fuel utilization factor (with 53% contribution) and current density (with 33% contribution) are the most effective parameter on the power and total efficiency, respectively. The power of integrated system is increased by increasing of temperature while power has an increasing behavior follows by decreasing behavior by increasing fuel utilization factor. The total efficiency is increased by increasing temperature and *STBR* while it is decreased by increasing current density and fuel utilization factor. The results revealed that the power and total efficiency is obtained at optimum states as high as 300 kW and 90%, respectively.

### 1- مقدمه

سوخت‌های جایگزین شده است [1]. پیل‌های سوختی<sup>1</sup> فناوری جدیدی برای تولید انرژی هستند که بدون ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی و صوتی، از

تقاضای انرژی، کاهش سوخت‌های فسیلی و نگرانی جهانی ناشی از اثرات گازهای گلخانه‌ای موجب توجه قرار گرفتن استفاده از انرژی و

<sup>1</sup> Fuel cell

#### Please cite this article using:

P. Mojaver, Sh. Khalilarya, A. Chitsaz, The thermodynamic analysis and optimization of a novel integrated solid oxide fuel cell system with biomass gasification and heat pipes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 339-350, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.mme.modares.ac.ir

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \alpha_{ij} x_i x_j + \beta \quad (1)$$

که در این رابطه،  $Y$  متغیر پاسخ،  $x_i$  پارامترهای در نظر گرفته شده و  $\alpha$  ضرایب مدل رگرسیون هستند.  $\alpha_0$  ضریب ثابت،  $\alpha_i$  ضرایب خطی،  $\alpha_{ii}$  ضرایب درجه دو و  $\alpha_{ij}$  ضرایب متقابل بوده و همچنین  $\beta$  باقیمانده نتایج آزمایش می‌باشد. به منظور بررسی دقت مدل رگرسیون ارائه شده، از پارامتر  $R^2$  خروجی از تحلیل واریانس استفاده می‌شود که هرچه مقدار آن به 1 نزدیک‌تر باشد، نشان از دقت بالاتر مدل رگرسیون ارائه شده دارد. روش رویه پاسخ به طرح‌های مختلفی مانند مرکب مرکزی، باکس بنکن و دهلبرت تقسیم می‌شود که روش طرح مرکب مرکزی را می‌توان مهم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها دانست [10]. در این روش، بازه‌ی مدنظر هر پارامتر به 5 سطح تقسیم می‌شود. لازم به ذکر است که از روش‌های طراحی آزمایش‌ها در زمینه سیستم‌های انرژی کمتر انجام شده است.

در راستای بهبود عملکرد سیستم‌های انرژی مطالعات گسترده‌ای انجام شده است. به‌عنوان مثال یاری و همکاران [11] به مقایسه دو سیستم تولید همزمان که یکی متشکل از پیل سوختی اکسید جامد و گازساز بود و در سیستم دیگر بجای گازساز، دیجست<sup>8</sup> قرار گرفته بود، پرداختند. آن‌ها اثر پارامترهای عملکردی از جمله چگالی جریان و اختلاف دمای استک پیل سوختی را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد زمانی که در ترکیب سیستم از دیجست<sup>8</sup> استفاده می‌شود، توان خروجی بیشتر از زمانی است که در سیستم گازساز قرار بگیرد اما بازه کلی سیستم برای استفاده از گازساز و دیجست<sup>8</sup> به ترتیب 58.75٪ و 51.05٪ به‌دست آمد. آنالیز اگزوزی و نشر گازهای گلخانه‌ای یک سیستم سه‌گانه با محرک پیل سوختی اکسید جامد توسط چیت‌ساز و همکاران [12] مطالعه شد. آن‌ها اثر دمای کاری، ضریب مصرف سوخت و چگالی جریان را روی سیستم بررسی کردند و توانستند بازه اگزوزی کل سیستم سه‌گانه را 6٪ بهبود دهند. حسین‌پور و همکاران [13] تحلیل انرژی و اگزوزی یک سیستم همزمان توان و گرما شامل پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ را انجام داده و اثرات چگالی جریان، دمای ورودی پیل سوختی و نسبت تراکم را روی سیستم بررسی نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش دما، بازه اگزوزی تا 54.44٪ افزایش می‌یابد. فرزاد و همکاران [14] یک پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای با اصلاح داخلی<sup>9</sup> را مدل‌سازی و بهینه‌سازی کردند و برای تولید همزمان حرارت و توان مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها اثر پارامترهای عملیاتی از جمله میزان هوای اضافی و درصد پیش‌اصلاح سوخت را مطالعه نموده و در بهینه‌ترین حالت، راندمان انرژی و اگزوزی را به ترتیب 42 و 24٪ به‌دست آوردند. آنالیز انرژی و اگزوزی سیستم ترکیبی گازساز زیست توده با پیل سوختی اکسید جامد توسط جیا و همکاران [15] صورت گرفت. آن‌ها عملکرد سیستم را با بررسی پارامترهای عملیاتی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که بازه الکتریکی کل 40٪ و بازه اگزوزی کل 29٪ حاصل شد. فریدا و همکاران [16] یک سیستم ترکیبی از پیل سوختی اکسید جامد و گازساز زیست توده را مورد بررسی قرار دادند که در آن از لوله‌های حرارتی به‌منظور انتقال گرما از استک پیل سوختی اکسید جامد به گازساز استفاده کردند و چگالی جریان و ضریب مصرف سوخت را به‌عنوان پارامترهای عملکردی مطالعه کردند. با توجه به نتایج، توان الکتریکی 170 کیلووات و بازه 34٪ حاصل شد.

ترکیب مستقیم بین سوخت و اکسیدکننده، انرژی الکتریکی با بازدهی بالا تولید می‌کند [2]. سازه و بدنه اصلی پیل سوختی از الکترولیت، الکتروند آند و الکتروند کاتد تشکیل شده است. الکترولیت جامد با الکترونها که از مواد متخلخل مخصوصی تشکیل شده‌اند، پوشانده شده‌اند. وقتی یک سوخت گازی حاوی هیدروژن از آند عبور کند، یک جریان شارژ شده منفی شامل یون‌های اکسیژن از الکترولیت عبور می‌کند تا سوخت را اکسید کند. اکسیژن ذخیره شده در کاتد معمولاً از هوا گرفته می‌شود. الکترون‌های ایجاد شده در آند از یک مدار خارجی عبور کرده و به کاتد می‌رود. پیل سوختی اکسید جامد<sup>1</sup> بنا به دلایلی چون دمای کاری بالا (600-1000 °C)، تنوع سوخت، مقاومت در برابر سولفور، عدم حساسیت به مونواکسیدکربن، پتانسیل بالای تولید همزمان و غیره از اهمیت خاصی برخوردار است [3].

زیست توده (بیوماس)<sup>2</sup> شامل موادی در طبیعت است که از موجودات زنده به‌عمل آمده و زائدات، ضایعات و فضولات آن‌ها می‌باشد [4]. زیست توده را می‌توان توسط فرآیندهای فیزیکی، مکانیکی، بیولوژیکی و گرمایی به انرژی تبدیل کرد [5]. فرآیند گازسازی<sup>3</sup> زیست توده یک تکنولوژی تبدیل ترموشیمیایی است که سوخت را به مخلوط گازی به‌نام گاز سنتز تبدیل می‌کند و نسبت به احتراق، بازه بالاتری دارد [6].

لوله حرارتی<sup>4</sup> یک وسیله انتقال حرارت دو فازی است که می‌تواند به دو صورت لوله‌ای و مسطح ساخته شود و برای انتقال حرارت از یک چشمه حرارتی به یک چاه حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [7]. لوله حرارتی بدون نیاز به منبع خارجی، فقط با اعمال گرما فعال می‌شود و دارای ضریب رسانایی گرمایی موثر و بسیار بالایی است که این ویژگی یکی از مزایای لوله‌های حرارتی می‌باشد [8].

در سال‌های اخیر مطالعاتی بر روی به‌کارگیری پیل‌های سوختی در چرخه‌های تولید همزمان انجام شده و در برخی از آن‌ها از گازساز زیست توده به‌منظور تامین سوخت پیل سوختی نیز استفاده شده است. همچنین برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های انرژی از روش‌های مختلف از جمله الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی<sup>5</sup> و غیره استفاده کرده‌اند. روش‌های طراحی آزمایش‌ها<sup>6</sup> امروزه مخصوصاً در تحقیقات مهندسی جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. این مجموعه روش‌ها، به منظور بررسی جامع یک فرآیند به‌گونه‌ای که حداکثر میزان اطلاعات با حداقل تعداد آزمایش‌ها حاصل شود، به‌کار گرفته می‌شوند. زمانیکه تعداد آزمایش‌های لازم برای بررسی و تحلیل یک فرآیند زیاد باشد، روش‌های طراحی آزمایش‌ها به منظور کاهش زمان و هزینه‌ی مربوط به انجام آن‌ها، کارساز خواهند بود. از جمله روش‌های طراحی آزمایش‌ها می‌توان به روش‌های فاکتوریل، تاگوچی و روش رویه پاسخ<sup>7</sup> اشاره کرد. زمانی که تعداد پارامترهای موثر بر یک سیستم، اندک یا سطوح آن‌ها محدود باشد، می‌توان از روش فاکتوریل بهره گرفت [9]. اما هنگامی که پارامترهای متعددی در سطوح مختلفی بر یک فرآیند تاثیرگذار باشند، روش‌های تاگوچی و رویه پاسخ کاربردی خواهند بود. از جمله مزایای روش سطح پاسخ نسبت به روش تاگوچی می‌توان به مواردی چون گسسته در نظر گرفتن سطوح پارامترها و ارائه‌ی مدل رگرسیون اشاره کرد. مدل رگرسیون، برازشی از داده‌های آزمایش بوده و در قالب یک مدل درجه دوم مطابق رابطه (1)، نحوه اثر متغیرهای ورودی بر متغیرهای پاسخ را توصیف می‌کند.

<sup>1</sup> Solid oxide fuel cell (SOFC)

<sup>2</sup> Biomass

<sup>3</sup> Gasification

<sup>4</sup> Heat pipe

<sup>5</sup> Neural network

<sup>6</sup> Design of experiments (DOE)

<sup>7</sup> Response surface method (RSM)

<sup>8</sup> Digester

<sup>9</sup> Internal Reformer

ساختار جدید به روش رویه پاسخ مرکب مرکزی پرداخته شده است. در این پژوهش، به‌علت اینکه گازسازی با بخار آب انجام می‌شود و فرآیند گرماگیر است، به منبع حرارت خارجی برای تامین گرمای موردنیاز فرآیند نیاز می‌باشد. برای افزایش بازده سیستم موردنظر مشابه فریدا و همکاران [16] به جای به‌کارگیری منبع حرارتی خارجی از لوله‌های حرارتی استفاده شده است اما در مطالعه حاضر لوله‌های حرارتی گرمای لازم برای گازسازی را از محفظه پس‌سوز به راکتور گازساز منتقل می‌کنند در حالی که در مرجع [16] لوله‌های حرارتی گرما را از استک پیل سوختی دریافت می‌کردند. لازم به ذکر است که در کار حاضر علاوه بر بررسی پارامترهای چگالی جریان و ضریب مصرف سوخت، پارامترهای نسبت بخار به زیست توده (STBR) و دمای خروجی پیل سوختی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. با بهینه‌سازی سیستم، مناسب‌ترین شرایط عملکردی مشخص شده و توان و بازده بالاتری نسبت به مرجع [16] به‌دست آمد.

سیستم مورد مطالعه یک سیستم ترکیبی شامل قسمت‌هایی چون پیل سوختی اکسید جامد، گازساز زیست توده و لوله‌های حرارتی دما بالای سدیم می‌باشد که تولید همزمان کار و گرما می‌کند. پس از صحت‌سنجی مدل‌سازی انجام گرفته در مقایسه با نتایج تجربی، توان تولیدی و بازده انرژی به عنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شده و پس از شناسایی پارامترهای ورودی موثر، اثرگذاری آن‌ها بر روی متغیرهای پاسخ ذکر شده، توسط روش رویه پاسخ بررسی می‌شود.

روش رویه پاسخ در کاربردهای متعدد مهندسی به‌کار گرفته شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. حسن‌پور و همکاران [17]، میکروسختی فرزکاری فولاد سخت را با استفاده از روش رویه پاسخ بررسی کردند. پارامتر  $R^2$  مدل رگرسیون حاصل از تحقیق ایشان حدود 95% حاصل شد. آن‌ها همچنین تاثیر پارامترهای مختلف را بر فرآیند مدنظر با استفاده از تحلیل واریانس روش رویه پاسخ بررسی کردند. محمدی و ارغوانی [16] از روش رویه پاسخ به منظور بررسی مدل‌سازی یک بعدی و بهینه‌سازی پرتابگر گازی دو مرحله‌ای استفاده کردند. نتایج حکایت از کارآمدی روش رویه پاسخ به منظور بررسی فرآیند مذکور داشت. خزیمه‌نژاد و نیازمند [18] بهینه‌سازی ریزپمپ لزجی با روتور بیضوی را توسط روش رویه پاسخ انجام دادند که نتایج تحلیل واریانس گویای کارآمدی این روش در بررسی سیستم مربوطه بود. ظهور و موسوی [19] پارامترهای موثر بر عمق کشش را در فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی توسط روش رویه پاسخ بررسی و بهینه‌سازی نمودند. رفتار پارامترهای موثر در نیروی محوری فرآیند سوراخ‌کاری استخوان کورتیکال به روش رویه پاسخ توسط حیدری و همکاران [20] بررسی شد.

مرور ادبیات گسترده صورت گرفته نشان داد که به‌علت مزایای انرژی‌های نو در سال‌های اخیر مطالعاتی بر روی سیستم‌های ترکیبی با محرک پیل سوختی اکسید جامد انجام گرفته است. همچنین مطالعات گسترده صورت گرفته بر روی تحقیقات پیشین گویای کارآمدی روش رویه پاسخ در بررسی مسائل مهندسی بود. از این‌رو در تحقیق حاضر به بررسی سیستمی ترکیبی با

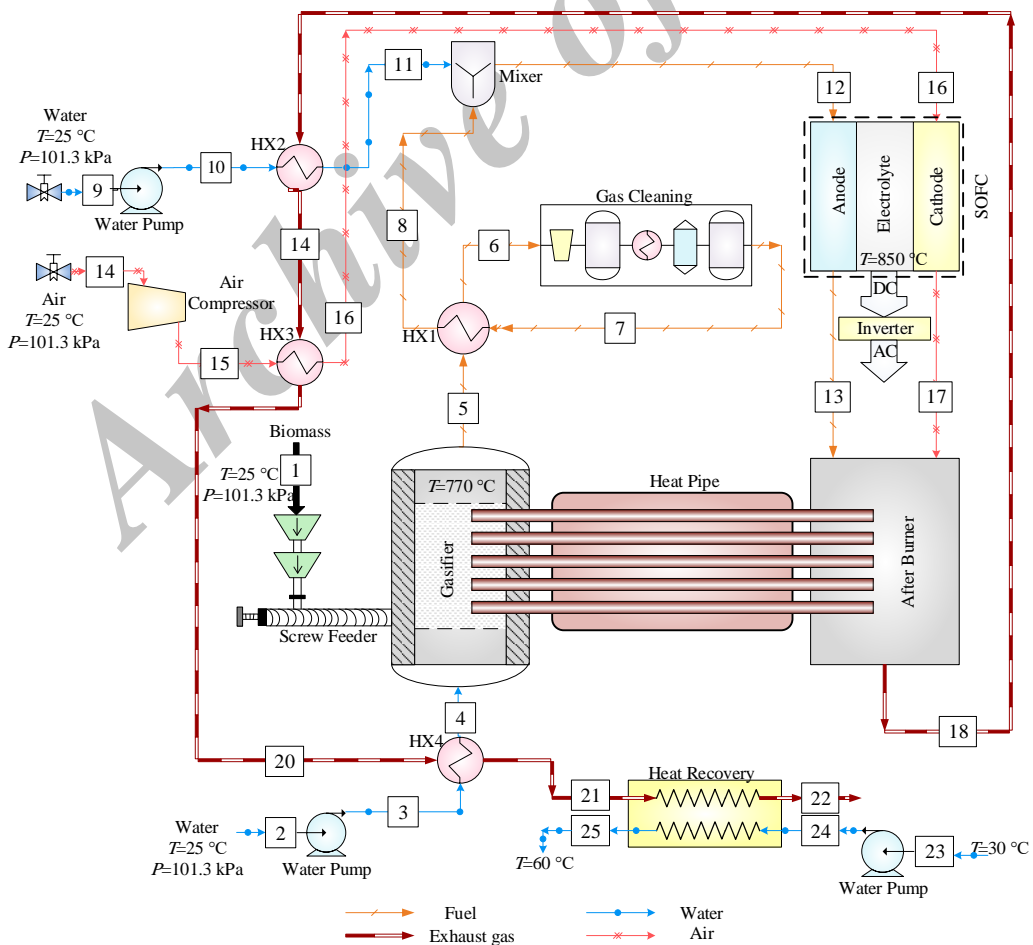


Fig. 1 The schematic of novel integrated system

شکل 1 شماتیک سیستم ترکیبی نوین

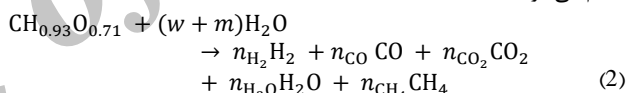
## 2- سیستم ترکیبی و بیان مسئله

شماتیکی از سیستم در "شکل 1" نشان داده شده است.

سیستم ترکیبی شامل گازساز زیست توده، پیل سوختی اکسید جامد، لوله‌های حرارتی دما بالای سدیم، بازیاب حرارتی، کمپرسور هوا، پمپ‌های آب، مبدل‌های حرارتی، محفظه احتراق، محفظه اختلاط، فیلترها و اتصالات می‌باشد. مراحل سیستم بدین گونه است که سوخت موردنیاز پیل سوختی از طریق گازسازی زیست توده در گازساز تولید می‌شود. گاز سنتز تولیدی به همراه هوا و جریان بخار آب وارد استک پیل سوختی می‌شود و پس از انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی، توان و حرارت زیادی تولید می‌شود. از حرارت تولیدی برای راه‌اندازی گازساز و پیش گرمایش جریان‌های ورودی به سیستم استفاده می‌شود و باقیمانده حرارت برای گرمایش آب خانگی به کار گرفته می‌شود. قابل ذکر است که تمامی مدل‌سازی‌ها به روش کدنویسی در نرم‌افزار EES صورت گرفته است.

## 2-1- مدل‌سازی راکتور گازساز زیست توده

در این پژوهش پوسته برنج و بخار آب به ترتیب به‌عنوان خوراک و عامل گازساز انتخاب شده‌اند که فرمول شیمیایی خوراک به‌صورت  $CH_{0.93}O_{0.71}$  است. زیست توده شامل مواد فرآر، کربن ثابت، خاکستر و آب است. به محض گرم کردن زیست توده تا دمای 120 درجه سانتی‌گراد رطوبت اولیه آن تبخیر شده و با افزایش بیشتر تا 350 درجه سانتی‌گراد، مواد فرآر هم خارج می‌شود [21]. واکنش گازسازی زیست توده با عامل بخار آب به‌صورت رابطه (2) انجام می‌شود:



مجهولات موجود با استفاده از قانون بقای جرم و تعادل ترمودینامیکی به دست می‌آیند. واکنش‌های تعادل بصورت روابط (3) و (4) در گازساز انجام می‌شوند:



ثابت تعادل برای واکنش‌های تعادل، به‌صورت روابط (5) و (6) تعریف می‌شود. قانون اول ترمودینامیک برای گازسازی زیست توده در رابطه (7) ارائه شده است. از پارامترهای موثر در ترکیب گاز سنتز خروجی از گازساز نسبت بخار به زیست توده می‌باشد که به‌صورت رابطه (8) تعریف می‌شود.

$$K = \prod_i^n x_i^{n_i} (P_i/P_0)^{\sum_i^n n_i} \quad (5)$$

$$\ln(k) = - \frac{\sum_i^n n_i \Delta G_i^\circ}{\bar{R}/T} \quad (6)$$

$$\bar{h}_{f,biomass}^\circ + w(\bar{h}_{f,H_2O(l)}^\circ + \Delta \bar{h}_{T,H_2O(l)}^\circ) + m(\bar{h}_{f,H_2O(g)}^\circ + \Delta \bar{h}_{T,H_2O(g)}^\circ) + Q_{in} = \sum_j n_j (\bar{h}_{f,j}^\circ + \Delta T_{T,j}), j, \text{ محصول} \quad (7)$$

$$STBR = \frac{\text{دبی جرمی بخار ورودی} + \text{جرم رطوبت سوخت}}{\text{زیست‌جرم توده خشک}} \quad (8)$$

## 2-2- مدل‌سازی پیل سوختی اکسید جامد

پیل سوختی اکسید جامد از گاز سنتز خروجی از گازساز به‌عنوان سوخت

استفاده می‌کند. اطلاعات ورودی بخش پیل سوختی در جدول 1 آورده شده است.

معادلات به‌سازی<sup>1</sup> و ارتقای سوخت<sup>2</sup> به ترتیب در روابط (9) و (10) بیان شده است [22].

سپس هیدروژن به‌دست آمده، در واکنش الکتروشیمیایی رابطه (11) مصرف شده و تولید کار و گرما می‌کند.

که  $a_r$ ،  $b_r$  و  $c_r$  به ترتیب نرخ تبدیل مولی در واکنش‌های به‌سازی، ارتقای سوخت و الکتروشیمیایی است.

نسبت سوخت مصرفی پیل سوختی به مقدار کل سوخت ورودی ضریب مصرف سوخت نامیده می‌شود و به‌صورت رابطه (12) تعریف می‌گردد.

برای واکنش‌های تعادلی به‌سازی و ارتقای سوخت نیز همانند روابط (5) و (6)، ثابت تعادل تعریف می‌شود. با استفاده از معادلات موازنه جرمی مربوط به معادلات (9) تا (12) و رابطه ثابت تعادل‌های واکنش‌های تعادل، نرخ جریان مولی گازها تعیین می‌گردد.

ولتاژ ایده‌آل پیل سوختی به عنوان ولتاژ نرنست<sup>3</sup> شناخته می‌شود و به صورت معادله (13) محاسبه می‌گردد.

با در نظر گرفتن افت ولتاژها، ولتاژ واقعی پیل سوختی از رابطه (14) به‌دست می‌آید.

افت ولتاژ اهمی به دلیل مقاومت الکترودها در برابر جریان و همچنین مقاومت الکترولیت در برابر جریان یون‌ها ایجاد می‌شود که به‌صورت رابطه (15) محاسبه می‌شود [25,24].

برای انجام هر واکنش شیمیایی لازم است که انرژی هر کدام از اجزای تشکیل دهنده واکنش به یک حد لازم برسد که به این انرژی، انرژی فعال‌سازی گفته می‌شود. افت ولتاژ فعال‌سازی به‌صورت رابطه (16) محاسبه می‌شود [28-26].

افت ولتاژ غلظتی به اختلاف در فشارهای جزئی بین سطوح مشترک الکترودها-الکترولیت و مقدار جریان گاز مربوط است. مقدار افت ولتاژ غلظتی به‌صورت رابطه (17) محاسبه می‌شود [31-29].

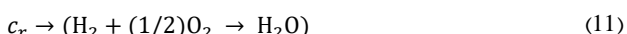
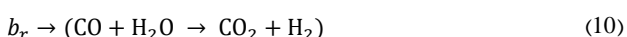
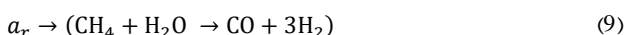
توان الکتریکی تولید شده به‌وسیله استک پیل سوختی اکسید جامد از رابطه (18) به‌دست می‌آید.

چگالی جریان را می‌توان از رابطه (19) به‌دست آورد.

که در این رابطه  $j$  چگالی جریان بوده و از طریق رابطه (19) محاسبه می‌شود.

## 3-2- لوله‌های حرارتی

هر لوله حرارتی دارای سه بخش کندانسور، آدیاباتیک و اواپراتور است و شامل 9 مقاومت حرارتی  $R_1$  تا  $R_9$  می‌باشد که در "شکل 2" نشان داده شده است. لوله‌های حرارتی که برای کار حاضر انتخاب شده است از نوع استوانه‌ای است و از سدیم به‌عنوان سیال عامل داخل آن انتخاب شده است.



$$U_f = \frac{c_r}{3a_r + b_r + n_{H_2}^{in}} \quad (12)$$

$$V_N = - \frac{\Delta g^\circ}{2 \cdot F} + \frac{\bar{R} \cdot T_{FC,e}}{2 \cdot F} \ln \left( \frac{a_{H_2,e} \cdot \sqrt{a_{O_2,e}}}{a_{H_2O,e}} \right) \quad (13)$$

<sup>1</sup> Shifting

<sup>2</sup> Reforming

<sup>3</sup> Nernst

جدول 1 اطلاعات ورودی به پیل سوختی اکسید جامد [22,23]

مقدار	پارامتر
0.01	سطح موثر (m <sup>2</sup> )
500	ضخامت آند (μm)
50	ضخامت کاتد (μm)
10	ضخامت الکترولیت (μm)
300	ضخامت اتصال میانی (μm)
11000	تعداد سلول
100	اختلاف دمای ورودی و خروجی (°C)
96.485	ثابت فارادی (C/gmol)
5000	چگالی جریان پایه <sup>1</sup> (A/m <sup>2</sup> )
775	دمای خروجی پایه (°C)
0.8	ضریب مصرف سوخت پایه
1.3	نسبت بخار به زیست توده پایه
2.0	نسبت بخار به کربن

به صورت روابط (22) و (23) می‌باشد:

$$\eta_{\text{pump,comp}} = (\bar{h}_{e,s} - \bar{h}_e) / (\bar{h}_e - \bar{h}_i) \quad (22)$$

$$\dot{W}_{\text{pump,comp}} = \dot{n}(\bar{h}_e - \bar{h}_i) \quad (23)$$

بازده ایزنتروپیک کمپرسور و پمپها 85% در نظر گرفته شده است [25].

### 5-2- سیستم ترکیبی

توان الکتریکی خالص سیستم ترکیبی از تفاضل توان‌های مصرفی از توان تولیدی است که مطابق رابطه (24) به دست می‌آید:

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_{\text{FC}} - \sum \dot{W}_{\text{pump}} - \dot{W}_{\text{comp}} \quad (24)$$

همچنین بازده کلی سیستم ترکیبی به صورت رابطه (25) تعریف می‌گردد:

$$\eta_{\text{tot}} = \left[ \frac{\dot{W}_{\text{net}} + \dot{Q}_{\text{useful}}}{\text{ورودی انرژی}} \right] \times 100 \quad (25)$$

### 6-2- طراحی آزمایش‌ها

به منظور بررسی سیستم ترکیبی ارائه شده، پارامترهای چگالی جریان، دما، ضریب مصرف سوخت و نسبت بخار به زیست توده به عنوان پارامترهای فرآیندی لحاظ گردیدند. همچنین توان الکتریکی خالص تولیدی سیستم و بازده انرژی کل سیستم ترکیبی به عنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شدند.

جدول 3 پارامترهای ورودی فرآیند و بازه‌های موردنظر برای آنها را نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً عنوان گردید، بازه مورد بررسی برای هر پارامتر، در روش رویه پاسخ مرکب مرکزی به پنج سطح تقسیم می‌شود. با وارد کردن سطوح پایین و بالای پارامترها در نرم‌افزار، بازه مدنظر توسط نرم‌افزار به پنج سطح تقسیم می‌شود.

برای بررسی چهار پارامتر در پنج سطح، 625 آزمایش موردنیاز بوده در حالی که طبق روش رویه پاسخ به 31 آزمایش نیاز است که این آزمایش‌ها در جدول 4 ارائه شده‌اند. قابل ذکر است که برای انجام طراحی آزمایش‌ها و

$$V_c = V_N - (V_{\text{ohm}} + V_{\text{act}} + V_{\text{conc}}) \quad (14)$$

$$V_{\text{ohm}} = (R_c + \sum_i \rho_i L_i) \cdot j \quad (15)$$

$$V_{\text{act}} = \frac{\bar{R} \cdot T_{\text{FC},e}}{F} \cdot \left( \sinh^{-1} \left( \frac{j}{2 \cdot j_{\text{oa}}} \right) + \sinh^{-1} \left( \frac{j}{2 \cdot j_{\text{oc}}} \right) \right) \quad (16)$$

$$V_{\text{conc}} = \frac{\bar{R} \cdot T_{\text{FC},e}}{2 \cdot F} \cdot \left( \ln \left( 1 + \frac{P_{\text{H}_2} \cdot j}{P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot j_{\text{as}}} \right) - \ln \left( 1 - \frac{j}{j_{\text{as}}} \right) - \left( \frac{\bar{R} \cdot T_{\text{FC},e}}{2 \cdot F} \cdot \ln \left( 1 - \frac{j}{j_{\text{cs}}} \right) \right) \right) \quad (17)$$

$$\dot{W}_{\text{FC}} = \eta_{\text{inv}} (N_{\text{FC}} \cdot j \cdot A_a \cdot V_c) \quad (18)$$

$$j = \frac{2 \cdot F \cdot c_r}{N_{\text{FC}} \cdot A_a} \quad (19)$$

هندسه لوله حرارتی دارای سه ناحیه پوسته بیرونی، ناحیه متخلخل و ناحیه درونی که سیال عامل در آن جریان دارد، می‌باشد.

برای لوله حرارتی، 9 مقاومت حرارتی  $R_1$  تا  $R_9$  تعریف می‌شود که در شکل 2 نشان داده شده است. مقاومت‌های  $R_4$ ،  $R_5$  و  $R_6$  مربوط به سیال عامل داخل لوله می‌باشد. مقاومت‌های  $R_3$  و  $R_7$  برای ناحیه پوسته استوانه‌ای خارجی و مقاومت‌های  $R_2$  و  $R_8$  برای ناحیه متخلخل تعریف می‌شود. مقاومت‌های  $R_1$  و  $R_9$  نیز مربوط به سطح بیرونی استوانه خارجی می‌باشد که با هوا در تماس است. مقادیر هر یک از مقاومت‌های حرارتی در جدول 2 ارائه شده است.

نرخ انتقال حرارت در یک لوله حرارتی از رابطه (20) محاسبه می‌شود:

$$q_{\text{HP}} = \frac{\Delta T}{\sum_{i=1}^9 R_i} \quad (20)$$

که  $\Delta T$  مربوط به اختلاف دمای محفظه پس سوز و راکتور گازساز می‌باشد.

### 4-2- بازیاب حرارتی، کمپرسور و پمپها

گرمای لازم برای گرمایش آب خانگی از بازیاب حرارتی دریافت می‌شود. مقدار این گرما از رابطه (21) به دست می‌آید:

$$\dot{Q}_{\text{useful}} = \dot{n}(\bar{h}_e - \bar{h}_i) \quad (21)$$

مدل ترمودینامیکی کمپرسور هوا و پمپ آب براساس بازده ایزنتروپیک

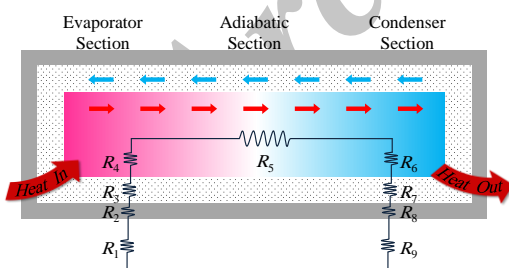


Fig. 2 The schematic of thermal resistance of a heat pipe  
شکل 2 شماتیک مقاومت‌های حرارتی یک لوله حرارتی

جدول 2 مقاومت‌های حرارتی لوله حرارتی [32]

مقدار	مقاومت
17.69	$R_9$ و $R_1$
1.075	$R_8$ و $R_2$
0.165	$R_7$ و $R_3$
1.56E-5	$R_6$ و $R_4$
0	$R_5$

<sup>1</sup>Baseline

جدول 4 طراحی آزمایش‌ها به روش رویه پاسخ

Table 4 Design of experiments according to RSM

D	C	B	A	پارامتر
0.95	0.75	837.5	6750	1
0.95	0.75	712.5	6750	2
1.30	0.80	775.0	1500	3
0.95	0.75	712.5	3250	4
1.30	0.70	775.0	5000	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1.65	0.85	837.5	6750	27
1.30	0.80	775.0	5000	28
1.65	0.75	712.5	3250	29
1.65	0.85	712.5	6750	30
0.95	0.85	837.5	6750	31

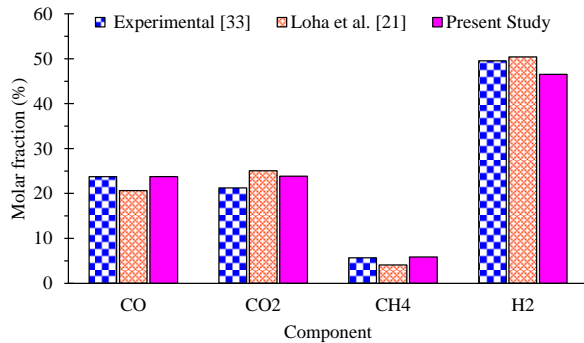


Fig. 3 The validation of composition of syngas produced in gasifier

شکل 3 صحت‌سنجی ترکیب گاز سنتز تولیدی گازساز

پیروی کنند. بنابراین بایستی نرمال بودن توزیع داده‌ها را بررسی نمود.

### 3-2-1- بررسی نرمال بودن داده‌ها

با وارد کردن داده‌ها در نرم‌افزار مینی‌تب مشخص شد که میزان  $P$  برای هر دو متغیر پاسخ بیشتر از 0.05 (مقدار خطایی که توسط نرم‌افزار مینی‌تب به صورت پیش‌فرض در نظر گرفته می‌شود) می‌باشد، بنابراین توزیع داده‌ها نرمال بوده و بنابراین می‌توان تحلیل واریانس را انجام داد.

### 3-2-2- بررسی نرمال بودن داده‌ها

با وارد کردن داده‌ها در نرم‌افزار مینی‌تب مشخص شد که میزان  $P$  برای هر دو متغیر پاسخ بیشتر از 0.05 (مقدار خطایی که توسط نرم‌افزار مینی‌تب به صورت پیش‌فرض در نظر گرفته می‌شود) می‌باشد، بنابراین توزیع داده‌ها نرمال بوده و بنابراین می‌توان تحلیل واریانس را انجام داد.

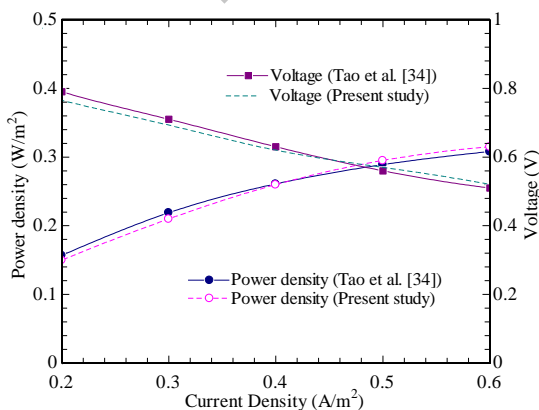


Fig.4 The validation of voltage and power of SOFC

شکل 4 صحت‌سنجی ولتاژ و چگالی توان پیل سوختی اکسید جامد

تمامی تحلیل‌ها از نرم‌افزار مینی‌تب<sup>1</sup> نسخه 17 استفاده شده است. همچنین به‌منظور اختصار از ذکر آزمایش‌های بین 6 تا 26 صرف‌نظر شده است.

### 3- نتایج و بحث

در این قسمت ابتدا، صحت‌سنجی مدل‌سازی سیستم ترکیبی در مقایسه با داده‌های تجربی انجام می‌گیرد و پس از حصول اطمینان از صحت نتایج مدل، از آن برای انجام آزمایش‌های مدنظر مطابق جدول 4 استفاده خواهد شد.

#### 3-1- صحت‌سنجی

برای اطمینان از درستی مدل‌سازی، نتایج حاصل از مدل با نتایج تجربی و مطالعات پیشین مقایسه شده است.  $RMS$  پارامتری است که مقدار خطا را بین نتایج تجربی و مدل نشان می‌دهد و به‌صورت رابطه (26) بیان می‌شود:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\text{مدل}_i - \text{تجربی}_i)^2}{N}} \quad (26)$$

که  $N$  تعداد نقاط داده شده است. هرچه مقدار پارامتر  $RMS$  کمتر باشد، حکایت از تطابق بیشتر داده‌های مدل‌سازی و نتایج تجربی دارد. برای سیستم ترکیبی در دو مرحله صحت‌سنجی انجام می‌شود که به‌ترتیب شامل گازسازی زیست توده و پیل سوختی اکسید جامد می‌باشد.

#### 3-1-1- فرآیند گازسازی زیست توده

به‌منظور بررسی ترکیب گاز سنتز حاصل از مدل‌سازی انجام شده، نتایج تحقیق حاضر با نتایج تجربی حاصل از فرآیند گازسازی زیست توده [33] و نتایج به‌دست آمده از مدل لوها [21] مقایسه می‌گردد. این نتایج در "شکل 3" ارائه شده است. مقدار  $RMS$  پایین، حکایت از اعتبار بالای مدل‌سازی تحقیق حاضر دارد. از آنجایی که مقدار  $RMS$  مدل حاضر (1.984) در مقایسه با مدل [21] (2.619) مقدار کمتری دارد، در نتیجه مدل‌سازی تحقیق حاضر تطابق بیشتری با نتایج تجربی دارد.

#### 3-1-2- پیل سوختی اکسید جامد

داده‌های ولتاژ و توان پیل سوختی اکسید جامد به ازای مقادیر مختلف چگالی جریان با نتایج تجربی گزارش شده در تحقیق تائو [34] در "شکل 4" مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که ولتاژ و توان پیل سوختی اکسید جامد مدل‌سازی تحقیق حاضر در تمامی مقادیر چگالی جریان تطابق خوبی با نتایج تحقیق تائو [34] دارد.

پس از حصول اطمینان از صحت مدل ارائه شده، آزمایش‌های مختلف مطابق جدول 4 انجام گرفته و نتایج حاصل در جدول 5 ارائه گردیده است.

### 3-2- تحلیل واریانس

زمانی می‌توان تحلیل واریانس انجام داد که متغیرهای پاسخ از توزیع نرمال

جدول 3 پارامترهای ورودی فرآیند و بازه مدنظر برای آن‌ها

پارامتر	واحد	کد	سطح پایین	سطح بالا
چگالی جریان	$A/m^2$	A	1500	8500
دمای خروجی	$^{\circ}C$	B	650	900
ضریب مصرف سوخت	-	C	0.7	0.9
نسبت بخار به زیست توده	-	D	0.6	2

<sup>1</sup>Minitab

دارد.

$$\text{توان (kW)} = -10151 + 0.2218A + 6.17B + 18707C$$

$$+ 226D - 0.000005A^2 - 0.00265B^2 - 10060C^2 + 18.9D^2 + 0.000108A \times B - 0.2854A \times C - 0.0059A \times D - 2.45B \times C + 0.124B \times D - 196C \times D \quad (27)$$

$$\text{کلانترژی‌بازده (\%)} = -446 + 0.0002A + 0.268B + 1030C + 7.6D + 0.000000A^2 - 0.000124B^2 - 626C^2 + 1.20D^2 + 0.000002A \times B - 0.01066A \times C - 0.000084A \times D - 0.045B \times C + 0.0119B \times D - 7.6C \times D \quad (28)$$

### 3-2-5- اثرات اصلی پارامترها

اثرات اصلی پارامترهای در نظر گرفته شده بر روی توان تولیدی سیستم در "شکل 5" نشان داده شده است.

"شکل 5-a" تغییرات توان تولیدی سیستم نسبت به چگالی جریان را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، با افزایش چگالی، توان تولیدی سیستم ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در چگالی جریان بالا، سیستم سوخت و هوای بیشتری را تقاضا می‌کند، از این رو کمپرسور هوا برای فشرده کردن مقدار دبی بیشتری از هوا، توان بالاتری را مصرف می‌کند. از طرفی زمانی که چگالی جریان بالا می‌رود، توانایی برای نفوذ کافی مواد واکنش دهنده به محل‌های واکنش الکتروود وجود ندارد. بنابراین افت ولتاژ افزایش می‌یابد. افزایش افت ولتاژ باعث می‌شود که استک پیل سوختی، ولتاژ کمتری را تولید کند.

از آن‌جا که توان پیل سوختی با چگالی جریان و ولتاژ تولیدی پیل رابطه مستقیم دارد، اثر همزمان افزایش چگالی جریان و کاهش ولتاژ تولیدی باعث می‌شود که در چگالی‌های پایین که مقدار افت ولتاژ کم است، با افزایش چگالی، توان افزایش یابد ولی در چگالی‌های جریان بالا به علت افزایش چشمگیر افت ولتاژ غلظتی باعث می‌شود که توان تولیدی پیل با افزایش چگالی، کاهش یابد. توان تولیدی کل تا چگالی جریان  $7541 \text{ A/m}^2$  افزایش یافته سپس به دلیل افزایش توان مصرفی کمپرسور در چگالی جریان بالا روندی نزولی خواهد داشت. با توجه به "شکل 5-b" می‌توان دریافت که در دماهای بالا، سیستم توان بیشتری تولید می‌کند زیرا هر چه دمای پیل سوختی افزایش پیدا کند به علت افزایش سرعت واکنش‌ها، افت ولتاژ کمتری در پیل رخ می‌دهد، کاهش افت ولتاژ باعث می‌شود که ولتاژ تولیدی سیستم بیشتر شده و در نتیجه پیل سوختی توان بیشتری تولید می‌کند. از طرفی افزایش دما باعث می‌شود که هوای کمتری برای انجام واکنش‌ها مورد نیاز باشد بنابراین دبی هوای کمتری وارد سیستم شود و از آن‌جایی که توان مصرفی کمپرسور با نرخ دبی هوای ورودی به آن رابطه مستقیم دارد از این رو کمپرسور نیز توان کمتری مصرف کند. اثر توأم افزایش ولتاژ تولیدی و کاهش توان مصرفی کمپرسور منجر به افزایش توان تولیدی سیستم ترکیبی می‌شود. "شکل 5-c" نشان می‌دهد که توان تولیدی سیستم با افزایش ضریب مصرف سوخت ابتدا افزایش‌اندکی یافته و پس از رسیدن به حداکثر مقدار خود کاهش می‌یابد زیرا بالا بودن مقدار ضریب مصرف سوخت به این معنی است که مقدار سوخت ورودی بیشتری وارد واکنش می‌شود، بنابراین در خروجی آند درصد گاز دی‌اکسیدکربن نسبت به هیدروژن و مونواکسید کربن افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش ضریب مصرف سوخت منجر به کاهش

جدول 5 نتایج توان تولیدی و بازده انرژی کل

Table 5 The results of power and total energy efficiency

آزمایش	بازده انرژی کل (%)	توان (kW)
1	70.65	372.8
2	62.73	261.6
3	89.51	112.6
4	71.01	194.0
5	76.58	302.2
⋮	⋮	⋮
27	72.19	191.1
28	72.90	269.6
29	79.80	193.9
30	65.25	166.6
31	63.45	241.0

### 3-2-3- بررسی اثرگذاری پارامترها

اثرگذاری پارامترهای لحاظ شده بر روی توان تولیدی سیستم و بازده انرژی کل به ترتیب در جدول 6 و 7 نشان داده است.

مقدار  $P$  کمتر از 0.05 (خطای آماری پیش فرض) بیانگر اثرگذاری معنادار یک پارامتر بر روی متغیر پاسخ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که تمامی پارامترها بر روی هر دو متغیر پاسخ به صورت معناداری اثرگذار می‌باشند به غیر از  $STBR$  که با مقدار  $P=0.617$  اثر معناداری بر روی توان تولیدی سیستم ندارد. نتایج بیانگر این امر بودند که ضریب مصرف سوخت با درصد مشارکت 53% موثرترین پارامتر بر روی توان تولیدی سیستم می‌باشد. پس از ضریب مصرف سوخت، چگالی جریان و دما به ترتیب با میزان اثرگذاری 26 و 21% پارامترهای اثرگذار بعدی بر روی توان تولیدی سیستم می‌باشند. همچنین مطابق نتایج، چگالی جریان با اثرگذاری 33.4%، موثرترین پارامتر بر روی بازده انرژی کل می‌باشد. نسبت بخار به زیست توده، دما و ضریب مصرف سوخت به ترتیب با میزان مشارکت 29.8، 20.4 و 16.4% در رتبه‌های بعدی اثرگذاری بر روی بازده انرژی کل می‌باشند. مطابق نتایج، ضریب مصرف سوخت به ترتیب موثرترین و کم اثرترین پارامتر بر روی توان تولیدی سیستم و بازده انرژی کل می‌باشد.

### 3-2-4- مدل رگرسیون

مدل‌های رگرسیون حاصل از تحلیل واریانس برای توان تولیدی سیستم و بازده کل انرژی به ترتیب در روابط (27) و (28) ارائه شده است. پارامتر  $R^2$  برای مدل‌های رگرسیون (27) و (28) به ترتیب به میزان 97.74% و 93.10% حاصل شد که حکایت از صحت بالای مدل‌های رگرسیون ارائه شده

جدول 6 اثرگذاری پارامترها بر روی توان تولیدی سیستم

Table 6 The effectiveness of parameters on the power

پارامتر	DF	SS	P	اثرگذاری (%)
چگالی جریان	1	27209	0.000	25.8
دما	1	22198	0.000	21.0
ضریب مصرف سوخت	1	55918	0.000	53.0
نسبت بخار به زیست توده	1	174	0.617	0.2

جدول 7 اثرگذاری پارامترها بر روی بازده انرژی کل

Table 7 The effectiveness of parameters on the total energy efficiency

پارامتر	DF	SS	P	اثرگذاری (%)
چگالی جریان	1	594.81	0.000	33.4
دما	1	362.70	0.000	20.4
ضریب مصرف سوخت	1	292.74	0.000	16.4
نسبت بخار به زیست توده	1	530.72	0.000	29.8

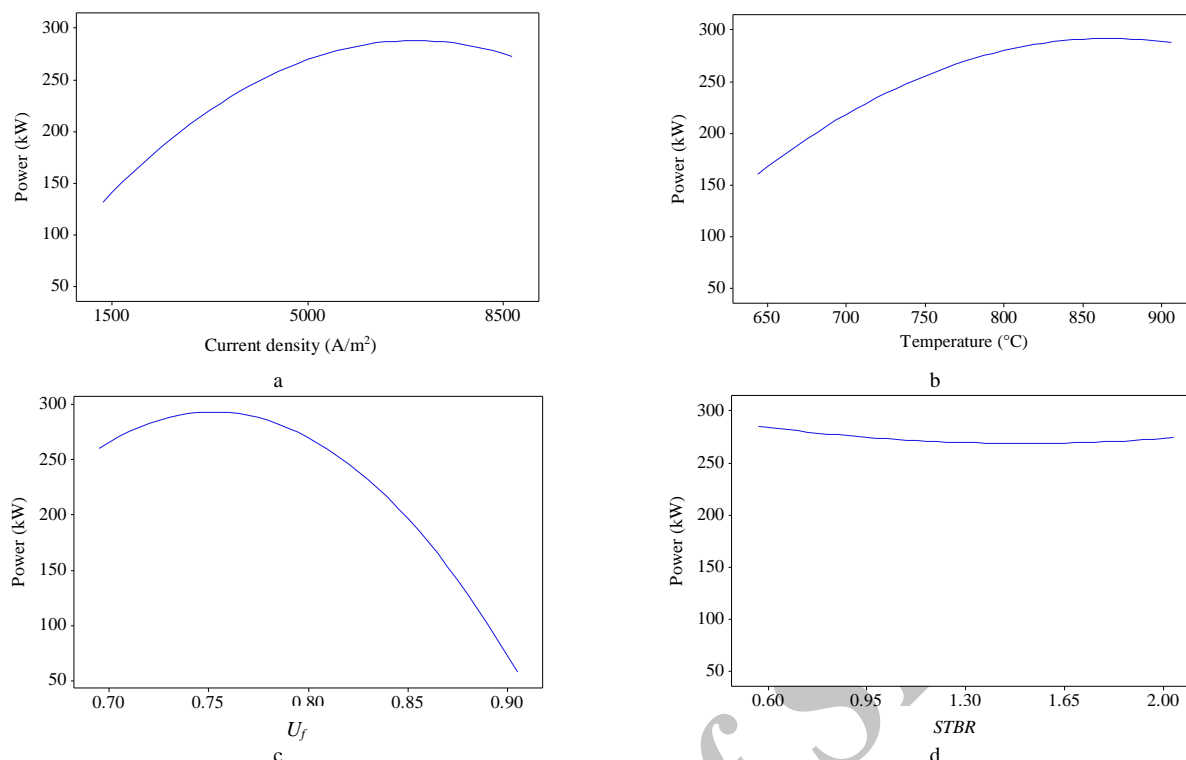


Fig. 5 The main effects of considered parameters on the power; a) current density, b) temperature, c)  $U_f$  and d) STBR

شکل 5 اثرات اصلی پارامترها بر روی توان؛ (a) چگالی جریان، (b) دما، (c) ضریب مصرف سوخت و (d) نسبت بخار به زیست توده

به‌علت ایجاد شرایط بهتر واکنش‌ها سریع‌تر اتفاق بیافتند در نتیجه افت‌ها کاهش یابند و ولتاژ و توان بیشتری تولید شود و همچنین دبی کمتری از هوا وارد استک پیل سوختی شود. مطابق "شکل 6-c" با افزایش ضریب مصرف سوخت بازده انرژی کل سیستم به مقدار بسیار کمی افزایش و سپس کاهش یافته است. به‌صورتی که سیستم در ضریب مصرف سوخت پایین‌تر بازده بالاتری دارد اما از طرفی لازم به‌ذکر است که پایین نگه‌داشتن ضریب مصرف سوخت به‌منظور بهبود عملکرد پیل زمانی که در سیستم، چرخه‌ای برای جریان گاز آند وجود ندارد، اتلاف بالایی ایجاد می‌کند. بنابراین لازم است که بین عملکرد سیستم و ضریب مصرف سوخت تعادل منطقی ایجاد شود تا سیستم به مناسب‌ترین حالت برسد. بازده انرژی کل سیستم در STBR متغیر در "شکل 6-d" مطالعه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد افزایش STBR، بازده سیستم ترکیبی را افزایش داده است.

### 3-2-6- اثرات متقابل پارامترها

در این بخش هدف بررسی اثرات متقابل همزمان دو پارامتر بر روی متغیرهای پاسخ می‌باشد. قابل ذکر است که به منظور بررسی اثر دو پارامتر، دو پارامتر دیگر در سطوح متوسط خود تنظیم شده‌اند. نمودارهای رویه به‌منظور بررسی اثرات متقابل پارامترهای موثر بر روی توان تولیدی سیستم در "شکل 7" نشان داده شده است. "شکل 7-a" نشان می‌دهد که در چگالی‌های جریان بیشتر از 6000 و ضرایب مصرف سوخت کمتر از 0.8، توان تولیدی سیستم بیشتر از 300 kW می‌باشد که این مقدار با کاهش چگالی جریان و افزایش ضریب مصرف سوخت، کاهش می‌یابد. در چگالی‌های جریان پایین و ضرایب مصرف سوخت پایین، توان تولیدی سیستم به کمتر از 100 kW می‌رسد. همچنین مقادیری مشابه (کمتر از 100 kW) در ضرایب مصرف سوخت بالا و به ازای تمامی مقادیر چگالی جریان حاصل خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد

ولتاژ تولیدی می‌شود. در ضریب مصرف سوخت پایین زمانی که ضریب مصرف سوخت افزایش می‌یابد، ولتاژ تغییرات محسوسی ندارد بنابراین توان تولیدی افزایش می‌یابد اما در ضریب مصرف سوخت بالا تغییرات ولتاژ چشمگیر است، در نتیجه افزایش ضریب مصرف سوخت، توان را کاهش می‌دهد. "شکل 5-d" نشان می‌دهد که تغییرات STBR اثر چشمگیری بر روی توان خروجی سیستم ترکیبی ندارد. STBR از پارامترهای عملکردی گازساز است. اگر STBR افزایش یابد رطوبت بیشتری وارد گازساز می‌شود و در نتیجه بخار آب بیشتری نیز در خروجی گازساز تولید می‌شود. بنابراین دبی آب کمتری به‌طور مجزا وارد پیل سوختی می‌شود. ولی از آنجایی که مقدار توان مصرفی پمپ در مقایسه با توان تولیدی پیل سوختی ناچیز است، پس می‌توان نتیجه گرفت که STBR بر روی توان تولیدی سیستم اثر چشمگیری ندارد. عدم اثرگذاری STBR بر روی توان خروجی سیستم در تطابق با نتایج بخش 2-3 می‌باشد.

اثرات اصلی پارامترها بر روی بازده انرژی کل در "شکل 6" ارائه گردیده است. اثر چگالی جریان بر روی بازده انرژی کل در "شکل 6-a" نشان داده شده است. در چگالی جریان بالا، علاوه بر این که سیستم دچار افت ولتاژ می‌شود، دبی سوخت و هوای بیشتری را نیز تقاضا می‌کند. از آنجایی که هوا برای ورود به سیستم ابتدا از کمپرسور عبور می‌کند در نتیجه با افزایش دبی جرمی هوا، توان مصرفی کمپرسور نیز افزایش می‌یابد. از طرفی همان‌طور که اشاره شد بازده کلی از نسبت توان تولیدی سیستم ترکیبی به دبی سوخت ورودی به سیستم به‌دست می‌آید به‌دلیل این که با افزایش چگالی جریان دبی سوخت ورودی افزایش یافته در نتیجه بازده انرژی سیستم ترکیبی کاهش می‌یابد.

مطابق "شکل 6-b" مشاهده می‌شود که در دماهای بالا، سیستم ترکیبی بازده بالاتری را به‌دست می‌دهد زیرا افزایش دما باعث می‌شود که



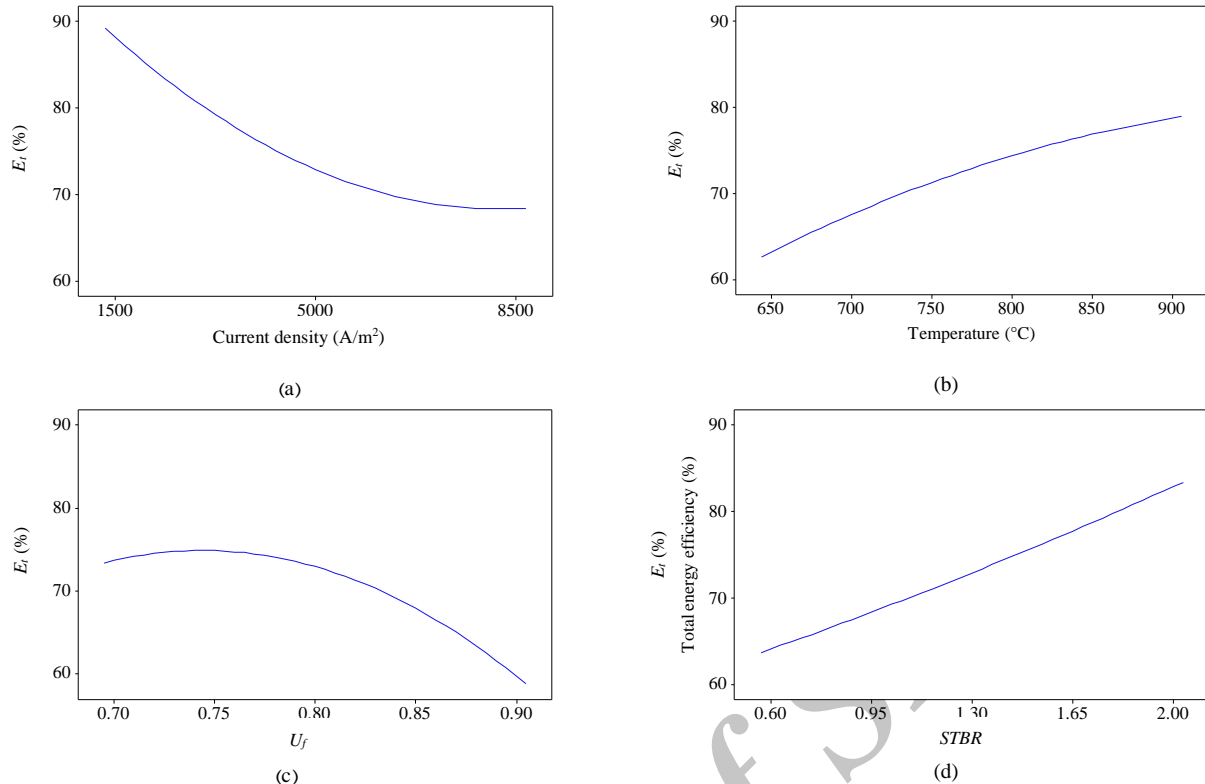


Fig. 6 The main effects of considered parameters on the total energy efficiency ( $E_t$ ); a) current density, b) temperature, c)  $U_f$  and d) STBR

شکل 6 اثرات اصلی پارامترها بر روی بازده انرژی کل؛ (a) چگالی جریان، (b) دما، (c) ضریب مصرف سوخت و (d) نسبت بخار به زیست توده

که در ضرایب مصرف سوخت بالاتر از 0.85، تغییرات چگالی جریان اثر قابل توجهی بر توان تولیدی سیستم نداشته در حالی که در ضرایب مصرف سوخت کمتر از 0.8، اثر تغییرات چگالی جریان بر روی توان تولیدی سیستم چشمگیر می‌باشد. "شکل 7-b" نشان می‌دهد که بیشترین توان تولیدی سیستم به مقدار بیشتر از 300 kW در چگالی‌های جریان و دماهای بالا حاصل می‌شود. با کاهش همزمان هر دو پارامتر به سطوح پایین خود، توان تولیدی سیستم به مقدار کمتر از 150 kW خواهد رسید. تغییرات دما در چگالی‌های جریان بالا، به شدت بر روی توان تولیدی سیستم اثرگذار می‌باشد در حالیکه در چگالی‌های جریان پایین، با تغییرات دما، توان تولیدی سیستم تغییر محسوسی نخواهد داشت. اثر متقابل دما و ضریب مصرف سوخت در "شکل 7-c" نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر متقابل دما و

ضریب مصرف سوخت بر روی توان تولیدی سیستم بسیار چشمگیر بوده و توان بین 300 تا 50 kW متغیر می‌باشد. بیشترین مقدار توان تولیدی (300 kW) در دماهای بالاتر از 800 درجه سانتی‌گراد و ضرایب مصرف سوخت کمتر از 0.8 حاصل می‌شود درحالی‌که کمترین مقدار توان تولیدی (50 kW) به ازای دماهای پایین و ضرایب مصرف سوخت بالا حاصل می‌گردد. افزایش دما و کاهش ضریب مصرف سوخت همزمان، سبب افزایش توان تولیدی سیستم خواهد شد و بالعکس. به‌منظور بررسی اثرات متقابل پارامترها بر روی بازده انرژی کل از نمودارهای کانتوری استفاده شده است. نتایج در "شکل 8" ارائه شده است. "شکل 8-a" نشان می‌دهد که بیشترین بازده انرژی کل در چگالی‌های جریان پایین و دمای بالا به میزان بیش از 90% حاصل می‌شود. همچنین

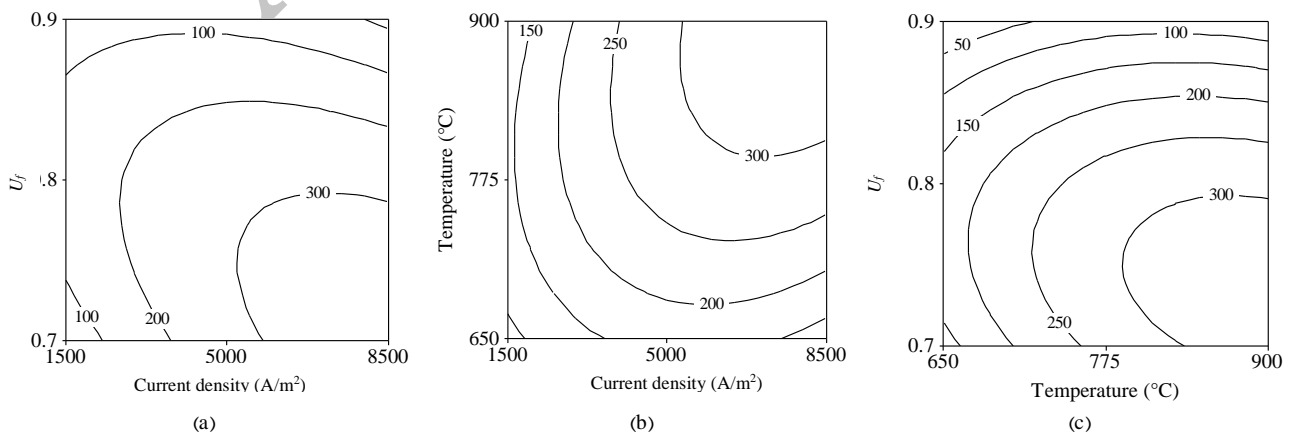
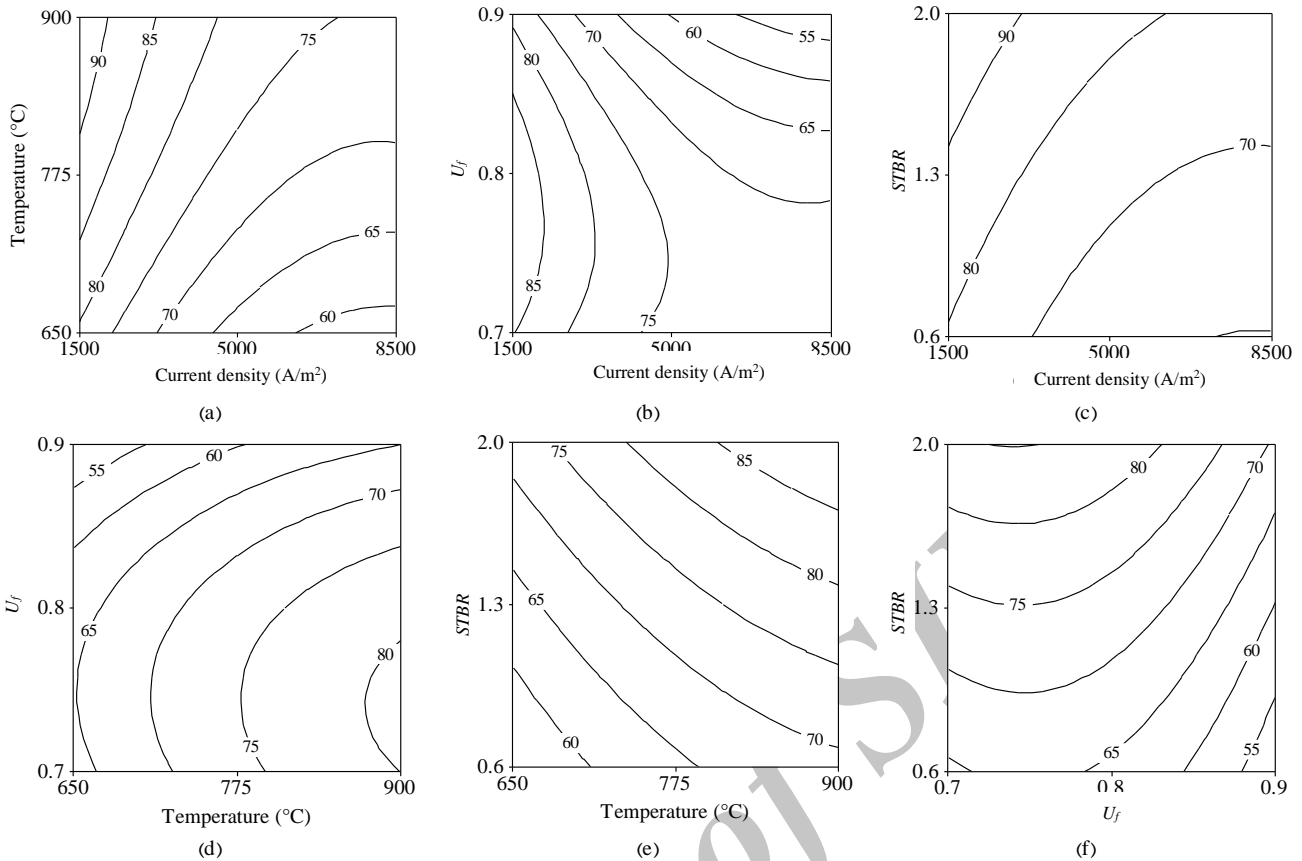


Fig. 7 The contour plots of interaction effect on the power (kW); a)  $U_f$ -current density- b) temperature-current density- and c)  $U_f$ -temperature

شکل 7 نمودارهای کانتوری اثرات متقابل بر روی توان (kW)؛ (a) ضریب مصرف سوخت-چگالی جریان، (b) دما-چگالی جریان و (c) ضریب مصرف سوخت-دما



**Fig. 8** The contour plots of interaction effect on the total energy efficiency (%); a) temperature-current density, b)  $U_f$ -current density, c)  $STBR$ -current density, d)  $U_f$ -temperature, e)  $STBR$ -temperature and f)  $STBR-U_f$

شکل 8 نمودارهای کانتوری اثرات متقابل بر روی بازده انرژی کل (%؛ a) دما-چگالی جریان، b) ضریب مصرف سوخت-چگالی جریان، c)  $STBR$ -چگالی جریان، d) ضریب مصرف سوخت-دما، e)  $STBR$ -دما و f)  $STBR-U_f$

#### 4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پیل سوختی اکسید جامد با گازساز زیست توده و لوله‌های حرارتی به منظور تولید همزمان توان الکتریکی و گرما ادغام شده است. اثرات پارامترهای عملیاتی بر روی سیستم ترکیبی بررسی شد و سپس بهینه‌سازی سیستم با رویه پاسخ مرکب مرکزی انجام گردید. خلاصه نتایج بدست آمده از پژوهش صورت گرفته عبارتند از:

- ✓ با افزایش چگالی جریان پیل سوختی، توان تولیدی سیستم ترکیبی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد در حالی که بازده کلی سیستم پیوسته کاهش می‌یابد.
- ✓ افزایش دمای خروجی پیل سوختی، توان الکتریکی و بازده کلی را افزایش می‌دهد و عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد.
- ✓ توان الکتریکی و بازده کلی سیستم با افزایش ضریب مصرف سوخت پیل سوختی، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابند.
- ✓ توان الکتریکی سیستم به تغییرات  $STBR$  گازساز حساس نبوده در حالی که در  $STBR$  بالا، سیستم بازده بیشتری بدست می‌دهد.
- ✓ ضریب مصرف سوخت با میزان اثرگذاری 53% و چگالی جریان با میزان اثرگذاری 33% موثرترین پارامترها به ترتیب بر روی توان تولیدی سیستم و بازده انرژی کل می‌باشند.
- ✓ در بهینه‌ترین شرایط، توان تولیدی سیستم ترکیبی ارائه شده، تا 300 kW افزایش می‌یابد.
- ✓ بیشترین بازده انرژی کلی سیستم به میزان 90% در شرایط

بازده انرژی کل به میزان کمتر از 60% در چگالی‌های جریان بالا و دمای پایین حاصل می‌شود. مطابق "شکل 8-b"، مشاهده می‌شود که بیشترین بازده انرژی کل به میزان 85%، در چگالی‌های جریان پایین و به ازای تمامی مقادیر ضریب مصرف سوخت بین 0.7 تا 0.85 حاصل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که بازده انرژی کل در چگالی‌های جریان بالا و ضریب مصرف سوخت تا 55% کاهش می‌یابد. در چگالی‌های جریان بالا، به ازای ضرایب مصرف سوخت بیشتر از 0.8، بازده انرژی کل به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد. "شکل 8-c" نشان می‌دهد که در چگالی‌های جریان پایین و به ازای مقادیر  $STBR$  بزرگتر از 1.4، بازده انرژی کل بیشتر از 90% حاصل می‌شود. اثر متقابل دما و ضریب مصرف سوخت در "شکل 8-d" نشان داده شده است. مطابق این شکل، بیشترین و کمترین بازده انرژی کل به ترتیب به میزان بیش از 80% و کمتر از 55% حاصل می‌شود. بیشترین مقدار به ازای دماهای بالا و ضرایب مصرف سوخت پایین و کمترین مقدار به ازای دماهای پایین و ضرایب مصرف سوخت بالا می‌باشند. مطابق "شکل 8-e" هنگامی که همزمان دما و  $STBR$  در سطوح بالای خود قرار داشته باشند، بازده انرژی کل به میزان بیش از 85% حاصل می‌شود درحالی که تنظیم همزمان پارامترهای دما و  $STBR$  روی سطوح پایین، بازده انرژی کل را به کمتر از 60% کاهش می‌دهد. مطابق "شکل 8-f"، بیشترین میزان بازده انرژی کل در ضرایب مصرف سوخت کمتر از 0.8 و  $STBR$  بالا به میزان بیش از 80% حاصل می‌شود درحالی که این مقدار به ازای ضرایب مصرف سوخت بالا و  $STBR$  پایین به کمتر از 55% نیز افت پیدا می‌کند.

بهینه‌ی چگالی جریان پایین-دمای بالا و یا چگالی جریان  
پایین-STBR، بالا حاصل می‌شود.

$N$  نرنست  
 $ohm$  اهمی

## 6- مراجع

## 5- فهرست علائم

- [1] I. Dincer, Renewable energy and sustainable development: a crucial review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 4, No. 2, pp.157-175, 2000.
- [2] R. O'Hayre, S. W. Cha, F. B. Prinz, W. Colella, *Fuel cell Fundamentals*, pp. 207-246, New Jersey, John Wiley & Sons, 2016.
- [3] T. S. Lee, J. N. Chung, Y. C. Chen, Design and optimization of a combined fuel reforming and solid oxide fuel cell system with anode off-gas recycling, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 10, pp.3214-3226, 2011.
- [4] T. Bridgwater, Biomass for energy, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Vol. 86, No. 12, pp.1755-1768, 2006.
- [5] C. B. Field, J. E. Campbell, D. B. Lobell, Biomass energy: the scale of the potential resource, *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 23, No. 2, pp.65-72, 2008.
- [6] S. Dasappa, P. J. Paul, H. S. Mukunda, N. K. S. Rajan, G. Sridhar, H. V. Sridhar, Biomass gasification technology—a route to meet energy needs, *Current Science*, Vol. 87, No. 7, pp.908-916, 2004.
- [7] B. Zohuri, *Heat Pipe Design and Technology: Modern Applications for Practical Thermal Management*, pp. 117-157, New York, Springer, 2016.
- [8] M. Sayyahi, M. Mamourian, M. Ghafari, Experimental investigation of the influence of nanofluid on the heat performance of pulsating heat pipe, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heat and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 162-165, 2016. (in Persian فارسی)
- [9] M. Alisadeghi, J. Fazilati, Optimization of honeycomb impact attenuator using genetic algorithm based on response method and design of experiments; Part I: crashworthiness, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 25-36, 2015. (in Persian فارسی)
- [10] M. Mohammadi, J. Arghavani, One-dimensional modeling and optimization of two-stage light gas launcher with response surface methodology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 129-139, 2016. (in Persian فارسی)
- [11] M. Yari, A.S. Mehr, S.M.S. Mahmoudi, M. Santarelli, A comparative study of two SOFC based cogeneration systems fed by municipal solid waste by means of either the gasifier or digester, *Energy*, Vol. 114, No. 1, pp.586-602, 2016.
- [12] A. Chitsaz, J. Hosseinpour, M. Assadi, Effect of recycling on the thermodynamic and thermoeconomic performances of SOFC based on trigeneration systems; A comparative study, *Energy*, Vol. 124, No. 1, pp.613-624, 2017.
- [13] J. Hosseinpour, M. Sadeghi, A. Chitsaz, F. Ranjbar, M. A. Rosen, Exergy assessment and optimization of a cogeneration system based on a solid oxide fuel cell integrated with a Stirling engine, *Energy Conversion and Management*, Vol. 143, No. 1, pp.448-458, 2017.
- [14] M.A. Farzad, H. Hassanzadeh, Modeling and optimization of a single planar solid oxide fuel cell, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 81-91, 2015. (in Persian فارسی)
- [15] J. Jia, A. Abudula, L. Wei, B. Sun, Y. Shi, Thermodynamic modeling of an integrated biomass gasification and solid oxide fuel cell system, *Renewable Energy*, Vol. 81, No. 1, pp.400-410, 2015.
- [16] L. Fryda, K. D. Panopoulos, J. Karl, E. Kakaras, Exergetic analysis of solid oxide fuel cell and biomass gasification integration with heat pipes, *Energy*, Vol. 33, No. 2, pp.292-299, 2008.
- [17] H. Hassanzadeh, M. H. Sadeghi, A. Rasti, Investigation of microhardness and white layer in milling of hardened steel using response surface methodology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 175-182, 2015. (in Persian فارسی)
- [18] H. Khozaymeh-Nezhad, H. Niazmand, A numerical and entropy analysis of viscous micropump with an elliptic rotor by LBM and micropump optimization by RSM, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 343-354, 2017. (in Persian فارسی)
- [19] M. Zohoor, S. M. Mousavi, Evaluation and optimization of drawing depth in electrohydraulic forming (with bridge wire between electrodes), *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 137-144, 2017. (in Persian فارسی)
- [20] H. Heydari, M. Zolfaghari, N. Asadiipoor, Providing and analytical model and experimental study of the behavior of cortical bone drilling the thrust force, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 175-184, 2017. (in Persian فارسی)
- [21] C. Loha, P. K. Chatterjee, H. Chattopadhyay, Performance of fluidized bed steam gasification of biomass—modeling and experiment, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 3, pp.1583-1588, 2011.
- [22] S. H. Chan, H. K. Ho, Y. Tian, Modelling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant, *Journal of Power Sources*, Vol. 109, No. 1, pp.111-120, 2002.
- [23] C. O. Colpan, I. Dincer, F. Hamdullahpur, Thermodynamic modeling of
- $a$  فاکتور فعالیت اجزا در واکنش الکتروشیمیایی  
 $a_r$  نرخ تبدیل مولی واکنش به‌سازی  
 $A_a$  مساحت سطح فعال پیل سوختی ( $m^2$ )  
 $b_r$  نرخ تبدیل مولی واکنش ارتقای سوخت  
 $c_r$  نرخ تبدیل مولی واکنش الکتروشیمیایی  
 $D$  قطر لوله حرارتی (m)  
 $F$  ثابت فارادی ( $Cg^{-1}mol^{-1}$ )  
 $\bar{G}_i^o$  انرژی آزاد گیبس استاندارد مولی ( $kJkmol^{-1}$ )  
 $\bar{h}$  آنتالپی مولی ( $kJkmol^{-1}$ )  
 $\bar{h}_f^o$  آنتالپی استاندارد تشکیل مولی ( $kJkmol^{-1}$ )  
 $J$  چگالی جریان ( $Am^{-2}$ )  
 $j_{oa}$  چگالی جریان‌تبادل آند ( $Am^{-2}$ )  
 $j_{oc}$  چگالی جریان‌تبادل کاتد ( $Am^{-2}$ )  
 $j_{as}$  چگالی جریان محدود شده در آند ( $Am^{-2}$ )  
 $j_{cs}$  چگالی جریان محدود شده در کاتد ( $Am^{-2}$ )  
 $K$  ثابت تعادل  
 $L$  ضخامت اجزای پیل ( $\mu m$ )  
 $m$  میزان بخار آب ورودی (mol)  
 $n_i$  ضرایب استوکیومتری اجزا (mol)  
 $N_{FC}$  تعداد سلول  
 $P$  فشار (kPa)  
 $\dot{Q}_{in}$  نرخ گرمای لازم برای گازسازی (kW)  
 $R_c$  مقاومت تماسی ( $\Omega m^2$ )  
 $R_i$  مقاومت‌های حرارتی ( $kWK^{-1}$ )  
 $\bar{R}$  ثابت جهانی گاز ( $Jmol^{-1}K^{-1}$ )  
 $STBR$  نسبت بخار به زیست توده  
 $T$  دما ( $^{\circ}C$ )  
 $U_f$  ضریب مصرف سوخت  
 $V$  ولتاژ (V)  
 $w$  رطوبت زیست توده (mol)  
 $\dot{W}$  نرخ توان الکتریکی (kW)
- علائم یونانی  
 $\rho$  مقاومت الکتریکی ( $\Omega m^2$ )  
 $\eta$  بازده (%)
- زیرنویس‌ها  
 $0$  حالت محیط  
act فعال‌سازی  
 $C$  سلول  
conc غلظتی  
 $e$  خروجی  
 $FC$  پیل سوختی  
 $g$  گازساز  
 $i$  ورودی

- [29] S. H. Chan, C. F. Low, O. L. Ding, Energy and exergy analysis of simple solid-oxide fuel-cell power systems, *Journal of Power Sources*, Vol. 103, No. 2, pp.188-200, 2002.
- [30] A. V. Akkaya, Electrochemical model for performance analysis of a tubular SOFC, *International Journal of Energy Research*, Vol. 31, No. 1, pp.79-98, 2007.
- [31] S. H. Chan, K. A. Khor, Z. T. Xia, A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness, *Journal of Power Sources*, Vol. 93, No. 1, pp.130-140, 2001.
- [32] N. Perdikaris, K. D. Panopoulos, L. Fryda, E. Kakaras, Design and optimization of carbon-free power generation based on coal hydrogasification integrated with SOFC, *Fuel*, Vol. 88, No. 8, pp.1365-1375, 2009.
- [33] C. Loha, H. Chattopadhyay, P. K. Chatterjee, Thermodynamic analysis of hydrogen rich synthetic gas generation from fluidized bed gasification of rice husk, *Energy*, Vol. 36, No. 7, pp.4063-4071, 2011.
- [34] G. Tao, T. Armstrong, A. Virkar, Intermediate temperature solid oxide fuel cell (IT-SOFC) research and development activities at MSRI, *Nineteenth Annual ACERC&ICES Conference*, Utah, United States, February 17, 2005.
- direct internal reforming solid oxide fuel cells operating with syngas, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 7, pp.787-795, 2007.
- [24] U. G. Bossel, *Final Report on SOFC Data Facts and Figures*, Swiss Federal Office of Energy, Berne, pp. 1-10, 1992.
- [25] F. Ranjbar, A. Chitsaz, S. M. S. Mahmoudi, S. Khalilarya, M. A. Rosen, Energy and exergy assessments of a novel trigeneration system based on a solid oxide fuel cell, *Energy Conversion and Management*, Vol. 87, No. 1, pp.318-327, 2014.
- [26] J. W. Kim, A. V. Virkar, K. Z. Fung, K. Mehta, S. C. Singhal, Polarization effects in intermediate temperature, anode-supported solid oxide fuel cells, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 146, No. 1, pp.69-78, 1999.
- [27] C. O. Colpan, F. Hamdullahpur, I. Dincer, Y. Yoo, Effect of gasification agent on the performance of solid oxide fuel cell and biomass gasification systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 10, pp.5001-5009, 2010.
- [28] S. Campanari, P. Iora, Definition and sensitivity analysis of a finite volume SOFC model for a tubular cell geometry, *Journal of Power Sources*, Vol. 132, No. 1, pp.113-126, 2004.

Archive of SID