

## تحلیل انرژی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و میکرو توربین گاز

علی اکبر عالم رجبی

دانشیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان

[Rajabi@cc.iut.ac.ir](mailto:Rajabi@cc.iut.ac.ir)

احمد صداقت

استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان

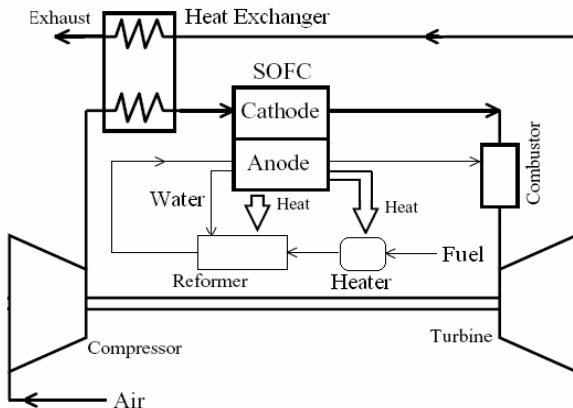
[Sedaghat@cc.iut.ac.ir](mailto:Sedaghat@cc.iut.ac.ir)

احمد طهماسبی

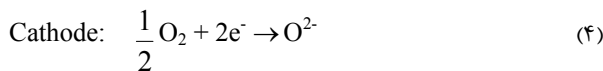
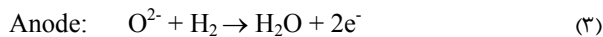
کارشناس ارشد تبدیل انرژی

[Tahmasebi.ahmad@gmail.com](mailto:Tahmasebi.ahmad@gmail.com)

توسط یک کمپرسور متراکم شده و با ورود به یک مبدل حرارتی گرم می شود، تا دما و فشار آن به شرایط کاری پیل برسد. هوای دارای دما و فشار بالا وارد کاتد هر SOFC می گردد و واکنش های الکتروشیمیایی (۳ و ۴) در پیل رخ می دهد:



شکل ۱- نمودار شماتیک سیستم ترکیبی SOFC/MGT



این واکنش ها سبب تولید جریان الکتریکی و همچنین حرارت می گردند. با هدایت حرارت و بخشی از آب تولیدی به بهبود دهنده خارجی، گرما و آب مورد نیاز برای این بخش از سیستم تأمین می گردد. همچنین مقداری از سوخت واکنش نداده نیز پس از هدایت شدن به وسیله صفحه هایی در پیل به کمک گرمای داخلی و بالای پیل واکنش می دهند و کارایی سیستم را بالا می برد. گاز خروجی از SOFC که شامل  $\text{CO}_2$ ،  $\text{H}_2\text{O}$  و همچنین  $\text{H}_2$ ،  $\text{CH}_4$  و  $\text{CO}$  واکنش نداده است، در محفظه احتراق و جهت بالا بردن دمای گاز می سوزد. مجموع این واکنش ها گرماده هستند. گاز خروجی از محفظه احتراق سبب حرکت دادن شفت میکروتوربین گاز و تولید جریان الکتریکی می شود بخشی از توان تولید شده صرف به حرکت در آوردن کمپرسور می گردد. همچنین گرمای لازم برای پیش گرم کردن هوای ورودی به پیل از خروجی میکروتوربین و با استفاده از یک مبدل حرارتی تأمین می شود.

### نرم افزار و فرضیات

این شبیه سازی با استفاده از کدنویسی در نرم افزار HYSYS صورت گرفته است. در این شبیه سازی سیستم در حالت پایدار در نظر گرفته شده و سوخت مورد استفاده متان و هوا با مشخصات ۷۹٪ نیترژن و ۲۱٪ اکسیژن در محاسبات منظور گردیده است.

### تحلیل انرژی

آنالیز انرژی به ما این امکان را می دهد تا میزان و حجم آلودگی و اتلافات کاری پیل سوختی اکسید جامد و سیستم ترکیبی را بر مبنای قانون دوم ترمودینامیک محاسبه کرده و از آن در راستای طراحی بهتر و

### چکیده

در این مطالعه به بررسی ترمودینامیکی و تحلیل انرژی سیستم ترکیبی تولید توان پیل سوختی اکسید جامد و میکرو توربین گاز می پردازیم. برای شبیه سازی ترمودینامیکی این سیستم، برنامه ای نوشته شده تا به عنوان ابزاری توانمند برای پیش بینی کارکرد و بازده سیستم ترکیبی مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق، پیل سوختی اکسید جامد با بهبود دهنده داخلی را با سیستم میکروتوربین گاز ترکیب کرده و سیستمی با بازده بالا و آلودگی کم را معرفی می کنیم. این سیستم قابلیت تولید توان در کلاس ۵ کیلووات و با بازده قانون دوم ۶۵٪ را دارد.

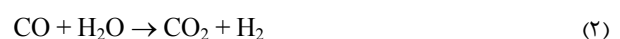
**واژه های کلیدی:** پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)، میکرو توربین گاز (MGT) و سیستم ترکیبی

### مقدمه

رشد روز افزون استفاده از منابع تجدید ناپذیر فسیلی، محدودیت این منابع و مشکلات زیست محیطی ناشی از بکارگیری آنها سبب توجه جهانیان به تنوع استفاده از انواع انرژی و بهره گیری از منابع جدید انرژی با استفاده از روشهای پایدار، ایمن و سازگار با محیط زیست شده است. فن آوری پیل سوختی که در آن هیدروژن طی یک سری واکنشهای الکتروشیمیایی با اکسیژن تولید توان و حرارت می کند، یکی از بهترین گزینه های تولید انرژی در آینده محسوب می شود. یکی از انواع مهم پیل های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد است، که از سرامیک های بدون تخلخل و بسیار سخت به عنوان الکترولیت استفاده می کند. دمای کاری بالای پیل سبب می شود که خروجی آن به عنوان یک منبع انرژی، برای راه اندازی میکرو توربین گاز استفاده گردد. بررسیهای تئوریک بر روی این نوع از سیستم های ترکیبی اولین بار در سال ۱۹۷۰ توسط شرکت آمریکایی Simens-Westinghouse صورت گرفت [۲ و ۱]. در تحقیقی که هم اکنون در دست دارید، پیل سوختی مورد مطالعه دارای یک بهبود دهنده داخلی و یک بهبود دهنده خارجی برای افزایش کارایی سیستم است. هم چنین از میکروتوربین گازی به عنوان سیستم ترکیبی تولید توان در کلاس کیلووات استفاده گردیده است.

### نحوه عملکرد سیستم

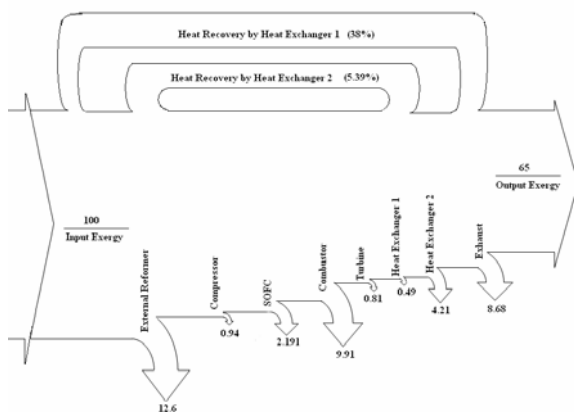
این سیستم شامل دو بخش است، یک قسمت SOFC های لوله ای با مساحت  $125 \text{ cm}^2$  که از سه لایه تشکیل شده اند. کاتد به عنوان دیواره داخلی، الکترولیت و آند به عنوان دیواره خارجی و بخش دوم سیستم، استفاده از میکروتوربین گاز که خود شامل محفظه احتراق، توربین، کمپرسور و مبدل حرارتی می باشد (شکل ۱). سوخت متراکم (متان) پس از پیش گرم شدن، به درون بهبود دهنده تزریق می شود و واکنش های زیر در بهبود دهنده رخ می دهد:



پس  $\text{H}_2$  و  $\text{CO}_2$  و مقداری از  $\text{CH}_4$  و  $\text{CO}$  که در واکنش شرکت ننموده اند، به سمت آند هر SOFC لوله ای می روند. از سوی دیگر هوای محیط

جدول ۲- نتایج ارائه شده از تحلیل انرژی سیستم مورد مطالعه

	۸۰۰ °C	۹۰۰ °C	۱۰۰۰ °C
Inlet Exergy ( $kJ/S$ )	۸/۵۱۳	۸/۵۱۳	۸/۵۱۳
Destroyed Exergy in External Reformer ( $kJ/S$ )	۱/۰۷۳	۱/۰۸۲	۱/۰۹۰
Destroyed Exergy in Compressor ( $kJ/S$ )	۰/۰۷۹۷	۰/۰۷۹۷	۰/۰۷۹۸
Destroyed Exergy in SOFC ( $kJ/S$ )	۰/۲۴۷۴	۰/۱۰۶۵	۰/۰۸۵۷
Destroyed Exergy in Combustor ( $kJ/S$ )	۰/۸۴۲۸	۰/۷۸۴۷	۰/۷۳۵۴
Destroyed Exergy in Turbine ( $kJ/S$ )	۰/۰۷۵۰	۰/۰۷۴۹	۰/۰۸۴۸
Destroyed Exergy in Heat Exchanger 1 ( $kJ/S$ )	۰/۰۴۱۲	۰/۰۴۶۷	۰/۰۵۲۱
Destroyed Exergy in Heat Exchanger 2 ( $kJ/S$ )	۰/۳۵۸۴	۰/۳۴۱۳	۰/۳۱۳۶
Recovery Exergy by Heat Exchanger 1 ( $kJ/S$ )	۳/۲۳	۳/۸۰۲	۴/۳۸۴
Recovery Exergy by Heat Exchanger 2 ( $kJ/S$ )	۰/۴۵۹	۰/۵۶۴	۰/۶۳۷
Outlet Exergy ( $kJ/S$ )	۰/۷۳۹۲	۰/۱۶۷۸	۰/۱۶۲۵۳
System Second Low Efficiency (%)	۶۵	۷۵/۸	۷۶/۵



شکل ۲- دیاگرام گراسمون برای سیستم مورد مطالعه در نقطه طراحی

### نتیجه گیری

با مدلسازی الکترو شیمیایی و تحلیل انرژی سیستم ترکیبی فوق بازده قانون دوم سیستم ۶۵٪ محاسبه گردیده است. بیشترین اتلافات انرژی در پالایش دهنده خارجی دیده می شود که مهمترین دلیل آن وقوع واکنش های شیمیایی گرماگیر در این بخش از سیستم است. همچنین استفاده از مبدل های حرارتی سبب گردیده است که اتلاف انرژی از  $۰/۷۳۹۲ kJ/S$  به  $۳/۶۸۹ kJ/S$  کاهش یابد.

### مراجع

- [1] Palsson, J., *Thermodynamic modeling and performance of combined solid oxide fuel cell and gas turbine systems*, Department of Heat and Power Engineering, Lund University of Sweden, 2002.
- [2] Veyo, S., Shockling, L., Dederer, J., Gillet, J. and Lundberg, W., "Tubular solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid cycle power systems: status", *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol.124, 2002.

افزایش بازدهی سیستم، استفاده نماییم. هدف از تحلیل انرژی یافتن قسمت هایی از سیکل است که بیشترین اتلافات را دارند و سپس تلاش برای بهینه کردن این بخش ها است. انرژی به معنای ماکزیمم مقدار کاری است که از یک سیستم یا یک جریان وقتی که واکنشها به صورت تعادلی با محیط و برگشت پذیر باشند، بدست می آید. اتلاف انرژی در طول یک فرآیند با تولید آنتروپی که به دلیل بازگشت ناپذیری به وجود می آید، متناسب است. پس این تحلیل، برای افزایش بازده سیستم، انتخاب نوع و موقعیت مواد بکار رفته در پیل و در کاهش افت های سیستم موثر است. در تحلیل انرژی، سه نوع از انتقال انرژی مطرح است. انرژی تولید کار، یا گرما و یا انتقال جرم منتقل می شود. همچنین در آنالیز انرژی دو نوع از تعادل تعریف می گردد. تعادل با محیط پیرامون و تعادل با محیط مرده. تعادل با محیط پیرامون یک تعادل محدود در زمانی است که شرایط مکانیکی مثل دما و فشار برابر با محیط اطراف باشد، تعادل با محیط مرده زمانی رخ می دهد که سیستم علاوه بر تعادل با محیط، تعادل شیمیایی نیز داشته باشد. انرژی یک جریان ماده شامل پارامترهای مختلفی است که در فقدان انرژی هسته ای، مغناطیسی، الکتروسیسته و کشش سطحی، شامل انرژی های جنبشی، پتانسیلی، گرمایی و شیمیایی است.

$$Ex = Ex_{Ke} + Ex_{Pe} + Ex_{Th} + Ex_{Ch} \quad (۵)$$

در این مطالعه تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل ناچیز در نظر گرفته شده است و سیستم فقط دارای تغییرات انرژی گرمایی و شیمیایی است. انرژی گرمایی به عنوان بیشترین مقدار کاری است که سیستم در صورتی که فقط انتقال گرما با منبع حرارتی داشته باشد، بدست می آید (رابطه ۶). این در حالی است که انرژی شیمیایی به عنوان بیشترین کاری است که سیستم تولید می کند در حالی که از حالت فعلی به حالت مرده برسد (رابطه ۷).

$$Ex_{Th} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (۶)$$

$$Ex_{Ch} = \sum_j x_j (\mu_{j_0} - \mu_{j_{100}}) \quad (۷)$$

در روابط فوق  $x_j$  نسبت مولی و  $\mu_{j_0}$  پتانسیل شیمیایی در دمای  $T_0$  و فشار  $P_0$  و  $\mu_{j_{100}}$  پتانسیل شیمیایی در حالت مرده است. آنالیز انرژی بدون توجه به تعریف محیط نمی تواند صورت گیرد. در این مطالعه شرایط محیط  $۲۰^\circ C$  و  $1 \text{ atm}$  در نظر گرفته شده است. همچنین محیط به صورت گاز ایده آل در نظر گرفته شده و دارای مشخصات جدول (۱) است.

جدول ۱- نسبت مولی و انرژی شیمیایی در محیط

Component	Mole Fraction	Chemical Exergy ( $J/mole$ )
N <sub>2</sub>	۷۹٪	۶۴۱،۱۵
O <sub>2</sub>	۲۱٪	۳۸۹۴/۰۸

### نتایج

سیستم در سه دمای متفاوت مورد تحلیل انرژی قرار گرفت و نتایج آن در جدول (۱) آمده است. همان گونه که انتظار می رفت با افزایش دما شاهد افزایش بازده قانون دوم در سیستم هستیم. در صورتی که از مبدل های حرارتی استفاده نمی کردیم، اتلاف انرژی به شدت افزایش می یافت. بیشترین بخش از اتلافات انرژی در پالایش دهنده خارجی رخ داده است، که علت آن وقوع واکنش های گرماگیر شیمیایی در این بخش از سیستم است. سپس با رسم دیاگرام گراسمون (شکل ۲) برای سیستم در نقطه طراحی و با در نظر گرفتن انرژی ورودی در مبنای ۱۰۰ تصویر بهتری از تحلیل انرژی ارائه شده است.