

آنالیز اگزورژی سیستم هیبریدی شامل کلکتور سهموی خطی، پیل سوختی، توربین گاز و سیکل بخار

صابر صادقی^۱، سعید رجبی^۲

^۱ایران، کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، s.sadeghi@kgut.ac.ir

^۲ایران، کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، sa.rajabipour@gmail.com

چکیده

اگزورژی حداکثر کار مفیدی است که از مقدار مشخصی از انرژی موجود یا از جریانی از مواد، حاصل می‌شود. در تحلیل اگزورژی، هدف اساسی تعیین محل و مقدار تولید بازگشت‌ناپذیری‌ها در طی فرآیندهای مختلف سیکل ترمودینامیکی و عوامل مؤثر بر تولید این بازگشت‌ناپذیری‌ها می‌باشد. پیل‌های سوختی انرژی شیمیایی یک سوخت گازی را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند و به دلیل اینکه در آن‌ها هیچ احتراقی رخ نمی‌دهد، بسیار تمیزتر و کارآمدتر از موتورهای احتراق داخلی هستند. یکی از موثرترین ابزارها برای تولید توان الکتریکی، پیل‌های سوختی اکسید جامد هستند. با استفاده از انرژی حرارتی پیل سوختی اکسید جامد در یک چرخه توربین گاز و بخار می‌توان به یک سیستم هیبرید با عملکرد بالا دست یافت. بخش عمده حرارت خروجی از توربین گازی صرف بالا بردن دمای واکنشگرهای پیل سوختی می‌شود. در مطالعه حاضر پیشنهاد شده بخشی از این حرارت توسط کلکتورهای سهموی خطی تامین شود تا حرارت کافی برای تولید بخار وجود داشته باشد. در این تحقیق آنالیز اگزورژی یک سیستم هیبریدی شامل کلکتور سهموی خطی، پیل سوختی، توربین گاز و توربین بخار انجام شده و اجزایی که بیشترین میزان تخریب اگزورژی را در سیستم هیبریدی دارند شناسایی شده‌اند. در انتها به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان تخریب اگزورژی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان تخریب اگزورژی در پیل سوختی و محفظه احتراق به دلیل انجام واکنش‌های شیمیایی رخ می‌دهد. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر این اگزورژی تخریب شده ضریب مصرف سوخت، ضریب مصرف هوا و نسبت تراکم می‌باشند.

واژه‌های کلیدی

اگزورژی، پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز، سیکل بخار، کلکتور سهموی خطی

مقدمه

رشد روزافزون استفاده از منابع تجدیدناپذیر فسیلی، محدودیت این منابع و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از به‌کارگیری آن‌ها، سبب توجه جهانیان به تنوع استفاده از انواع انرژی و بهره‌گیری از منابع جدید انرژی با استفاده از روش‌های پایدار، ایمن و سازگار با محیط‌زیست

شده است. یکی از موارد مهمی که بشر از ابتدا به‌عنوان یک چالش اساسی با آن مواجه بوده است یافتن روش‌های نوین و پربازده تبدیل انرژی سوخت‌ها به انرژی قابل استفاده بوده است. یکی از شیوه‌های اساسی که تکنولوژی آن در دهه اخیر به سرعت توسعه یافته است استفاده از پیل‌های سوختی جهت تأمین هم‌زمان الکتریسیته و حرارت به روش الکتروشیمیایی می‌باشد. پیل سوختی اکسید جامد یکی از انواع مهم پیل‌های سوختی است که دمای کاری بالای آن باعث می‌شود که خروجی آن به عنوان یک منبع انرژی، برای راه‌اندازی میکروتوربین گاز و تشکیل یک سیستم ترکیبی استفاده گردد. مطالعه تحقیقات گذشته درمورد سیستم‌های هیبریدی نشان می‌دهد که بررسی‌های نظری بر روی این سیستم‌های هیبریدی برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ میلادی توسط شرکت زمینس وستینگهاوس صورت گرفت [۱]. چان و همکاران [۲] تحلیل کاملی از افت‌های ولتاژ درون پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای و حساسیت ولتاژ نسبت به ضخامت اجزای پیل ارائه کردند. در تحقیقات الویی و همکاران [۳] اثر نوع سوخت بر روی عملکرد پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفت. کالیس و همکاران [۴] سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز را با استفاده از تحلیل اگزورژی شبیه‌سازی نموده‌اند. آن‌ها در شبیه‌سازی خود برای نقطه کارکرد طراحی توربین، توان ۱/۵ مگاوات و بازده ۶۰ درصد گزارش کرده‌اند. مطهرو عالم رجبی [۵] به آنالیز اگزورژی سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای و توربین گاز با تزریق بخار پرداختند. آن‌ها از حرارت گازهای خروجی توربین گاز برای تولید بخار و تزریق آن به محفظه احتراق استفاده کرده‌اند، که باعث افزایش راندمان اگزورژی و راندمان حرارتی به ترتیب به میزان ۱۲/۱۱ درصد و ۱۲/۲ درصد شده است. کلکتور خورشیدی سهموی خطی همواره به عنوان گیرنده تابشی خورشید مورد توجه پژوهشگران بوده است و تحقیقات بسیاری از لحاظ تئوری و آزمایشگاهی روی انواع مختلف این کلکتور صورت گرفته است. در سال ۲۰۱۴ ریکاردو و پادایلا و همکاران به بررسی و ارزیابی کلکتورهای سهموی خطی از دیدگاه انرژی و اگزورژی در شدت تشعشع ثابت و مقایسه دو حالت بدون پوشش و با پوشش پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که هردو بازده‌های انرژی و اگزورژی در حالت وجود پوشش شیشه‌های بیشتر از بازده در حالت بدون پوشش می‌باشد [۶].

هدف از این تحقیق تجزیه و تحلیل سیستم هیبریدی شامل کلکتور خورشیدی، پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز و سیکل بخار می

مصرف شده است. اتلاف انرژی یا به عبارت دیگر بازگشت ناپذیری، میزان ناکارآمدی سیستم مورد مطالعه را به صورت کمی نشان می‌دهد. علاوه بر آن اگر سیستم فوق از چند جز مختلف تشکیل شده باشد، آنالیز انرژی، چگونگی توزیع بازگشت ناپذیری کلی سیستم را بین اجزا آن نشان داده و مشخص می‌کند که چه اجزایی نقش بیشتری در میزان بازگشت ناپذیری کلی دارند. بالانس انرژی در واقع مقایسه وضعیت موجود با بهترین حالت ممکن می‌باشد. آنالیز انرژی برای کلکتور سهموی خطی طبق رابطه زیر بدست می‌آید [۷]. انرژی ورودی شامل انرژی که از سیال عامل می‌آید و انرژی ناشی از تابش خورشید می‌باشد.

$$\dot{E}_i = \dot{m} \left[\int_{T_0}^{T_i} c_p(T) dT + v(P_i - P_0) - T_0 \int_{T_0}^{T_i} \frac{c_p(T)}{T} dT + \frac{V_i^2}{2} \right] + I_b A_a \psi \quad (1)$$

$$\psi = 1 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_s} \right)^4$$

که T_s برابر دمای جسم سیاه خورشید است. انرژی خروجی شامل انرژی ناشی از اختلاف دمای خروجی و دمای مرجع و همچنین انرژی جنبشی می‌باشد که مقدار تخریب آنتروپی از آن کم می‌شود.

$$\dot{E}_e = \dot{m} \left[\int_{T_0}^{T_e} c_p(T) dT + v(P_e - P_0) - T_0 \int_{T_0}^{T_e} \frac{c_p(T)}{T} dT + \frac{V_e^2}{2} \right] \quad (2)$$

میزان انرژی دریافت شده توسط کلکتور ناشی از تابش مستقیم خورشید می‌باشد.

$$\dot{E}_{gain} = \dot{m} \left[\int_{T_i}^{T_e} c_p(T) dT + v(P_e - P_i) - T_0 \int_{T_i}^{T_e} \frac{c_p(T)}{T} dT \right] \quad (3)$$

میزان بازده انرژی به صورت میزان انرژی دریافتی به کل انرژی ناشی از تابش خورشید تعریف می‌شود.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{gain}}{\dot{E}_{sr}} \quad (4)$$

که $\dot{E}_{sr}$ کل انرژی ناشی از تابش خورشید می‌باشد. انرژی پیل سوختی اکسید جامد از مجموع انرژی فیزیکی، شیمیایی و حرارتی تشکیل شده است [۸].

$$\dot{E}_x = \dot{E}_{ph} + \dot{E}_{ch} + \dot{E}_q \quad (5)$$

انرژی فیزیکی، شیمیایی و انرژی حرارتی به ترتیب از روابط زیر بدست می‌آید.

$$\dot{E}_{ph} = \sum_i \dot{n}_i ((h_i - h_{0,i}) - T_0 (\bar{S}_i - \bar{S}_{0,i}))$$

$$\dot{E}_{ch} = \sum_i \dot{n}_i \sum_j (x_i ex_{ch,i} + RT x_i \ln(x_i))$$

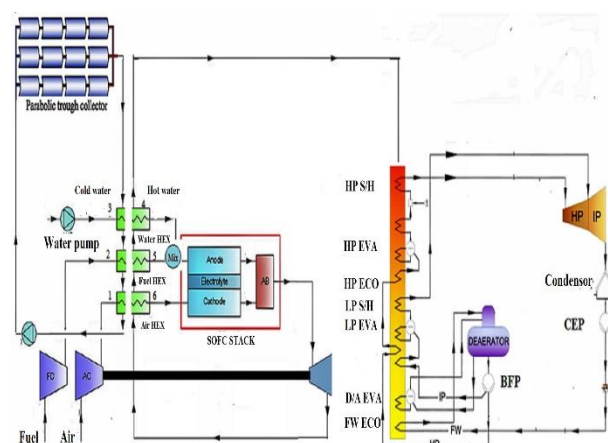
$$\dot{E}_q = \dot{Q}_s \left(1 - \frac{T_0}{T_s} \right) \quad (6)$$

در رابطه (۶) x_i کسر مولی گاز در مخلوط می‌باشد.

باشد. سیستم هیبریدی مورد نظر شامل کلکتور خورشیدی، یک پیل سوختی اکسید جامد با بهسازی داخلی، محفظه پس سوز، توربین گاز و بخار، کمپرسور هوا، کمپرسور سوخت، پمپ آب، بویلر بازتاب حرارتی، کندانسور است. در این تحقیق ابتدا یک کلکتور سهموی خطی به طور مجزا شبیه سازی سپس نتایج خروجی از کلکتور به عنوان پارامترهای سیستم هیبریدی که شامل پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز و سیکل بخار در نظر گرفته می شود. خواص در نقاط مختلف سیستم شناسایی و به دنبال آن انرژی تخریبی هر یک از اجزا بدست آورده می شود. در ادامه تاثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد تجهیزاتی که بیشترین نرخ تخریب انرژی را داشته اند، بررسی می شود.

توصیف سیستم

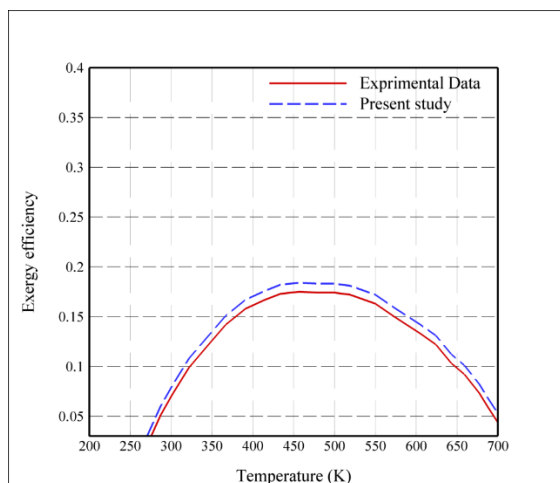
سیستم شبیه سازی شده در این پژوهش متشکل از کلکتور سهموی خطی، پمپ سیرکولاسیون، مبدل حرارتی، پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز، بویلر بازتاب حرارتی، توربین بخار، کندانسور، پمپ آب تغذیه (BFP) و پمپ کندانس (CEP) است که در شکل ۱ اجزای سیستم نشان داده شده است. سوخت، آب و هوا پس از فشرده شدن توسط پمپ و کمپرسورها وارد مبدل های حرارتی اولیه می شوند تا توسط سیال عامل کلکتور پیش گرم شوند سپس وارد مبدل های ثانویه شده تا با گاز خروجی توربین گاز به دمای لازم برای ورود به پیل سوختی برسند. واکنشگرها وارد پیل سوختی می شوند و واکنش شیمیایی انجام می شود، سپس محصولات به همراه بخشی از واکنشگرها که هنوز باقی مانده وارد محفظه پس سوز می شوند تا بطور کامل واکنش انجام گیرد و دمای محصولات بالا رود. محصولات برای انجام کار وارد توربین گازی می شوند و پس از انجام کار برای گرمایش ورودی های پیل سوختی وارد مبدل های ثانویه می شوند. محصولات پس از آن وارد سیستم تولید بخار برای راه اندازی توربین بخار می شوند و سپس به محیط وارد می شوند.



شکل ۱. اجزای سیستم مورد بررسی

معادلات حاکم

آنالیز انرژی یک فرآیند یا یک سیستم، نشان می‌دهد که چه مقدار از قابلیت انجام کار یا انرژی ورودی، توسط آن فرآیند یا سیستم،



شکل ۳: نتایج منحنی دمای ورودی برحسب بازده اگزورژی کلکتور با نتایج عددی حاصل از کد تهیه شده [۱۱]

در بخش انتهایی نتایج مربوط به سیکل بخار با نتایج بدست آمده در مرجع [۱۲] مقایسه شده‌اند که هم‌خوانی نزدیک بین این نتایج، بار دیگر صحت روش حاضر و کد تهیه شده را تایید می‌کند که مقایسه نتایج در جدول آورده شده است.

جدول ۳-۱ مقایسه نتایج حاصل از کد حاضر با نتایج مرجع [۱۲]			
داده‌های ورودی به سیکل بخار			
$T_{SH_HP}(C)$	۵۶۸	$P_{SH_HP}(bar)$	۱۰۵
$T_{inlet_HRSG}(C)$	۶۴۷	$\dot{m}_{gas}(kg/s)$	۳۸۶
نتایج مرجع		نتایج حاصل از کد	
$T_{out_HRSH}(C)$		۹۶	
$\dot{m}_{HP_SH}(kg/s)$		۷۲	
$\dot{W}_{st}(MW)$		۹۹	

نتایج

پیل‌های سوختی با توجه به دمای کارکرد بالا به دمای ورودی بالایی برای بازده بالا نیاز دارند که در مطالعات صورت گرفته معمولاً از دمای خروجی از پیل سوختی یا خروجی توربین گاز برای گرم کردن هوا و سوخت استفاده می‌کنند. این امر باعث کاهش بازده پیل سوختی و همچنین کاهش دمای خروجی از پیش‌گرم‌کن‌های پیل سوختی می‌شود. در این تحقیق برای پیش‌گرم کردن، از کلکتور سهموی هم استفاده شده است که با توجه به دمای کارکرد بالا این کلکتور، بخشی از نیاز پیل سوختی تامین می‌شود. از طرفی باعث افزایش دمای محصولات احتراق ورودی به محیط شده که با آن می‌توان یک سیکل بخار را برای تولید توان راه‌اندازی کرد و به بازدهی بالاتری دست یافت. سیکل ترکیبی مورد نظر به لحاظ اگزورژی مورد بررسی قرار گرفته تا اجزا با تخریب اگزورژی بالا شناخته شوند و تاثیر پارامترهای

میزان نرخ تولید آنتروپی، اگزورژی تخریب‌شده و بازده اگزورژی از مجموعه روابط زیر حاصل خواهد شد.

$$\dot{S}_{gen} = (\dot{n}_{i,ca,out} \bar{S}_{i,ca,out} + \dot{n}_{i,an,out} \bar{S}_{i,an,out}) - (\dot{n}_{i,ca,in} \bar{S}_{i,ca,in} + \dot{n}_{i,an,in} \bar{S}_{i,an,in})$$

$$\dot{E}x_{D_{sofc}} = \dot{E}x_{i,ca,in} + \dot{E}x_{i,an,in} - \dot{E}x_{i,ca,out} - \dot{E}x_{i,an,out} - \dot{E}x_q - \dot{W}_{sofcDC-tot}$$

$$\dot{E}x_q = \dot{Q}_{surr} \left(1 - \frac{T_0}{T_{sofc}}\right)$$

$$\psi_{sofc} = \frac{\dot{W}_{sofcDC-tot}}{\dot{E}x_{i,ca,in} + \dot{E}x_{i,an,in} - \dot{E}x_{i,ca,out} - \dot{E}x_{i,an,out}} \quad (7)$$

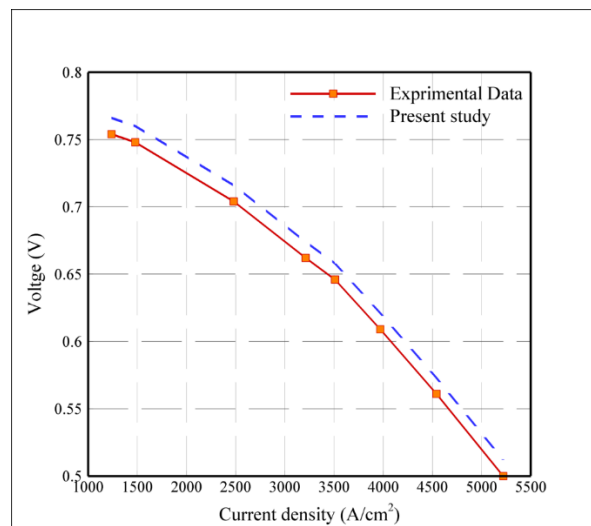
نرخ تولید آنتروپی، اگزورژی تخریب‌شده و بازده اگزورژی در فرایند انبساط انجام‌شده در توربین، مطابق روابط (۸) حاصل می‌شود [۹].

$$\dot{S}_{gen_{gt}} = \dot{n}_g (\bar{S}_{out} - \bar{S}_{in})$$

$$\psi_{tur} = \frac{\dot{W}_{gt}}{\dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out}} \quad (8)$$

اعتبارسنجی

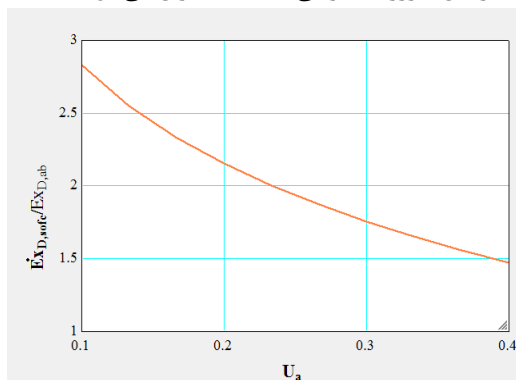
جهت اعتبار سنجی این قسمت ابتدا بخش مربوط به پیل سوختی با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته توسط سینگال و در مرجع [۱۰] مقایسه شده است که در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل نتایج مقایسه نشان‌دهنده عملکرد صحیح برنامه نوشته‌شده در EES می‌باشد.



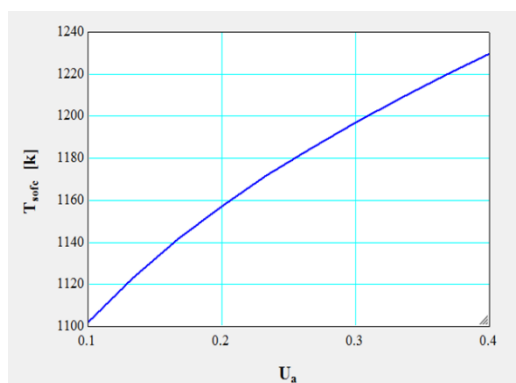
شکل ۲: مقایسه منحنی ولتاژ برحسب جریان نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی حاصل از کد

در بخش بعد نتایج مربوط به کلکتور با نتایج مرجع [۱۱] مقایسه شده است که هم‌خوانی نزدیکی با نتایج به دست آمده دارد. (شکل ۳)

در شکل ۴ تغییرات اگزرژی نسبت اگزرژی تخریبی پیل سوختی اکسید جامد به اگزرژی تخریبی محفظه احتراق نسبت به تغییرات ضریب مصرف هوا در سیستم هیبریدی استاندارد نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده با افزایش ضریب مصرف هوا دبی هوای ورودی به سیستم کاهش می‌یابد، در نتیجه باعث افزایش دمای عملکرد پیل سوختی می‌شود. همانطور که اشاره شد واکنش دگرگونی آب و گاز یک واکنش گرماده می‌باشد که در شکل ۶ اثرات دما بر ثابت تعادل نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌یابد، در نتیجه نرخ مولی پیشرفت واکنش دگرگونی آب و گاز کاهش می‌یابد. با کاهش نرخ مولی پیشرفت واکنش دگرگونی منواکسید کربن خروجی از پیل سوختی افزایش می‌یابد. در نتیجه مقدار بیشتری منواکسید کربن درون محفظه احتراق واکنش می‌دهد و سبب افزایش اگزرژی تخریبی محفظه احتراق می‌شود.

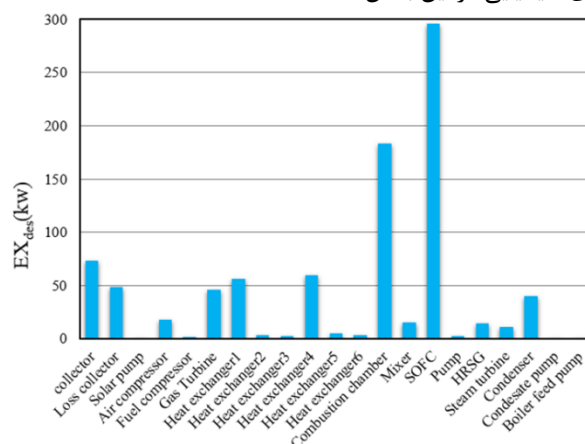


شکل ۶. تاثیر ضریب مصرف هوا بر اگزرژی تخریبی پیل سوختی و پس سوز



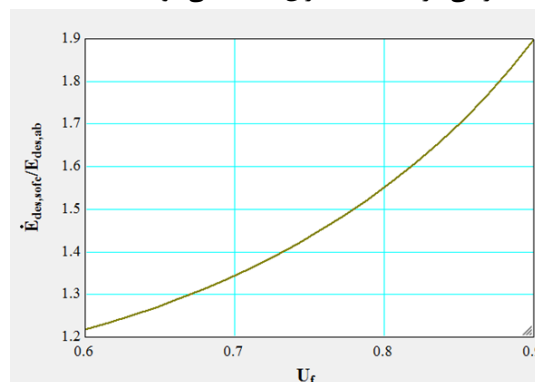
شکل ۷. تاثیر ضریب مصرف هوا بر دمای خروجی پیل سوختی

مهم بر میزان تخریب اگزرژی مشخص گردد. شکل ۲ اگزرژی تخریبی در اجزا مختلف سیستم هیبریدی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین اگزرژی تخریبی مربوط به پیل سوختی اکسید جامد و سپس محفظه احتراق است که این امر به دلیل واکنش های شیمیایی در این بخش‌ها است.

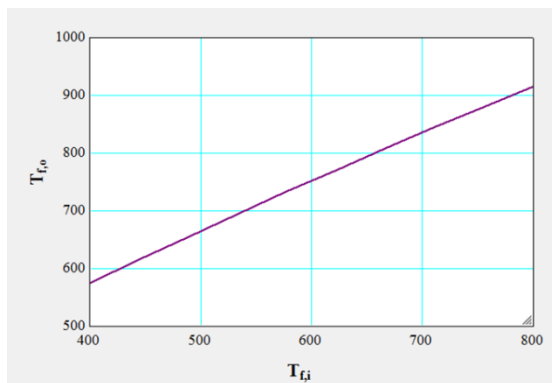


شکل ۴. مقایسه اگزرژی تخریبی در اجزای مختلف سیستم

عوامل موثر بر اگزرژی تخریبی پیل سوختی، ضریب مصرف سوخت، ضریب مصرف هوا و نسبت تراکم می‌باشند که در زیر مورد بررسی قرار گرفته اند. در شکل ۳ تاثیر ضریب مصرف سوخت بر اگزرژی تخریبی پیل سوختی و محفظه احتراق نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که قسمت عمده تخریب اگزرژی در اجزایی از سیستم هیبریدی اتفاق می‌افتد، که در آن‌ها واکنش شیمیایی یا واکنش الکتروشیمیایی رخ می‌دهد. تخریب اگزرژی در پیل سوختی اکسید جامد و تخریب اگزرژی در محفظه احتراق از طریق دبی و دمای محصولات خروجی از پیل سوختی به یکدیگر وابسته می‌باشند. از جمله پارامترهایی که بر روی محصولات پیل سوختی تاثیر می‌گذارد ضریب مصرف سوخت می‌باشند. ضریب مصرف سوخت بالا بدان معنی است که بسیاری از واکنش های شیمیایی درون پیل سوختی رخ می‌دهد و مقدار بسیار اندکی از سوخت و منواکسید کربن وارد محفظه احتراق می‌شود. در نتیجه با افزایش ضریب مصرف سوخت بر اگزرژی تخریبی پیل سوختی اکسید جامد افزوده و از اگزرژی تخریبی در محفظه احتراق کاسته می‌شود.

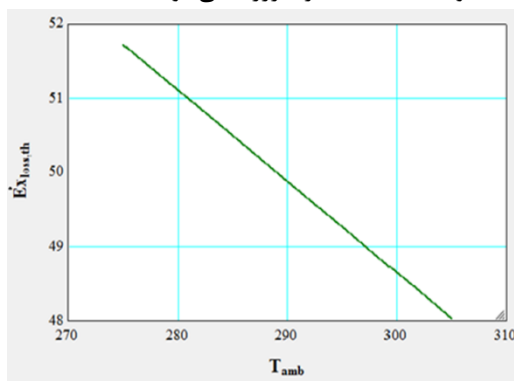


شکل ۵. تاثیر ضریب مصرف سوخت بر اگزرژی تخریبی پیل سوختی و محفظه احتراق



شکل ۱۱. تاثیر دمای ورودی بر دمای خروجی سیال از کلکتور

شکل ۱۰ تغییرات دمای محیط بر اگزورژی تخریبی کلکتور را نشان می دهد. با افزایش دمای محیط اختلاف دمای لوله جاذب با محیط بیشتر شده و سبب افت بیشتر اگزورژی می شود.



شکل ۱۲. تاثیر دمای محیط بر اگزورژی تخریبی کلکتور

نتیجه گیری و جمع بندی

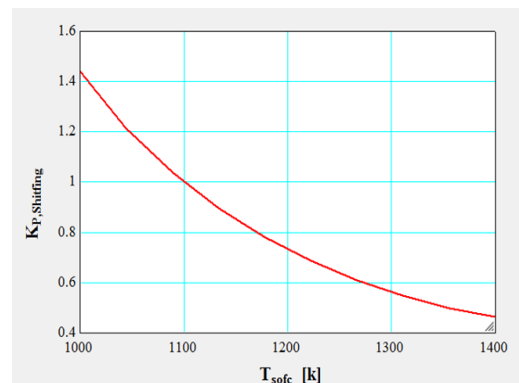
با توجه به مطالب ارائه شده در این تحقیق، می توان موارد زیر را به عنوان جمع بندی بحث ارائه کرد:

-نتایج شبیه سازی نشان می دهد که قسمت عمده تخریب اگزورژی در اجزایی از سیستم هیبریدی اتفاق می افتد، که در آن ها واکنش شیمیایی یا واکنش الکتروشیمیایی رخ می دهد. تخریب اگزورژی در پیل سوختی اکسید جامد و تخریب اگزورژی در محفظه احتراق دارای بیشترین مقدار است.

-با افزایش ضریب مصرف سوخت بر اگزورژی تخریبی پیل سوختی اکسید جامد افزوده و از اگزورژی تخریبی در محفظه احتراق کاسته می شود.

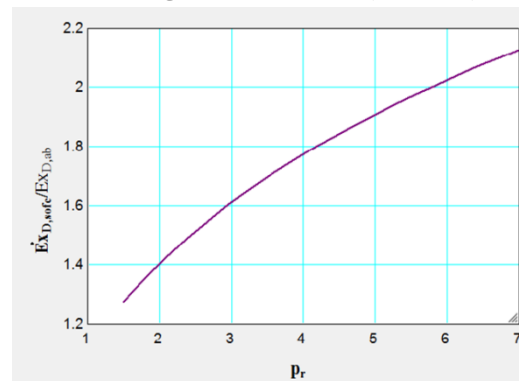
-با افزایش ضریب مصرف هوا دبی هوای ورودی به سیستم کاهش می یابد، در نتیجه باعث افزایش دمای عملکرد پیل سوختی می شود -هرچه میزان واکنش شیمیایی در پیل سوختی بیشتر شود اگزورژی تخریبی نیز بیشتر خواهد شد.

-نسبت تراکم بیشتر به معنی انجام واکنش بیشتر در پیل سوختی است و به دنبال آن اگزورژی تخریبی نیز بیشتر خواهد شد.



شکل ۸. تغییرات دمای پیل سوختی نسبت به ثابت تعادل واکنش دگرگونی

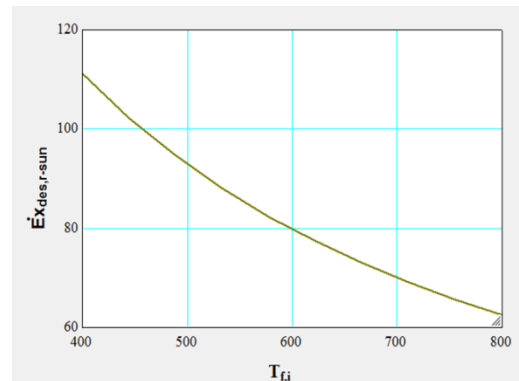
افزایش نسبت تراکم سبب کاهش دمای عملکرد پیل سوختی می شود. با افزایش نسبت تراکم نرخ مولی پیشرفت واکنش دگرگونی افزایش می یابد. در نتیجه اکثر واکنش های شیمیایی درون پیل سوختی انجام می شود. شکل ۷ نشان دهنده تغییرات نسبت اگزورژی تخریبی پیل سوختی جامد به اگزورژی تخریبی محفظه احتراق نسبت به تغییرات نسبت تراکم در سیستم هیبریدی استاندارد می باشد.



شکل ۹. تاثیر نسبت تراکم فشار بر اگزورژی تخریبی پیل سوختی و پس سوز

برای بررسی عوامل موثر بر اگزورژی تخریبی کلکتور پارامترهای دمای سیال ورودی و دمای محیط بررسی شده است.

شکل ۸ تاثیر دمای سیال ورودی بر اگزورژی تخریبی کلکتور را نشان می دهد. همانطور که شکل ۹ نشان می دهد با افزایش دمای سیال ورودی دمای سیال خروجی افزایش می یابد. به دلیل افزایش دمای خروجی و افزایش راندمان اگزورژی، اگزورژی تخریبی کاهش می یابد.



شکل ۱۰. تاثیر تغییرات دمای ورودی سیال بر اگزورژی تخریبی جذب

- [۵] Motahar, S., and Ali Akbar Alemrajabi, A. A., 2009. "Exergy based performance analysis of a solid oxide fuel cell and steam injected gas turbine hybrid power system". *international journal of hydrogen energy*, 34(5), pp. 2396-2407.
- [۶] Padilla, R. V., Fontalvo, A., Demirkaya, G., Martinez, A., and Quiroga, A. G., 2014. "Exergy analysis of parabolic trough solar receiver". *Applied Thermal Engineering*, 67(1), pp. 579-586.
- [۷] Kahrobaian, A., and Malekmohammadi, H., 2008. "Exergy Optimization Applied to Linear Parabolic Solar Collectors". *Journal of Faculty of Engineering*, 42(1), pp. 131 – 144.
- [۸] Akkaya, A. V., Bahri, S., and Hasan Huseyin, E., 2007. "Exergetic performance coefficient analysis of a simple fuel cell system". *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(17), pp. 4600-4609.
- [۹] Sreeramulu, M., and Gupta, A.V.S.S.K.S., 2011. "Exergy analysis of gas turbine – solid oxide fuel cell-based combined cycle power plant." *International Journal of Energy Technology and Policy*, 7, pp. 469-488.
- [۱۰] Singhal, S. C. "Advances in solid oxide fuel cell technology." *Solid state ionics* 135.1 (2000): 305-313.
- [۱۱] Kahrobaian, A., and H. Malekmohammadi. "Exergy optimization applied to linear parabolic solar"
- [۱۲] Kehlhofer, R., 1999. *Combined-cycle gas & steam turbine power plants*. PennWell Pub. Co., Tulsa, Oklahoma.

-با افزایش دمای سیال ورودی به کلکتور دمای سیال خروجی افزایش می یابد. به دلیل افزایش دمای خروجی و افزایش راندمان اگزرژی، اگزرژی تخریبی کاهش می یابد

-با افزایش دمای محیط میزان اگزرژی تخریبی در کلکتور نیز کمتر می شود.

-با افزایش دمای ورودی و کاهش دبی هوا به توربین اگزرژی تخریبی توربین کاهش می یابد.

-با افزایش نسبت تراکم اگزرژی تخریبی توربین گاز افزایش می یابد

- با افزایش فشار کندانسور اگزرژی تخریبی کندانسور افزایش می یابد.

مراجع و منابع

- [۱] McLarty, D., Brouwer, J., and Samuelsen, S., 2013. "Hybrid fuel cell gas turbine system design and optimization". *Journal of fuel cell science and technology*, 10(4), August, p. 041005.
- [۲] Chan, S. H., Khor, K. A., and Xia, Z. T., 2001. "A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness". *Journal of Power Sources* 93(1), pp. 130-140.
- [۳] Aloui, Th., and Halouani, K., 2007. "Analytical modeling of polarizations in a solid oxide fuel cell using biomass syngas product as fuel". *Applied thermal engineering*, 27(4), pp. 731-737.
- [۴] Calise, F., Dentice d'Accadia, M., Palombo, A., and Vanoli, L., 2006. "Simulation and exergy analysis of a hybrid solid oxide fuel cell (SOFC)-gas turbine system". *Energy*, 31(15), pp. 3278-3299