

# مدل سازی ترمو اکونومیکی و تحلیل پارامتری چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد تحت فشار / توربین گازی

قاسم عرب\*<sup>+</sup>

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده محیط زیست و انرژی

حسین قدمیان

کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده انرژی

**چکیده:** در این پژوهش با رویکرد توسعه پایدار، تحلیل ترمو اکونومیکی چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد تحت فشار / توربین گازی انجام شده است. در ابتدا با معرفی چرخه پیشنهادی و ارایه متدولوژی مدل سازی، شبیه سازی چرخه با توسعه یک مدل ترمودینامیکی و با استفاده از کدنویسی در محیط نرم افزار EES صورت گرفته و معادله های موازنه جرمی، انرژی و الکتروشیمی به صورت هم زمان حل شده اند. با معرفی شاخص های بازده الکتریکی و کل سامانه، تحلیل ترمودینامیکی چرخه انجام شده و در ادامه، با ارایه مدل اقتصادی و بر مبنای محاسبه های دینامیکی، تحلیل های اقتصادی بر روی این چرخه انجام شده است. همچنین تحلیلی پارامتری برای بررسی مهمترین پارامترهای تأثیر گذار بر خروجی های فنی و اقتصادی سامانه انجام شده است. نتیجه های پژوهش، دستیابی به بازدهی الکتریکی ۶۳/۵۱٪ و بازده کل ۷۷/۶۵٪ را در در توان الکتریکی خالص خروجی ۱۹۶۲ کیلووات، توان گرمایی ۴۳۶/۸ کیلووات و نسبت گرما به توان ۲۲/۲۷٪ نشان می دهد. این چرخه با تولید ۳۱۰/۹۰ گرم بر کیلووات ساعت کربن دی اکسید، کاهش ۳۰/۳٪ را در مقایسه با نیروگاه های معمول چرخه ترکیبی گازی نشان می دهد.

**واژه های کلیدی:** پیل سوختی اکسید جامد تحت فشار / توربین گازی، تحلیل پارامتری، ترمو اکونومیک، انرژی تجدید پذیر.

**KEY WORDS:** PSOFC/GT, Parametric study, Thermo economic, Renewable energy.

## مقدمه

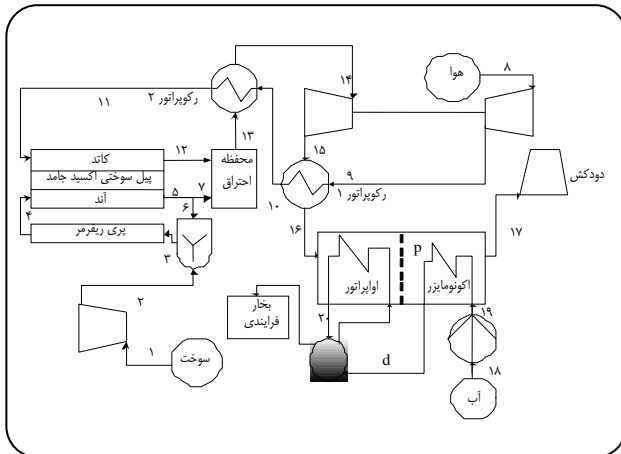
پیامدهای استفاده از فناوری های مرسوم تولید برق، آلودگی های زیست محیطی می باشد. تلاش دانشمندان و پژوهشگران جهان برای دستیابی به فناوری های تمیز و با بازده بالای تولید برق منجر به معرفی و توسعه فناوری هایی مانند چرخه هیبریدی پیل سوختی

بر اساس آخرین آمار ارایه شده توسط آژانس بین المللی انرژی<sup>(۱)</sup>، تولید برق در جهان در سال ۲۰۰۹ میلادی برابر ۲۰۰۵۵ تراوات ساعت بوده است که بیشتر این برق توسط نیروگاه های با سوخت زغال سنگ، گاز طبیعی و انرژی هسته ای تأمین شده است [۱]. یکی از مهمترین

\*عهد دار مکاتبات

+E-mail: gh\_arab@srbiau.ac.ir

(۱) International Energy Agency (IEA)



شکل ۱- شمای چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد تحت فشار/ توربین گازی مورد بررسی.

نتیجه‌های این پژوهش نشانگر بالا بودن کارایی سامانه هیبریدی مستقیم در مقایسه با نوع غیرمستقیم می‌باشد. پژوهش‌های انجام شده به طور عمده به مباحث عملکرد چیدمان‌های گوناگون از این سیکل هیبریدی توجه داشته و بررسی جنبه‌های اقتصادی و فنی این سامانه به صورت همزمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، در این پژوهش، مدل‌سازی یک چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد تحت فشار/ توربین گازی با استفاده از کد نویسی در محیط نرم‌افزار EES صورت گرفته و معادله‌های موازنه جرم، انرژی و الکتروشیمی به صورت همزمان حل شده‌اند. پس از اعتبارسنجی مدل و صحت‌سنجی نتیجه‌ها، محاسبه‌های اقتصادی بر مبنای روش اقتصادی دینامیکی انجام شده و در انتها تحلیلی پارامتریک جهت بررسی مهمترین پارامترهای تأثیرگذار فنی و اقتصادی بر این سامانه انجام شده است.

### معرفی ساختار مورد بررسی

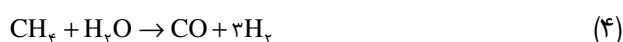
چرخه مورد بررسی پیل سوختی اکسید جامد تحت فشار/ توربین گازی در شکل ۱ ارائه شده است. این چرخه شامل یک استک پیل سوختی اکسید جامد تحت فشار با ریفرمر داخلی، توربین گازی رکوپراتور دار و یک مولد بخار بازیافتی برای تولید بخار می‌باشد. سوخت از نقطه (۱) وارد کمپرسور سوخت شده و سپس با سوخت برگشتی از آند مخلوط، وارد پری‌ریفرمر شده و به آند پیل سوختی وارد می‌شود. هوا از نقطه (۸) وارد چرخه شده و پس از فشرده‌سازی در کمپرسور، پس از دو مرحله گرمایش در رکوپراتورها، وارد کاتد پیل سوختی می‌شود. بخشی از گاز رقیق شده

اکسید جامد/ توربین گازی شده است. استفاده از برتری‌های پیل سوختی اکسید جامد مانند بازدهی الکتریکی بالا، دانسیته توان بالا، آلاینده‌های کم و همچنین توانایی استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوخت [۲]، در کنار فناوری بالغ و تجاری توربین گازی، منجر به توسعه فناوری نیروگاهی با بازده الکتریکی بالا و توجیه اقتصادی مناسب شده است.

مروری بر پژوهش‌های مربوط به این حوزه نشان می‌دهد مطالعه‌ها و مدل‌سازی این سامانه هیبریدی با اهداف گوناگونی مانند انجام تحلیل‌های ساختاری و پارامتری صورت گرفته و انجام مطالعه‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و تحلیل‌های پارامتری در این حوزه همچنان ادامه دارد [۳ - ۶]. با استفاده از یک مولد بخار بازیافتی در پایین دست این چرخه، می‌توان به بازده کلی بالایی دست یافت [۷]. مدل‌سازی پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای برای سامانه‌های ترکیبی گرما و الکترسیسته با هدف ارزیابی عملکرد این پیل سوختی در سامانه‌های ترکیبی گرما و الکترسیسته در [۸] انجام شده است. این مدل شامل تحلیل جرمی، ممنتوم، گرمایی و الکتروشیمیایی به همراه مدل‌های سینتیک واکنش‌های هیدروکربن بوده و مدل الکتروشیمیایی، ارزیابی کامل هر سه تلفات اهمی، فعال‌سازی و غلظت را شامل می‌شود. عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای در ساختار تقویت شده آندی با استفاده از یک مدل عددی در [۹] مورد بررسی قرار گرفته و نتیجه‌های به دست آمده نشان می‌دهد که به ترتیب تلفات فعال‌سازی کاتد، آند و اهمی نقش‌های مهمی در کاهش ولتاژ مدار باز سلول دارند. بهینه‌سازی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی سامانه هیبرید پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گاز در بار کامل به منظور تولید توزیع شده انرژی الکتریکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در [۱۰] ارائه شده است. نتیجه‌های این پژوهش نشان می‌دهد که حساس‌ترین و مهم‌ترین پارامتر طراحی سامانه، چگالی جریان پیل سوختی است و انتخاب دقیق مقدار آن سهم مهمی در توازن میان کارایی و هزینه سامانه دارد. تحلیل عملکرد ترمودینامیکی یک چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی در یک سامانه تولید همزمان در [۱۱] انجام شده است. نتیجه‌های به دست آمده از این پژوهش نشانگر افزایش بازده سامانه هیبریدی در اثر افزایش دما و فشار کاری پیل (تا حدود ۸۰ درصد) است. مقایسه عملکرد سامانه‌های هیبریدی مستقیم و غیرمستقیم توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد از دیدگاه ترمودینامیکی و انرژی در [۱۲] ارائه شده است.

میکسر، پری ریفورمر، اجکتور، استک پیل سوختی اکسید جامد و اینورتور جریان مستقیم - متناوب می باشد که ویژگی های طراحی مورد استفاده آن بر اساس نمونه ساخته شده در مرجع [۱۳] است. از متان به عنوان سوخت ورودی استفاده شده است. سوخت ورودی پس از ورود در کمپرسور سوخت (جریان ۱)، وارد میکسر شده و با سوخت رقیق شده خروجی از آند (جریان ۶) مخلوط می شود. سوخت خروجی از آند دارای بخار و گرمای زیادی برای انجام فرایند به سازی بخار<sup>(۱)</sup> است بنابراین بخشی از آن با یک اجکتور برگشت داده شده و به سوخت ورودی اضافه می شود. مقدار سوخت رقیق شده برگشت داده شده را می توان از معادله (۳) و بر اساس نسبت بخار به کربن به دست آورد. به منظور عملکرد مناسب سامانه پری ریفورمر، این نسبت به طور معمول بین ۲ تا ۳ می باشد. سوخت خروجی از میکسر (جریان ۳) وارد پری ریفورمر شده و در آن واکنش های به سازی بخار و دگرگونی آب - گاز<sup>(۲)</sup> بر اساس معادله های (۴) و (۵) به صورت هم زمان رخ می دهند. در اثر این واکنش ها بخشی از متان ورودی و کربن منواکسید به هیدروژن تبدیل می شوند. دمای تعادل برابر دمای خروجی از پری ریفورمر در نظر گرفته می شود. مقدار متان به سازی شده و کربن منوکسید دگرگون شده و ترکیب مخلوط خروجی با استفاده از رابطه های ثابت های تعادلی (رابطه های (۶) و (۷)) به دست می آیند. گازهای خروجی از پری ریفورمر وارد پیل سوختی دارای ریفورمر داخلی شده و در آنجا افزون بر واکنش های آرایه شده در معادله های (۶) و (۷)، واکنش الکتروشیمی بر اساس معادله (۸) اتفاق می افتد. فرض می شود کل متان ورودی در پیل سوختی اکسید جامد به سازی شده و گازهای خروجی، متان ندارند. فرایند دگرگونی در تعادل شیمیایی رخ می دهد. میزان هیدروژن مصرفی بر اساس معادله (۹) به دست می آید.

$$SCR = \frac{\dot{n}_{\tau, H_2O}}{\dot{n}_{\tau, CH_4}} \quad (3)$$



$$K_{P_r} = \frac{P_{H_2}^2 P_{CO}}{P_{CH_4} P_{H_2O}} \quad (6)$$

$$K_{P_r} = \frac{P_{H_2} P_{CO_2}}{P_{CO} P_{H_2O}} \quad (7)$$

خروجی از آند با هوای رقیق شده خروجی از کاند در محفظه احتراق، سوخته و گازهای خروجی پس از عبور از رکوپراتور وارد توربین گاز می شوند. گازهای خروجی از رکوپراتور ۱ (نقطه ۱۶) دارای دمای بالایی بوده و بنابراین جهت تکمیل بخش بازیافت گرما وارد یک مولد بخار بازیافتی شده و بخار آب تولید می کند که می تواند برای مصرف های گوناگون فرایندی یا گرمایش فضا مورد استفاده قرار گیرد.

### متدولوژی مدل سازی ترمودینامیکی

شمای چرخه مورد بررسی در شکل ۱ آرایه شده است. در پیل سوختی اکسید جامد، انرژی شیمیایی سوخت به واسطه واکنش های الکتروشیمیایی به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل شده و در مولد بخار بازیافتی با استفاده از گرمای موجود در گازهای خروجی از محفظه احتراق، بخار اشباع تولید می شود. یک مدل ترمودینامیکی جریان پایدار با استفاده از معادله های موازنه جرم و انرژی برای شبیه سازی سامانه توسعه داده شده است. مدل محاسباتی توسعه داده شده مقادیرهای شدت جریان و جزء مولی تمامی جریان ها به همراه ویژگی های فیزیکی آنها مانند آنتالپی، دما و فشار را می دهد. شرایط خروجی از یک تجهیز در این سامانه پیوسته به عنوان شرایط ورودی به تجهیز بعدی در نظر گرفته می شود. فرضیه های توسعه مدل به صورت زیر خلاصه شده اند.

۱- ویژگی های سامانه در حجم کنترل ثابت هستند.

۲- تجهیزها در شرایط جریان پایدار کار می کنند.

۳- فرض می شود تمامی مخلوط های گازی در حالت گاز ایده آل قرار دارند.

۴- فرض می شود واکنش های شیمیایی به تعادل می رسند.

کلیه روابط مورد نیاز جهت مدل سازی ترمودینامیکی سامانه در ادامه آرایه شده اند. معادله های موازنه جرم و انرژی در هر تجهیز به ترتیب بر اساس معادله های کلی (۱) و (۲) به دست می آیند.

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

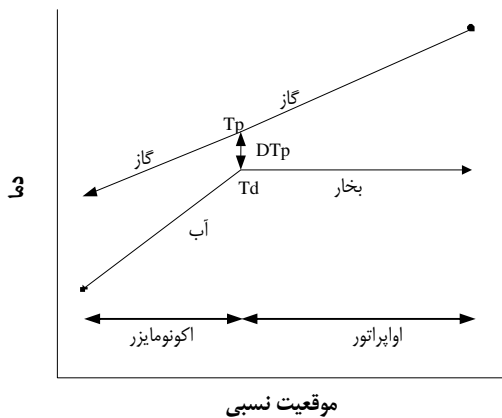
$$\sum \dot{Q}_{in} + \sum \dot{W}_{in} + \sum \dot{n}_{in} h_{in} = \sum \dot{Q}_{out} + \sum \dot{W}_{out} + \sum \dot{n}_{out} h_{out} \quad (2)$$

### مدل پیل سوختی اکسید جامد

بخش پیل سوختی اکسید جامد شامل کمپرسور سوخت،

(۱) Steam Reforming

(۲) Shifting



شکل ۲- دیاگرام جریانی مولد بخار بازیافتی.

قابل تعمیر برای سایر رکوپراتورها نیز می‌باشد. با توجه به این معادله و مشخص بودن مقدار ضریب تأثیر رکوپراتور دمای خروجی جریان سرد در رکوپراتور به دست آمده و دمای خروجی جریان گرم نیز با استفاده از موازنه انرژی در رکوپراتور به دست می‌آید.

$$P_q = P_{\lambda} * RP_{ca} \quad (14)$$

$$\eta_{is,ca} = \frac{h_{q, is} - h_{\lambda}}{h_q - h_{\lambda}} \quad (15)$$

$$P_{14} = P_{15} * RP_t \quad (16)$$

$$\eta_{is,t} = \frac{h_{14} - h_{15}}{h_{14} - h_{15, is}} \quad (17)$$

$$\dot{W}_{GT} = \dot{W}_t * \eta_m * \eta_g - \dot{W}_{ca} \quad (18)$$

$$\varepsilon_{rec1} = \frac{T_{10} - T_q}{T_{15} - T_q} \quad (19)$$

### مدل مولد بخار بازیافتی

جریان گازهای خروجی از رکوپراتور دارای کیفیتی هستند که بتوانند بخار اشباع تولید نمایند. همانند شکل ۲، مولد بخار بازیافتی از دو بخش اکونومایزر و اوپراتور تشکیل شده است. آب تا حد فشار مورد نیاز سامانه مولد بخار بازیافتی در پمپ فشرده شده و توسط جریان گازهای گرم تا دمای اشباع ( $T_d$ ) در اکونومایزر گرم می‌شود. سپس وارد بخش اوپراتور شده و بخار اشباع تولید می‌شود.  $DT_p$  اختلاف دما کمینه بین دمای گازهای گرم و دمای نقطه اشباع آب در نقطه پینچ است که بر اساس معادله (۲۰)



$$U_f = \frac{\dot{n}}{4 \dot{n}_{r, CH_4}} \quad (9)$$

### مدل الکتروشیمی

ولتاژ سلول پیل سوختی بر اساس معادله (۱۰) به دست می‌آید که در آن  $E_{re}$  ولتاژ برگشت‌پذیر پیل سوختی بوده و بر اساس معادله نرنست (معادله (۱۱)) به دست می‌آید.  $V_{act}$  بیانگر افت ولتاژ فعال‌سازی بوده و مقدار بر اساس معادله باتلر-ولمر به دست می‌آید.  $V_{ohm}$  افت ولتاژ اهمیک بوده و مجموع افت ولتاژهای اهمی در آند، کاتد، الکتروود و متصل کننده داخلی می‌باشد که مقاومت ویژه هر یک بر اساس معادله‌ای وابسته به دما محاسبه می‌شود.  $V_{con}$  افت ولتاژ غلظت می‌باشد. چگونگی محاسبه این افت ولتاژها در [۱۳] ارایه شده است. در پایان مقدار توان مستقیم و توان متناوب خروجی پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از معادله‌های (۱۲) و (۱۳) به دست می‌آیند.

$$V = E_{re} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (10)$$

$$E_{re} = -\frac{\Delta G}{n_e F} - \frac{\Delta G}{n_e F} = -\frac{\Delta G}{n_e F} + \frac{R_u T}{n_e F} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}}\right) \quad (11)$$

$$P_{SOFC} = \frac{N_{cell} V_i A_{act}}{1000} \quad (12)$$

$$\dot{W}_{SOFC} = \eta_{inv} * P_{SOFC} \quad (13)$$

### مدل توربین گازی

با توجه به فشار کاری پیل سوختی اکسید جامد، هوای ورودی به پیل سوختی قبل از ورود، در کمپرسور فشرده می‌شود. کمپرسورهای سامانه با استفاده از رابطه‌های نسبت فشار و بازده ایزنتروپیک کمپرسور مدل‌سازی می‌شوند. معادله‌های (۱۴) و (۱۵) برای کمپرسور هوا ارایه شده و قابل تعمیر برای کمپرسور سوخت نیز می‌باشد. مدل‌سازی توربین نیز بر اساس معادله‌های نسبت فشار (۱۶) و بازده ایزنتروپیک (۱۷) توربین صورت می‌گیرد. با توجه به بازده سامانه کوپلینگ مکانیکی و بازده ژنراتور، توان خروجی از توربین گاز بر اساس معادله (۱۸) محاسبه می‌شود. برای رکوپراتورها نیز از مدل میانگین ضریب تأثیر رکوپراتور ( $\varepsilon_{rec}$ ) استفاده می‌شود. معادله (۱۹) برای رکوپراتور (۱) ارایه شده و

جدول ۱- رابطه های مدل اقتصادی.

شماره رابطه	رابطه اقتصادی
(۲۵)	$C_{SOFC} = A_{act} N_{cell} (2.96 T_{SOFC} - 19.07)$
(۲۶)	$C_{inv} = 1.5 \left( \frac{\dot{W}_{SOFC}}{500} \right)^{0.7}$
(۲۷)	$C_{GT} = \dot{W}_{GT} (1318.5 - 98.328 \ln(\dot{W}_{GT}))$
(۲۸)	$C_{Compressor} = 91562 \left( \frac{\dot{W}_{compressor}}{445} \right)^{0.67}$
(۲۹)	$C_{P,R} = 130 \left( \frac{A_{P,R}}{0.093} \right)^{0.78} + 3240 V_{P,R} + 21280.5 V_{P,R}$
(۳۰)	$C_{aux} = 0.1 C_{SOFC}$
(۳۱)	$C_{HRSG} = 8600 + 670 (A_{HRSG})^{0.83}$
(۳۲)	$C_{recuperator} = 130 \left( \frac{A_{recuperator}}{0.093} \right)^{0.78}$

## نتیجه ها و بحث

### نتیجه های مدل سازی

پارامترهای ورودی برای مدل سازی سامانه در جدول ۲ و نتیجه های به دست آمده از شبیه سازی در نقاط گوناگون چرخه در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول ویژگی های فیزیکی مانند دما، فشار، شدت جریان جرمی و درصد ضریب های مولی برای تمامی جریان ها ارائه شده است. سایر ویژگی های کلیدی چرخه و محاسبه های اقتصادی در جدول ۴ ارائه شده اند. مقایسه نتیجه های به دست آمده از شبیه سازی سامانه پایه پیل سوختی اکسید جامد با نتیجه های منتشر شده در مقاله ها در مورد چرخه ارائه شده در [۱۶] نشان می دهد نتیجه های به دست آمده با دقت بسیار مناسبی با نتیجه های تجربی مطابقت دارند.

میزان انتشار آلاینده کربن دی اکسید در این سیکل برابر  $310/9 \text{ g/kWh}$  در نقطه طراحی می باشد که در مقایسه با چرخه های ترکیبی گازسوز مرسوم تولید توان که  $446 \text{ g/kWh}$  کربن دی اکسید [۱۷] تولید می کنند میزان  $30/3\%$  کاهش را نشان می دهد.

مورد استفاده قرار می گیرد. مقدار شدت جریان بخار تولید شده و شرایط خروجی از مولد بخار بازیافتی با استفاده از رابطه های موازنه انرژی در بخش های اکونومایزر و اواپراتور به دست می آیند. در این مرحله مقدار شدت جریان بخار تولید شده با استفاده از موازنه انرژی در بخش اواپراتور و بر اساس معادله ی (۲۱) به دست می آید که در آن  $h_{d,w}$  نشان دهنده آنتالپی آب اشباع در ورودی اواپراتور می باشد. با استفاده از معادله موازنه انرژی (۲۲) در بخش اکونومایزر،  $h_{17}$  و  $T_{17}$  به دست می آیند.

همچنین بازده الکتریکی و کلی سایت بر اساس ارزش گرمایی پایین سوخت (LHV) با استفاده از معادله های (۲۳) و (۲۴) به دست می آید.

$$T_p = T_d + DT_p \quad (20)$$

$$\dot{n}_{16} h_{16} + \dot{n}_{d,w} h_{d,w} - \dot{n}_2 h_2 - \dot{n}_p h_p = 0 \quad (21)$$

$$\dot{n}_{19} h_{19} + \dot{n}_p h_p - \dot{n}_{17} h_{17} - \dot{n}_{d,w} h_{d,w} = 0 \quad (22)$$

$$\eta_{ele} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{n}_{CH_4} LHV} \quad (23)$$

$$\eta_{Overall} = \frac{\dot{W}_{net,out} + \dot{Q}_{HRSG}}{\dot{n}_{CH_4} * LHV} \quad (24)$$

### مدل اقتصادی

برای انجام تحلیل های اقتصادی از مدلی دینامیکی وابسته به نرخ بهره و تابع های هزینه تجهیزها استفاده شده است. تجهیزهای مورد استفاده در این چرخه عبارتند از: استک پیل سوختی، اینورتور، توربین گازی، کمپرسورهای هوا و سوخت، رکوپراتور، پری ریفورمر، تجهیزهای جانبی پیل سوختی و مولد بخار بازیافتی. تابع های هزینه سرمایه گذاری این تجهیزهای (رابطه های (۲۵) تا (۳۲)) در جدول ۱ ارائه شده اند [۱۴، ۱۵]. مجموع هزینه های سرمایه گذاری شامل هزینه های خرید تجهیزات، هزینه های مستقیم و غیرمستقیم و پیش بینی نشده به عنوان هزینه سرمایه ای و هزینه های انرژی و سایر هزینه های عملکردی به عنوان هزینه عملیاتی در نظر گرفته شده و در سمت معادله های هزینه ای وارد می شوند. میزان درآمد سالانه این سامانه شامل درآمد به دست آمده از فروش برق و جایگزینی سوخت مورد نیاز تامین بخار اشباع با بویلر با بازدهی  $85\%$  می باشد.

## انجام تحلیل پارامتری

در این بخش با بهره‌گیری از ویژگی‌های چرخه مورد مطالعه، پارامترهای مؤثر بر ویژگی‌های عملکردی برای شناسایی تغییرها در شرایط عملکردی چرخه بررسی شده و تحلیل می‌شوند. در بررسی تأثیر هر پارامتر در شرایط عملکردی، فرض می‌شود سایر ویژگی‌ها ثابت می‌مانند.

نمودار تغییرهای توان‌های خروجی سامانه و نسبت گرما به توان<sup>(۱)</sup>، نسبت به تغییر در پارامتر  $U_f$  در شکل ۳ ارائه شده است. با افزایش  $U_f$ ، مقدار سوخت مصرف شده در فرایند الکتروشیمی در پیل سوختی افزایش یافته و در نتیجه توان خروجی پیل سوختی اکسید جامد افزایش می‌یابد. با افزایش مصرف سوخت در پیل، سوخت در دسترس برای احتراق در توربین گازی کاهش یافته و در نتیجه توان توربین گاز و توان مولد بخار بازیافتی کاهش یافته و نسبت گرما به توان نیز کاهش می‌یابد. با توجه به افزایش بیشتر توان خروجی در پیل سوختی اکسید جامد نسبت به کاهش توان در توربین گازی، توان خالص خروجی کمی افزایش می‌یابد. در نتیجه این تغییر توان‌ها، همان‌گونه که در شکل ۴ ارائه شده است بازده الکتریکی سامانه افزایش و بازده کلی سامانه کمی کاهش می‌یابد. میزان ولتاژ خروجی سلول با افزایش  $U_f$ ، کمی کاهش می‌یابد که به دلیل افزایش افت ولتاژهای غلظت و اهمی در  $U_f$ ‌های بالا می‌باشد.

## انجام آنالیز حساسیت اقتصادی

یکی از مهمترین ویژگی‌های پارامترهای اقتصادی، عدم قطعیت آن‌ها می‌باشد. در نتیجه برای بررسی میزان تأثیرگذاری تغییر در پارامترهای اقتصادی بر ویژگی‌های اقتصادی سامانه، آنالیز حساسیت انجام شده است. دامنه تغییرهای پارامترها شامل  $\pm 10\%$  در مقدارهای پیش‌فرض می‌باشد. دو پارامتر مهم اقتصادی سامانه شامل نرخ بازگشت سرمایه داخلی به عنوان شاخصی از میزان جذابیت اقتصادی سامانه و هزینه تمام شده برق، به عنوان شاخصی از رقابت‌پذیری سامانه با سایر سامانه‌های معمول، مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نمودار تغییرهای هزینه تمام شده برق تولیدی نسبت به تغییرها در هزینه خرید تجهیزات، قیمت فروش برق و قیمت سوخت در نمودار شکل ۵ ارائه شده‌اند. همچنین نمودار تغییرهای نرخ بازگشت سرمایه داخلی نسبت به تغییرها در هزینه خرید تجهیزات، قیمت فروش برق و قیمت سوخت در شکل ۶ ارائه شده است.

## جدول ۲- داده‌های ورودی به مدل.

پارامتر	مقدار
ضریب کاربرد سوخت $(U_f)$ (%)	۸۵
افت فشار پیل سوختی (%)	۲
تعداد سلول‌ها	۹۴۵۶
مساحت هر سلول ( $m^2$ )	۰/۰۸۳۴
بازده ایزنتروپیک کمپرسور هوا (%)	۷۸
شدت جریان محدود کننده ( $A/m^2$ )	۷۵۰۰
افت فشار رکوپراتور (%)	۲
ضریب تأثیر رکوپراتور (%)	۸۰
بازده تبدیل اینورتور (%)	۹۴
نسبت بخار به کربن (SCR)	۳
مینیمم اختلاف دما $(DT_p)$ (K)	۲۰
افت فشار در مولد بخار بازیافتی (%)	۵
فشار بخار (bar)	۸
دمای مرجع (K)	۲۹۸/۱۵
فشار مرجع (bar)	۱/۰۱۳
نرخ بهره (%)	۱۲
قیمت سوخت $(S/kg, \text{methane})$	۰/۴۵۷
تعداد ساعت کارکرد سالیانه (h)	۸۷۶۰
طول عمر (yr) (nl)	۱۰
قیمت فروش برق $(S/kWh)$	۰/۱۱۸
بازده بویلر (%)	۸۵

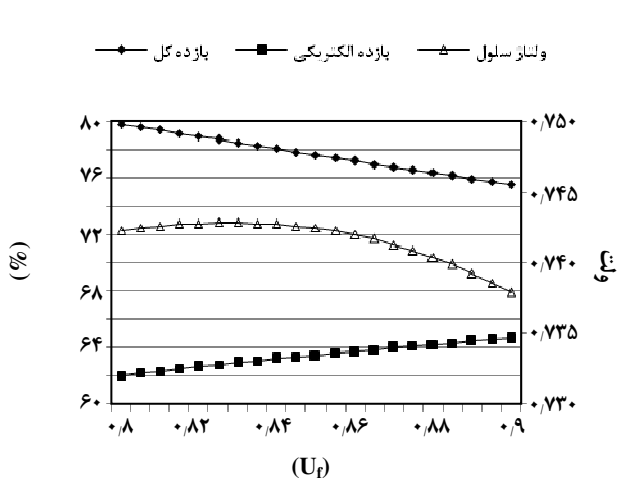
(۱) Heat to power ratio

جدول ۳- نتیجه‌های مدل‌سازی در نقاط گوناگون سیکل.

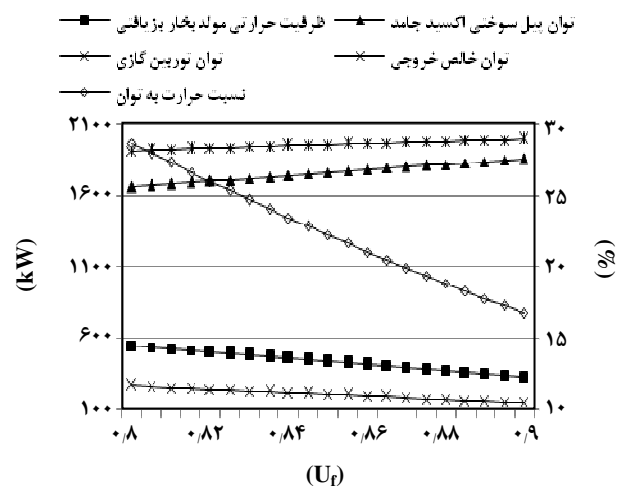
جریان	دما (کلوین)	فشار (بار)	شدت جریان جرمی (گرم بر ثانیه)	جزء مولی (%)						
				CH <sub>۴</sub>	CO	CO <sub>۲</sub>	H <sub>۲</sub>	H <sub>۲</sub> O	N <sub>۲</sub>	O <sub>۲</sub>
۱	۲۹۸٫۲	۱٫۰۱	۶۱٫۶	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۳۹۰	۲٫۹۴	۱۶٫۶	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۹۸۷٫۷	۲٫۸۸	۵۶۸٫۴۴	۱۵٫۱۳	۵٫۷۸	۲۲٫۵۱	۱۱٫۱۹	۴۵٫۳۹	۰	۰
۴	۸۵۰	۲٫۸۸	۵۶۸٫۴۴	۸٫۲	۹٫۸۵	۲۰٫۷۵	۲۶٫۶	۳۴٫۶	۰	۰
۵	۱۱۲۸٫۳	۲٫۷۶	۷۷۷٫۸۸	۰	۶٫۸۱	۲۶٫۵۲	۱۳٫۱۹	۵۳٫۴۸	۰	۰
۶	۱۱۲۸٫۳	۲٫۷۶	۵۰۶٫۸۴	۰	۶٫۸۱	۲۶٫۵۲	۱۳٫۱۹	۵۳٫۴۸	۰	۰
۷	۱۱۲۸٫۳	۲٫۷۶	۲۷۱٫۰۴	۰	۶٫۸۱	۲۶٫۵۲	۱۳٫۱۹	۵۳٫۴۸	۰	۰
۸	۲۹۸٫۲	۱٫۰۱	۳۵۹۵٫۳۹	۰	۰	۰	۰	۰	۷۹	۲۱
۹	۴۳۳	۲٫۹۴	۳۵۹۵٫۳۹	۰	۰	۰	۰	۰	۷۹	۲۱
۱۰	۷۸۹٫۷	۲٫۸۸	۳۵۹۵٫۳۹	۰	۰	۰	۰	۰	۷۹	۲۱
۱۱	۱۰۲۳	۲٫۸۸	۳۵۹۵٫۳۹	۰	۰	۰	۰	۰	۷۹	۲۱
۱۲	۱۱۲۸٫۳	۲٫۷۶	۳۳۸۵٫۹۵	۰	۰	۰	۰	۰	۸۳٫۳۸	۱۶٫۶۲
۱۳	۱۲۵۸٫۳	۲٫۷۱	۳۶۵۶٫۹۹	۰	۰	۳	۰	۵٫۹۹	۷۶٫۶۳	۱۴٫۳۸
۱۴	۱۰۴۷٫۸	۲٫۶۶	۳۶۵۶٫۹۹	۰	۰	۳	۰	۵٫۹۹	۷۶٫۶۳	۱۴٫۳۸
۱۵	۸۷۸٫۹	۱٫۰۹	۳۶۵۶٫۹۹	۰	۰	۳	۰	۵٫۹۹	۷۶٫۶۳	۱۴٫۳۸
۱۶	۵۴۸٫۷	۱٫۰۷	۳۶۵۶٫۹۹	۰	۰	۳	۰	۵٫۹۹	۷۶٫۶۳	۱۴٫۳۸
۱۷	۴۳۷٫۷	۱٫۰۵	۳۶۵۶٫۹۹	۰	۰	۳	۰	۵٫۹۹	۷۶٫۶۳	۱۴٫۳۸
۱۸	۲۹۸٫۲	۱٫۰۱	۱۶۳٫۸۶	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰
۱۹	۲۹۸٫۳	۸	۱۶۳٫۸۶	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰
۲۰	۴۴۳٫۶	۸	۱۶۳٫۸۶	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰

جدول ۴- نتیجه‌های مدل‌سازی ویژگی‌های عملکردی سامانه.

نتیجه‌های فنی و اقتصادی		نتیجه‌های هزینه‌ای	
توان خالص خروجی (kW)	۱۹۶۲	هزینه سرمایه‌ای (\$)	۵۳۴۸۷۸۹
توان جریان متناوب پیل سوختی (kW)	۱۷۶۳	هزینه خرید تجهیزات (\$)	۲۶۲۱۹۵۶
توان توربین گازی (kW)	۲۱۲٫۳	قیمت پیل سوختی	۱۱۲۹۸۷۳
توان توربین (kW)	۷۰۵٫۲	قیمت توربین گازی	۴۷۵۰۲۰
توان کمپرسور هوا (kW)	- ۴۹۲٫۹	قیمت پری ریفرمر	۴۲۷۴۸۵
توان کمپرسور سوخت (kW)	- ۱۲٫۵	قیمت اینورتور	۲۴۱۵۹۳
		تجهیزات جانبی پیل سوختی	۱۶۹۴۸۱
گرمای بازیافتی مولد بخار بازیافتی (kW)	۴۳۶٫۸	هزینه کمپرسور هوا	۹۸۰۴۹
بازده الکتریکی (%)	۶۳٫۵۱	هزینه مولد بخار بازیافتی	۱۹۸۹۸
بازده کل (%)	۷۷٫۶۵	هزینه رکوپراتور ۲	۲۶۵۸۴
ولتاژ سلول (V)	۰٫۷۴۲۵	هزینه رکوپراتور ۱	۲۵۱۷۰
تولید سالیانه برق (TWh)	۱۷٫۱۸	هزینه کمپرسور سوخت	۸۸۰۳
تولید ویژه CO <sub>2</sub> (g/kWh)	۳۱۰٫۹	هزینه‌های مستقیم (\$)	۱۳۱۰۹۷۸
هزینه تمام شده برق تولیدی (cent/kWh)	۱۱٫۶۵	هزینه‌های غیر مستقیم (\$)	۵۲۴۳۹۱
هزینه ویژه توان (\$/kW)	۲۷۲۷	هزینه‌های پیش بینی نشده (\$)	۸۹۱۴۶۴
نرخ بازگشت سرمایه داخلی (%)	۱۴٫۷۱	هزینه عملیاتی (\$)	۱۰۵۴۵۳۸

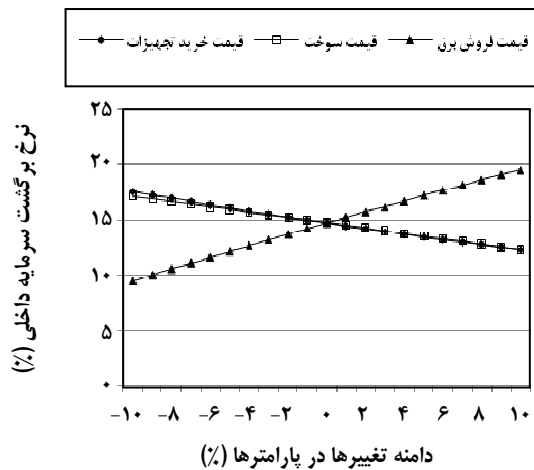


شکل ۴- نمودار تغییرهای بازده الکتریکی، کل و ولتاژ سلول پیل سوختی نسبت به  $U_F$ .



شکل ۳- نمودار تغییرهای توان‌های سامانه و نسبت توان به گرما نسبت به  $U_F$ .





شکل ۶ - نمودار تغییرهای نرخ بازگشت سرمایه داخلی نسبت به تغییر در قیمت خرید تجهیزات، قیمت سوخت و قیمت فروش برق.

۳- بازدهی الکتریکی و بازده کلی بالا (بازده الکتریکی ۶۳/۵۱٪ و بازده کل ۷۷/۶۵٪).

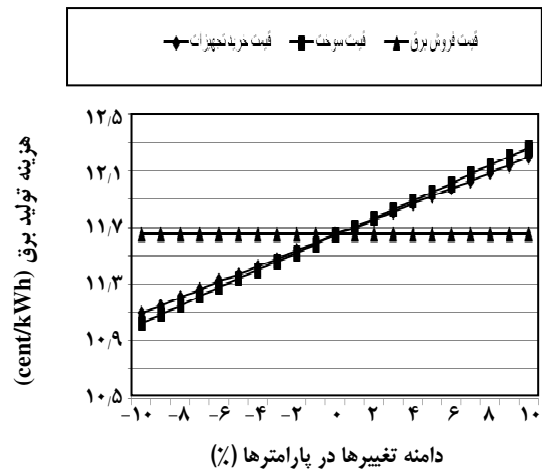
۴- چرخه‌ای با ویژگی‌های گرما و توان متناسب قابل کاربرد در محدوده زیادی از کاربردهای خانگی، تجاری و اداری. (در توان خالص الکتریکی خروجی ۱۹۶۲ kW، توان گرمایی ۴۳۶/۸ kW و نسبت گرما به توان ۲۲/۲۷٪).

۵ - در شرایط کارکردی این چرخه، هزینه ویژه سرمایه‌ای (میزان هزینه سرمایه‌ای به توان خالص خروجی) برابر ۲۷۲۷ \$/kW، قیمت تمام شده برق ۱۱/۶۵ cent/kWh و نرخ بازگشت سرمایه داخلی برابر ۱۴/۷۱٪ به دست آمده است.

فناوری پیل سوختی اکسید جامد/ توربین گازی در مقایسه با سایر فناوری‌های تولید برق، دارای بازده بالا و آلایندگی پایینی است و نتیجه‌ها نشان می‌دهند در صورت جهت‌گیری به سمت کاهش هزینه خرید تجهیزات، کاهش قیمت سوخت مصرفی یا افزایش قیمت خرید برق تولیدی این سامانه‌ها، توجیه اقتصادی این سامانه‌ها افزایش می‌یابد.

### فهرست نمادها

LHV	ارزش گرمایی پایین سوخت، kJ/mol
h	آنتالپی مخصوص، kJ/kmol
inv	اینورتور AC-DC
$\eta_{ele}$	بازده الکتریکی، %
$\eta_{overall}$	بازده کل، %
P.R	پری ریفرمر



شکل ۵ - نمودار تغییرهای هزینه تمام شده برق تولیدی نسبت به تغییر در قیمت خرید تجهیزات، قیمت سوخت و قیمت فروش برق.

افزایش قیمت سوخت و هزینه خرید تجهیزات منجر به افزایش قیمت تمام شده برق تولیدی این سامانه می‌شود به‌خاطر وجود بخش مولد بخار بازیافتی در این سامانه، تأثیر قیمت سوخت با تأثیر قیمت تجهیزات کمی متفاوت است. از سوی دیگر همان‌گونه که از شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است افزایش قیمت فروش برق تأثیر مثبتی بر نرخ بازگشت سرمایه داخلی داشته و افزایش هزینه خرید تجهیزات و افزایش قیمت سوخت منجر به کاهش نرخ بازگشت سرمایه داخلی می‌شود. بر این اساس جهت‌گیری به سمت کاهش هزینه تجهیزات این سامانه، کاهش قیمت سوخت ارایه شده به این سامانه‌ها یا افزایش قیمت خرید برق تولیدی این سامانه‌ها، منجر به افزایش توجیه اقتصادی این سامانه می‌شود.

### نتیجه‌گیری

چرخه‌ای با رویکرد توسعه پایدار تولید توان و گرما ارایه شده و بررسی‌های ترموآکونومیکی بر روی آن انجام شده است. این سامانه از جهت‌های زیر پتانسیل‌های بسیاری برای توسعه در بخش تأمین انرژی و تولید پراکنده دارد:

- ۱- برتری‌های فناوری مانند سر و صدای کم، هزینه تعمیرها و نگهداری پایین، نبود قطعه‌های متحرک در پیل سوختی و ...
- ۲- چرخه‌ای با آلایندگی بسیار پایین در مقایسه با چرخه‌های معمول تولید توان و گرما (این چرخه ۳۱۰/۹ g/kWh کربن دی اکسید تولید می‌کند که در مقایسه با چرخه‌های ترکیبی گاز سوز تولید توان که ۴۴۶ g/kWh کربن دی اکسید تولید می‌کنند، ۳۰/۳٪ کاهش را نشان می‌دهد).

$\dot{Q}$	شدت انتقال گرما، kW	(PSOFC) Pressurized Solid Oxide Fuel Cell	پیل سوختی
$U_f$	ضریب کاربرد سوخت، %		اکسید جامد تحت فشار
$n_l$	طول عمر پروژه، yr	$P_{SOFC}$	توان AC پیل سوختی، kW
$P$	فشار، bar	$\dot{W}_i$	توان الکتریکی تجهیز $i$ ، kW
(HRSRG) Heat Recovery Steam Generator	مولد بخار بازیافتی	Gas Turbine (GT)	توربین گاز
$\epsilon_{rec}$	میانگین ضریب تأثیر رکوپراتور	KP	ثابت تعادل واکنش شیمیایی
$\dot{n}$	میزان هیدروژن مصرف شده در پیل سوختی، mole/s	$y_i$	جزء مولی $i$
IRR	نرخ بازگشت سرمایه داخلی، %	$i$	چگالی جریان، A/m <sup>2</sup>
SCR	نسبت بخار به کربن	$\dot{m}$	شدت جریان جرمی، g/s
$C_i$	هزینه سرمایه ای مربوط به تجهیز $i$ ، \$	$\dot{n}_i$	شدت جریان مولی جریان $i$ ، mole/s
		$T$	دما، K
		$A_{act}$	سطح مؤثر پیل سوختی، m <sup>2</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۶

## مراجع

- [1] Key World Energy Statistics, <http://www.iea.org> (2011).
- [2] Singhal S.C., Advances in Solid Oxide Fuel Cell Technology, *Solid State Ionics*, **135**, p. 305 (2000).
- [3] Calise F., Accadia M.D., Palombo A., Vanoli L., Simulation and Exergy Analysis of a Hybrid Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)–Gas Turbine System, *Energy*, **31**, p. 3278 (2006).
- [4] Chan S.H., Low C.F., Ding O.L., Energy and Exergy Analysis of Simple Solid Oxide Fuel Cell Power Systems, *Journal of Power Sources*, **103**, p. 188 (2002).
- [5] Akkaya A.V., Sahin B., Erdem H.H., Exergetic Performance Coefficient Analysis of a Simple Fuel Cell System, *International Journal of Hydrogen Energy*, **32**, p. 4600 (2007).
- [6] Haseli Y., Dincer I., Naterer G.F., Thermodynamic Modeling of a Gas Turbine Cycle Combined with a Solid Oxide Fuel Cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, **33**, p. 5811 (2008).
- [7] Palsson J., Selimovic A., Sjunnesson L., Combined Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Systems for Efficient Power and Heat Generation, *Journal of Power Sources* **86**, p. 442 (2000).
- [8] کاظم پور، پژمان؛ امی، فتحا..؛ مدل سازی پیل سوختی اکسید جامد صفحه ای برای سیستم های ترکیبی گرما و الکتریسیته، نشریه علمی - پژوهشی سوخت و احتراق، شماره ۱ (۱۳۸۸).
- [9] کاظم پور، پژمان؛ امی، فتحا..؛ بررسی عملکرد پیل سوختی اکسید جامد صفحه ای در ساختار تقویت شده آندی همراه با تبدیل داخلی سوخت، مجله مکانیک هوافضا (انتقال حرارت و پیشرانش)، (۲) ۶، ص. ۱۱ (۱۳۸۹).
- [۱۰] صنایع، سپهر؛ کاتبی، آرش؛ بهینه سازی چند هدفه سیستم هیبرید میکروتوربین و پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مکانیک سازه ها و شاره ها، شماره ۱ (۱۳۹۰).

- [۱۱] پیرکندی، جاماسب؛ قاسمی، مجید؛ حامدی، محمد حسین؛ تحلیل عملکرد ترمودینامیکی یک چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی در یک سیستم تولید همزمان، نشریه علمی - پژوهشی سوخت و احتراق، شماره ۲ (۱۳۹۰).
- [۱۲] پیرکندی، جاماسب؛ قاسمی، مجید؛ حامدی، محمد حسین؛ مقایسه عملکرد سیستم‌های هیبریدی مستقیم و غیرمستقیم توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد از دیدگاه ترمودینامیکی و انرژی، مجله علمی - پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، (۳) ۱۲، ص. ۱۱۷ (۱۳۹۱).
- [13] Motahar S., Alemrajabi A.A., Exergy Based Performance Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell and Steam Injected Gas Turbine Hybrid Power System, *International Journal of Hydrogen Energy*, p. 1 (2009).
- [14] Cheddie D.F., Thermo-Economic Optimization of an Indirectly Coupled Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Power Plant, *International Journal of Hydrogen Energy* **36**, p. 1702 (2011).
- [15] Calise, F., Accadia, M.D., Vanoli, L., Spakovsky, M.R., Single-Level Optimization of a Hybrid SOFC-GT Power Plant, *Journal of Power Sources* **159**, p. 1169-1185 (2006).
- [16] Akkaya, A.V., Sahin, B., Erdem, H.H., An analysis of SOFC/GT CHP System Based on Exergetic Performance Criteria, *International Journal of Hydrogen Energy* **33**, p. 2566 (2008).
- [17] White, D. "Reduction in Carbon Dioxide emissions: Estimating the Potential Contribution from Wind Power", Renewable Energy Foundation, (2004).