تحلیل ترمودینامیکی عملکردیک سیستم پیل سوختی PEM در حالت ساده و تولید دوگانه قدرت و گرما

غلامرضا اشعری
کارشناس ارشد دانشگاه آزاداسلامی- واحد دزفول
Reza.ashnava@yahoo.com

سامان شالباف *
کارشناس ارشددانشگاه آزاداسلامی- واحد دزفول
saman.shalbaf@gmail.com

امیر ایمان زاده
مربی دانشگاه آزاداسلامی- واحد دزفول
imanzadeh@gmail.com

علیرضا باهری
مربی دانشگاه آزاداسلامی- واحد دزفول
Baheri_2003 @yahoo.com

چکید ه:

در این مقاله، تحلیل‌های انرژی و اگزرژی یک سیستم پیل سوختی PEM در دو حالت ساده و دوگانه (CHP) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اجزای اصلی سیستم مورد نظر شامل واحدهای پیل سوختی، مشعل، اصلاح‌کننده، مبدل حرارتی، باتری و آبگرمکن می‌باشد. تحلیل ترمودینامیکی سیستم فوق بر اساس تغییرات بازده انرژی، بازده اگزرژی و میزان آنتروپی تولیدی بر حسب دمای ورودی و به ازاء نسبت‌های مولی مختلف هوا به سوخت انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با افزایش دمای ورودی به پیل سوختی میزان آنتروپی تولیدی و بازده اگزرژی در هر دو حالت ساده و دوگانه افزایش می‌یابد. همچنین در سیستم ساده بر خلاف سیستم دوگانه، افزایش دمای هوای ورودی منجر به کاهش بازده انرژی سیستم می‌شود.

واژه های کلیدی: سیستم ساده، سیستم CHP، آنتروپی تولیدی، بازده انرژی و اگزرژی، نسبت مولی هوا به سوخت، دمای ورودی.

۱. مقدمه

سوخت‌های فسیلی رایج مانند نفت، گاز طبیعی، گازوئیل و زغال به عنوان تامین‌کننده اصلی نیازهای انرژی در جهان شناخته می‌شوند. از همین رو ذخایر این منابع به سرعت رو به اتمام بوده و محصولات ناشی از احتراق آنها نگرانی‌های زیست محیطی بسیاری ایجاد کرده است. امروزه تمایل زیادی به استفاده از سوخت‌های پاک و قابل دسترس‌تر وجود دارد. در همین راستا استفاده از پیل‌های سوختی مبدل پروتونی (PEM) به دلیل آلایندگی کمتر، بهروری اقتصادی و بازده انرژی بالاتر رو به گسترش می‌باشد[۱].

پیل سوختی مبدل پروتونی نوعی پیل سوختی هیدروژنی است که هیدروژن و اکسیژن را به طور مستقیم به الکتریسیته، آب و حرارت تبدیل کرده در حالیکه آلاینده‌های رایج حاصل از فرایندهای احتراق را تولید نمی‌کند. این نوع پیل سوختی جهت کاردهی در توان‌های بین ۱kW تا ۵۰kW و در سیستم‌هایی که به تغییرات سریع هنگام تغییر بار نیاز است، کاملا مناسب است. آب تنها مایع موجود در این نوع پیل سوختی بوده و بنابراین مشکلات مربوط به خوردگی به حداقل می‌رسد [۲] و [۳]. سیستم‌های حرارتی رایج و ساده تولید توان از تمامی انرژی حرارتی جهت تولید توان استفاده نکرده و بیش از نیمی از انرژی حرارتی را در قالب حرارت اضافی هدر می‌دهند. سیستم‌های دوگانه تولید توان و حرارت (CHP) از حرارت اضافی استفاده کرده و بازده انرژی سسیستم را افزایش می‌دهند. در این سیستم‌ها حرارت تولید شده در فرایند تولید الکتریسیته مورد استفاده قرار می‌گیرد. ازآنجاییکه در سیستم-های CHP توان و حرارت (به صورت بخار یا آب‌گرم) به طور همزمان تولید می‌شوند، بازده انرژی آنها به حدود ۸۵٪ تا ۹۰٪ رسیده و حدود ۳۰٪ تا ۳۵٪ از سیستم‌های ساده بیشتر است [۴]. در سال‌های اخیر تحلیل ترمودینامیکی سیستم‌های تولید دوگانه توربین‌های گازی میکرو و موتورهای احتراق داخلی مورد بررسی قرار گرفته است[۱۲-۵].

تحلیل انرژی بر اساس قانون اول و تحلیل اگزرژی بر اساس قانون دوم ترمودینامیک، دو روش تحلیل ترمودینامیکی سیستم‌های ساده و تولید دوگانه هستند. محاسبه بازده‌های انرژی و اگزرژی، میزان تولید آنتروپی و به حداقل رساندن عوامل بازگشت‌ناپذیری چالش‌های مهمی در راستای دستیابی به عملکرد ایده‌آل‌تر سیستم‌های تولید انرژی هستند. تحلیل اگزرژی سیستم نقش بسزایی در چگونگی تاثیر سیستم پیل سوختی بر محیط و درک مزایای استفاده از آن دارد. در حقیقت تحلیل اگزرژی به دلیل در نظرگرفتن کمیت و کیفیت انرژی به طور همزمان تحلیل دقیق‌تری نسبت به تحلیل انرژی ارائه

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.4.5]

می‌دهد[۱۳].

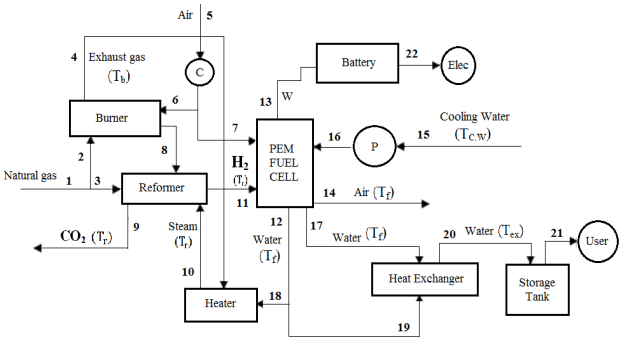
در این مقاله، یک سیستم پیل سوختی که اجزاء اصلی آن شامل ، واحدهای پیل سوختی، مشعل، اصلاح کننده (اصلاح کننده‌ها پیوند شیمیایی میان کربن و هیدروژن را شکسته و هیدروژن خالص را بدست می‌دهند.)، مبدل حرارتی، باتری و آبگرمکن می‌باشد در دوحالت ساده و CHP مورد تحلیل قرار می‌گیرد. سوخت مشعل و اصلاح‌کننده، گاز طبیعی می‌باشد. مراحل اصلی این مقاله به شرح زیر است:

- پیشنهاد یک سیستم جدید به منظور تولید همزمان توان و حرارت.
- مدل‌سازی ترمودینامیکی سیستم و بدست آوردن روابط مربوط به پایستگی جرم و انرژی.
- تحلیل اگزرژی سیستم و بدست آوردن روابط بازده‌های انرژی و اگزرژی.
- نوشتن کد کامپیوتری و بدست آوردن نتایج لازم.
- تحلیل نتایج و نتیجه‌گیری از آنها.

۲. تشریح سیستم:

مدل ساده سیستم مورد نظر در حالت تولید دوگانه در شکل (۱) نشان داده شده است. منبع تولید انرژی، مجموعه‌ای از واحدهای پیل سوختی با توان نامی ۸.۴ kW است که فرایند الکتروشیمیایی مربوطه را اجرا کرده و توان الکتریکی و حرارت تولید می‌کند. واحدهای پیل سوختی به یک باتری متصل‌اند. نحوه عملکرد سیستم بدین صورت تشریح می‌شود: گاز طبیعی از طریق خط (۱) به مشعل و اصلاح‌کننده وارد شده و در مشعل با هوای ورودی از خط (۵) واکنش می‌دهد. حرارت تولیدی در مشعل به منظور تامین بار انرژی اصلاح‌کننده استفاده می‌شود (خط ۸). در اصلاح‌کننده، گاز طبیعی (خط ۳) با بخار تولیدی در گرمکن (خط ۱۰) واکنش داده و حاصل آن تولید دی‌اکسیدکربن (CO_2) و هیدروژن (H_2) است. دی‌اکسیدکربن تولیدی در اصلاح‌کننده از طریق خط (۹) به محیط تخلیه شده و هیدروژن تولیدی از طریق خط (۱۱) وارد واحدهای پیل سوختی می‌شود. هیدروژن تولیدی و هوا (خط ۷) وارد پیل سوختی شده و توان الکتریکی (خط ۱۳) و آب گرم (خط ۱۲) تولید می‌شود.

بخشی از هوای ورودی به واحدهای پیل سوختی با هیدروژن واکنش نداده و از طریق خط (۱۴) وارد محیط می‌شود. به منظور خنک‌سازی واحدهای پیل سوختی از آب (خط ۱۶) استفاده می‌شود. آب ورودی جهت خنک‌سازی ، درون واحدها گرم شده و از طریق خط (۱۷) به مبدل حرارتی وارد شده، با بخشی از آب گرم تولیدی توسط واحدها (خط ۱۹) مخلوط شده و پس از آن از طریق خط (۲۰) به منبع ذخیره‌سازی آب وارد می‌شود. بخش دیگر آب تولیدی در واحدهای پیل سوختی (خط ۱۸) جهت تامین بخار آب ورودی به مشعل، وارد گرمکن می‌شود.



شکل ۱. مدل ساده سیستم در حالت تولید دوگانه

۳. تحلیل انرژی و اگزرژی

بررسی خواص ترمودینامیکی (نرخ جریان جرم، دما و غیره) اجزا سیستم توسط معادلات بقای انرژی و جرم بین ورودی و خروجی هر جزء صورت گرفته و اطلاعات ورودی هر جزء، نتایج حاصل از جزء قبل می‌باشد. فرضیات حاکم بر تحلیل ترمودینامیکی سیستم در زیر آورده شده‌اند.

- تمامی اجزاء سیستم در شرایط پایدار هستند.
- همه گازها ایده‌آل در نظر گرفته شده اند.
- از انرژی‌های پتانسیل و جنبشی صرفنظر می‌شود.
- هر جزء یک حجم کنترل مجزا می باشد.
- محیط در دمای ۲۵°C و فشار ۱atm قرار دارد.
- هیچگونه نشتی در اجزا وجود ندارد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.4.5]

- تمامی اجزا در شرایط بی‌دررو کار می‌کنند.

۳-۱ بقای جرم و انرژی:

پس از بررسی معادلات بقای جرم اصلاح‌کننده، معادلات مربوط به نرخ جریان جرم به صورت زیر بدست آمدند.

$$\dot{m}_{fuel_{in,r}} = \frac{\dot{W}_{net}}{9.648FVU_f} M_{fuel} \quad (۱)$$

$$\dot{m}_{H_2O_{in,r}} = \frac{\dot{W}_{net}}{3.764FV} M_{H_2O} \quad (۲)$$

$$\dot{m}_{H_2\ out,r} = \frac{\dot{W}_{net}}{2FVU_f} M_{H_2} \quad (۳)$$

$$\dot{m}_{CO_2\ out,r} = \frac{\dot{W}_{net}}{7.456FV} M_{CO_2} \quad (۴)$$

در روابط فوق F عدد فاراد و معادل ۹۶.۶۸۵، U_f درصد مصرف سوخت، V ولتاژ پیل سوختی بر حسب ولت و M جرم مولکولی می‌باشد. نرخ جریان جرمی واکنش‌دهنده‌های ورودی و محصولات خروجی واحدهای پیل سوختی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\dot{m}_{H_2\ in,f} = \frac{\dot{W}_{net}}{2FVU_f} M_{H_2} \quad (۵)$$

$$\dot{m}_{air\ in,f} = \frac{\dot{W}_{net}}{4FU_a} \frac{1}{x_{O_2}} r_a M_{air} \quad (۶)$$

$$\dot{m}_{air\ out,f} = \frac{\dot{W}_{net}}{4FV} \frac{1}{x_{O_2}} (r_a - 1) M_{air} \quad (۷)$$

$$\dot{m}_{H_2O\ out,f} = \frac{\dot{W}_{net}}{2FV} M_{H_2O} \quad (۸)$$

$$\dot{m}_{N_2\ in,f} = \frac{\dot{W}_{net}}{4FVU_a} \frac{x_{N_2}}{x_{O_2}} r_a M_{N_2} \quad (۹)$$

$$\dot{m}_{N_2\ outf} = \frac{\dot{W}_{net}}{4FVU_a} \frac{x_{N_2}}{x_{O_2}} (r_a - 1) M_{N_2} \quad (۱۰)$$

$$\dot{m}_{O_2\ in,f} = \frac{\dot{W}_{net}}{4FVU_a} r_a M_{O_2} \quad (۱۱)$$

$$\dot{m}_{O_2\ out,f} = \frac{\dot{W}_{net}}{4FVU_a} (r_a - 1) M_{O_2} \quad (۱۲)$$

x_{O_2}، x_{N_2}، r_a و U_a به ترتیب کسر مولی اکسیژن و نیتروژن در هوا، نسبت مولی هوا به سوخت و کسری از هوا که در پیل سوختی با سوخت واکنش می‌دهد، می‌باشند. نرخ جریان جرمی سوخت ورودی به مشعل از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\dot{m}_{fuel\ in,b} = \frac{\dot{Q}_r}{q_b} \quad (۱۳)$$

در این رابطه $\dot{Q}_r$ و q_b به ترتیب نرخ حرارت اصلاح‌کننده و مشعل بوده که از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\dot{Q}_r = 1.294\,\dot{m}_{CO_{2,out,r}} \left[h^\circ_{f_{CO_2}} + C_{p_{CO_2}}(T_r - T_\circ)\right] + 4.824\,\dot{m}_{H_{2\,out,r}} \left[C_{p_{H_2}}(T_r - T_\circ)\right] - 2.564\,\dot{m}_{H_2O_{in,r}} \left[h^\circ_{f_{H_2O}} + C_{p_{H_2O}}(T_f - T_\circ)\right] - \dot{m}_{fuel_{in,r}} \left[h^\circ_{f_{fuel}}\right] \quad (۱۴)$$

$$q_b = \left[h^\circ_{f_{fuel}} + 2h^\circ_{f_{O_2}} + 7.52h^\circ_{f_{N_2}}\right] - 2\left[h^\circ_{f_{H_2O}} + C_{p_{H_2}}(T_b - T_\circ)\right] - \left[h^\circ_{f_{CO_2}} + C_{p_{CO_2}}(T_b - T_\circ)\right] - 7.52\left[h^\circ_{f_{N_2}} + C_{p_{N_2}}(T_b - T_\circ)\right] \quad (۱۵)$$

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_{H_2\,in,f}\left[C_{p_{H_2}}(T_r - T_\circ)\right] + \dot{m}_{air_{in,f}}\left[C_{p_{air}}(T_f - T_\circ)\right] - \dot{m}_{air_{out,r}}\left[C_{p_{air}}(T_f - T_\circ)\right] - \dot{m}_{H_2O_{out,f}}\left[h^\circ_{f_{H_2O}} + C_{p_{H_2O}}(T_f - T_\circ)\right] \quad (۱۶)$$

$\dot{Q}_f$، h°_f و C_P به ترتیب نرخ حرارت تولیدی در پیل سوختی، آنتالپی تشکیل و گرمای ویژه می‌باشند. دمای اصلاح‌کننده، مشعل، پیل سوختی و دمای استاندارد به ترتیب با T_r، T_b، T_f و T_o نشان داده شده‌اند. عادله بقای انرژی در گرم‌کن و نحوه محاسبه حرارت بازگشتی در سیستم دوگانه به صورت زیر می‌باشد.

$$\dot{m}_{outb} C_{p_{outb}} (T_b - T_{he}) = \dot{m}_{w_f} (C_{p_{Steam}} (T_r - T_{sat}) + h_{fg} + C_{p_{C.W_{outf}}} (T_{sat} - T_f)) \quad (۱۷)$$

$$\dot{Q}_{CHP} = \dot{m}_{w_f} C_{p_w} (T_{ex} - T_f) + \dot{m}_{CoolWater} C_{p_W} (T_{ex} - T_{f_i}) \quad (۱۸)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.4.5]

T_{he} و T_{ex} به ترتیب دمای بخار خروجی از گرمکن و دمای مبدل حرارتی می‌باشند. محاسبه بازده انرژی سیستم در دو حالت ساده و دوگانه از طریق روابط زیر انجام می‌شود.

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_f LHV} \quad (۱۹)$$

$$\eta_{I,CHP} = \frac{\dot{W}_{net} + \eta_{Carnot}\dot{Q}_{CHP}}{\dot{m}_f\, LHV} \quad (۲۰)$$

LHV ارزش حرارتی پایین سوخت و معادل (kj/kg) ۲۶۵۰۰ و η_{Carnot} بازده سیکل کارنو می‌باشد.

۳-۲ تحلیل اگزرژی:

تحلیل اگزرژی روشی است که با استفاده از معادلات بقای جرم و انرژی و به همراه قانون دوم ترمودینامیک به بررسی عملکرد سیستم‌های انرژی و سایر سیستم‌ها پرداخته و پارامتر مهمی در طراحی اینگونه سیستم‌ها می‌باشد. امروزه تاکید بسزایی بر روی میزان اگزرژی فرآیندها و بهینه‌سازی ترمودینامیکی آنها وجود دارد. به گونه‌ای که اگزرژی به مشخصه‌ای فراتر از سایر مشخصه‌های ترمودینامیکی تبدیل شده و به دلیل جامعیت منحصر بفرد توانایی بررسی سه مولفه مهم انرژی، محیط زیست و پایداری توسعه را دارد[۶].

اگزرژی به چهار مولفه اگزرژی شیمیایی، فیزیکی، سینتیک و پتانسیل تقسیم می‌شود. در این مقاله اگزرژی فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی قرار گرفته و اگزرژی‌های سینتیک و پتانسیل به دلیل ناچیز بودن تغییرات سرعت و ارتفاع قابل صرفنظر کردن هستند. اگزرژی فیزیکی برابر است با بیشترین کار تئوری بدست‌آمده از سیستم در حال تبادل با حالت تعادل. همچنین اگزرژی شیمیایی یک ماده برابر است . با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک روابط مربوط به اگزرژی‌های فیزیکی، شیمیایی و کل به ترتیب به صورت زیر بدست آمدند[۱۳].

$$e_{ph} = C_p T_o\left[\frac{T}{T_o} - 1 - \ln\left(\frac{T}{T_o}\right)\right] + RT_o \ln\frac{P}{P_o} \quad (۲۱)$$

$$e_{ch} = \sum_{i=1}^{n} x_i e_{ch,i} + RT_o \sum_{i=1}^{n} x_i \ln(x_i) \quad (۲۲)$$

$$e_t = e_{ph} + e_{ch} \quad (۲۳)$$

در روابط فوق x_i کسر مولی جزء iام است. همچنین آنتروپی تولیدی و بازده اگزرژی سیستم از طریق رابطه زیر بدست می‌آید[۱۳].

$$\dot{S}_{gen} = \frac{1}{T_o}\left[\sum_{in}\dot{m}e_t - \sum_{out}\dot{m}e_t - \dot{W}_{net}\right] \quad (۲۴)$$

$$\dot{S}_{genCHP} = \frac{1}{T_o}\left[\sum_{in}\dot{m}e_t - \sum_{out}\dot{m}e_t - \dot{W}_{net} - \eta_{Carn}\dot{Q}_{CHP}\right] \quad (۲۵)$$

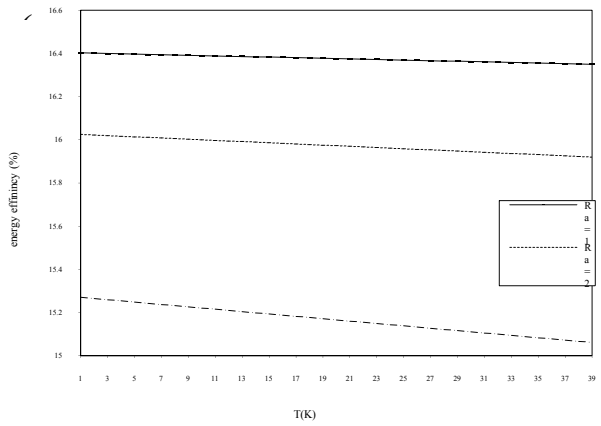
$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{net}}{\sum_{in}\dot{m}e_t - \sum_{out}\dot{m}e_t} \quad (۲۶)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{net} + \eta_{Carnot}\dot{Q}_{CHP}}{\sum_{in}\dot{m}e_t - \sum_{out}\dot{m}e_t} \quad (۲۷)$$

۴. بحث و نتیجه‌گیری

همانطور که اشاره شد روابط (۱۹) و (۲۰) بازده‌های انرژی سیستم در دو حالت ساده و دوگانه را بدست می‌دهند. تغییرات بازده انرژی بر حسب دمای محیط در دوحالت ساده و دوگانه شکل (۲) آورده شده است. افزایش دمای محیط منجر به افزایش کار ورودی به کمپرسور شده و کاهش بازده انرژی سیستم ساده می‌شود. در حالت تولید دوگانه، کاهش توان خالص تولیدی سیستم و همچنین افزایش حرارت بازگشتی از نتایج افزایش دمای محیط می‌باشند. شکل (۳) نشان می‌دهد که با افزایش دمای محیط، نرخ افزایش حرارت بازگشتی به مراتب از نرخ کاهش توان تولیدی بیشتر بوده و در نتیجه بازده انرژی سیستم در حالت دوگانه افزایش می‌یابد.

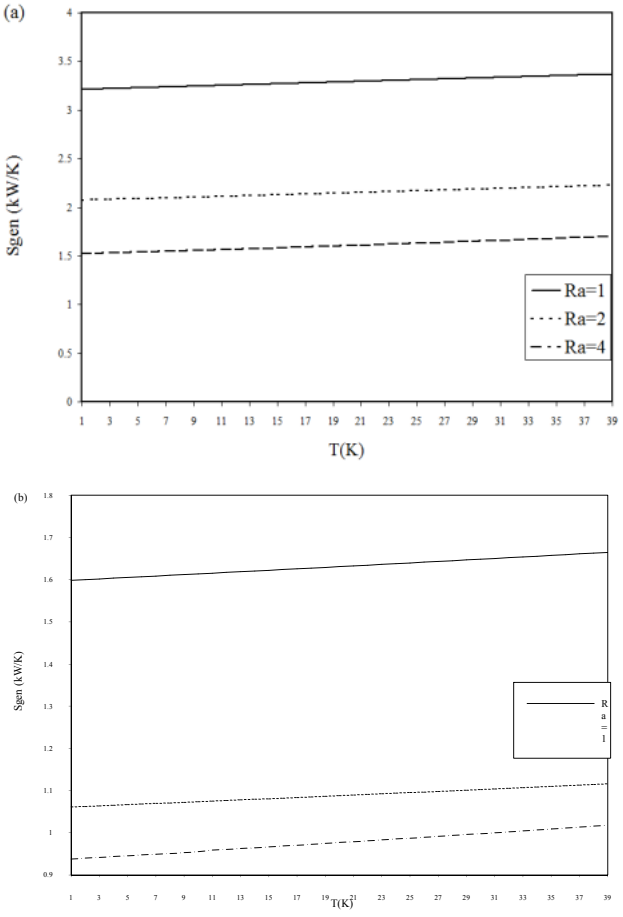
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.4.5]



شکل ۲. تغییرات بازده انرژی برحسب دمای محیط در حالت ساده (a) و دوگانه (b)

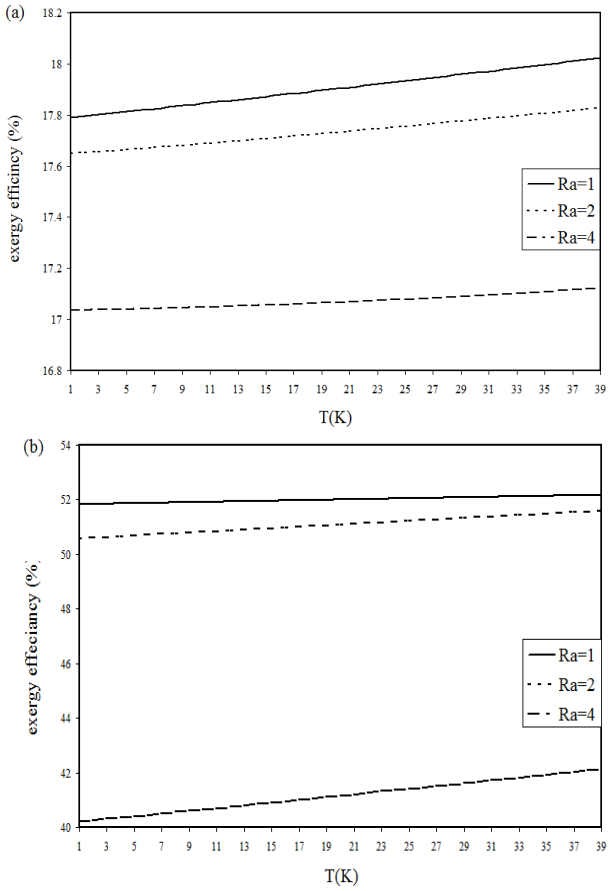
با افزایش دمای محیط و در پی آن کاهش دمای مشعل و افزایش کار ورودی به کمپرسور، میزان آنتروپی تولیدی توسط سیستم افزایش می‌یابد. مطابق با روابط (۲۴) و (۲۵) میزان آنتروپی تولیدی سیستم در حالت‌های ساده و دوگانه بدست آمده و نمودار تغییرات آن بر حسب تغییرات دمای محیط در شکل (۳) رسم شده است. به‌کارگیری سیستم دوگانه منجر به ۷۰٪ کاهش در میزان آنتروپی تولیدی می‌شود.

افزایش دمای هوای ورودی منجر به افزایش اگزرژی آن می‌شود. این تاثیر به‌گونه‌ای است بر کاهش بازده اگزرژی ناشی از افزایش کار ورودی به کمپرسور و کاهش دمای مشعل غلبه کرده و منجر به افزایش بازده اگزرژی سیستم در دو حالت ساده و دوگانه می‌شود. تغییرات بازده اگزرژی سیستم بر اساس دمای هوای ورودی به ازاء نسبت‌های هوا به اگزرژی سیستم در دو حالت ساده و دوگانه می‌شود. تغییرات بازده اگزرژی سیستم بر اساس دمای هوای ورودی به ازاء نسبت‌های هوا به سوخت مختلف در شکل (۴) آورده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش نسبت مولی هوا به سوخت، نرخ افزایش بازده اگزرژی بیشتر می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که به‌کارگیری سیستم در حالت دوگانه به‌طور میانگین منجر به ۲۸.۲٪ افزایش در بازده اگزرژی و ۳۲.۲٪ افزایش در بازده انرژی می‌شود.



شکل ۳. تغییرات آنتروپی تولیدی بر حسب دمای محیط در حالت ساده (a) و دوگانه (b)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.4.5]



شکل ۴. تغییرات بازده اگزرژی برحسب دمای محیط در حالت ساده (a) و دوگانه (b)

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیل‌های انرژی و اگزرژی یک سیستم پیل سوختی PEM در دو حالت ساده و دوگانه (CHP) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اجزای اصلی سیستم مورد نظر شامل واحدهای پیل سوختی، مشعل، اصلاح‌کننده، مبدل حرارتی، باتری و آبگرمکن می‌باشد. تحلیل ترمودینامیکی سیستم فوق بر اساس تغییرات بازده انرژی، بازده اگزرژی و میزان آنتروپی تولیدی بر حسب دمای ورودی و به ازاء نسبت‌های مولی مختلف هوا به سوخت انجام شده است. اهم نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

۱- به دلیل افزایش کار ورودی به کمپرسور، بازده انرژی سیستم در حالت ساده با افزایش دما کاهش می‌یابد.

۲- در سیستم دوگانه، افزایش گرمای بازیافتی به دلیل افزایش دمای هوای ورودی بر افزایش کار ورودی به کمپرسور غلبه کرده و برخلاف سیستم ساده بازده انرژی سیستم در حالت دوگانه با افزایش دمای هوا، افزایش می‌یابد.

۳- افزایش دمای هوای ورودی منجر به افزایش آنتروپی تولیدی در سیستم‌های ساده و دوگانه می‌شود. به‌کارگیری سیستم دوگانه منجر به ۷۰٪ کاهش در میزان آنتروپی تولیدی می‌شود.

۴- افزایش اگزرژی ناشی از افزایش دمای هوای ورودی منجر به افزایش بازده اگزرژی سیستم در هر دو حالت ساده و دوگانه می شود.

۵- به‌کارگیری سیستم در حالت دوگانه به‌طور میانگین منجر به ۲۸.۲٪ افزایش در بازده اگزرژی و ۳۲.۲٪ افزایش در بازده انرژی می‌شود.

مراجع

[1] A. Yialanci, I. Dincer, H.K. Ozturk, “Performance analysis of a PEM fuel cell unit in a solar-hydrogen system,” *International Journal of Hydrogen Energy,* vol.33, 2008, pp.7538-7552.

[2] M.A. Rosen, N.M. Lee, I. Dincer, “Efficiency analysis of a cogeneration and district energy system,” *Applied Thermal Engineering*, vol.25, 2005, pp.147–159.

[3] I. Dincer, M.A. Rosen, “Thermodynamic aspects of renewable and sustainable development,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.9(2), 2005, pp.89-169.

[4] M. Gorji-Bandpy, V. Ebrahimian, “Exergoeconomic analysis of gas turbine power plants,” *International Journal of Energy Journal*, vol.7, 2006, pp.57–67

[5] M.A. Ehyaei, M.N. Bahadori, “Selection of micro turbines to meet electrical and thermal energy needs of residential buildings in Iran,” *Energy & Building*, vol.39, 2006, pp.1227–1234.

[6] M.A. Ehyaei, A. Mozafari, “Energy, economic and environmental analysis of a micro gas turbine employed for on-site combined heat and power production,” *Energy and Buildings*, vol.42, 2010, pp.259–264

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.4.5]

[7] C.J. Renedo, A. Ortiz, M. Monana, D. Silio, S. Perez, "Study of different cogeneration alternatives for Spanish hospital center," *Energy and Buildings*, vol.38, 2006,

[8] K.H. Khan, M.G. Rasul, M.M.K. Khan, "Energy conservation in buildings: cogeneration and cogeneration coupled with thermal energy storage," *Applied Energy*, vol.7, 2004, pp.15–34.

[9] X.Q. Kong, R.Z. Wang, X.H. Huang, "Energy efficiency and economic feasibility of CCHP driven by Stirling engine," *Energy Conversion and Management*, vol.45, 2004, pp.1433-1442

[10] K.M. Maribu, R. Firestone, C. Marnay, A.S. Siddiqui, "Distributed energy resources market diffusion model," *Energy Policy*, vol.35, 2007, pp.4471–4484

[11] E. Cardona, P. Sannino, A. Piacentino, F. Cardona, "Energy saving in airports by trigeneration. Part II: Short and long term planning for the Malpensa 2000 CHCP plant," *Applied Thermal Engineering*, vol.26, 2006, pp.1437–1447..

[12] A. Bejan, Advanced Engineering Thermodynamics, John Wiley & Sons, New York, 19

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.4.5]