

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک  
پایان نامه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی

آنالیز انرژی و بهینه سازی چند هدفه عملکرد یک سیستم هیبریدی متشکل  
از پیل سوختی اکسید جامد - موتور استرلینگ - آب شیرین کن اسمز معکوس

دانشجو:

ام البنین شکوری

اساتید راهنما:

دکتر محمود فرزانه گرد

دکتر محمد حسین احمدی

زمستان ۱۳۹۸

## تقدیم به پدر و مادرم

## تعهد نامه

اینجانب ام البنین شکوری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه آنالیز انرژی و بهینه سازی چند هدفه عملکرد یک سیستم هیبریدی متشکل از پیل سوختی اکسید جامد- موتور استرلینگ- آب- شیرین کن اسمز معکوس تحت راهنمایی آقایان دکتر محمود فرزانه گرد و دکتر محمد حسین احمدی متعهد می شوم

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ:

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

در این پایان نامه، به ارزیابی سیستم تولید آب شیرین با استفاده از آب شیرین کن اسمز معکوس بر پایه ی پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ پرداخته شده است. پیل های سوختی یک مبدل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی هستند که امروزه به عنوان یک فناوری جدید در تولید انرژی محسوب می شوند. در میان پیل های سوختی موجود پیل های سوختی اکسید جامد به دلیل دمای کاری بالا (۷۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه ی سیلسیوس) پتانسیل بسیار خوبی برای کاربرد در سیستم های تولید همزمان و ترکیبی را داراست. حرارت خروجی پیل های سوختی اکسید جامد (SOFC)<sup>1</sup> به عنوان منبع حرارتی دما بالا عمل می کند که می تواند برای موتورهای حرارتی مانند موتور استرلینگ به عنوان منبع حرارتی استفاده شود. سیستم هیبریدی شامل پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ یک نیروگاه تولید توان می باشد که در آن از حرارت خروجی پیل سوختی به منظور تولید توان در موتور استرلینگ استفاده می شود و این بازیافت حرارت باعث افزایش بازدهی کل سیستم می گردد. همچنین با توجه به مشکلات کمبود آب در دنیا و نیاز به آب شیرین استفاده از سیستم های آب شیرین کن اسمز معکوس بسیار متداول شده است که در این پژوهش به بررسی یک سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ و آب شیرین کن اسمز معکوس پرداخته شده است که در این سیستم محصول تولیدی آب شیرین می باشد. توابع هدف مهمی از قبیل توان خروجی و چگالی تخریب انرژی و راندمان انرژی و انرژی برای قسمت تولید توان مورد بررسی قرار گرفته است. در کل این تحقیق عملکرد یک سیستم هیبریدی پیل سوختی، موتور استرلینگ و آب شیرین کن اسمز معکوس برای تولید آب شیرین بررسی شده است، که ابتدا یک تحلیل ترمودینامیکی برای تمام اجزای سیستم انجام شده است، سپس با یک بهینه سازی چند هدفه عملکرد سیستم هیبریدی تولید توان پیل سوختی، موتور استرلینگ و میزان آب تولیدی برای آب شیرین کن اسمز معکوس محاسبه گردیده است. بیشترین مقدار چگالی توان ( $P_H$ ) در سیستم هیبریدی ۷۴۴۷ وات بر متر مربع

---

<sup>1</sup> - solid oxide fuel cell

و همچنین مقدار بیشترین راندمان ( $\eta_h$ ) برابر ۰/۷۷ و چگالی تخریب انرژی ( $exd_h$ ) ۳۶۱۷۰ وات بر متر مربع و راندمان انرژی و انرژی ( $\Phi_h$ ) سیستم هیبریدی 0/86 می باشد. و مقدار ماکسیمم نرخ جریان جرم از آب شیرین ( $m_f$ ) ۳ کیلوگرم بر ثانیه دریافت شده است.

## کلمات کلیدی

پیل سوختی اکسید جامد، آب شیرین کن اسمز معکوس، موتور استرلینگ، برگشت ناپذیری، راندمان انرژی و انرژی، چگالی تخریب انرژی، بهینه سازی چند هدفه.

## فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ انواع پیل سوختی	۲
۳-۱ عملکرد پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)	۴
۴-۱ اجزای اصلی پیل سوختی اکسید جامد	۶
۱-۴-۱ کاتد	۶
۲-۴-۱ الکترولیت	۷
۳-۴-۱ آند	۷
۵-۱ مزایای پیل سوختی اکسید جامد	۸
۱-۵-۱ راندمان	۸
۲-۵-۱ انعطاف پذیری در سوخت	۸
۳-۵-۱ آلاینده های خروجی از پیل سوختی اکسید جامد	۹
۴-۵-۱ عدم آلودگی صوتی	۹
۵-۵-۱ طول عمر	۹
۶-۱ انواع موتورهای حرارتی	۱۰
۱-۶-۱ موتور استرلینگ	۱۰
۲-۶-۱ نحوه عملکرد سیکل استرلینگ	۱۲
۳-۶-۱ مزایا و معایب موتور استرلینگ	۱۳
۷-۱ مقدمه های بر سیستم های هیبریدی	۱۴
۱-۷-۱ یک نمونه از ترکیب سیستم هیبریدی SOFC-Stirling Engine	۱۵
۲-۷-۱ سیستم هیبریدی SOFC - موتور استرلینگ و آب شیرین کن اسمز معکوس	۱۶
۸-۱ جمع بندی	۱۸
فصل دوم: پیشینه تحقیق	۱۹
۱-۲ مقدمه	۲۰
۱-۱-۲ مطالعات پیشین روی پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)	۲۰
۲-۱-۲ مطالعات پیشین روی سیستم آب شیرین کن اسمز معکوس (RO)	۲۳
۳-۱-۲ مطالعات پیشین روی سیستم هیبریدی شامل پیل سوختی SOFC	۲۷

۲۹.....	۴-۱-۲ مطالعات پیشین روی سیستم هیبریدی SOFC با موتور استرلینگ
۳۱.....	۲-۲ معرفی کار حاضر.....
۳۳.....	فصل سوم: مدلسازی سیستم هیبریدی پیشنهادی.....
۳۴.....	۱-۳ آرایش سیستم هیبریدی پیشنهادی.....
۳۵.....	۲-۳ معادلات مربوط به بخش هیبریدی سینیتیک SOFC.....
۴۲.....	۳-۳ معادلات پیل سوختی اکسید جامد برگشت ناپذیر.....
۴۳.....	۴-۳ معادلات مربوط به موتور استرلینگ.....
۴۴.....	۵-۳ معادلات مربوط به سیستم هیبریدی.....
۴۴.....	۶-۳ معادلات مربوط به آب شیرین کن اسمز معکوس.....
۴۷.....	فصل چهارم: معتبرسازی و نتایج مدل سازی.....
۴۸.....	۱-۴ مقدمه.....
۴۸.....	۲-۴ معتبرسازی.....
۴۸.....	۱-۲-۴ معتبر سازی پیل سوختی اکسید جامد.....
۴۹.....	۲-۲-۴ معتبر سازی موتور استرلینگ.....
۵۰.....	۳-۲-۴ معتبر سازی سیستم هیبریدی شامل پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ.....
۵۱.....	۳-۴ مدلسازی.....
۵۳.....	۱-۳-۴ تحلیل نمودارهای شبیه سازی شده پیل سوختی اکسید جامد.....
۶۷.....	۲-۳-۴ تجزیه و تحلیل مدلسازی موتور استرلینگ.....
۶۸.....	۳-۳-۴ تجزیه و تحلیل شبیه سازی سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ.....
۷۳.....	۴-۳-۴ تجزیه و تحلیل میزان دبی آب شیرین.....
۷۳.....	۴-۴ بهینه سازی چند هدفه.....
۷۳.....	۱-۴-۴ مقدمه ای بر بهینه سازی چند هدفه.....
۷۵.....	۲-۴-۴ تحلیل نمودارهای بهینه سازی چند هدفه.....
۷۷.....	۳-۴-۴ نتایج بهینه سازی چند هدفه.....
۸۱.....	فصل پنجم: بحث و نتیجه گیری.....
۸۲.....	۱-۵ نتیجه گیری.....
۸۳.....	۲-۵ پیشنهاد ها.....



## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱-۱- انواع پیل سوختی اکسید جامد [۳]..... ۳
- شکل ۲-۱- عملکرد پیل سوختی اکسید جامد [۴]..... ۵
- شکل ۳-۱- شماتیک واکنش انجام شده پیل سوختی اکسید جامد [۵]..... ۵
- شکل ۴-۱- شماتیک سیکل استرلینگ [۸]..... ۱۲
- شکل ۵-۱- فاز سیکل استرلینگ [۸]..... ۱۳
- شکل ۶-۱- سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد- موتور استرلینگ [۱۱]..... ۱۵
- شکل ۷-۱- یک نوع دستگاه آب‌شیرین کن RO [۱۳]..... ۱۷
- شکل ۱-۳- شماتیک کلی سیستم هیبریدی پیشنهادی..... ۳۴
- شکل ۱-۴- نمودار توان خروجی از پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان در دماهای مختلف..... ۵۴
- شکل ۲-۴- نمودار راندمان حاصل از پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای دماهای مختلف..... ۵۵
- شکل ۳-۴- راندمان پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای ضخامت الکترولیت مختلف..... ۵۶
- شکل ۴-۴- توان خروجی از پیل سوختی با چگالی جریان برای ضخامت الکترولیت مختلف..... ۵۷
- شکل ۵-۴- نمودار توان پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای مقاومت تراوشی مختلف..... ۵۸
- شکل ۶-۴- نمودار بازده پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای مقاومت نشتی مختلف..... ۵۹
- شکل ۷-۴- نمودار توان پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای مقاومت نشتی مختلف..... ۶۰
- شکل ۸-۴- نمودار راندمان پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان در کسر مولی مختلف..... ۶۱
- شکل ۱۰-۴- نمودار توان پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای فشارهای مختلف..... ۶۲
- شکل ۱۱-۴- نمودار ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای دماهای مختلف..... ۶۳
- شکل ۱۲-۴- نمودار ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای فشارهای مختلف..... ۶۴
- شکل ۱۳-۴- نمودار ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان مختلف..... ۶۵
- شکل ۱۴-۴- نمودار توان پیل سوختی اکسید جامد با نرخ جریان هوای مختلف..... ۶۵
- شکل ۱۵-۴- نمودار توان پیل سوختی اکسید جامد با نرخ جریان سوخت مختلف..... ۶۶
- شکل ۱۶-۴- نمودار ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد با فشار مختلف..... ۶۷
- شکل ۱۷-۴- نمودار توان موتور استرلینگ با چگالی جریان مختلف..... ۶۷
- شکل ۱۸-۴- نمودار چگالی تخریب اگزرژی موتور استرلینگ با چگالی جریان مختلف..... ۶۸
- شکل ۱۹-۴- نمودار توان سیستم هیبریدی با چگالی جریان مختلف..... ۶۹
- شکل ۲۰-۴- نمودار راندمان سیستم هیبریدی با چگالی جریان مختلف..... ۷۰
- شکل ۲۱-۴- نمودار بازده انرژی و اگزرژی سیستم هیبریدی با چگالی جریان مختلف..... ۷۰
- شکل ۲۲-۴- نمودار چگالی تخریب اگزرژی سیستم هیبریدی با چگالی جریان مختلف..... ۷۱

- شکل ۴-۲۳- نمودار تابع ترمو زیست محیطی با چگالی جریان مختلف ..... ۷۲
- شکل ۴-۲۴- نمودار دبی آب خروجی با چگالی جریان برای دماهای مختلف ..... ۷۳
- شکل ۴-۲۵- نمودار بهینه سازی توان و چگالی تخریب انرژی و بازده انرژی و انرژی ..... ۷۶
- شکل ۴-۲۶- نمودار بهینه سازی دبی آب شیرین و چگالی تخریب انرژی و بازده انرژی و انرژی ..... ۷۷

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱- مقایسه انواع پیل‌های سوختی [۴] ..... ۴
- جدول ۱-۴- پارامترهای ورودی پیل سوختی اکسید جامد [۱۹,16] ..... ۴۹
- جدول ۲-۴- نتایج مدل حاضر با نتایج ارائه شده توسط زهانگ برای پیل سوختی اکسید جامد [۱۶, ۱۹] ..... ۴۹
- جدول ۳-۴- پارامترهای ورودی موتور استرلینگ [۱۱] ..... ۵۰
- جدول ۴-۴- نتایج مدل حاضر با نتایج ارائه شده توسط *Emin* برای موتور استرلینگ [۱۱] ..... ۵۰
- جدول ۵-۴- پارامترهای ورودی سیستم هیبریدی شامل پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ [۱۱] ..... ۵۱
- جدول ۶-۴- نتایج مدل حاضر با نتایج ارائه شده توسط *Emin* برای سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ [۱۱] ..... ۵۱
- جدول ۷-۴- پارامترهای مورد نیاز سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ [11,16,19] ..... ۵۲
- جدول ۸-۴- پارامترهای مورد سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ، آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس [۳۱] ..... ۵۳
- جدول ۹-۴- نتایج بهینه توسط الگوریتم‌های تصمیم‌سازی ..... ۷۷
- جدول ۱۰-۴- نتایج آنالیز خطا برای نتایج بهینه‌سازی ..... ۷۸
- جدول ۱۱-۴- نتایج بهینه توسط الگوریتم‌های تصمیم‌سازی ..... ۷۹

## فهرست علائم

$(m^2)$	مساحت سطح پیل	$A$
$\left(\frac{Mptsk}{g}\right)$	شاخص <i>Eco</i>	$b_1$
$\left(\frac{mptsm}{J}\right)$	شاخص <i>Eco</i>	$b_2$
$\left(\frac{m^2}{s}\right)$	فاکتور مختلف از اثرات گاز	$D_{eff}$
$(V)$	فعالسازی انرژی	$E$
$\left(\frac{C}{mol}\right)$	ثابت فارادی	$F$
$\left(\frac{J}{mol}\right)$	عملکرد مولار گیبس	$g$
$\left(\frac{J}{mol}\right)$	آنتالپی مولار	$h$
$\left(\frac{A}{m^2}\right)$	چگالی جریان	$i$
-	نسبت مقاومت نشتی	$k$
$(\mu m)$	ضخامت	$L$
$(Kg)$	وزن مولکولی	$M$
-	تعداد الکترون ها	$n_e$
$(bar)$	فشار عملیاتی	$P$
$(KW)$	توان الکتریکی	$Power$
$(KW)$	نرخ تولید حرارت	$Q$
$\left(\frac{J}{molK}\right)$	ثابت جهانی گاز	$R$
$(\Omega)$	مقاومت اهمیک	$r$
$(K)$	دمای عملیاتی	$T$
-	فاکتور تولید سوخت	$U_f$
$\left(\frac{Kmol}{hr}\right)$	نرخ مولار از پیشرفت واکنش بهسازی پیل	$x$
$Kgm^{-3}$	شوری آب خوراک	$X_f$
$Kgm^{-3}$	نفوذ شوری	$X_b$
$Kgm^{-3}$	شوری محلول نمکی	$X_P$
-	نرخ مولار از پیشرفت واکنش انتقال پیل	$y$
$(K)$	نرخ مولار از پیشرفتواکنش کلی پیل	$z$

## علائم یونانی

-	ضریب انتقال شارژ	$\alpha$
$\left(\frac{W}{m^2K}\right)$	هدایت حرارتی	$\theta$
-	ضریب انتقال	$\beta$
$m$	طول جریان جاری	$\delta$
-	تخلخل	$\varepsilon$
$\frac{mA}{cm^2}$	ثابت چگالی جریان	$\gamma$
-	راندمان	$\eta$
$Om$	مقاومت مواد	$\rho$
-	خمیدگی	$\tau$
-	ضرایب استوکیومتری	$\nu_i$
-	راندمان انرژی و انرژی	$\phi$

## زیرنویس ها

نقطه صفر	<i>0</i>
آند	<i>A</i>
کاتد	<i>C</i>
پیل سوختی	<i>Cell</i>
متان	<i>CH<sub>4</sub></i>
کربن منواکسید	<i>CO</i>
کربن دی اکسید	<i>CO<sub>2</sub></i>
هیدروژن	<i>H<sub>2</sub></i>
بخار	<i>H<sub>2</sub>O</i>
نیتروژن	<i>N<sub>2</sub></i>
اکسیژن	<i>O<sub>2</sub></i>
الکترولیت	<i>el</i>
مصرف سوخت	<i>f</i>
ترکیب پیل سوختی	<i>k</i>
واکنش بهسازی	<i>r</i>
واکنش بهسازی	<i>ref</i>
ساختار جامد	<i>s</i>
واکنش انتقال	<i>shift</i>
واکنش انتقال	<i>sh</i>
کلی	<i>tot</i>
آند	<i>an</i>
کاتد	<i>ca</i>
فعالسازی انرژی	<i>act</i>
غلظت قطبش	<i>conc</i>
تلفات	<i>loss</i>
اهمیک	<i>ohm</i>
خروجی	<i>o</i>
ورودی	<i>i</i>

## فصل اول: مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

سیستم‌های آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس آب شور دریاها را به آب قابل شرب تبدیل می‌کنند، امروزه این سیستم یکی از موفق‌ترین روش تصفیه آب با حجم بالا می‌باشد، که در این روش وابستگی به انرژی و سوخت‌های فسیلی به حداقل رسیده و برای محیط زیست به مراتب ایمن‌تر هستند. در تحقیق حاضر سعی شده است با استفاده از یک سیستم هیبریدی شامل آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس به همراه پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ، مقدار حجم آب شیرین تولیدی افزایش داده شود. در این میان استفاده از پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) نسبت به سایر پیل‌های سوختی به علت داشتن دمای کاری بالا (۷۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس) دارای پتانسیل بسیار خوبی برای کاربرد در سیستم‌های تولید همزمان و ترکیبی می‌باشد، که پیل‌های سوختی اکسید جامد به عنوان منبع حرارتی دما بالا برای موتور استرلینگ عمل می‌کند. در این نوع سیستم هیبریدی به کار رفته با توجه به واکنش‌های الکتروشیمیایی که در پیل سوختی انجام می‌شود، حرارت خروجی از واکنش‌های انجام شده از پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) وارد موتور استرلینگ شده و گرمای لازم برای کار-کرد موتور را فراهم می‌کند. موتور استرلینگ با دریافت گرما شروع به کار کرده و توان الکتریکی تولید می‌کند که باعث افزایش بازده سیستم هیبریدی می‌شود. در سیستم هیبریدی پیشنهادی، هردو بخش پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ به طور مجزا، توان الکتریکی تولید می‌کنند و این مسئله باعث افزایش بازده، توان تولیدی و دبی آب شیرین تولیدی می‌شود.

شیرین کردن آب شور دریاها با هدف تامین آب شیرین و قابل شرب برای مصارف خانگی و صنعتی مورد نیاز می‌باشد اما به علت هزینه‌های بالای فناوری آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس اغلب از این سیستم برای تولید آب شیرین برای مصارف خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۱-۲ انواع پیل سوختی

پیل‌های سوختی به دلیل راندمان بالا، عدم انتشار آلاینده‌های زیست محیطی، چگالی توان بالا، عدم وجود قطعات متحرک و عدم ایجاد ارتعاش و صدا، تجهیزات مطلوبی برای تولید انرژی از ظرفیت‌های



بسیار کم تا نیروگاه‌های بسیار بزرگ به حساب می‌آیند. سازه و بدنه اصلی پیل سوختی از الکترولیت، آند و کاتد تشکیل شده است. پیل سوختی یک دستگاه تبدیل انرژی است که به لحاظ نظری تا زمانی که ماده اکسیدکننده و سوخت در الکترودهای آن تأمین شود، قابلیت تولید انرژی الکتریکی را دارد. البته در عمل، اصطکاک و خوردگی باعث کاهش عمر پیل سوختی می‌شود [۱].

پیل‌های سوختی را در حالت کلی می‌توان در شش دسته زیر طبقه‌بندی نمود [۲].

(۱) پیل سوختی پلیمری

(۲) پیل سوختی قلیایی

(۳) پیل سوختی اسید فسفریک

(۴) پیل سوختی کربنات مذاب

(۵) پیل سوختی متانولی

(۶) پیل سوختی اکسید جامد

	Anode	Electrolyte	Cathode
PEM PAFC	Pt	Perfluorinated sulfonic acid	Pt
	Pt	Phosphoric acid in SiC	Pt
AFC	Ni/Ag	KOH in Asbestos	Metal Oxides
MCFC	Ni	Alkali Carbonate in LiAlO <sub>3</sub>	NiO
SOFC	Co-ZrO <sub>2</sub> Ni-ZrO <sub>2</sub> Cermet	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> stabilized ZrO <sub>2</sub>	Sr doped LaMnO <sub>3</sub>

شکل ۱-۱- انواع پیل سوختی اکسید جامد [۳]

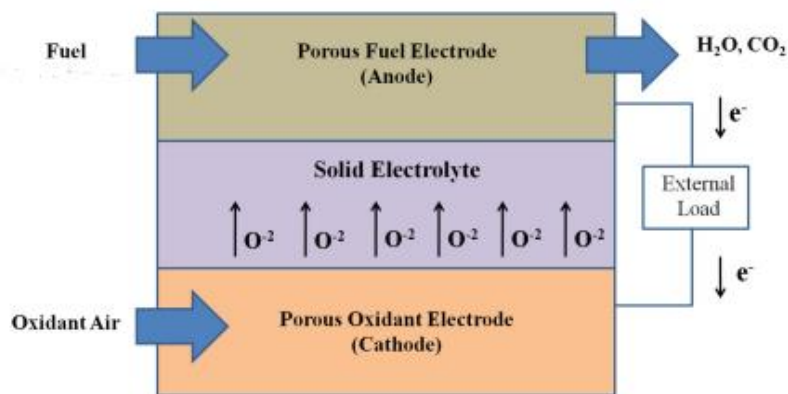
جدول ۱-۱- مقایسه انواع پیل‌های سوختی [۴]

انواع پیل سوختی	دمای عملیاتی (درجه سانتی‌گراد)	توان (کیلو وات)	بازده (%)
غشای الکترولیت پلیمر (PEM)	۶۰ - ۱۱۰	۰/۰۱ - ۲۵۰	٪۴۰ - ٪۵۵
پیل سوختی آلکالین (AFC)	۷۰ - ۱۳۰	۰/۱ - ۵۰	٪۵۰ - ٪۷۰
پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC)	۱۷۵ - ۲۱۰	۵۰ - ۱۰۰۰	٪۴۰ - ٪۴۵
پیل سوختی کربنات گداخته (MCFC)	۵۵۰ - ۶۵۰	۲۰۰ - ۱۰۰۰/۰۰	٪۵۰ - ٪۶۰
پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)	۵۰۰ - ۱۰۰۰	۰/۵ - ۲۰۰۰	٪۴۰ - ٪۷۲
پیل سوختی متانول مستقیم (DMFC)	۷۰ - ۱۳۰	۰/۰۰۱ - ۱۰۰	٪۴۰

### ۱-۳ عملکرد پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)

توسعه پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) از اواخر دهه ۱۹۵۰ آغاز شد و در حال حاضر بالاترین دما را در میان انواع پیل سوختی دارد. محدوده دمای عملکرد این پیل ۷۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس است و به همین دلیل از انواع سوخت‌ها در آن می‌توان استفاده نمود. این پیل سوختی دو ساختار صفحه‌ای و لوله‌ای دارد و از الکترولیت جامد سرامیکی نازکی به جای الکترولیت مایع استفاده می‌شود. در دمای عملکرد بالا در پیل سوختی اکسید جامد یون‌های اکسیژن (با بار منفی) از شبکه کریستالی (عموماً ترکیبی از اکسید کلسیم) عبور می‌کنند. در کاتد ملکول‌های اکسیژن هوا با چهار الکترون ترکیب می‌شوند. 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. الکترون‌های ایجاد شده در آند از یک مدار خارجی عبور می‌کنند. با این کار یک مدار الکتریکی کامل می‌شود و انرژی برق تولید می‌شود. عملکرد کلی پیل سوختی اکسید جامد را می‌

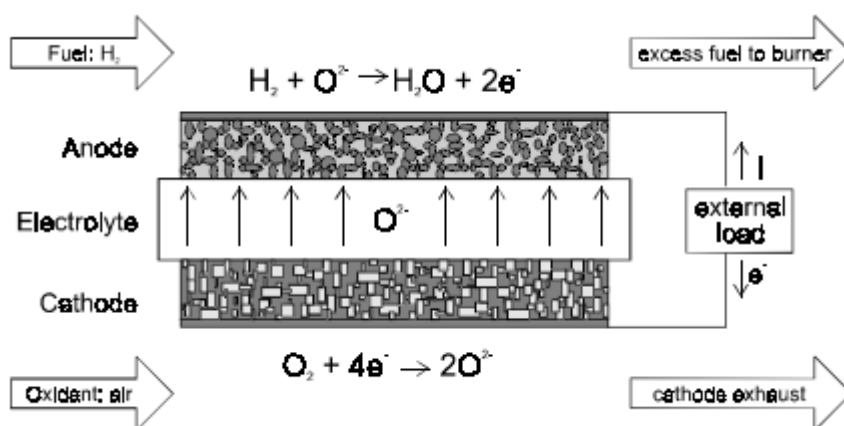
توان در شکل زیر دید [۴].



شکل ۱-۲- عملکرد پیل سوختی اکسید جامد [۴]

دمای بالای کارکرد پیل سوختی اکسید جامد و نیاز به مواد گران قیمت تنوع کاربردها را در این پیل سوختی محدود می کند ولی از طرف دیگر با افزایش دمای کارکرد امکان تبدیل سوخت در داخل پیل سوختی میسر شده و امکان بهره برداری موثر از انرژی گرمایی تولید شده نیز بوجود می آید. با توجه به دمای بالای کارکرد پیل سوختی اکسید جامد، این نوع پیل سوختی در نیروگاه های بزرگ تولید برق و هم چنین نیروگاه های سیکل ترکیبی مورد استفاده قرار می گیرد [۵].

واکنش های انجام شده در آند و کاتد بصورت زیر می باشد:



شکل ۱-۳- شماتیک واکنش انجام شده پیل سوختی اکسید جامد [۵]

در این پیل سوختی واکنش های شیمیایی به قرار زیر اتفاق می افتد [۵]  
واکنش آند:



واکنش کاتد:



واکنش کلی پیل:



### ۴-۱ اجزای اصلی پیل سوختی اکسید جامد

چهار جزء اصلی یک پیل سوختی اکسید جامد بدین ترتیب قرار دارند: آند، الکترولیت، کاتد و اتصال دهنده. این اجزا و موارد تشکیل دهنده آنها به طور مبسوط در زیر مورد بحث قرار خواهند گرفت [۶].

#### ۴-۱-۱ کاتد

کاتد برای ایجاد ویژگی انتقال جرم خوب باید میزان تخلخل مناسبی داشته باشد و برای برقراری جریان الکترون یک رسانای خوب باشد. کاتد همچنین باید دارای سطحی با تبادل سینتیکی مناسب برای اکسیژن و قابلیت انتقال یون اکسیژن بالا باشد. ماده کاتد به منظور کاهش ریسک شکست مکانیکی تحت تأثیر تنش‌های حرارتی، می‌بایست از نظر مکانیکی و شیمیایی با الکترولیت‌ها سازگار باشد.

ماده مرسوم برای کاتد در پیل سوختی اکسید جامد (*LSM Manganate Strontium Lanthanum*) می‌باشد که یک هادی جریان در دماهای بالا است. مشکل اصلی با قسمت کاتد عدم توانایی برای فراهم کردن مسیر انتقال جریان یونی است، بنابراین مناطق فعال به سطوح تبدیلی کاتد-الکترولیت محدود هستند [۶].

## ۱-۴-۲ کنترلیت

الکترولیت‌ها در پیل سوختی اکسید جامد باید دارای ویژگی هدایت یونی، بدون هیچگونه هدایت الکتریکی باشند. الکترولیت همچنین به منظور جلوگیری از نشت جریان و پدیده اتصال کوتاه باید چگال (بدون تخلخل) باشد. به منظور کاهش اتلافات مقاومتی باید آن را تا حد ممکن نازک ساخت. همچنین مانند کاتد باید از لحاظ مکانیکی و شیمیایی پایدار باشد. داشتن عملکردی پایدار در هر دو محیط کاهشی و اکسایشی یکی از مهمترین ویژگی‌های الکترولیت می‌باشد. الکترولیت پیل سوختی نقش اساسی را در عملکرد پیل بر عهده دارد. الکترولیت در پیل‌های سوختی اکسید جامد به صورت یک لایه نازک و متراکم ساخته می‌شود و باعث جداسازی طرف آندی از قسمت کاتدی آن می‌گردد. در دمای بالا یون‌های اکسیژن از طریق غشا، از سمت کاتد و یا اصطلاحاً الکتروود هوا به سمت آند (الکتروود سوخت) انتقال داده شده و با توجه به نوع سوخت مورد استفاده آب، دی اکسید کربن، الکتروسیته و گرما تولید می‌شود. واکنش‌های الکتروشیمیایی در فاصله ۱۰ الی ۲۰ میکرومتری از فصل مشترک الکتروود الکترولیت انجام می‌شوند که به این منطقه، ناحیه عملکردی یا کاربردی گفته می‌شود. بهینه کردن ساختار این ناحیه باعث افزایش مرزهای سه فازی و در نتیجه بهبود کارکرد پیل خواهد شد [۶].

## ۱-۴-۳ آند

آند نیز می‌بایست بیشتر ویژگی‌های کاتد مانند تخلخل، هدایت الکتریکی و سازگاری شیمیایی و مکانیکی را دارا باشد. همچون کاتد، برای گسترده کردن مرزهای میان سه فاز مختلف، آند نیز باید تا حدی ویژگی رسانش یونی را داشته باشد. الکتروود آند پیل سوختی اکسید جامد در اصل باید نیازهای مختلفی را برآورده کند که عبارتند از [2,3].

(۱) نقش کاتالیزوری

(۲) هدایت الکترون‌ها

(۳) تناسب ضریب انبساط حرارتی آن با ضریب انبساط حرارتی سایر اجزاء

۴) پایداری مکانیکی

۵) انتقال به مرز سه فاز و واکنش دهنده‌ها و محصولات

## ۱-۵ مزایای پیل سوختی اکسید جامد

پیل سوختی اکسید جامد یک تکنولوژی پیشرفته برای تبدیل انرژی شیمیایی در سوخت‌های هیدروکربن به انرژی الکتریکی و گرمایش با استفاده از یک واکنش الکتروشیمیایی است. تکنولوژی (SOFC) دارای مزایای زیادی نسبت به تکنولوژی‌های احتراقی می‌باشد از جمله [5]:

- راندمان بالا در مقیاس کوچک
- انعطاف پذیری سوخت
- کاهش انتشار آلاینده‌های خروجی ( $CO_2, NO_x, SO_x$ )
- عملکرد بدون صدا و عدم لرزش

## ۱-۵-۱ راندمان

پیل سوختی اکسید جامد از تکنولوژی‌های متداول مانند موتورهای احتراق و توربین‌های گازی متفاوت است و دارای مراحل احتراق و تبدیل حرارت به کار مکانیکی به منظور تولید الکتروسیته نیست و مستقیماً به وسیله استفاده از واکنش‌های شیمیایی برق تولید می‌کند [۵].

## ۱-۵-۲ انعطاف پذیری در سوخت

پیل سوختی اساساً وسیله‌ای است که سوخت‌هایی مانند هیدروژن، متانول، گاز طبیعی، بنزین و اکسیدان (مانند هوا و اکسیژن) را به برق، آب و حرارت تبدیل می‌کند. به عبارت دیگر پیل سوختی شبیه یک باتری بوده ولی برخلاف باتری نیاز به شارژ ندارد. تا زمانی که سوخت و هوای مورد نیاز پیل تأمین شود، سیستم کار خواهد کرد. پیل‌های سوختی می‌توانند سوخت‌های حاوی هیدروژن مانند متانول (*Methanol*)، اتانول (*Ethanol*)، گاز طبیعی (*Gas Natural*) و حتی بنزین و گازوئیل را مورد استفاده قرار دهند. به طور کلی در سوخت‌های هیدروکربنی، هیدروژن توسط یک دستگاه

اصلاحگر سوخت (*Reformer Fuel*) از آنها جدا شده و بکار گرفته می‌شود. با توجه به دمای عملکرد بالای پیل سوختی اکسید جامد (*SOFC*) (۷۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس)، هیدروکربن‌هایی با وزن مولکولی پایین، می‌توانند بدون نیاز به اصلاح‌کننده (*Reformer*) بیرونی، اصلاح (*Reform*) گردند. با تهویه مناسب، به منظور حذف آلاینده‌های مضر و اطمینان از تعادل مناسب ترکیبات کربن، می‌توان از سوخت‌های گوناگون نظیر گاز طبیعی، بیوگاز، اتانول، متانول، پروپان و حتی سوخت موشک نیز استفاده کرد. سوخت‌های مایع غیرکربن مایع مانند آمونیاک و هیدرازین نیز می‌توانند در پیل سوختی اکسید جامد (*SOFC*) استفاده شوند. آمونیاک با توجه به ارزان بودن، ذخیره سازی آسان، داشتن چگالی انرژی بالا بدون تولید دی‌اکسید کربن بسیار مورد توجه است [۵].

### ۱-۵-۳ آلاینده های خروجی از پیل سوختی اکسید جامد

سیستم‌های پیل سوختی برای فرآیند تولید توان نیازی به احتراق ندارند، به همین دلیل تولید گازهای گلخانه‌ای از جمله *NOX* یا ذرات ریز دیگر، از این سیستم‌ها کم است. به علاوه، ترکیبات گوگرد برای پیل سوختی، سمی هستند که باید از سوخت استخراج گردند بنابراین *SOX* خروجی از پیل ناچیز می‌گردد [۵].

### ۱-۵-۴ عدم آلودگی صوتی

تبدیل الکتروشیمیایی سوخت نیاز به بخش‌های متحرک برای تولید توان را از بین می‌برد. سیستم‌های پیل سوختی فاقد اجزای متحرک هستند. با توجه به این ویژگی سیستم پیل سوختی اکسید جامد دارای ارتعاش و سروصدا نیستند که یک ویژگی مطلوب در فضاهای باز و بسته است [۵].

### ۱-۵-۵ طول عمر

در مقایسه با سایر پیل‌های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد (*SOFC*) به طور کلی بهترین پایداری و قابلیت اطمینان را به علت ساختار سرامیکی تمام جامد ارائه می‌دهند. سیستم‌های تجاری (*SOFC*) در حال حاضر عمر ۳۰/۰۰۰ تا ۴۰/۰۰۰ ساعت یا تقریباً چهار سال با در نظر گرفتن کارکرد مداوم دارا می‌باشند، هرچند که واحدهای آزمایش عملکرد قابل قبولی برای بیش از ۱۰ سال را نیز

نشان داده اند. کمیسیون اروپایی پیل سوختی و هیدروژن (FCHJU) معتقدند که پیل‌های سوختی باید حداقل ۱۰ سال عمر کنند تا تقاضای تجاری را رعایت کنند. دستیابی به این عمر نیازمند بهبود طول عمر مواد مورد استفاده می‌باشد. دماهای بالا باعث افزایش سرعت خوردگی و تخریب اجزاء پیل در طول زمان می‌شود، بنابراین کاهش دمای عملیاتی برای کاهش این فرآیند و افزایش عمر حیاتی ضروری است. بهینه سازی طراحی مواد و بهبود روش‌های حرارتی که برای سخت کردن مواد به جهت بهبود مداوم نیز استفاده می‌شود نیز نقش مهمی دارد. در فصل آینده بحث بیشتری در مورد نحوه و روش‌های بهینه‌سازی انجام شده است [۵].

## ۱-۶ انواع موتورهای حرارتی

موتورهای حرارتی خود به دو دسته کلی احتراق داخلی و احتراق خارجی تقسیم می‌شوند [۷].

- **موتورهای احتراق خارجی:** در این موتورها که عموماً موتورهای بخار نامیده می‌شوند. از بخار آب به عنوان عامل محرک پیستون استفاده می‌شود. وجه مشترک آن نیز بدین دلیل است که بخار داغ به علت محترق شدن ماده سوختنی در خارج از سیلندر موتور ایجاد می‌شود و توسط یک لوله به محفظه سیلندر منتقل می‌گردد.

- **موتورهای احتراق داخلی:** این موتورها خود به دو دسته کلی موتورهای اشتعال جرقه‌ای و دیزل تقسیم می‌شوند و وجه مشترک آنها اینست که ماده سوختنی در داخل محفظه سیلندر محترق می‌گردد. در موتورهای اشتعال جرقه‌ای پس از ورود مخلوط سوخت و هوا به داخل سیلندر از یک جرقه برای شعله‌ور ساختن آن استفاده می‌شود. و در موتورهای دیزل برای محترق ساختن سوخت از حرارت ایجاد شده بواسطه تراکم هوا استفاده می‌شود.

## ۱-۶-۱ موتور استرلینگ

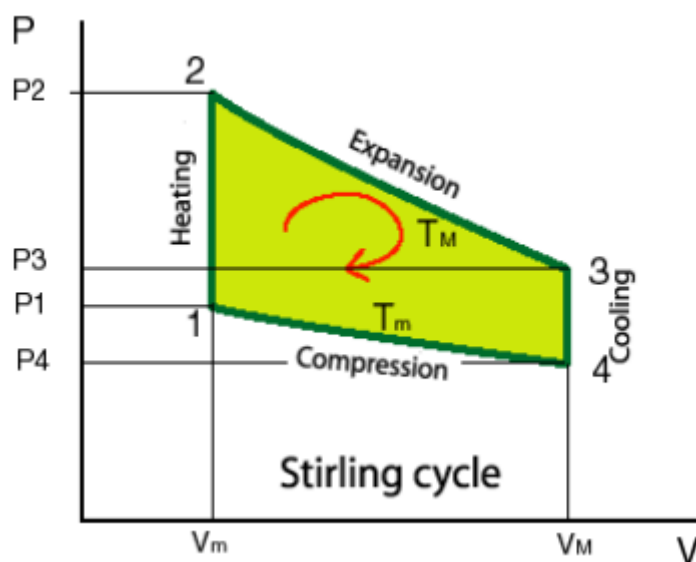
امروزه از موتور استرلینگ در موارد بسیار تخصصی مثل زیردریایی و مولد های کمکی، جایی که عملکرد بی سروصدا اهمیت دارد، استفاده می‌شود. این موتورها یک دسته از موتورهای حرارتی خاص



هستند زیرا بازده آنها تقریباً نزدیک ماکزیمم بازدهی است که توسط تئوری پیش‌بینی می‌شود (بازده چرخه کارنو). این موتور با گاز کار می‌کند. انبساط آن هنگام گرم شدن و انقباض آن هنگام سرد شدن نیروی این موتور را تامین می‌کند. این مقدار گاز بین دو انتهای سرد و گرم در حرکت است و هیچگاه از این چرخه خارج نمی‌شود. یک پیستون وظیفه انتقال گاز به دو منبع سرد و گرم را انجام می‌دهد که حرکت آن ناشی از انبساط و انقباض حجم گاز است. همانطور که گفته شد این گاز هیچوقت از موتور استرلینگ خارج نمی‌شود. این موتور برخلاف موتورهای دیزلی یا بنزینی هیچ کانال تخلیه ندارد زیرا اساس کار آن بر اساس احتراق سوخت نیست بنابراین کاملاً بی صدا عمل می‌کند. منبع تامین گرمای آن می‌تواند انرژی خورشیدی، سوخت‌های فسیلی یا هر نوع گرمای اتلاف شده در طبیعت باشد. این موتور توسط رابرت استرلینگ در سال ۱۸۱۶ اختراع شده بود و پتانسیلی دارد که بسیار کارا تر از موتور گازویلی یا دیزلی می‌باشد. موتور استرلینگ از سیکل استرلینگ استفاده می‌کند که برخلاف سیکلی است که در موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شوند. گازهایی که درون موتور استرلینگ استفاده می‌شوند هرگز از موتور خارج نمی‌شوند. هیچگونه دریچه اگزوزی ندارد که گازها را با فشار زیاد بیرون دهد و هیچ انفجاری رخ نمی‌دهد. به خاطر همین موتورهای استرلینگ فاقد صدا یا به بیان بهتر بسیار کم صدا هستند. سیکل استرلینگ از منبع گرمای خارجی استفاده می‌کند که می‌تواند هر چیزی از گازوییل تا انرژی خورشیدی تا گرمای تولید شده توسط پوسیدگی گیاهان باشد. مبنای کلیدی موتور استرلینگ مقدار ثابتی گاز درون موتور محفوظ است. سیکل استرلینگ مستلزم یک سری اتفاقات است که فشار گاز درون موتور را تغییر می‌دهد که باعث می‌شود کاری انجام شود. اگر میزان ثابتی گاز را در فضایی به حجم ثابت داشته باشید و دمای گاز را افزایش دهید فشار زیاد خواهد شد و همچنین اگر فشرده کنید (حجم فضا را کاهش دهید) دمای گاز افزایش خواهد یافت، به این دلیل است که گازها برای کار در موتور استرلینگ به کار می‌روند [۸].

## ۱-۶-۲ نحوه عملکرد سیکل استرلینگ

همانطور که در شکل (۴-۱) نشان داده می‌شود، یک سیکل استرلینگ است که بخش فاز حرارتی در حجم ثابت می‌باشد (۱-۲). بخش فاز سرمایشی (۳-۴) در حالی که در طی فرایند انبساط (۲-۳). فشار متراکم (۴-۱) که حجم متغییر و دما ثابت می‌باشد.

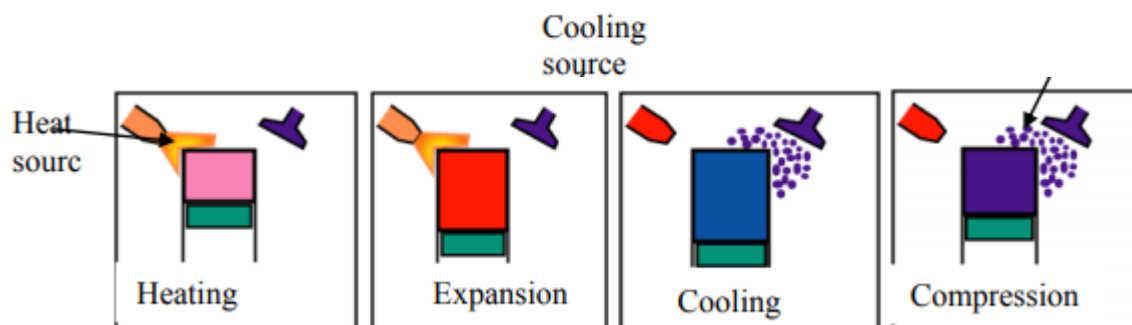


شکل ۴-۱- شماتیک سیکل استرلینگ [۸]

چرخه موتور استرلینگ چهار مرحله دارد؛ گرمایش، انبساط، خنک کننده و فشرده سازی توضیح کوتاه در مورد هر مرحله در زیر آمده است [۸].

- گرمایش: منبع حرارت انرژی گرما را برای موتور فراهم می‌کند به طوری که فشار و دمای گاز افزایش می‌یابد.
- انبساط: در این فاز حجم افزایش می‌یابد، اما فشار و درجه حرارت کاهش می‌یابد، در این فاز از چرخه انرژی مکانیکی از انرژی گرما تولید می‌شود.
- خنک سازی: گاز خنک می‌شود و درجه حرارت و فشار کاهش می‌یابد، بنابراین گاز آماده در طی این دوره فشرده می‌شود.

- فشرده سازی: فشار گاز افزایش می یابد در حالی که حجم آن کاهش می یابد؛ بخشی از انرژی مکانیکی تولید شده برای پردازش این مرحله استفاده می شود.



شکل ۱-۵- فاز سیکل استرلینگ [۸]

### ۱-۶-۳ مزایا و معایب موتور استرلینگ

موتور استرلینگ دارای مزایا و معایب زیر می باشد [۹]

مزایا

- موتورهای استرلینگ می توانند با سوخت های متنوعی از جمله انرژی خورشیدی و بدون نیاز به سوخت در تماس با گاز عامل استفاده شوند. از این رو حتی اگر انرژی خورشیدی در دسترس نباشد ، می توان از سوخت های جایگزین برای عملیات استفاده کرد. بنابراین این دستگاه ها در معرض کمبود سوخت نیستند.
- عملیات با سر و صدای کم امکان پذیر است. از این رو برای زیردریایی ها مناسب است.
- نگهداری کمتری مورد نیاز است و احتراق سوخت در خارج از موتور اتفاق می افتد.
- می تواند به عنوان یک واحد *CHP* استفاده شود.
- خطر انفجار مانند موتورهای بخار وجود ندارد.

معایب

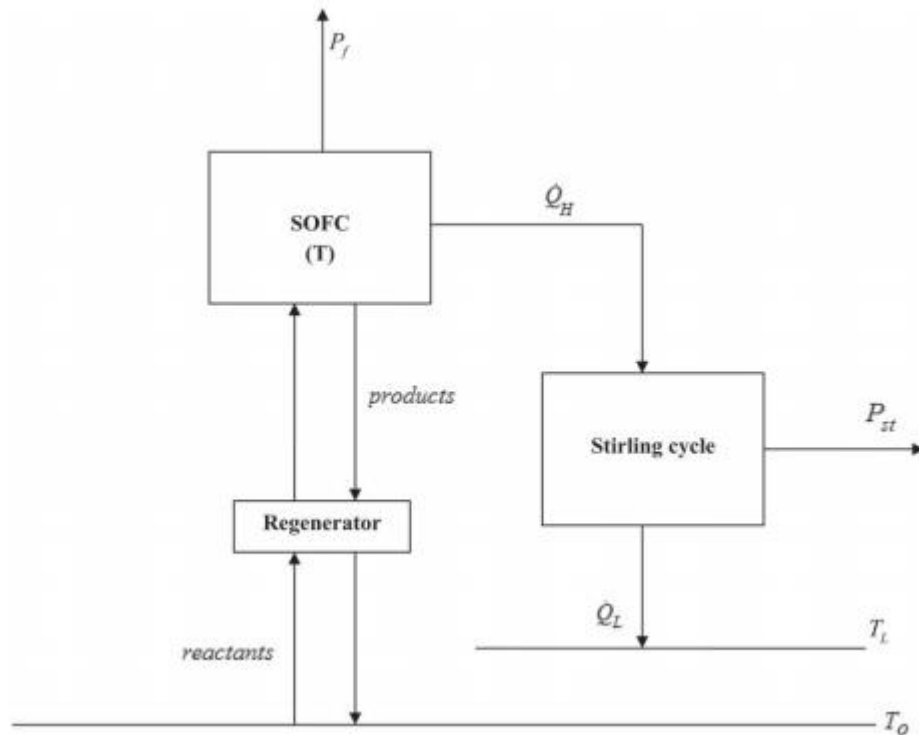
- در مقیاس های بزرگ تجاری تولید نمی شوند.
- زمان زیادی برای سرد شدن آن طول می کشد.

## ۷-۱ مقدمه‌ای بر سیستم‌های هیبریدی

یک سیستم هیبریدی می‌تواند بسیار متنوع بوده و کاربرد متنوعی داشته باشد. از هر کدام از ترکیبات بسته به محل جغرافیایی و دسترسی به انواع انرژی‌های تجدیدپذیر و محدودیت‌های فنی و اقتصادی می‌توان استفاده نمود. در یک وضعیت تولید برق خارج از شبکه، سیستم هیبریدی امکان تولید برق پاک و مقرون به صرفه‌ای را فراهم می‌کند که در بیشتر مواقع از تولید برق با ژنراتور دیزلی نیز به صرفه‌تر است. در نتیجه گزینه‌های انرژی تجدیدپذیر یک راه حل پایدار و منطقی‌تر برای تولید برق در خارج از شبکه محسوب می‌شوند. سیستم‌های هیبریدی یک رویکرد فناوری رو به توسعه‌ای هستند که در سراسر جهان نظرها را به سمت خود جلب نموده‌اند. دلایلی این جذابیت را می‌توان در موارد ذیل خلاصه نمود [۱۰].

- بهبود قابلیت اطمینان تأمین برق
- بهبود خدمات انرژی
- کاهش انتشار آلاینده‌گی و سروصدا
- تولید توان برقی پیوسته
- افزایش عمر بهره برداری از سیستم
- کاهش هزینه‌های تولید برق
- مصرف بهینه انرژی

## ۱-۷-۱ یک نمونه از ترکیب سیستم هیبریدی *SOFC-Stirling Engine*



شکل ۱-۶- سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد- موتور استرلینگ [۱۱]

در شکل (۱-۶) یک سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ نشان داده شده است، که سیستم شامل پیل سوختی اکسید جامد، بازیاب و موتور استرلینگ<sup>۲</sup> می‌باشد. که در این سیستم (*SOFC*) به عنوان منبع حرارتی دما بالا عمل می‌کند که برای تولید توان موتور استرلینگ ضروری می‌باشد و همچنین نقش بازیاب در سیستم هیبریدی پیش‌گرم کردن سوخت و هوای ورودی با دمای بالا گاز خروجی از پیل سوختی عمل می‌کند. که در این سیستم چگالی تابع ترمویست محیطی، چگالی تخریب آگزژی و راندمان انرژی و آگزژی مورد بررسی قرار داده شده است. معیارهای ترمودینامیکی که یک فرصت علمی و مهندسی برای ارزیابی اثرات محیطی بر یک سیکل حرارتی فراهم می‌کند.

<sup>2</sup> - Stirling engine

## ۱-۷-۲ سیستم هیبریدی *SOFC*، موتور استرلینگ و آب شیرین کن اسمز-

### معکوس

تفاوت میان سیستم هیبریدی حاضر و سیستم هیبریدی شکل (۱-۶) در بخش آب شیرین کن اسمز-معکوس می باشد. واژه "آب شیرین کن" معمولاً برای توصیف سیستم‌هایی استفاده می شود که آب دریا یا هر آب شور دیگری را نمک زدایی و آن را به آب قابل شرب تبدیل می کند. هر سیستم آب شیرین-کن اسمز معکوس شامل سه جریان مایع است: فرایند خوراک (*Feed*) که همان آب شور یا آب دریا است، محصول (*Permeate Product*) که همان آب تصفیه شده و نمک زدایی شده است، و محلول غلیظ نمکی (*Brine*) که بسیار شور است و دوباره به دریا باز می گردد. آب شیرین کن اسمز معکوس یکی از موفق ترین و پرکاربردترین سیستم‌هایی است که برای این منظور، یعنی نمک زدایی از آب دریا، استفاده می شود. اسمز، انتقال خود به خودی حلال از یک محلول رقیق به یک محلول غلیظ در سراسر یک غشای نیمه نفوذ پذیر ایده آل است. اسمز معکوس بر دو متغیر استوار است که فشار آب زیاد و عدم پذیرش نمک زیاد می باشد و در فشار (۱ الی ۱۰ مگاپاسکال) عمل می کند. کیفیت آب محصول یا همان آب شیرین تولید شده وابسته به پارامترهایی است که در طراحی آب شیرین کن اسمز معکوس در نظر گرفته شده است. این پارامترها معمولاً بر اساس کاربرد محصول نهایی تعیین می شوند. بطور مثال آبی که برای مصارف شرب مورد استفاده قرار می گیرد باید از کیفیت و خلوص بالاتری نسبت به مصارف کشاورزی برخوردار باشد، همچنین آبی که برای مصارف صنعتی نظیر صنایع داروسازی استفاده می شود حتی نیازمند خلوص بالاتری نسبت به آب شرب است. هر چه آب شیرین تولیدی کیفیت بالاتری داشته باشد عملیات تصفیه پیچیدگی بیشتری داشته و هزینه های تولید نیز افزایش می یابد. در آینده نزدیک بهبود غشاهای اسمز معکوس برای مقاومت در برابر رسوب است [۱۲]. همانطور که قبلاً گفته شد سیستم هیبریدی شکل (۱-۶) یک سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور حرارتی استرلینگ می باشد و پارامترهای مختلفی از جمله چگالی تابع ترمو زیست محیطی ( $F$ )، چگالی تخریب انرژی ( $exd$ )، توان پیل سوختی اکسید جامد ( $P_F$ ) راندمان پیل سوختی ( $\eta_F$ )، راندمان انرژی و انرژی ( $\phi$ )، مورد ارزیابی قرار داده شده است. در کار حاضر

سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور حرارتی استرلینگ، آب شیرین کن اسمزمعکوس مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این کار علاوه بر بررسی پارامترهای چگالی تابع ترمو زیست محیطی ( $F$ )، چگالی تخریب انرژی ( $exd$ )، توان پیل سوختی اکسید جامد ( $P_F$ )، راندمان پیل سوختی ( $\eta_F$ )، راندمان انرژی و انرژی ( $\phi$ )، مقدار دبی آب شیرین کن اسمزمعکوس نیز بررسی شده است. سیستم شکل (۶-۱) یک سیستم هیبریدی متشکل از پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ می‌باشد، اما در کار حاضر علاوه بر بهینه سازی سیستم شکل (۶-۱) همچنین یک جزء جدید آب شیرین کن اسمزمعکوس به سیستم اضافه شده است و همچنین سیستم هیبریدی جدید پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ، آب شیرین کن اسمزمعکوس نیز بهینه سازی شده است.



شکل ۱-۷- یک نوع دستگاه آب شیرین کن RO [۱۳]

## ۸-۱ جمع بندی

در بخش‌های قبل، ابتدا درباره کاهش روز افزون مقدار آب شیرین، کنترل استفاده از آب شیرین زیرزمینی و همچنین ملاحظات کلی جهت بهبود وضعیت موجود، بحث شد و در ادامه به مزایای پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ اشاره گردید و سپس توضیحات و خصوصیات سیستم هیبریدی مورد بحث قرار داده شد و از سیستم‌های آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس به عنوان یک راه‌حل مناسب برای بهبود وضع موجود نام برده شد، در انتهای این فصل نیز به معرفی اجزا و تجهیزات به کار گرفته شده در سیستم آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس به منظور آب مورد نیاز ساختمان پرداخته شد، در فصل دوم به بررسی بخشی از تحقیقات و کارهای پیشین در زمینه سیستم‌های هیبریدی، موتور استرلینگ و پیل سوختی اکسید جامد پرداخته خواهد شد و در انتهای فصل نیز به معرفی کار حاضر پرداخته خواهد شد. در فصل سوم، در ابتدا به تشریح آرایش سیستم هیبریدی شامل پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ و آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس پیشنهادی پرداخته می‌شود و در ادامه معادلات حاکم و مدل‌سازی مربوط به موتور استرلینگ و همچنین پیل سوختی اکسید جامد ارائه شده است و معادلات به کار رفته در سیستم هیبریدی بیان می‌گردد و در پایان این فصل نیز معادلات مربوط به مدل‌سازی و تحلیل سیستم تولید آب شیرین بیان گردید. در فصل چهارم نیز ابتدا معتبرسازی مربوط به مدل‌سازی‌های انجام شده جهت تحلیل عملکرد پیل سوختی و موتور استرلینگ ارائه می‌شود و سپس نتایج حاصل از مدل‌سازی سیستم هیبریدی پیشنهادی، شامل نتایج حاصل از ارزیابی راندمان و تولید توان در مقدار جریان‌های مختلف بر حسب پارامترهای مانند دما، کسر مولی، فشار و همچنین تحلیل تابع ترمو زیست‌محیطی گردیده است و در نهایت در فصل پنجم، نتیجه‌گیری‌ها و همچنین پیشنهادها بیان خواهد شد.



## فصل دوم: پیشینه تحقیق

## ۲-۱ مقدمه

در این فصل، به مرور مطالعات و کارهای انجام شده در زمینه سیستم‌های تولید همزمان پرداخته شده است. در ابتدای این فصل کارهای انجام شده در زمینه پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ ارائه شده است و در ادامه به بررسی سیستم‌های هیبریدی بر پایه محرکه‌های پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ پرداخته شده است و در انتهای این فصل نیز کار حاضر معرفی شده است.

### ۲-۱-۱ مطالعات پیشین روی پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)

با توجه به ویژگی‌های فراوان پیل سوختی اکسید جامد در سیستم‌های ترکیبی بیشتر مطالعات انجام شده بر روی سیستم‌های هیبریدی نیز شامل بررسی عملکرد پیل سوختی اکسید جامد می‌باشند در این زمینه حاصلی<sup>۳</sup> و همکاران [۱۴] به بررسی عملکرد یک سلول سوختی اکسید جامد با دمای بالا همراه با یک دستگاه توربین گازی احیا کننده معمولی (GT-SOFC)، و همچنین برگشت-ناپذیری در سیستم پرداختند، که از طریق کاربردهای قانون اول و دوم ترمودینامیک مدل‌های جداگانه برای هر مؤلفه ایجاد شده است. عملکرد کلی سیستم با استفاده از اعمال بیشتر قوانین ترمودینامیکی برای کل چرخه، به منظور ارزیابی راندمان حرارتی و تولید آنتروپی دستگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دمای ورودی توربین منجر به کاهش راندمان حرارتی چرخه می‌شود، در حالی که باعث افزایش توان خالص خروجی شده است. علاوه بر این، افزایش در دمای ورودی توربین یا نسبت فشرده سازی منجر به تولید بیشتر آنتروپی در دستگاه می‌شود. خانی<sup>۴</sup> و همکاران [۱۵] به ارائه و تحلیل یک سیستم تولید همزمان جدید متشکل از یک پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) با هیدروژن تغذیه شده، و یک توربین گازی GT و GAX (ژنراتور جذب کننده و مبادله گرما) چرخه تبرید پرداخته شده است. علاوه بر آن از طریق یک مطالعه پارامتری، تأثیر پارامترهای تصمیم‌گیری مانند چگالی جریان، ضریب مصرف سوخت، نسبت فشار و ضریب استفاده هوا بر عملکرد سیستم مورد مطالعه قرار گرفته شده است. علاوه بر این، با استفاده از

<sup>3</sup> - Y.Haseli

<sup>4</sup> - Layla Khani

یک الگوریتم ژنتیکی ، عملکرد سیستم برای حداکثر راندمان انرژی یا حداقل *SUCP* (مجموع هزینه‌های واحد محصولات) بهینه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، راندمان انرژی سیستم پیشنهادی بالاتر از پیل سوختی اکسید جامد (*SOFC*) مستقل است. همچنین مشاهده شده است که دسته پیل سوختی بیشترین کمک را در کل برگشت‌ناپذیری انجام داده است. زوها<sup>۵</sup> و همکاران [۱۶] یک رویکرد تحلیلی جدید برای مدل سازی و ارزیابی عملکرد یک نوع از پیل‌های سوختی برگشت‌ناپذیر را مورد بررسی قرار دادند. یک مدل برگشت‌ناپذیر از یک نوع از پیل‌های سوختی هیدروژن-اکسیژن که در حالت پایدار کار می‌کنند ایجاد شده است، که در آن برگشت‌ناپذیری ناشی از واکنش الکتروشیمیایی ، مقاومت الکتریکی و انتقال حرارت به محیط مورد بررسی قرار گرفته شده است. تجزیه و تحلیل تولید آنتروپی برای بررسی عملکردهای فیزیکی و شیمیایی پیل سوختی با استفاده از تئوری الکتروشیمی و ترمودینامیک غیرتعادلی معرفی و اعمال شده است. عبارات مربوط به بازده انرژی و کارایی پیل سوختی با معرفی مقاومت داخلی و نشت معادل آن حاصل می‌شود. با کمک این مدل که در پیل‌های سوختی اکسید جامد با دمای بالا اعمال می‌شود، منحنی‌های مشخصه عملکرد پیل سوختی ارائه می‌شود. نتایج به دست آمده یک مبانی نظری هم برای طراحی بهینه و هم برای فعالیت پیل‌های سوختی واقعی ارائه می‌دهد. این روش جدید همچنین می‌تواند در بررسی و بهینه‌سازی تنظیمات تبدیل انرژی مشابه و سیستم‌های الکتروشیمیایی مورد استفاده قرار گیرد. پیل‌های سوخت اکسید جامد (*SOFC*) امروزه مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. ویژگی پیل سوختی اکسید جامد (*SOFC*) باعث می‌شود که آنها برای سیستم‌های هیبریدی مناسب باشند زیرا از دمای کاری بالایی برخوردار هستند و در صورت ترکیب با نیروگاه‌های توربین معمولی راندمان چرخه بالایی را ارائه می‌دهند، که در این زمینه پنیارات<sup>۶</sup> و همکاران [۱۷] به بررسی یک سیستم ترکیبی پایدار، پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز (*SOFCGT*) پرداختند. در این کار یک مدل ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد با یک توربین گاز تولید شده است. یک مطالعه مقایسه‌ای از پیکربندی‌های شبیه‌سازی

---

<sup>5</sup> - Yingru Zhao

<sup>6</sup> - Penyarat Chinda

شده ، بر اساس تجزیه و تحلیل انرژی برای انجام یک مطالعه پارامتری از راندمان کلی سیستم ترکیبی استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد اگرچه در دماهای بالای (SOFC)، بازده چرخه زیاد است، اما عملکرد چرخه تحت این شرایط دمایی پس از یک نقطه مشخص امکان پذیر نیست همچنین واقعیت مهمی که یافت شد این بود که مدل انتخاب شده، در شرایط سطح دریا، کارایی بهتری را در کل چرخه از خود نشان می‌دهد. دنیای امروز به سیستم‌هایی بسیار کارآمد نیاز دارد که بتواند تقاضای رو به رشد انرژی را برآورده سازند، که از راه حل‌های امیدوارکننده پیل سوختی اکسید جامد است. پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) توسط بسیاری از کشورهای توسعه یافته به عنوان یک راه حل جایگزین انرژی در آینده نزدیک در نظر گرفته می‌شود. سیو<sup>۷</sup> و همکارانش [۱۸] به بررسی طراحی پیل سوختی و پشتیبانی پیل سوختی از کاتد در برابر آند پرداختند، در این کار به بررسی تأثیر طراحی پیل بر عملکرد پیل‌های سوختی اکسید جامد (SOFC) می‌پردازیم. بر اساس شبیه سازی‌های سه بعدی ، مشخص می‌شود که آن عملکرد از دسته بندی پیل‌های سوختی به طراحی پیل سوختی بستگی دارد. نتایج به طور قطعی نشان می‌دهد که، عملکرد دسته پیل CSC نسبت به دسته ASC برای هرگونه مقاومت در برابر تماس عملی و عرض زمین بسیار مفیدتر است . بیگ زاده<sup>۸</sup> و همکارانش [۱۹] مدل سازی مبتنی بر رویکرد ساده سیستم‌های انرژی پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) که توسط گاز طبیعی تغذیه می‌شود را مورد بررسی قرار دادند، که این سیستم پیل سوختی برای بررسی عوامل خروجی از جمله ولتاژ ، توان و راندمان سیستم برای عناصر ورودی مختلف از جمله ترکیب سوخت مختلف ، دمای هوا و سوخت و نسبت استفاده آنها مدل شده است. هدف از این مطالعه، بررسی مهارت یک پیل سوختی اکسید جامد لوله ای (SOFC) با ساده سازی در محاسبه مدل سازی آن می‌باشد، که در ابتدا یک مدل الکتروشیمیایی تعریف شده و انواع مختلف تلفات جریان در مرحله بعدی محاسبه می‌شود. از آنجا که میزان متان واکنش تقریباً برابر با مقدار ورودی است، پس از انجام این محاسبه برای چندین پیل سوختی و اعتبارسنجی آن ، بهینه ترین مقدار برای

---

<sup>7</sup> - Shichuan Su

<sup>8</sup> - M.Beigzadeh

خروجی متان ارزیابی می شود و پارامترهای خروجی از پیل سوختی اکسید جامد (*SOFC*) محاسبه می شود، روش مدل سازی مطالعه حاضر سرعت مطلوب جریان هوا و سوخت را فراهم می کند. در این مطالعه، اصلاح داخلی پیل سوختی اکسید جامد (*SOFC*) مورد بررسی قرار گرفته شده است و یک مدل ( $D_0$ ) معرفی شده است. نتایج نشان می دهد افزایش فشار و دمای پیل سوختی منجر به افزایش ولتاژ و راندمان پیل سوختی می شود و همچنین افزایش چگالی جریان منجر به کاهش ولتاژ پیل می شود. زهانگ<sup>۹</sup> و همکارانش [۲۰] تجزیه و تحلیل بهینه سازی چندهدفه و تطبیق بار از یک سیستم پیل سوختی اسید فسفریک را مورد بررسی قرار دادند، بر اساس مدل فعلی سیستم پیل سوختی اسید فسفریک (*PAFC*)، غلظت الکترولیت بهینه شده است. اصطلاحات تحلیلی جدید برای توان و کارایی سیستم پیل سوختی اسید فسفریک (*PAFC*) با در نظر گرفتن تأثیرات چند برگشتناپذیری ناشی از فعال شدن غلظت بیش از حد اهمی و مقاومت در برابر نشت بر عملکرد سیستم پیل سوختی اسید فسفریک (*PAFC*) بدست می آید، که این پارامترها برای ارزیابی ویژگی های عملکرد کلی سیستم پیل سوختی اسید فسفریک (*PAFC*) استفاده می شوند. بر این اساس، حد بالا و پایین مقادیر بهینه شده برای برخی پارامترهای اصلی مانند چگالی جریان، خروجی نیرو و راندمان تعیین می شود، و همچنین روابط بین توان و کارایی سیستم و بار به تفصیل مورد بحث قرار گرفته و شرایط مطابقت بهینه بار به دست می آید. نتایج به دست آمده از این کار ممکن است راهنمایی هایی برای طراحی بهینه و عملکرد سیستم های واقعی پیل سوختی اسید فسفریک (*PAFC*) باشد.

## ۲-۱-۲ مطالعات پیشین روی سیستم آب شیرین کن اسمز معکوس (*RO*)

با توجه به این که اسمز معکوس نقش مهمی در آب شیرین کن ها دارد، امروزه محققان به دنبال غشا هایی هستند که انرژی و هزینه های کمتری داشته باشد، بنابراین زهانگ<sup>۱۰</sup> و همکاران [۲۱] غشای زئولیت که یک غشای متراکم و بسیار سازمان یافته است را مورد بررسی قرار داده اند که لایه های این غشا با پلی الکترودهایی با بارهای مخالف با مقیاس نانو محدود شده است. این روش آماده سازی و

<sup>9</sup> - Houcheng Zhang

<sup>10</sup> - Meng Zheng

کنترل هزینه کم می‌تواند هزینه ساخت غشاهای اسمزمعکوس را به شدت کاهش دهد. نتایج نشان می‌دهد که دانستن تأثیرات متقابل بین یون‌های مختلف و منافذ زئولیت، شکاف‌های بین بلوری، ساختار غشایی و خصوصیات شیمیایی سطح، فشار ترشح غشایی و درجه حرارت بر روی فرآیند نمک‌زدایی به فراهم آوردن یک مبنای نظری و نقطه مرجع برای توسعه غشاهای اسمزمعکوس مفید می‌باشد. امروزه محققان سیستم‌های مختلفی برای شیرین کردن آب‌های شور دریاها و آب‌های املاح‌دار با استفاده از آب‌شیرین‌کن‌های اسمزمعکوس ارائه می‌دهند، که در این زمینه آگستین<sup>۱۱</sup> و همکارانش [۲۲] یک طراحی اولیه برای یک سیستم نمک‌زدایی اسمزمعکوس با نیروی حرارتی خورشیدی مورد بررسی قرار داده‌اند. این واحد به یک چرخه انرژی خورشیدی مبتنی بر یک پمپ فشار بالا و یک چرخه رانکین با تولوئن، هگزامتیلی دی سیسیلوکسان (*MM*) و اکتامتیل سیکلوتوترازیلوکسا (*D4*) به عنوان مایعات کار و دو مدل مختلف از جمع‌کننده‌های سنگاب سهموی همراه بوده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار آب شیرین تولیدی با استفاده از مایع (*D4*) بیشتر از مایع تولوئن بوده است. با توجه به اینکه منابع آب شیرین محدود است و در حالی که آب‌شیرین‌کن به طور بالقوه می‌تواند تأمین نامحدودی از آب شیرین تولید شده از اقیانوس‌های نامحدود را فراهم کند، اما مصرف انرژی بالا و تأثیرات زیست‌محیطی مرتبط با آن اشکالات بزرگ سیستم آب‌شیرین‌کن است. به این دلیل در این زمینه محققان تلاش دارند سیستمی با مصرف انرژی کمتر و حداقل تأثیرات مخرب زیست‌محیطی ارائه دهند. دشت پور<sup>۱۲</sup> و همکارانش [۲۳] یک برنامه عملی برای تأمین آب شیرین با استفاده از فشار هیدرواستاتیک در رابطه با انرژی موج ارائه داده است. نتایج نشان می‌دهد در حالی که یک دستگاه اسمزمعکوس دریایی معمولی، ۳ تا ۱۰ کیلو وات انرژی الکتریکی برای تولید یک متر مکعب آب شیرین مورد نیاز است، اما در روش پیشنهادی، از آنجا که فقط آب محصول باید به سطح پمپ شود، می‌توان مصرف انرژی را تا ۲/۴۶ کیلو وات کاهش داد. مناسب بودن این فن‌آوری‌های نمک‌زدایی مبتنی بر معیارهای مختلفی از جمله میزان کیفیت آب تغذیه شده

---

<sup>11</sup> - Agustin M

<sup>12</sup> - Reza Dashtpour

، منبع انرژی، راندمان برداشت، نیاز به انرژی و غیره است، بنابراین مطالعه‌ای در این زمینه توسط سادات<sup>۱۳</sup> و همکاران [۲۴] یک مطالعه مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف نمک‌زدایی در کشورهای در حال توسعه انجام دادند. مشکل واقعی در این فناوری‌های ترکیبی، طراحی و ارزیابی اقتصادی بهینه به منظور اقتصادی بودن برای کشورهای در حال توسعه است. مشکلات خوردگی، مقیاس بندی و رسوب دهی در مقایسه با فرآیندهای غشایی در فرآیندهای حرارتی جدی‌تر است. از طرف دیگر، فرآیندهای غشایی نیاز به پیش تصفیه آب تغذیه شده به منظور از بین بردن ذرات دارند که این باعث طولانی شدن غشا می‌شود که این خود مصرف هزینه و انرژی به دنبال دارد. نتایج نشان می‌دهد که با ادامه پیشرفت برای کاهش کل مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های تولید آب، فرآیندهای غشایی یک فناوری انتخابی برای آب‌شیرین‌کن در کشورهای در حال توسعه هستند. بنات<sup>۱۴</sup> و همکارانش [۲۵] به تجزیه و تحلیل انرژی سیستم نمک‌زدایی توسط واحدهای تقطیر غشای خورشیدی پرداختند، در بین محققان علاقه شدیدی به استفاده از انرژی به عنوان ابزاری بالقوه برای تجزیه و تحلیل و ارزیابی عملکرد فرآیندهای نمک‌زدایی وجود دارد که در آن استفاده بهینه از انرژی مسئله مهمی محسوب می‌شود. برخلاف انرژی، انرژی به دلیل عدم برگشت‌ناپذیری در هر فرآیند واقعی مصرف یا از بین می‌رود، بنابراین انرژی بینش عمیق‌تری از تجزیه و تحلیل فرآیند ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تخریب انرژی در ماژول تقطیر غشایی رخ داده است. منلاکاس<sup>۱۵</sup> و همکارانش [۲۶] یک سیستم سیکل رانکین ارگانیک خورشیدی دما پایین برای نمک‌زدایی اسمز معکوس (RO) مورد ارزیابی قرار داده‌اند. این کار یک گام تحقیقاتی برای ارزیابی تجربی (SORC) در شرایط آزمایشگاهی است که در آن سیستم با استفاده از ترمز الکتریکی به عنوان بار و یک بخار حرارتی الکتریکی به عنوان تامین حرارت مورد آزمایش قرار گرفته شده است. این آزمایش یک سیستم بازیابی انرژی ویژه پمپ با پیستون محوری (APP) به واحد اسمز معکوس (RO) برای کاهش مصرف انرژی اختصاص داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مفهوم فوق از لحاظ فنی عملی است و

<sup>13</sup> - A.H.M.Saadat

<sup>14</sup> - Fawzi Banat

<sup>15</sup> - D. Manolakos

عملیات مداوم تحت دسترسی متناوب انرژی خورشیدی به دست می‌آید، با این وجود، می‌توان گفت که کار بهینه‌سازی بیشتر برای بهبود کارایی سیستم ضروری است. منلاکاس<sup>۱۶</sup> و همکارانش [۲۷] ارزیابی تجربی یک سیستم با سیکل رانکین خورشیدی دما پایین برای نمک‌زدایی اسمز معکوس مورد بررسی قرار داده‌اند و در این مطالعه نتایج تجربی حاصل از تست‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. گام بعدی تحقیق، ارزیابی عملکرد سیستم در شرایط واقعی آب و هوایی است، تفاوت اصلی دو نمونه آزمایشی فوق این است که در تست‌های آزمایشگاهی، منبع انرژی حرارتی مورد استفاده یک بخاری الکتریکی ۱۰۰ کیلو وات است که قادر به کار در بار حرارتی جزئی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که این منبع انرژی حرارتی جایگزین خوبی برای کلکتورهای خورشیدی می‌باشند. منلاکاس<sup>۱۷</sup> و همکارانش [۲۸] عملکرد سیستم سیکل رانکین ارگانیک در مقیاس کوچک، همراه با منابع حرارتی کم دما (به عنوان مثال در محدوده ۴۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد) برای شیرین کردن آب دریا یا آب شور در روند اسمز معکوس (RO) مورد ارزیابی قرار داده‌اند. برای منابعی با مقادیر کم دما می‌توان از گرمای صنعتی مانند: مجموعه‌های خورشیدی و روش‌های زمین گرمایی استفاده کرد. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که عملکرد سیستم به شدت به نقطه عملیاتی مربوطه بستگی دارد. اسمز معکوس (RO) بیشتر به دلیل استفاده در نمک‌زدایی (از بین بردن نمک آب دریا) برای دریافت آب شیرین شناخته شده است، اما از اوایل دهه ۱۹۷۰ نیز برای تصفیه آب شیرین برای مصارف پزشکی، صنعتی و خانگی استفاده شده است. در این زمینه زیراکرد<sup>۱۸</sup> و همکاران [۲۹] در این تحقیق به بررسی عملکرد دستگاه اسمز معکوس برای آب شیرین‌کن پرداختند که در این مطالعه غلظت تعدادی از پارامترها، کیفیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در آب خام و آب تصفیه شده بندرها و عملکرد دستگاه اسمز معکوس (RO) برای آب دریا و هزینه‌های نمک‌زدایی آب زیرزمینی مورد مطالعه قرار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که کیفیت آب خوراک و پیش تصفیه نقش بسیار مهمی در مشکلات عملیاتی مانند رسوب سیستم‌های اسمز معکوس (RO) دارد. اسمز معکوس

---

<sup>16</sup> -D.Manolakos

<sup>17</sup> -D.Manolakos

<sup>18</sup> - Alireza Zirakrad M.S.C.



در حال حاضر مهمترین و متداولترین روش نمک‌زدایی است، و امروزه مهمترین نقش را در آب- شیرین‌کن‌ها ایفا می‌کنند، در یک مطالعه‌ای ردیگیوز<sup>۱۹</sup> و همکارانش [۳۰] به بررسی تاریخچه غشاهای اسمز معکوس، ترسیم وضعیت فعلی اسمز معکوس پرداخته‌اند. بازار فعلی غشاهای (RO) بر روی غشاهای پلی‌آمید کامپوزیت به صورت کاملاً نازک متمرکز شده است که از سه لایه ساخته شده و با وزن متوسط مولکولی ۱۵۰-۱۰۰ Da ساخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که این ساختار سه لایه به تولید نمک بیشتر انجامیده است. کانگیو ایکسا<sup>۲۰</sup> و همکارانش [۳۱] به تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی و بهینه‌سازی انرژی خورشیدی و توان سیکل پیشنهادی (CO<sub>2</sub>) برای نمک‌زدایی اسمز معکوس بر اساس بهبود انرژی برودتی از (LNG) (گازهای طبیعی) پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با معرفی مخزن ذخیره‌سازی پیشنهادی سیکل توان (CO<sub>2</sub>) برای نمک‌زدایی (RO) می‌تواند برای یک مدت طولانی آب شیرین تولید کند و همچنین نتایج نشان می‌دهد که با مقدار بهینه‌ی فشار ورودی توربین (CO<sub>2</sub>) می‌توان مقدار ماکسیمم انرژی مؤثر سیستم را تولید کرد.

## ۲-۱-۳ مطالعات پیشین روی سیستم هیبریدی شامل پیل سوختی SOFC

ذبیحیان<sup>۲۱</sup> و همکارانش [۳۲] رویکرد یک سیستم هیبریدی شامل پیل سوختی اکسید جامد ترکیبی (SOFC) و مدل توربین گازی (GT) برای تأثیر نوع پیل سوختی و ترکیب سوخت ورودی روی عملکرد چرخه مورد ارزیابی قرار دادند. این نوع تحلیل برای استفاده در جهان واقعی از سوخت‌های تولید شده در سیستم ترکیبی SOFC-GT انجام شده است، و همچنین این تحلیل به دلیل این واقعیت که ترکیبات سوخت بستگی به نوع ماده پردازش شده، فرآیند تولید سوخت و پارامترهای کنترل فرآیند دارد بسیار حیاتی است. علاوه بر آن اطلاعات دقیقی از عملکرد چرخه SOFC-GT با سوخت متان ارائه شده است. سرانجام، نتایج شبیه‌سازی برای انواع مختلف سوخت ورودی نشان داده شده است که خروجی سیستم و پارامترهای عملیاتی تا حد زیادی تحت تأثیر تغییرات در نوع سوخت است. بنابراین، احتمال تغییر نوع سوخت ورودی باید در نظر گرفته شود، و تأثیرات آن باید

<sup>19</sup> - Alfonso Rodriguez

<sup>20</sup> - Guanghui Xia

<sup>21</sup> - Farshid Zabihian

قبل از استفاده از بایوگاز، زیست توده‌گازدار به عنوان سوخت در چرخه های ترکیبی *SOFC-GT* بررسی شود. زوها<sup>۲۲</sup> و همکارانش [۳۳] روی بهینه سازی سیستم هیبریدی موتور حرارتی – پیل سوختی و طراحی پارامترهای شاخص این سیستم مطالعه‌ای انجام داده‌اند، و همچنین یک رویکرد مدل‌سازی نظری ارائه دادند که رفتار یک سیستم هیبریدی موتور حرارتی و پیل سوختی معمولی را در حالت عملیاتی پایدار مبتنی بر مدل پیل سوختی اکسید جامد موجود ارائه دادند تا ویژگی‌های طراحی بنیادی مفید و نیز مشکلات بالقوه بحرانی را ارائه دهند. منابع مختلف زیان‌های برگشت‌ناپذیر، مانند واکنش الکتروشیمیایی، مقاومت الکتریکی، انتقال گرمای محدود بین پیل سوختی و موتور حرارتی و گرمای نشت از پیل سوختی به محیط زیست مشخص نمودند و مورد بررسی قرار دادند. که نتایج به دست آمده در اینجا ممکن است مبنای نظری برای طراحی و عملیات مطلوب سیستم‌های هیبریدی موتور حرارتی و پیل‌های سوختی ارائه دهد. زهانگ<sup>۲۳</sup> و همکارانش [۳۴] به تجزیه و تحلیل عملکرد و معیار پارامترهای بهینه در یک سیستم هیبریدی شامل یک پیل سوختی برگشت‌ناپذیر و یک موتور حرارتی پرداخته‌اند، بر اساس مدل‌های فعلی پیل‌های سوختی اکسید جامد و موتورهای گرما با منبع دو بخار متشکل از دو فرآیند ایزوترمال و دو روش پلی‌تروپیک، یک مدل کلی از یک نوع سیستم هیبریدی پیل سوختی و موتور حرارتی ایجاد می‌شود که در آن چند برگشت‌ناپذیری موجود است. عبارات مربوط به رادمان و توان مصرفی سیستم‌های هیبریدی از یک مدل تحلیلی حاصل می‌شوند. نتایج به دست آمده در اینجا بسیار کلی است و ممکن است به طور مستقیم برای استخراج نتیجه گیری از سیستم‌های ترکیبی که تحت موارد خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند، استفاده شود. زهانگ<sup>۲۴</sup> و همکارانش [۳۵] یک روش تحلیلی جدید برای ارزیابی و بهینه سازی عملکرد سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد برگشت‌ناپذیر و توربین گاز ارائه دادند، بر اساس مدل‌های فعلی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز، یک مدل کلی از سیستم ترکیبی توربین گاز پیل سوختی اکسید جامد ایجاد شده است که در آن چندین برگشت‌ناپذیری واقعی در نظر گرفته می‌شود. در این

---

<sup>22</sup> - Yingru Zhao

<sup>23</sup> - Xiuqin Zhang

<sup>24</sup> - Xiuqin Zhang

مطالعه مشخصات کلی عملکرد سیستم ترکیبی و عملکرد معیارهای بهینه پارامترهای اصلی تعیین می‌شود. نتایج به دست آمده در اینجا ممکن است برای تجزیه و تحلیل عملکرد بهینه تعدادی از موارد خاص سیستم‌های ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد (*SOFC*) - توربین گازی استفاده شود. زهانگ<sup>۲۵</sup> و همکاران [۳۶] تأثیر خسارات برگشت‌ناپذیری چندگانه بر عملکرد سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز کربنات گداخته را مورد بررسی قرار دادند، خسارات جبران‌ناپذیر چندگانه موجود در سیستم‌های هیبریدی واقعی توسط مدل‌های یک پیل سوختی کربنات گداخته و یک چرخه باز برایتون با یک روند بازسازی در نظر گرفته می‌شود. ویژگی‌های عملکرد کلی سیستم ترکیبی ارزیابی شده و معیارهای بهینه از پارامترهای اصلی سیستم نیز تعیین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با یک پیل سوختی کربنات مذاب، هم قدرت تولید و هم راندمان سیستم ترکیبی بسیار افزایش یافته است.

## ۲-۱-۴ مطالعات پیشین روی سیستم هیبریدی *SOFC* با موتور استرلینگ

امروزه موتور استرلینگ به عنوان یک موتور حرارتی در بیشتر سیستم‌های ترکیبی به کار می‌رود و باعث افزایش راندمان کلی چرخه می‌شود، بنابراین در این زمینه سیستم ترکیبی که شامل موتور استرلینگ می‌باشد، چن<sup>۲۶</sup> و همکارانش [۳۷] به تجزیه و تحلیل عملکرد و بهینه‌سازی چندهدفه از سیستم هیبریدی موتور حرارتی استرلینگ و پیل سوختی اکسید جامد برگشت‌ناپذیر پرداختند. یک سیستم ترکیبی جدید متشکل از یک پیل سوختی اکسید جامد (*SOFC*) و یک موتور حرارتی استرلینگ تأسیس شده است، که در آن موتور حرارتی با استفاده از گرمای اتلافی از پیل سوختی اکسید جامد (*SOFC*) با کیفیت بالا تولید می‌شود. منحنی‌های راندمان و توان معادل با چگالی جریان الکتریکی از طریق محاسبات عددی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد پیل سوختی اکسید جامد را می‌توان با اتصال موتور حرارتی استرلینگ تا حد زیادی افزایش داد تا گرمای

<sup>25</sup> - Xiuqin Zhang

<sup>26</sup> - Liwei Chen

اتلافی برای تولید توان بیشتر شود. با توجه با به سیستم‌های ترکیبی موجود غلامیان<sup>۲۷</sup> و همکارانش [۳۸] به بررسی یک سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) با موتور استرلینگ برای کاربرد هواپیمایی پرداخته است. در این تحقیق یک چرخه ترکیبی مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) با سوخت متان و یک موتور استرلینگ پیشنهادی مورد تجزیه و تحلیل قرار داده شده است، که نتایج نشان می‌دهد که ترکیب یکپارچه پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) و موتور استرلینگ در یک سیستم مبدل حرارتی دما باعث افزایش در راندمان انرژی سیستم شده است. رکنی<sup>۲۸</sup> و همکارانش [۳۹] یک سیستم ترمودینامیکی و گرماسنجی از یک مقیاس کوچک گاززدایی یکپارچه پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) و موتور استرلینگ برای گرما و قدرت ترکیبی (CHP) با ظرفیت الکتریکی خالص ۱۲۰ KWe انجام داده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که فشار و دمای پیل‌های خورشیدی میزان ولتاژ و بهره‌وری پیل را تقویت می‌کند و افزایش جریان سبب کاهش ولتاژ پیل‌ها می‌شود. توصیه می‌شود که عملکرد زیست محیطی اصلاح شده به عنوان معیار عملکرد دیگر برای طراحی سیستم‌های محیطی نمک‌زدایی اسمز معکوس استفاده شود. رکنی<sup>۲۹</sup> و همکاران [۴۰] یک سیستم توان هیبریدی جدید (۱۰ کیلو وات) برای یک خانه متوسط را مورد ارزیابی قرار داده است. سیستم بررسی شده شامل یک پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) در بالای یک موتور استرلینگ است. فرآورده‌های گازی خارج شده از چرخه توسط یک موتور استرلینگ زیر چرخه پیل سوختی اکسید جامد قرار دارد تغذیه می‌شود که باعث تولید توان اضافی در موتور می‌شود. شبیه‌سازی‌های سیستم پیشنهادی با استفاده از سوخت‌های مختلف انجام شده است که بسته به در دسترس بودن، استفاده از انواع سوخت‌ها را آسان می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که سیستم ترکیبی باعث بهبود راندمان الکتریکی کلی نسبت به یک موتور مستقل استرلینگ یا یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) می‌شود.

---

<sup>27</sup> - E.Gholamian

<sup>28</sup> - Masoud Rokni

<sup>29</sup> - Masoud Rokni

## ۲-۲ معرفی کار حاضر

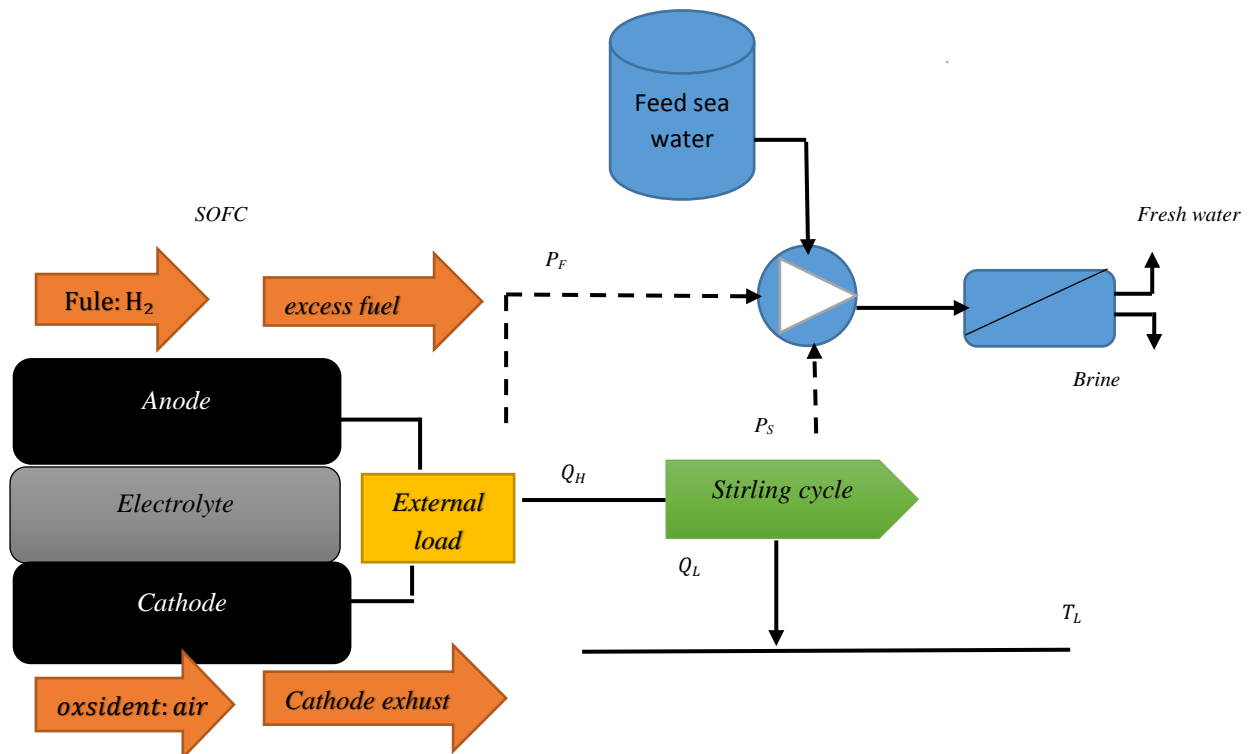
در کار حاضر به بررسی عملکرد یک مجموعه جدید که شامل یک سیستم هیبریدی با اجزایی متفاوت می‌باشد پرداخته شده است. سیستم هیبریدی ارائه شده شامل پیل سوختی اکسید جامد و موتور حرارتی استرلینگ و آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس می‌باشد که در این کار مقدار گرمای خروجی از پیل سوختی اکسید جامد به موتور استرلینگ داده شده است و باعث ایجاد تولید توان در موتور حرارتی استرلینگ می‌شود و سپس توان تولیدی از پیل سوختی و موتور استرلینگ به آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس انتقال داده می‌شود که این روند باعث افزایش راندمان و مقدار دبی آب شیرین تولیدی شده است.



# فصل سوم: مدل‌سازی سیستم هیبریدی پیشنهادی

### ۱-۳ آرایش سیستم هیبریدی پیشنهادی

شکل (۱-۳) یک سیستم هیبریدی شامل پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ و آب شیرین کن اسمز معکوس نشان می‌دهد، که در این سیستم پیل سوختی و موتور استرلینگ به عنوان یک نیروگاه تولید توان عمل می‌کنند، و فرآیند الکتروشیمیایی، حرارتی و ترمودینامیکی در پیل سوختی انجام داده می‌شود. همانطور در شکل مشخص شده است، ابتدا با انجام فرآیند الکتروشیمیایی در پیل سوختی اکسید جامد یک مقدار حرارت و مقداری توان از پیل سوختی خارج شده است که مقدار حرارت خروجی ( $Q_H$ ) به عنوان حرارت اولیه مورد نیاز به موتور استرلینگ انتقال داده می‌شود و موتور استرلینگ با دریافت حرارت اِتلافی پیل سوختی اکسید جامد شروع به تولید توان می‌کند، سپس یک توان تولیدی از پیل سوختی اکسید جامد ( $P_F$ ) و یک توان تولیدی دیگر نیز توسط موتور استرلینگ ( $P_S$ ) به پمپ‌های موجود در سیستم هیبریدی داده می‌شود و در نهایت توان پمپ‌ها افزایش می‌یابد و مقدار آب بیشتری را به آب شیرین کن اسمز معکوس وارد می‌کنند و در نتیجه آب شیرین بیشتری تولید خواهد شد.



شکل ۱-۳- شماتیک کلی سیستم هیبریدی پیشنهادی



آب شیرین کن اسمز معکوس (RO) فرآیندی است که در آن از فشار برای معکوس نمودن جریان اسمزی آب از درون یک غشای نیم تراوا استفاده می‌شود به کمک این روش می‌توان از آب شور آب آشامیدنی مطلوب تولید کرد. در این مرحله از یک غشای نیم تراوا و پمپی که بتواند فشار لازم آب ورودی به سیستم را تأمین کند و یک خروجی پساب لازم می‌باشد. فرآیند آب شیرین کن اسمز- معکوس (RO) پایه‌ای است بر روی اصل نفوذپذیری که به یک تکنولوژی مدرن تبدیل می‌شود تا آب تازه تولید کند. فرآیند آب شیرین کن اسمز معکوس (RO) صنعتی یکی از فرآیندهایی است که باعث می‌شود آب شیرین (desalination) تولید شود. و فراتر از آن آب شیرین کن اسمز معکوس برای بازیافت تصفیه خانه‌ی فاضلاب استفاده می‌شود حتی می‌تواند تولید انرژی نماید. در کل این تحقیق عملکرد یک سیستم هیبرید پیل سوختی و موتور استرلینگ و آب شیرین کن اسمز معکوس برای تولید آب شیرین بررسی می‌شود که ابتدا یک تحلیل ترمودینامیکی برای تمام اجزای سیستم و سپس با بهینه‌سازی‌های انجام شده در پیل سوختی اکسید جامد، توان تولیدی و بازده سیستم را افزایش داده و همچنین تاثیر چگالی جریان، دما و فشار کاری پیل بر روی توان تولیدی سیستم بررسی می‌شود.

### ۳-۲ معادلات مربوط به بخش هیبریدی سینیتیک SOFC

در این بخش، معادلات حاکم بر بخش سینیتیک SOFC ارائه شده است:

بازده بر گشت ناپذیر و توان خروجی از پیل سوختی از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود [۱۶].

$$\eta_F = \frac{P_F}{-\Delta H} = \frac{1}{-\Delta h} \left( m - \frac{k}{RTd} m^2 \right) \quad (3-1)$$

$$P_F = \frac{iA}{n_e F} \left( m - \frac{k}{RTd} m^2 \right) \quad (3-2)$$

در روابط (۳-۱) و (۳-۲) مقدار جریان جاری در سیستم،  $(F)$  ثابت فارادی،  $(n_e)$  تعداد الکترون،  $(A)$  مساحت سطح صفحه می‌باشد،  $(R)$  ثابت جهانی گازها،  $(T)$  دمای پیل سوختی،  $(d)$  و  $(m)$  که رابطه پایه ای از راندمان و توان و ولتاژ پیل سوختی می‌باشند به فرم زیر تعریف می‌شوند [۱۱].

$$d = 2n_e \sinh^{-1} \left( \frac{i}{2i_{o,a}} \right) + 2n_e \sinh^{-1} \left( \frac{i}{2i_{o,c}} \right) \quad (3-3)$$

$$- \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{L,a}} \right) - \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{L,c}} \right)$$

$$+ \frac{i n_e F L_{el}}{\sigma_0 R} \exp \left( \frac{E_{el}}{RT} \right)$$

$$m = -\Delta g(T) + RT \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) - RTd \quad (4-3)$$

در فرمول‌های بالا  $(i_{o,a})$  و  $(i_{o,c})$  به ترتیب مقدار آند و کاتد می‌باشند.  $(L_e)$  مقدار ضخامت الکتروود می‌باشد  $(\sigma_0)$  مرجع هدایت یونی و  $(P_{H_2O})$  و  $(P_{O_2})$  و فشارهای جزئی هستند. و  $(i_{L,a})$  و  $(i_{L,c})$  جریان‌های جزئی از آند و کاتد می‌باشد و  $(E_{el})$  انرژی فعال سازی،  $(\Delta g)$  تغییرانرژی گیبس می‌باشد.

آنتالپی کلی پیل سوختی اکسید جامد از رابطه زیر که  $(\Delta h)$  تغییر آنتالپی مولار می‌باشد محاسبه می‌شود [۱۶].

$$-\Delta H = -\frac{iA}{n_e F} \Delta h \quad (5-3)$$

توان برگشت‌پذیر پیل سوختی اکسید جامد از رابطه (۶-۳) محاسبه می‌شود [۱۱].

$$P_{rev,F} = -\frac{iA}{n_e F} \Delta g \quad (6-3)$$

نرخ اتلافات انرژی پیل سوختی اکسید جامد از رابطه زیر تعریف می‌شود و  $(P_F, P_{F,rev})$  به ترتیب توان و توان برگشت‌پذیر پیل سوختی اکسید جامد می‌باشد [۱۱].

$$Exd_F = P_{F,rev} - P_F \quad (7-3)$$

نرخ انتقال گرما بازیاب به صورت زیر تعریف می‌شود، که  $(T_0)$  دمای محیط،  $(k_r)$  میزان هدایت گرمایی بازیاب،  $(\epsilon_r)$  ضریب تاثیر بازیاب می‌باشد [۱۱].

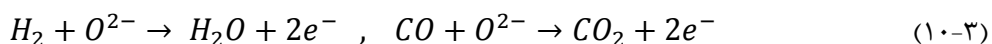
$$Q_r = K_r(1 - \varepsilon_r)(T - T_0) \quad (8-3)$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک گرمای ورودی به سیکل به صورت زیر تعریف می‌شود که  $(\Delta H)$  و  $(P_F)$  و به ترتیب مقدار آنتالپی و توان خروجی از پیل سوختی اکسید جامد و  $(Q_r)$  نرخ انتقال گرما بازیاب می‌باشند [۱۱].

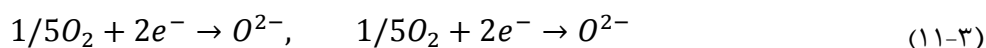
$$Q_H = -\Delta H - P_F - Q_r \quad (9-3)$$

واکنش الکتروشیمیایی پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) به شکل زیر می‌باشند [۱۹].

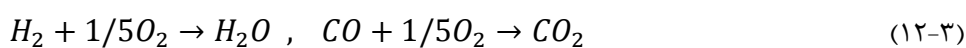
i. آند



ii. کاتد



iii. جمع کلی



معادله بهسازی برای پیل سوختی اکسید جامد [۱۹].



در معادله زیر  $(k_{ref})$  ثابت تعادل برای بخار اصلاح شده متان و  $(k_{shift})$  ثابت تعادل برای واکنش تغییر آب و گاز می باشد.  $(n_{H_2O})$  تعداد مول هیدروژن می باشد، و تعداد مول کربن دی اکسید با  $(n_{CO})$  و فشار پیل سوختی را در فرمول زیر به صورت  $(P_F)$  و مقدار  $(P_0)$  مقدار فشار کلی می باشد [۱۹].

$$K_{ref}(T_{outlet}) = \frac{n_{H_2}^3 n_{CO}}{n_{H_2O} n_{CH_4}} \left( \frac{P_{cell}}{P_0} \right)^2 \quad (۱۶-۳)$$

$$K_{shift}(T_{outlet}) = \frac{n_{H_2} n_{CO}}{n_{H_2O} n_{CO}} \quad (۱۷-۳)$$

$$Z = U_f(n_{H_2, inlet} + 3x + y) \quad (۱۸-۳)$$

در فرمول (۱۸-۳) عامل استفاده از سوخت را با عبارت  $(U_F)$  نشان داده شده است، و مقدار  $x$  و  $y$  به ترتیب نرخ مختصات سرعت واکنش و نسبت میزان هماهنگی واکنش متان می باشند. و مقدار  $(z)$  نرخ مختصات سرعت واکنش الکتروشیمیایی می باشد.

رابطه (۱۹-۳) تا (۲۱-۳) رابطه بین  $x, y, z$  و نرخ جریان مولی با استفاده از مکانیزم رابطه بین مول-های  $n_{CO}, n_{H_2O}, n_{CH_4}$  استفاده می شود [۱۹].

$$n_{CH_4} = n_{CH_4, inlet} - x \quad (۱۹-۳)$$

$$n_{H_2O} = n_{H_2O, inlet} - x - y + z \quad (۲۰-۳)$$

$$n_{CO} = n_{CO, inlet} + x - y \quad (۲۱-۳)$$

رابطه (۲۲-۳) تا (۲۴-۳) رابطه بین  $x, y, z$  و نرخ جریان مولی با استفاده از مکانیزم رابطه بین مول-های  $n_{H_2}, n_{O_2}, n_{CO_2}$  محاسبه می شود [۱۹].

$$n_{H_2} = n_{H_2, inlet} + 3x + y - z \quad (۲۲-۳)$$

$$n_{O_2} = n_{O_2, inlet} - 1.5z \quad (۲۳-۳)$$

$$n_{CO_2} = n_{CO_2,inlet} + y \quad (24-3)$$

رابطه (۲۵-۳) ولتاژ پیل سوختی می‌باشد که مقدار نیروی الکتروموتیو ( $E_0$ ) می‌باشد،  $R$  مقدار ثابت جهانی گازها است و  $T$  مقدار دمای پیل سوختی اکسید جامد می‌باشد و همچنین ( $P_{H_2O}$ ) مقدار فشار جزئی هیدروژن است و  $P_{H_2O}, P_{O_2}$  به ترتیب مقدار فشار جزئی آب و مقدار فشار اکسیژن می‌باشد [۱۹].

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0/5}}{P_{H_2O}} \quad (25-3)$$

رابطه (۲۶-۳) و (۲۷-۳) که ( $i_{0,anode}$ ) مقدار چگالی جریان آند و ( $i_{0,cathode}$ ) مقدار چگالی جریان کاتد می‌باشد و  $\gamma_{cathode}$ ,  $\gamma_{anode}$  به ترتیب مقادیر ثابت تبادل چگالی جریان آند و ثابت تبادل چگالی جریان کاتد می‌باشد.  $P_{ref}$  نشان دهنده فشار مربع می‌باشد که مقدار آن برابر با ۱ می‌باشد.  $T_s$  دمای ساختار مواد جامد است [۱۹].

$$i_{0,anode} = \gamma_{anode} \left( \frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp \left( - \frac{E_{act,anode}}{RT_s} \right) \quad (26-3)$$

$$i_{0,cathode} = \gamma_{cathode} \left( \frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^{0/25} \exp \left( - \frac{E_{act,cathode}}{RT_s} \right) \quad (27-3)$$

رابطه (۲۸-۳) و (۲۹-۳) مقدار ولتاژ آند و کاتد می‌باشند که  $I$  چگالی جریان می‌باشد.  $a$  ضریب انتقال بار و  $n_e$  تعداد الکترون مولی از هر مول واکنش هیدروژن می‌باشد.  $i_{0,an}$  و  $i_{0,cat}$  به ترتیب چگالی جریان اکسید آند و کاتد می‌باشد. ثابت فارادی را با  $F$  می‌باشد [۱۹].

$$V_{act,an} = \frac{RT}{n_e \alpha F} \sinh^{-1} \left( \frac{I/2}{i_{0,an}} \right) \quad (28-3)$$

$$V_{act,ca} = \frac{RT}{n_e \alpha F} \sinh^{-1} \left( \frac{I/2}{i_{0,ca}} \right) \quad (29-3)$$

در رابطه (۳۰-۳) تا (۳۲-۳) که  $V_{act,A}$  و  $V_{act,C}$  فعال سازی ولتاژ آند و کاتد می باشد. و  $V_{ohmic}$  فعال سازی ولتاژ اهمی می باشد.  $r_j$  مقاومت ناحیه  $\rho_j$  ضریب مقاومت  $\lambda_i$  ثابت مقاومت می باشد [۱۹].

$$V_{act} = V_{act,an} + V_{act,ca} \quad (۳۰-۳)$$

$$V_{ohm} = i \sum_{j=1}^4 r_j \quad (۳۱-۳)$$

$$r_j = \rho_j \delta_j \quad (۳۲-۳)$$

همانطور که در رابطه (۳۳-۳) و (۳۴-۳) نشان داده می شود  $\rho_{anode}$  و  $\rho_{cathode}$  مقاومت کاتد و آند و  $\lambda_{anode}$  و  $\lambda_{cathode}$  به ترتیب مقاومت نمائی آند و کاتد می باشند [۱۹].

$$\rho_{anode} = \zeta_{anode} \exp\left(\frac{\lambda_{anode}}{T}\right) \quad (۳۳-۳)$$

$$\rho_{cathode} = \zeta_{cathode} \exp\left(\frac{\lambda_{cathode}}{T}\right) \quad (۳۴-۳)$$

در رابطه (۳۵-۳) و (۳۶-۳) نیز مقدار مقاومت الکترولیت  $\rho_{electr}$  مقاومت اتصال دهنده داخلی  $\rho_{interconnections}$  تعریف می شود و مقدار مقاومت نمائی و اتصال دهنده داخلی به ترتیب  $\lambda_{electr}$  و  $\lambda_{interconnections}$  می باشد [۱۹].

$$\rho_{electr} = \zeta_{electr} \exp\left(\frac{\lambda_{electr}}{T}\right) \quad (۳۵-۳)$$

$$\rho_{interconn} = \zeta_{interconn} \exp\left(\frac{\lambda_{interconn}}{T}\right) \quad (۳۶-۳)$$

طبق رابطه (۳۷-۳) و (۳۸-۳)  $(i_{l,H2})$  مقدار چگالی جریان محدود برای آند و کاتد و  $(C_{H2,O})$  ثابتی از  $(H_2,O)$  می باشد و همچنین پارامتر  $(h_{m,o2})$  ضریب انتشار تعریف شده است [۱۹].

$$i_{l,H_2} = 2F \frac{C_{H_2,O}}{\frac{i}{h_{m,o_2}} A_F} \quad (37-3)$$

$$i_{l,o_2} = 4F \frac{C_{O_2,O}}{\frac{i}{h_{m,o_2}} A_F} \quad (38-3)$$

رابطه (39-3) مقدار غلظت قطبش را بیان می کند [19].

$$V_{conc} = \frac{RT_S}{2F} \log \left[ \left( i - \frac{i}{i_{l,H_2}} \right) \left( i - \frac{i}{i_{l,o_2}} \right) \right] \quad (39-3)$$

با توجه به رابطه (40-3) ولتاژ کلی پیل سوختی اکسید جامد محاسبه می شود که  $E$  ماکسیمم پتانسیل تئوری و  $V_{act}$  مقدار ولتا  $V_{ohm}$  مقدار ولتاژ بالای اهمیک و همچنین ولتاژ غلظت قطبش  $V_{conc}$  به صورت زیر تعریف می شود [19].

$$V_F = E - (V_{act} + V_{ohm} + V_{conc}) \quad (40-3)$$

رابطه (41-3) جریان کلی پیل سوختی اکسید جامد می باشد که  $(i)$  مقدار چگالی جریان و  $A_F$  مقدار مساحت سطح پیل سوختی اکسید جامد تعریف می شود [19].

$$I_F = i A_F \quad (41-3)$$

معادله (42-3) مقدار توان  $AC$  پیل سوختی اکسید جامد می باشد که  $V_F$  مقدار ولتاژ کلی پیل سوختی و  $I_F$  مقدار جریان کلی پیل سوختی می باشد [19].

$$P_{dc,F} = V_F I_F \quad (42-3)$$

در رابطه زیر مقدار چگالی کلی جریان از طریق دوبرابر کردن فرکانس و مقدار  $Z$  محاسبه می شود [19].

$$I_{tot} = 2Fz \quad (43-3)$$

با توجه به دو رابطه‌ی (۴۴-۳) و (۴۵-۳) میتوان مقدار راندمان پیل سوختی را محاسبه نمود با توجه به این که  $P_{ac,F}$  و  $P_{dc,F}$  از هردو توان پیل سوختی استفاده می‌شود [۱۹].

$$P_{ac,F} = P_{dc,F} \times \eta \quad (۴۴-۳)$$

$$\eta = \frac{P_{dc,total}}{P_{ac,F}} \quad (۴۵-۳)$$

معادله نشان داده شده در معادله (۴۷-۳) ولتاژ پیل سوختی را تعریف می‌کند یک مقدار ثابت آن که  $N$  تعریف شده در معادله (۴۶-۳) نشان داده شده شامل پارامتر مساحت سطح آند و کاتد ( $A_{cathode}$ ,  $A_{anode}$ ) می‌باشد و همچنین مقدار جریان خروجی آند و کاتد ( $i_{o,anode}$ ,  $i_{o,cathode}$ ) و مقدار چگالی

$$V_F = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1.5}}{p_{H_2O}} - ir - N - \frac{RT}{n_e \alpha F} \left( \frac{i}{i_0} \right) \quad (۴۷-۳)$$

جریان و ( $E_0$ ) ولتاژ پیل سوختی با شرایط استاندارد تعریف می‌شود [۱۹].

$$N = (A_{anode} + A_{cathode}) \ln \left( \frac{i}{\frac{A_{anode}}{(i_{o,anode})^{A_{anode} + A_{cathode}}} \frac{A_{cathode}}{(i_{o,cathode})^{A_{anode} + A_{cathode}}}} \right) \quad (۴۶-۳)$$

### ۳-۳ معادلات پیل سوختی اکسید جامد برگشت ناپذیر

رابطه (۴۸-۳) ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد را بیان می‌کند رابطه  $d$  و  $m$  رابطه‌های (۳-۳) و (۴-۳) بیان شده‌اند [۱۶].

$$V_F = \frac{1}{n_e F} \left[ -\Delta g(T) + RT \ln \left( \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right) - RTd \right] \quad (۴۸-۳)$$



رابطه زیر بیانگر مقدار توان پیل سوختی اکسید جامد برگشتناپذیر می‌باشد [۱۶].

$$P_F = \frac{iA}{n_e F} \left( m - \frac{k}{RTd} m^2 \right) \quad (۴۹-۳)$$

رابطه (۵۰-۳) مقاومت نشتی موجود در پیل سوختی اکسید جامد را بیان می‌کند، که در رابطه‌ی (۳-)

(۵۱) که راندمان پیل سوختی را نشان می‌دهد به کار رفته است [۱۶].

$$k = \frac{R_{int}}{R_{leak}} \quad (۵۰-۳)$$

$$\eta = \frac{1}{\Delta h} \left( m - \frac{k}{RTd} m^2 \right) \quad (۵۱-۳)$$

### ۳-۴ معادلات مربوط به موتور استرلینگ

در این قسمت معادلات مربوط به موتور استرلینگ را تجزیه و تحلیل می‌کنیم.

بازده انرژی از سیکل استرلینگ برگشتناپذیر به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱]:

$$\eta_S = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (۵۲-۳)$$

حرارت اتلافی از موتور استرلینگ برگشتناپذیر به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱]:

$$Q_L = Q_H(1 - \eta_S) \quad (۵۳-۳)$$

توان حاصل از استرلینگ برگشتناپذیر، ساختار انرژی موتور استرلینگ برگشتناپذیر و توان

برگشت‌پذیر از موتور استرلینگ به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱]:

$$P_S = Q_H - Q_L \quad (۵۴-۳)$$

رابطه (۵۶-۳) و (۵۵-۳) به ترتیب چگالی تخریب انرژی موتور استرلینگ و توان برگشت‌پذیر موتور

استرلینگ را نشان می‌دهند [۱۱].

$$Exd_S = T_0 \left( \frac{Q_L}{T_L} - \frac{Q_H}{T} \right) \quad (۵۵-۳)$$

$$P_{rev,S} = Q_H \left( \frac{T_0}{T} \right) - Q_L \left( \frac{T_0}{T_L} \right) \quad (56-3)$$

### ۳-۵ معادلات مربوط به سیستم هیبریدی

رابطه (۳-۵۷) و (۳-۵۸) به ترتیب مقدار توان خروجی از سیستم هیبریدی و راندمان سیستم هیبریدی را نشان می‌دهند [۱۱]:

$$P_h = P_F + P_S \quad (57-3)$$

$$\eta_h = \frac{P_F + P_S}{-\Delta H} \quad (58-3)$$

رابطه (۳-۵۹) و (۳-۶۰) به ترتیب مقدار راندمان انرژی و انرژی و چگالی تخریب انرژی تعریف می‌شوند [۱۱].

$$\varphi_h = \frac{P_F + P_S}{P_{rev,F} + P_{rev,S}} \quad (59-3)$$

$$Exd_h = Exd_F + Exd_S \quad (60-3)$$

رابطه زیر مقدار چگالی تابع ترمو زیست محیطی را بیان می‌کند که در این رابطه مقادیر  $(b_1)$  و  $(b_2)$  و  $(b_3)$  و همچنین مقدار  $(M)$  مقادیر ثابتی هستند که صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱]:

$$F = \frac{P_h}{Mb_1 + Exd_h b_2 + P_h b_3} \quad (61-3)$$

### ۳-۶ معادلات مربوط به آب شیرین کن اسمز معکوس

در این قسمت ما به بررسی معادلات آب شیرین کن اسمز معکوس می‌پردازیم.

معادله زیر بیانگر پارامتر  $(\Delta H)$  آنتالپی می‌باشد که  $P_F$  چگالی توان پیل سوختی اکسید جامد و  $Q_r$  نرخ انتقال حرارت در بازیاب می‌باشد. [۱۱].

$$Q_H = -\Delta H - P_F - Q_r \quad (62-3)$$

نرخ حرارت انتقالی که در بازیاب به صورت زیر تعریف می‌شود که در این رابطه پارامتر هدایت حرارتی از بازیاب ( $k_r$ ) و ضریب تاثیر بازیاب ( $\varepsilon_r$ ) نقش دارند [۱۱].

$$Q_r = K_r(1 - \varepsilon_r)(T - T_0) \quad (۶۳-۳)$$

رابطه (۶۵-۳) توان مکانیکی خالص ( $W_{net}$ ) بیان شده است، که از مجموع توان پیل سوختی ( $P_F$ ) و توان موتور استرلینگ ( $P_S$ ) به دست آمده است [۳۱].

$$W_{net} = P_F + P_S \quad (۶۴-۳)$$

رابطه (۶۶-۳) و (۶۶-۳) به ترتیب میانگین فشار آب تغذیه شده و میانگین فشار اسمزی تعریف شده اند. در این رابطه‌ها ( $P_b$ ) و ( $P_f$ ) به ترتیب فشار هیدرولیک از جریان تغذیه شده و جریان رد شده، و همچنین ( $\pi_b$ ) و ( $\pi_f$ ) به ترتیب فشار اسمزی از جریان تغذیه شده و جریان رد شده تعریف شده‌اند [۳۱].

$$\bar{P} = 0/5(P_f + P_b) \quad (۶۵-۳)$$

$$\bar{\pi} = 0/5(\pi_f + \pi_b) \quad (۶۶-۳)$$

رابطه (۶۷-۳) و (۶۸۷۴-۳) به ترتیب هیدرولیک نفوذی و فشار اسمزی بیان می‌شوند، که در این دو رابطه ( $P_p$ ) و ( $\pi_p$ ) به ترتیب هیدرولیک و فشار اسمزی از جریان نفوذی تعریف می‌شوند. ( $P$ ) بار و ( $\pi$ ) بار به ترتیب میانگین فشار آب تغذیه شده و میانگین فشار اسمزی روی سمت تغذیه شده و سمت آب نمک بیان می‌شوند [۳۱].

$$\Delta P = \bar{P} - P_p \quad (۶۷-۳)$$

$$\Delta \pi = \bar{\pi} - \pi_p \quad (۶۸-۳)$$

رابطه (۶۹-۳) و (۷۰-۳) و (۷۱-۳) فشارهای اسمزی هستند، که  $(R)$  ثابت گاز جهانی و  $(T)$  دمای آب هستند، و همچنین  $(X_f)$  و  $(X_b)$  و  $(X_p)$  به ترتیب شوری تغذیه شده و شوری آب نمک و نفوذ شوری تعریف می‌شوند [۳۱].

$$\pi_f = (RTX_f) \quad (۶۹-۳)$$

$$\pi_b = (RTX_b) \quad (۷۰-۳)$$

$$\pi_p = (RTX_p) \quad (۷۱-۳)$$

طبق رابطه زیر که  $(\Delta P_{net})$  راندمان فشار خالص عبوری از پمپ فشار بالا تعریف می‌شود از مجموع هیدرولیک نفوذی و فشار اسمزی بدست می‌آید [۳۱].

$$\Delta P_{net} = \Delta P + \Delta \pi \quad (۷۲-۳)$$

در رابطه زیر  $(m_f)$  نرخ جریان جرم از آب شیرین که در این رابطه پارامترهای،  $(\rho_f)$  نرخ چگالی جریان تغذیه شده و  $(\eta_{pump})$  راندمان مکانیکی پمپ محرک و  $(\Delta P_{net})$  اختلاف فشار عبوری از پمپ فشار بالا نقش مؤثری دارند [۳۱].

$$m_f = \frac{W_{net} \rho_f \eta_{pump}}{\Delta P_{net}} \quad (۷۳-۳)$$

## فصل چهارم: معتبرسازی و نتایج مدل سازی

## ۱-۴ مقدمه

در فصل سوم، در ابتدا معادلات حاکم بر پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ و همچنین معادلات مربوط به سیستم هیبریدی ارائه گردید، سپس روابط مربوط به آب شیرین کن اسمزمعکوس و بهینه سازی بیان شد. سپس نمودارهای مدلسازی شده و جداول راندمان و توان تولیدی از موتور استرلینگ و پیل سوختی و در نهایت بازده و توان و مقدار دبی آب شیرین بر اساس بهینه سازی‌های انجام شده مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در جدول (۱-۴) پارامترهای ثابت استفاده شده در موتور استرلینگ و پیل سوختی و جدول (۲-۴) نیز پارامترهای آب شیرین کن اسمزمعکوس بیان شده است.

## ۲-۴ معتبر سازی

### ۱-۲-۴ معتبر سازی پیل سوختی اکسید جامد

در این قسمت به معتبر سازی مدل بکار رفته جهت تحلیل عملکرد پیل سوختی اکسید جامد پرداخته می‌شود. بدین منظور در ابتدا نتایج توان و راندمان پیل سوختی اکسید جامد از مدلسازی انجام شده با نتایج ارائه شده از مدلسازی زهانگ [۱۶] و بیگ زاده [۱۹] مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، شبیه سازی انجام شده دارای دقت و صحت بالایی می‌باشد.

در ابتدا در جدول (۱-۴)، به ترتیب پارامترهای ورودی پیل سوختی اکسید جامد ارائه شده است.

در جدول (۲-۴) چگالی توان، راندمان، ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد حاصل از کار حاضر با نتایج منتشر شده توسط زهانگ [۱۶] و بیگ زاده [۱۹] ارائه شده است. همانطور که از اعداد خطا مشخص است شبیه سازی انجام شده دارای دقت بالایی برای سه پارامتر می‌باشد.

جدول ۴-۱- پارامترهای ورودی پیل سوختی اکسید جامد [16, 19]

واحد	مقدار	پارامتر
$K$	۱۲۷۳	$T$
$\mu m$	۲۰	$L_e$
-	$97\%H_2+3\%H_2O$	<i>Molar fraction</i>
-	۰	$k$
$bar$	۹	$p$
$A/m^2$	۱۰۰۰۰	$I$
$Kmol/hr$	۲	<i>Air flow rate</i>
$Kmol/hr$	0/7	<i>Fuel flow rate</i>

جدول ۴-۲- نتایج مدل حاضر با نتایج ارائه شده توسط زهانگ برای پیل سوختی اکسید جامد [16, 19]

پارامتر	Error (%)
$P_F (W/m^2)$	0/15%
$\eta_F$	0/2%
$V_F (V)$	0/5%

#### ۴-۲-۲-۲ معتبر سازی موتور استرلینگ

در این بخش نیز معتبر سازی مربوط به موتور استرلینگ ارائه شده است. به منظور معتبر سازی مدل حاضر ابتدا پارامترهای ورودی موتور استرلینگ در جدول (۴-۳) ارائه شده است. همچنین در جدول (۴-۴) چگالی توان و چگالی تخریب انرژی برای موتور استرلینگ حاصل از کار حاضر با نتایج منتشر شده [۱۱] ارائه شده است. همانطور که از مقادیر خطا مشخص است شبیه سازی انجام شده دارای دقت و صحت بالایی برای هردو پارامتر می‌باشد.

جدول ۳-۴- پارامترهای ورودی موتور استرلینگ [۱۱]

واحد	مقدار	پارامتر
$A/m^2$	۱۳۱۰۰	$I$
$k$	۱۰۷۳	$T$
$\mu m$	۲۰	$L_e$
-	%۹۷H <sub>2</sub> +3%H <sub>2</sub> O	<i>Molar fraction</i>
-	.	$k$

جدول ۴-۴- نتایج مدل حاضر با نتایج ارائه شده توسط  $E_{min}$  برای موتور استرلینگ [۱۱]

پارامتر	Error (%)
$P_S (W/m^2)$	0/055%
$exd_S (W/m^2)$	0/066%

### ۳-۲-۴ معتبر سازی سیستم هیبریدی شامل پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ

در این بخش معتبر سازی مربوط به سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ ارائه شده است. به منظور معتبر سازی مدل حاضر ابتدا پارامترهای ورودی سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ در جدول (۴-۵) ارائه شده است. همچنین در جدول (۴-۶) چگالی توان، راندمان، چگالی تخریب انرژی، راندمان انرژی و انرژی و همچنین تابع ترمو زیست محیطی را برای سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ از کار حاضر با نتایج منتشر شده از  $E_{min}$  [۱۱] ارائه شده است. همانطور که از مقادیر خطا مشخص شده است، شبیه سازی انجام شده دارای دقت و صحت بالایی برای هر چهار پارامتر سیستم هیبریدی می باشد.



جدول ۴-۵- پارامترهای ورودی سیستم هیبریدی شامل پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ [۱۱]

واحد	مقدار	پارامتر
$(A/m^2)$	۱۴۳۰۰	$I$
$(k)$	۱۰۷۳	$T$
$(\mu m)$	۲۰	$L_e$
-	0/01	$K$
-	$\%97H_2+3\%H_2O$	<i>Molar fraction</i>
$m^2$	0/1036	$A$

جدول ۴-۶- نتایج مدل حاضر با نتایج ارائه شده توسط  $Emin$  برای سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ [۱۱]

پارامتر	Error (%)
$P_h (W/m^2)$	0/63%
$\eta_h$	0/038%
$\phi h$	0/9%
$exd_h (w/m^2)$	0/016%
$F(w/m^2 mpts^{-1})$	0/7%

### ۴-۳ مدلسازی

در ابتدا به منظور مدلسازی‌های پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ و سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ پارامترهای مورد نیاز در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۴-۷- پارامترهای مورد نیاز سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ [11][16,19]

واحد	مقدار	پارامتر
(K)	۱۰۷۳	$T$
atm	۱	$P_0$
atm	0/97; 0/03	$p_{H_2}; p_{H_2O}$
atm	0/21; 0/79	$p_{O_2}; p_{N_2}$
-	0/5	$\beta$
-	۲	$n_e$
J/mol	$1 \times 10^5$	$E_{act,a}$
J/mol	$1/2 \times 10^5$	$E_{act,c}$
$\mu m$	20	$L_{el}$
J/mol	$8 \times 10^4$	$E_{el}$
S/m	$3/6 \times 10^7$	$\sigma_0$
-	1/100	$k$
$A/m^2$	$2/99 \times 10^4$	$i_{L,a}$
$A/m^2$	$2/16 \times 10^4$	$i_{L,c}$
C/mol	۹۶۴۸۵	$F$
J/molK	۰/314۸	$R$
$Mptskg^{-1}$	۱۷	$b_1$
$MptsMJ^{-1}$	۰/۵۷	$b_2$
kg	۵۰۰۰	$M$
K	۲۹۳/۱۵	$T_0$
K	۳۰۰	$T_L$

برای مدلسازی سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ، آب شیرین کن اسمز-

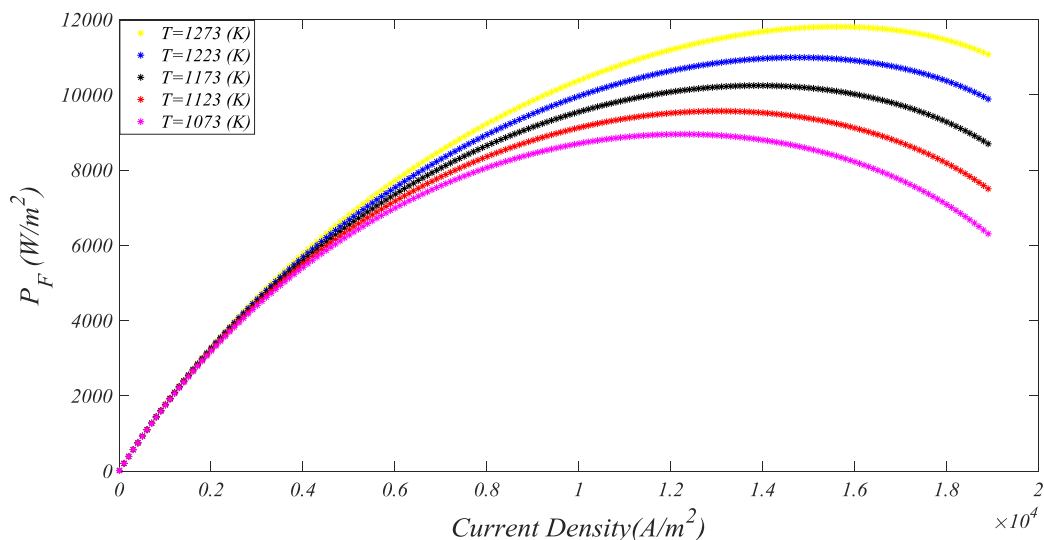
معکوس در قسمت آب شیرین کن اسمز معکوس پارامترهای مورد نیاز در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۴-۸- پارامترهای مورد سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ، آب شیرین کن اسمز- معکوس [۳۱]

پارامتر	مقدار	واحد
$X_f$	۴۵	$Kgm^{-3}$
$X_b$	۶۹	$Kgm^{-3}$
$X_P$	0/145	$Kgm^{-3}$
$P_f$	8/000	$Mpa$
$P_b$	7/800	$Mpa$
$P_p$	0/101	$Mpa$
$T_f$	298/15	$k$
$R_r$	0/3	-

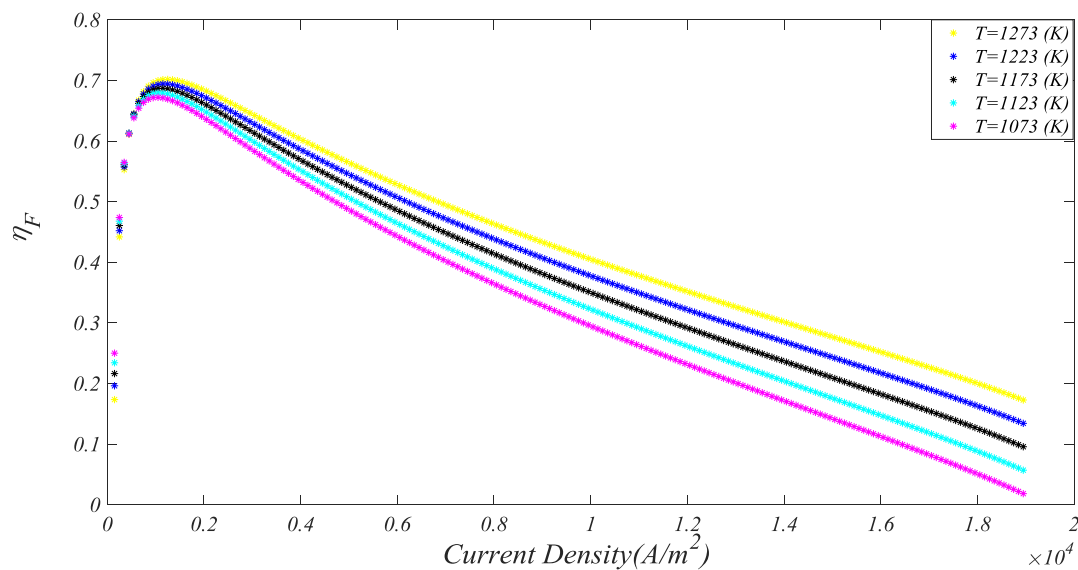
#### ۴-۳-۱ تحلیل نمودارهای شبیه سازی شده پیل سوختی اکسید جامد

همانطور که در شکل (۴-۱) مشخص شده است در یک چگالی جریان ثابت با افزایش دما عملکرد چگالی توان خروجی نیز افزایش می یابد، زیرا با افزایش دما علاوه بر این که به واکنش الکتروشیمیایی افزوده می شود، هدایت الکترونیک و یونی از بخش های الکترون و یون، نیز افزایش می یابد در نتیجه باعث افزایش عملکرد سیستم نیز می شود. همچنین در یک دمای مشخص با افزایش چگالی جریان، چگالی توان پیل سوختی ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان، تلفات افزایش یافته و ولتاژ جریان خروجی پیل سوختی کاهش می یابد، توان خروجی نیز ابتدا به سبب بالا بودن ولتاژ خروجی ابتدا افزایش یافته و با کاهش بیشتر ولتاژ خروجی توان نیز کاهش می یابد.



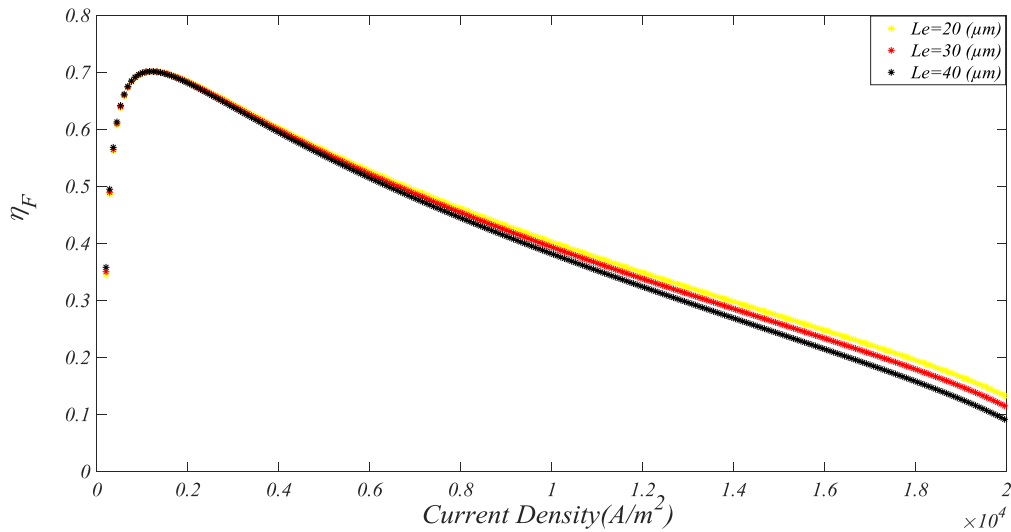
شکل ۴-۱- نمودار توان خروجی از پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان در دماهای مختلف

همانطور که در شکل (۲-۴) مشخص شده است در یک چگالی جریان ثابت با افزایش دما عملکرد راندمان خروجی از پیل سوختی نیز افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش دما علاوه بر این که به واکنش الکتروشیمیایی افزوده می‌شود، هدایت الکترونیک و یونی از بخش‌های الکترون و یون، نیز افزایش می‌یابد در نتیجه باعث افزایش عملکرد راندمان خروجی از پیل سوختی نیز می‌شود. همچنین در یک دمای مشخص با افزایش چگالی جریان، راندمان خروجی از پیل سوختی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان، تلفات افزایش یافته و ولتاژ جریان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد، راندمان خروجی نیز ابتدا به سبب بالا بودن ولتاژ خروجی ابتدا افزایش یافته و با کاهش بیشتر ولتاژ خروجی راندمان نیز کاهش می‌یابد.



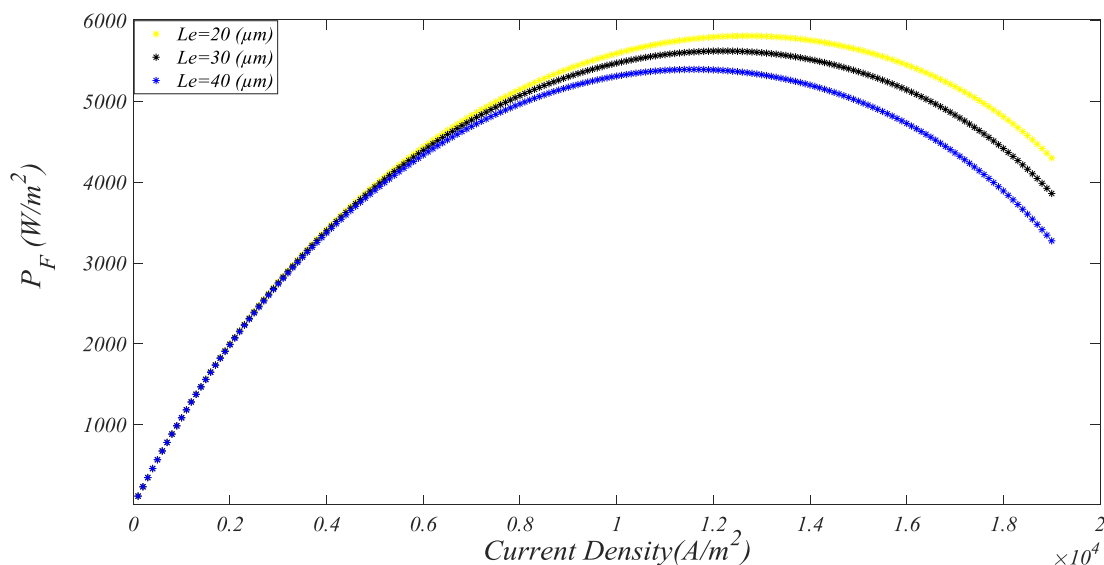
شکل ۴-۲- نمودار راندمان حاصل از پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای دماهای مختلف

همانطور که در شکل (۳-۴) مشخص شده است در یک چگالی جریان ثابت با افزایش مقدار ضخامت الکترولیت ( $L_e$ ) مقدار راندمان پیل سوختی کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش ضخامت الکترولیت اتلافات بیشتر می‌شود و در نتیجه عملکرد پیل سوختی و همچنین راندمان آن کاهش می‌یابد. همچنین در یک ضخامت الکترولیت ثابت ( $L_e$ ) با افزایش چگالی جریان مقدار راندمان پیل سوختی ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان، تلفات افزایش یافته و ولتاژ جریان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد، راندمان خروجی نیز ابتدا به سبب بالا بودن ولتاژ خروجی ابتدا افزایش یافته و با کاهش بیشتر ولتاژ خروجی راندمان نیز کاهش می‌یابد.



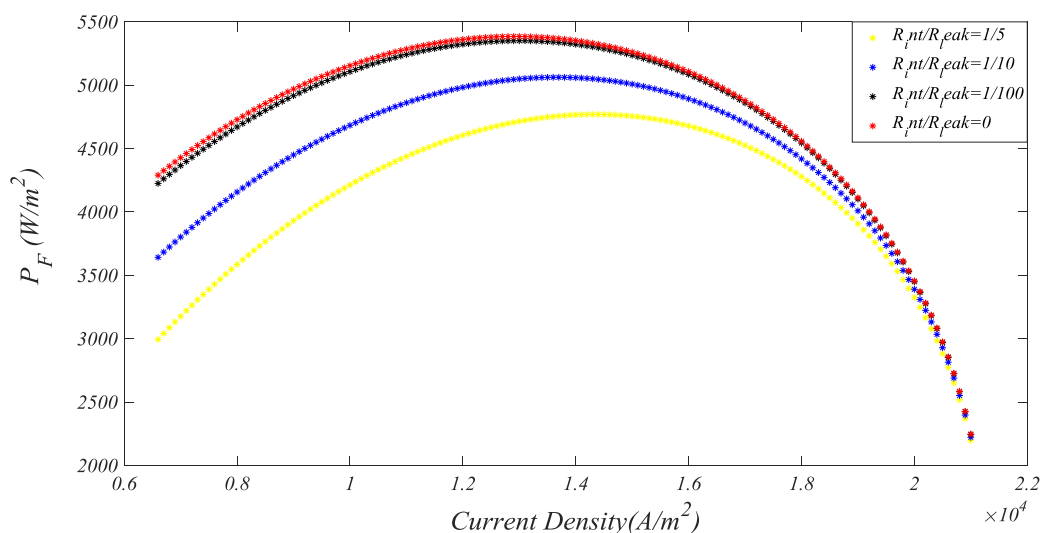
شکل ۴-۳- راندمان پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای ضخامت الکترولیت مختلف

همانطور که در شکل (۴-۴) مشخص شده است در یک چگالی جریان ثابت با افزایش مقدار ضخامت الکترولیت ( $L_e$ ) مقدار چگالی توان پیل سوختی کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش ضخامت الکترولیت اتلافات بیشتر می‌شود و در نتیجه عملکرد پیل سوختی و همچنین چگالی توان آن کاهش می‌یابد. همچنین در یک ضخامت الکترولیت ثابت ( $L_e$ ) با افزایش چگالی جریان مقدار چگالی توان پیل سوختی ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان، تلفات افزایش یافته و ولتاژ جریان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد، چگالی توان خروجی نیز ابتدا به سبب بالا بودن ولتاژ خروجی ابتدا افزایش یافته و با کاهش بیشتر ولتاژ خروجی چگالی توان نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۴- توان خروجی از پیل سوختی با چگالی جریان برای ضخامت الکترولیت مختلف

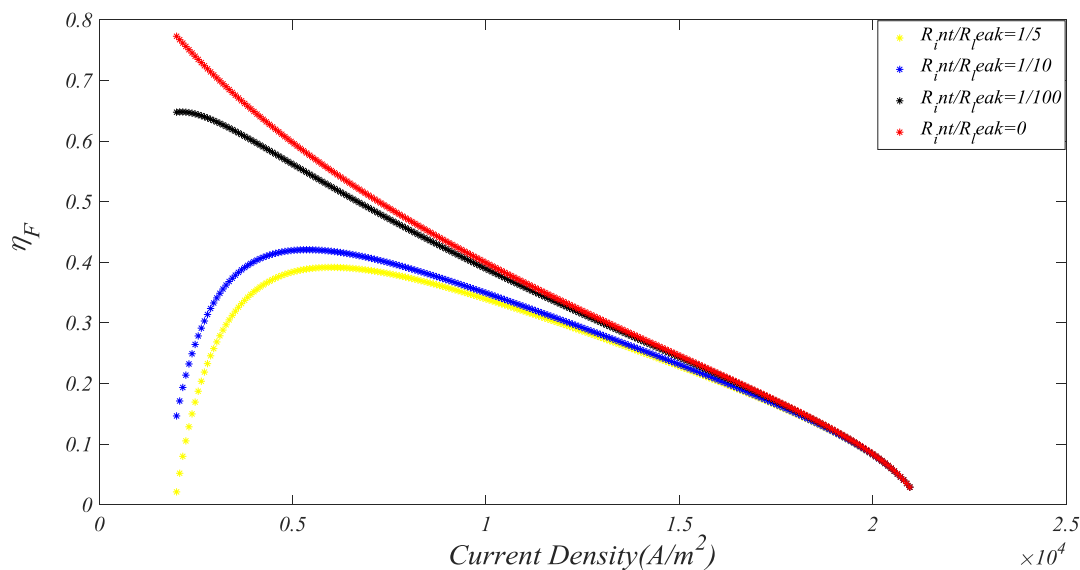
همانطور که در شکل (۴-۵) مشخص شده است، تغییرات توان خروجی از پیل با چگالی جریان در مقادیر مختلف از مقاومت در برابر نشت ( $R_{leakage}$ ) مورد بررسی قرار گرفته شده است.  $k$  نسبت مقاومت داخلی به مقاومت در برابر نشت تعریف شده است. با توجه به شکل در یک چگالی جریان ثابت با افزایش مقدار مقاومت نشتی ( $R_{leakage}$ ) توان خروجی پیل سوختی نیز افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش مقاومت نشتی برگشت ناپذیری در پیل سوختی کاهش می‌یابد و در نتیجه توان خروجی از پیل سوختی افزایش می‌یابد. همچنین در یک مقدار ثابت از مقاومت در نشتی ( $R_{leakage}$ ) با افزایش چگالی جریان مقدار توان خروجی ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان تلفات افزایش یافته و ولتاژ جریان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد، چگالی توان خروجی نیز ابتدا به سبب بالا بودن ولتاژ خروجی ابتدا افزایش یافته و با کاهش بیشتر ولتاژ خروجی چگالی توان نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۵- نمودار توان پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای مقاومت تراوشی مختلف

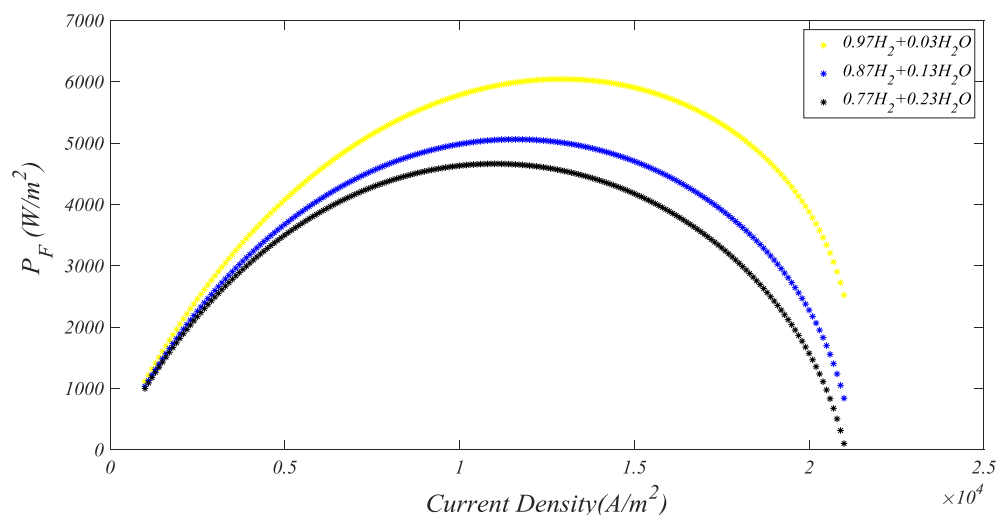
همانطور که در شکل (۴-۶) مشخص شده است، تغییرات راندمان خروجی از پیل با چگالی جریان در مقادیر مختلف از مقاومت در برابر نشت ( $R_{leakage}$ ) مورد بررسی قرار گرفته شده است.  $k$  نسبت مقاومت داخلی به مقاومت در برابر نشت تعریف شده است. با توجه به شکل در یک چگالی جریان ثابت با افزایش مقدار مقاومت نشتی ( $R_{leakage}$ ) راندمان خروجی پیل سوختی نیز افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش مقاومت نشتی برگشت ناپذیری در پیل سوختی کاهش می‌یابد و در نتیجه راندمان خروجی از پیل سوختی افزایش می‌یابد. همچنین در یک مقدار ثابت از مقاومت در نشتی ( $R_{leakage}$ ) با افزایش چگالی جریان مقدار راندمان خروجی ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان تلفات افزایش یافته و ولتاژ جریان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد، راندمان خروجی نیز ابتدا به سبب بالا بودن ولتاژ خروجی ابتدا افزایش یافته و با کاهش بیشتر ولتاژ خروجی راندمان خروجی از پیل سوختی نیز کاهش می‌یابد.





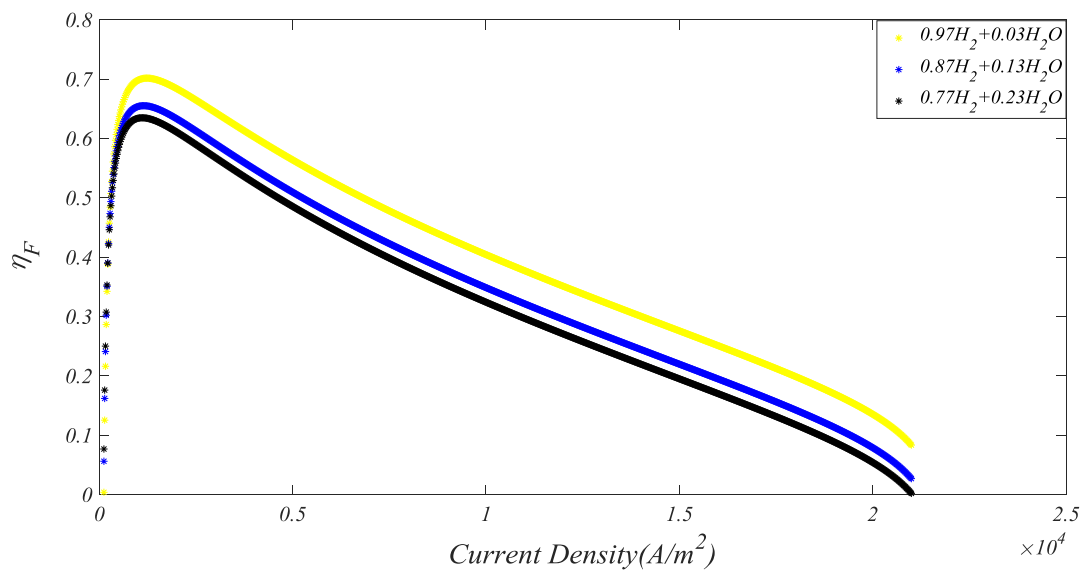
شکل ۴-۶- نمودار بازده پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای مقاومت نشتی مختلف

همانطور که در شکل (۴-۷) مشخص شده است، تغییرات توان پیل سوختی با چگالی جریان در مقادیر مختلف از کسر مولی مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به شکل در یک چگالی جریان ثابت با افزایش کسر مولی هیدروژن مقدار توان خروجی از پیل افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش ضریب سوخت، دما پیل سوختی افزایش می‌یابد و افزایش دما باعث افزایش سرعت واکنش الکتروشیمیایی و همچنین افزایش هدایت الکترونی و یونی از بخش‌های الکترون و یون می‌شود در حالی که عملکرد چگالی توان پیل سوختی نیز افزایش می‌یابد. همچنین در یک کسر مولی ثابت با افزایش چگالی جریان مقدار توان خروجی ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان تلفات افزایش یافته و ولتاژ جریان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد، چگالی توان خروجی نیز ابتدا به سبب بالا بودن ولتاژ خروجی ابتدا افزایش یافته و با کاهش بیشتر ولتاژ خروجی چگالی توان خروجی از پیل سوختی نیز کاهش می‌یابد.



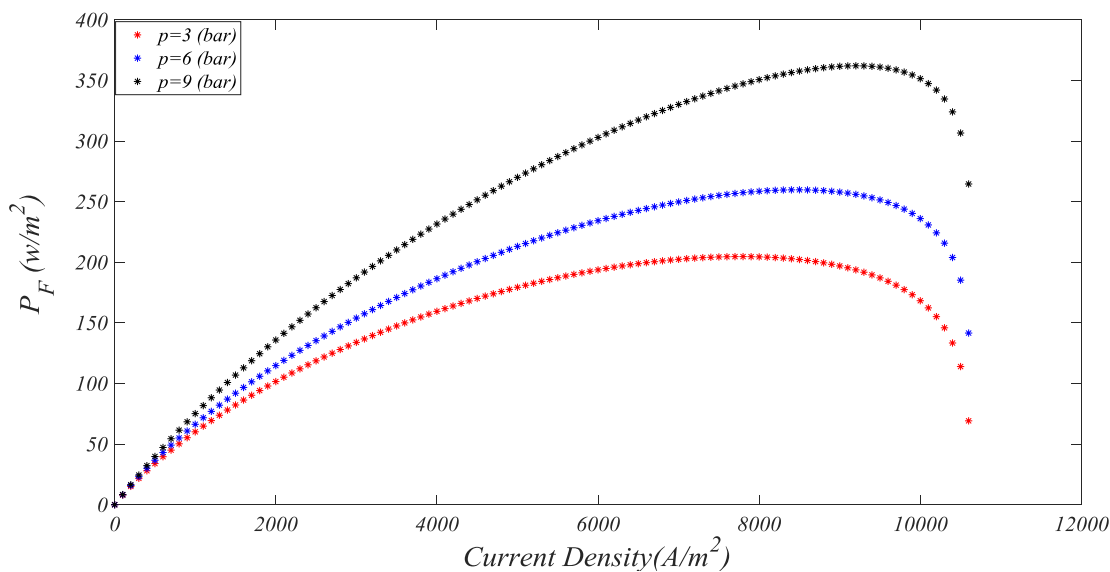
شکل ۴-۷- نمودار توان پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای مقاومت نشتی مختلف

همانطور که در شکل (۴-۸) مشخص شده است، تغییرات راندمان پیل سوختی با چگالی جریان در مقادیر مختلف از کسر مولی مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به شکل در یک چگالی جریان ثابت با افزایش کسر مولی هیدروژن مقدار راندمان خروجی از پیل سوختی افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش ضریب سوخت، دما پیل سوختی افزایش می‌یابد و افزایش دما باعث افزایش سرعت واکنش الکتروشیمیایی در مکان واکنش و همچنین باعث افزایش هدایت الکترونی و یونی از بخش های الکترون و یون می‌شود و در نهایت عملکرد راندمان خروجی از پیل سوختی نیز افزایش می‌یابد. همچنین در یک کسر مولی ثابت با افزایش چگالی جریان مقدار راندمان خروجی ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان تلفات افزایش یافته و ولتاژ جریان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد، راندمان خروجی از پیل سوختی نیز ابتدا به سبب بالا بودن ولتاژ خروجی ابتدا افزایش یافته و با کاهش بیشتر ولتاژ خروجی راندمان خروجی از پیل سوختی نیز کاهش می‌یابد.



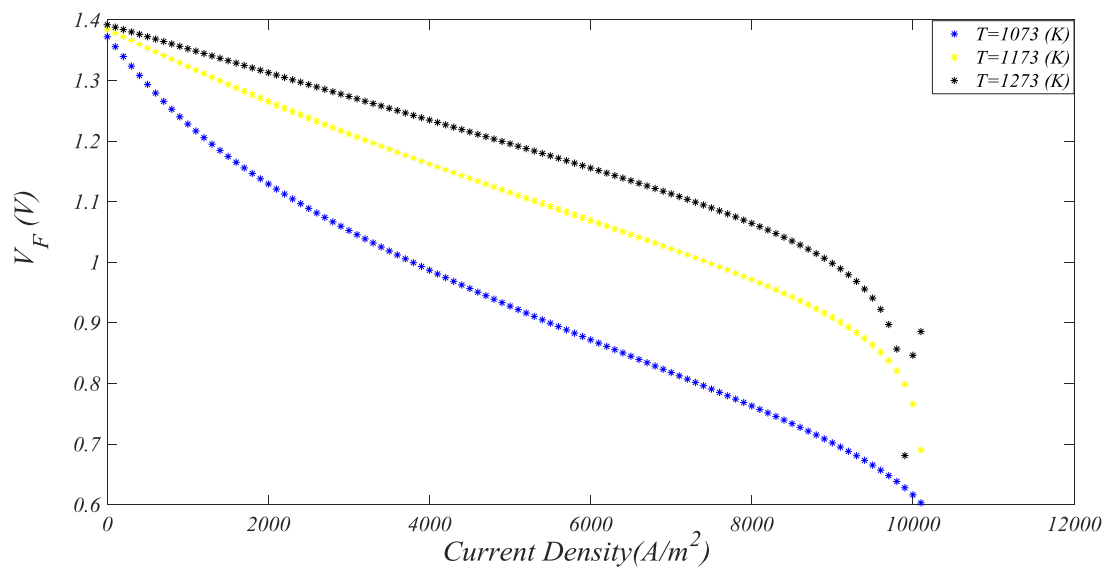
شکل ۴-۸- نمودار راندمان پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان در کسر مولی مختلف

همانطور که در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است، تغییرات توان پیل سوختی با چگالی جریان در مقادیر مختلف از فشار مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به شکل در یک چگالی جریان ثابت با افزایش فشار چگالی توان خروجی از پیل افزایش می‌یابد، در کانال هوا و سوخت با افزایش اصطکاک مقدار فشار کاهش می‌یابد ولی با افزایش فشار از مقدار اصطکاک کاسته می‌شود و برگشت ناپذیری نیز ناچیز می‌شود سپس توان پیل سوختی نیز افزایش می‌یابد. همچنین در یک فشار ثابت با افزایش چگالی جریان مقدار توان خروجی ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان تلفات افزایش یافته و ولتاژ جریان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد، چگالی توان خروجی نیز ابتدا به سبب بالا بودن ولتاژ خروجی ابتدا افزایش یافته و با کاهش بیشتر ولتاژ خروجی توان خروجی از پیل سوختی نیز کاهش می‌یابد.



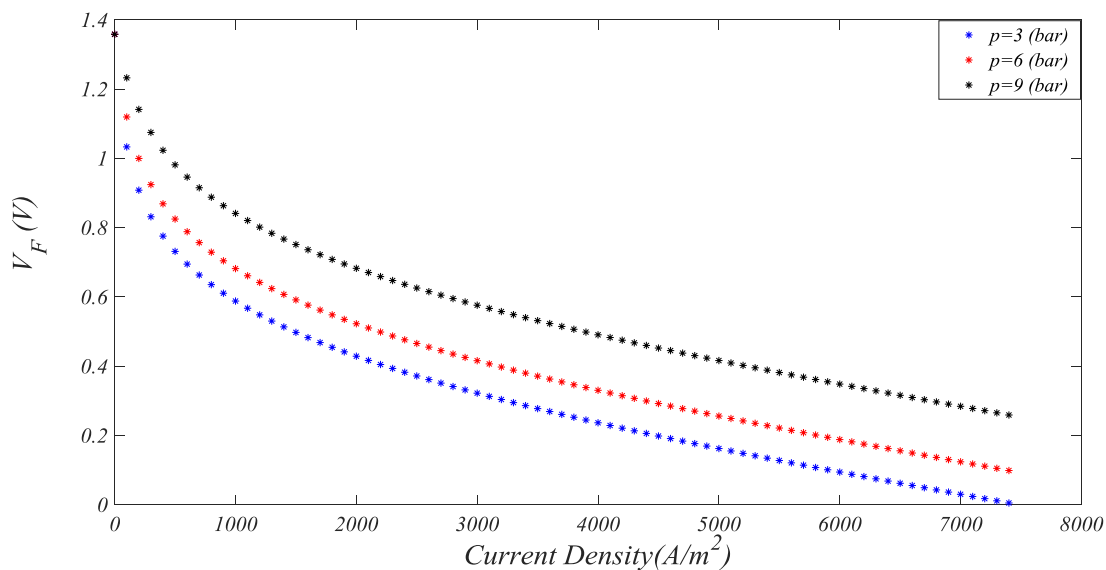
شکل ۴-۱۰- نمودار توان پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای فشارهای مختلف

همانطور که در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است، تغییرات ولتاژ پیل سوختی با چگالی جریان در مقادیر مختلف از دما مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به شکل در یک چگالی جریان ثابت با افزایش دما ولتاژ خروجی از پیل افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش دما علاوه بر افزایش سرعت واکنش الکتروشیمیایی، هدایت الکترونی و یونی نیز افزایش می‌یابد در نتیجه عملکرد ولتاژ پیل سوختی نیز افزایش می‌یابد. همچنین در یک دمای ثابت با افزایش چگالی جریان مقدار ولتاژ پیل سوختی ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان تلفات افزایش یافته و ولتاژ جریان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد.



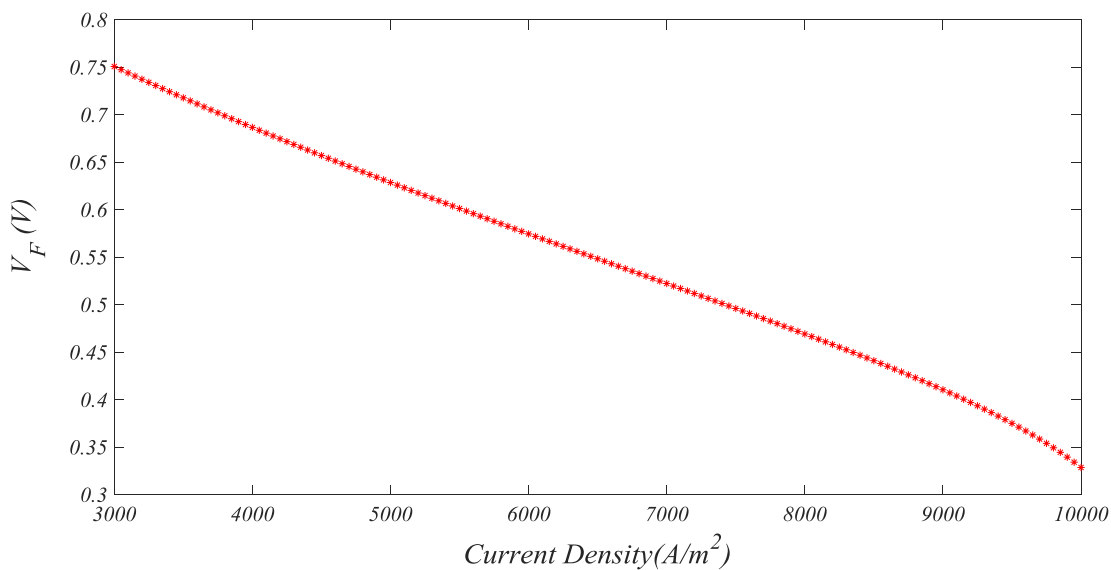
شکل ۴-۱۱- نمودار ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای دما های مختلف

همانطور که در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است، تغییرات ولتاژ پیل سوختی با چگالی جریان در مقادیر مختلف از فشار مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به شکل در یک چگالی جریان ثابت با افزایش فشار ولتاژ خروجی از پیل افزایش می‌یابد، زیرا در کانال هوا و سوخت با افزایش اصطکاک مقدار فشار کاهش می‌یابد ولی با افزایش فشار از مقدار اصطکاک کاسته می‌شود و برگشت ناپذیری نیز ناچیز می‌شود سپس ولتاژ پیل سوختی نیز افزایش می‌یابد. همچنین در یک فشار ثابت با افزایش چگالی جریان مقدار ولتاژ به طور پیوسته کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان تلفات افزایش یافته و ولتاژ جریان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد.



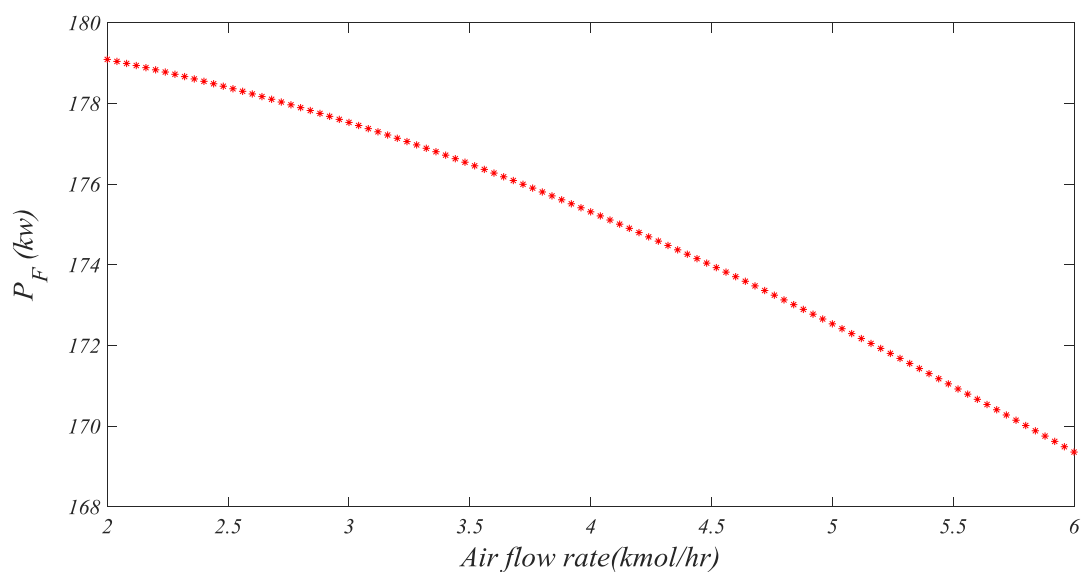
شکل ۴-۱۲- نمودار ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان برای فشار های مختلف

همانطور که در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است، تغییرات ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به شکل با افزایش چگالی جریان مقدار ولتاژ پیل سوختی کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان، تلفات افزایش یافته و باعث کاهش ولتاژ پیل سوختی می‌شود. همانطور که در شکل نشان داده می‌شود بیشترین مقدار ولتاژ پیل سوختی ۰/۷۵ ولت می‌باشد که در چگالی جریان ۳۰۰۰ اتفاق می‌افتد.



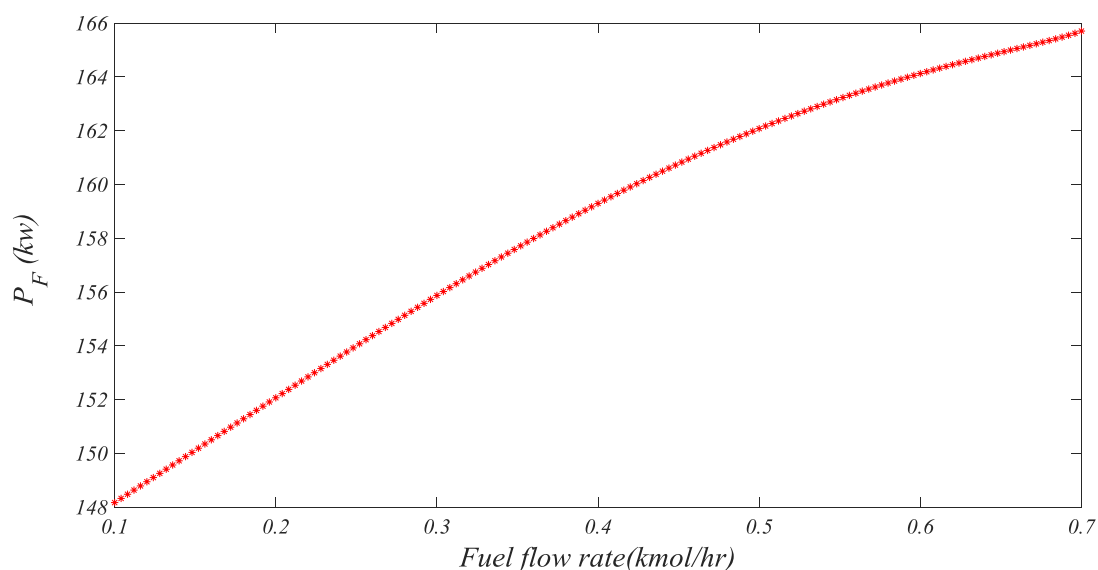
شکل ۴-۱۳- نمودار ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد با چگالی جریان مختلف

همانطور که در شکل (۴-۱۴) نشان داده شده است، تغییرات توان پیل سوختی با نرخ جریان هوا مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به شکل با افزایش نرخ جریان هوا اصطکاک افزایش می‌یابد و با افزایش اصطکاک برگشت ناپذیری در پیل سوختی نیز افزایش پیدا می‌کند و سپس باعث کاهش عملکرد توان پیل سوختی می‌شود.



شکل ۴-۱۴- نمودار توان پیل سوختی اکسید جامد با نرخ جریان هوای مختلف

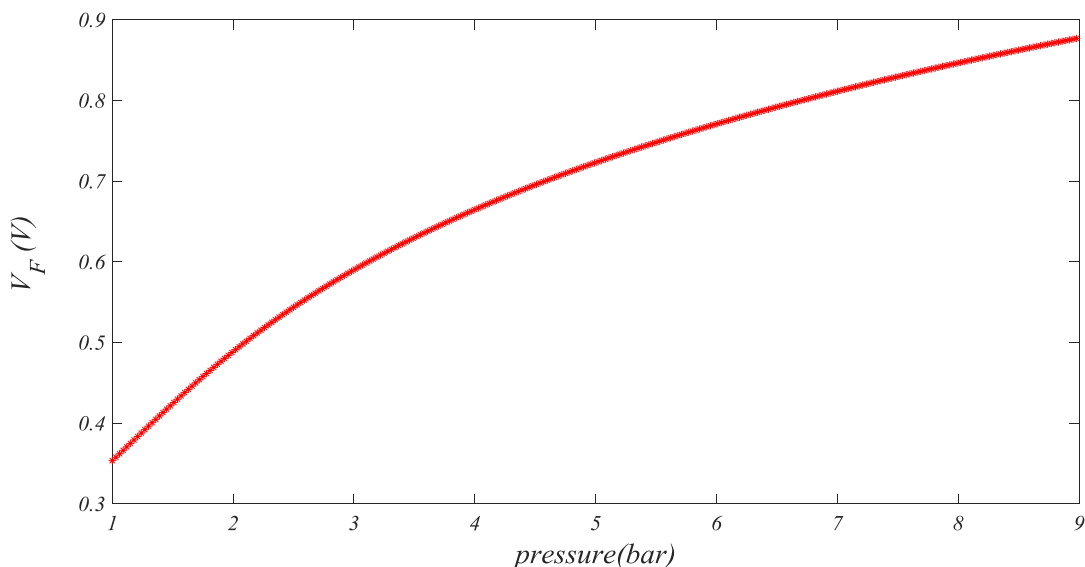
همانطور که در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است، تغییرات توان پیل سوختی با نرخ جریان سوخت مورد بررسی قرار شده است. با توجه به شکل با افزایش نرخ جریان سوخت مقدار توان پیل سوختی افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش نرخ جریان سوخت، دمای پیل سوختی افزایش و سرعت واکنش الکتروشیمیایی و همچنین هدایت الکترونی و یونی نیز افزایش یافته و در نتیجه عملکرد توان پیل سوختی افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۱۵- نمودار توان پیل سوختی اکسید جامد با نرخ جریان سوخت مختلف

همانطور که در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است، تغییرات ولتاژ پیل سوختی با فشار مورد بررسی قرار شده است. با توجه به شکل با افزایش فشار مقدار ولتاژ پیل سوختی افزایش می‌یابد، زیرا افزایش فشار باعث کاهش اصطکاک و برگشت ناپذیری در پیل سوختی می‌شود، در نتیجه باعث افزایش عملکرد ولتاژ پیل سوختی می‌شود.

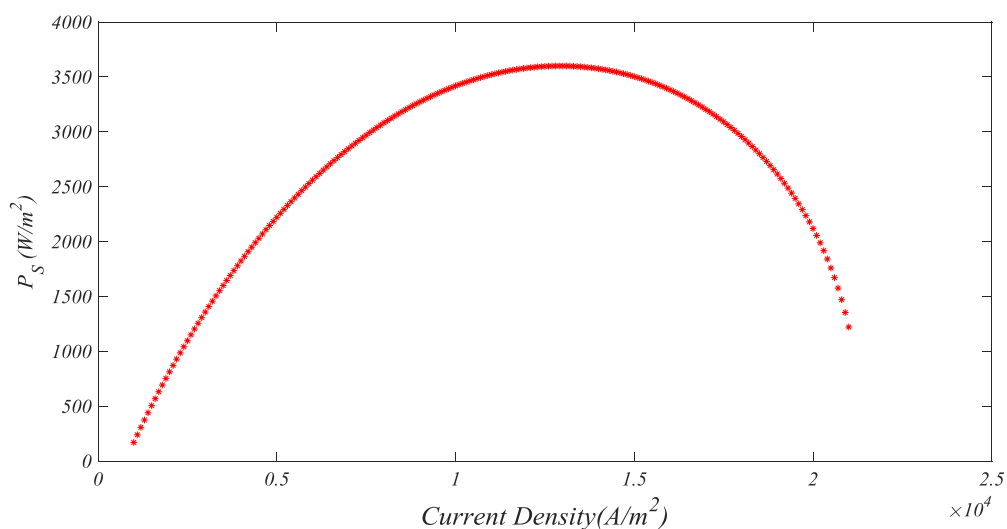




شکل ۴-۱۶- نمودار ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد با فشار مختلف

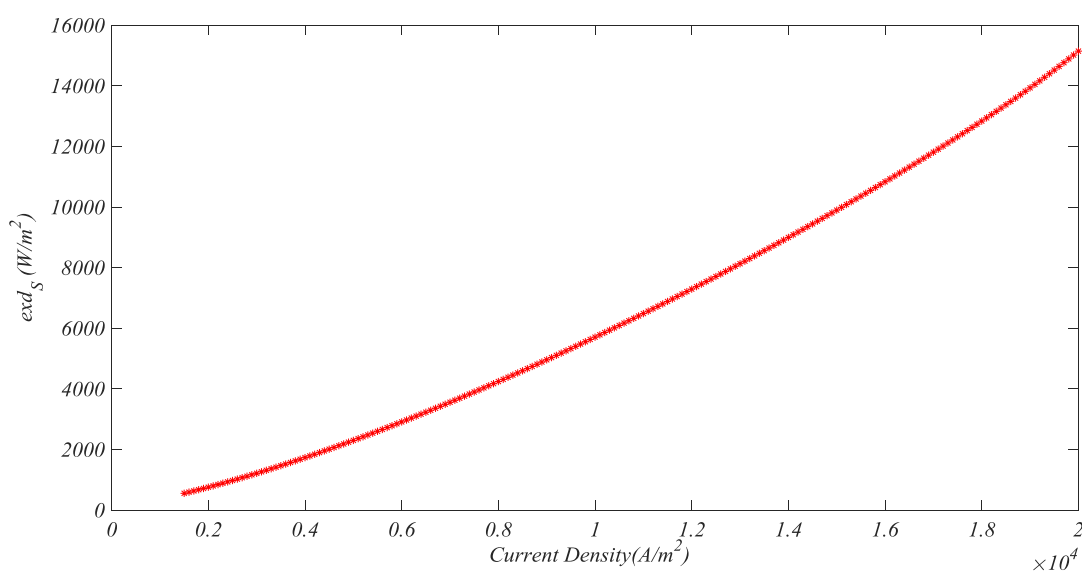
### ۴-۳-۲ تجزیه و تحلیل مدلسازی موتور استرلینگ

در این بخش عملکرد پارامترها روی موتور استرلینگ مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. با افزایش چگالی جریان، چگالی توان موتور استرلینگ ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان، تلفات افزایش یافته و ولتاژ جریان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد، توان خروجی از موتور استرلینگ نیز ابتدا به سبب بالا بودن ولتاژ خروجی ابتدا افزایش یافته و با کاهش بیشتر ولتاژ خروجی توان نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۱۷- نمودار توان موتور استرلینگ با چگالی جریان مختلف

تغییرات چگالی تخریب اگزرژی ( $exd$ ) با چگالی جریان در شکل (۴-۱۸) مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به شکل در یک چگالی جریان ثابت  $i = 20000$  مقدار ماکسیمم چگالی تخریب اگزرژی برابر ۱۵۱۴۰ می‌باشد. همانطور که مشاهده شده است با افزایش چگالی جریان مقدار چگالی تخریب اگزرژی ( $exd$ ) افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان تلفات افزایش می‌یابد، افزایش تلفات یک نوع تخریب برای موتور استرلینگ می‌باشد که در نتیجه چگالی تخریب اگزرژی موتور استرلینگ ( $exd$ ) نیز افزایش می‌یابد.



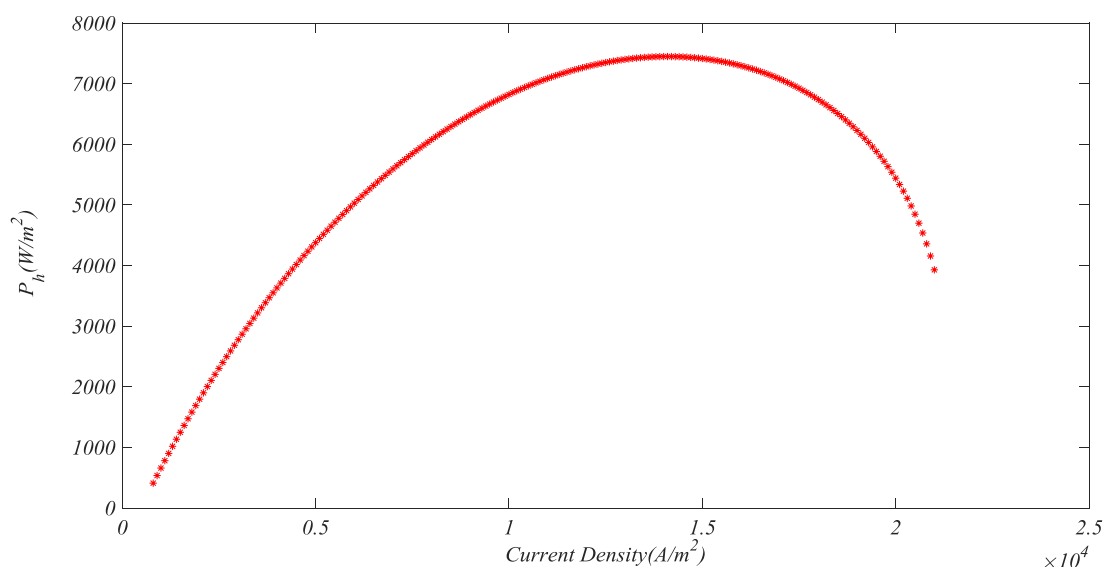
شکل ۴-۱۸- نمودار چگالی تخریب اگزرژی موتور استرلینگ با چگالی جریان مختلف

### ۳-۳-۴ تجزیه و تحلیل شبیه سازی سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ

در این بخش عملکرد پارامترها روی سیستم هیبریدی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است، که شامل پارامترهای توان خروجی، راندمان، چگالی تخریب اگزرژی، چگالی تابع ترمویست محیطی می‌باشد، که در معادلات بخش سیستم هیبریدی فصل گذشته بیان شده است.

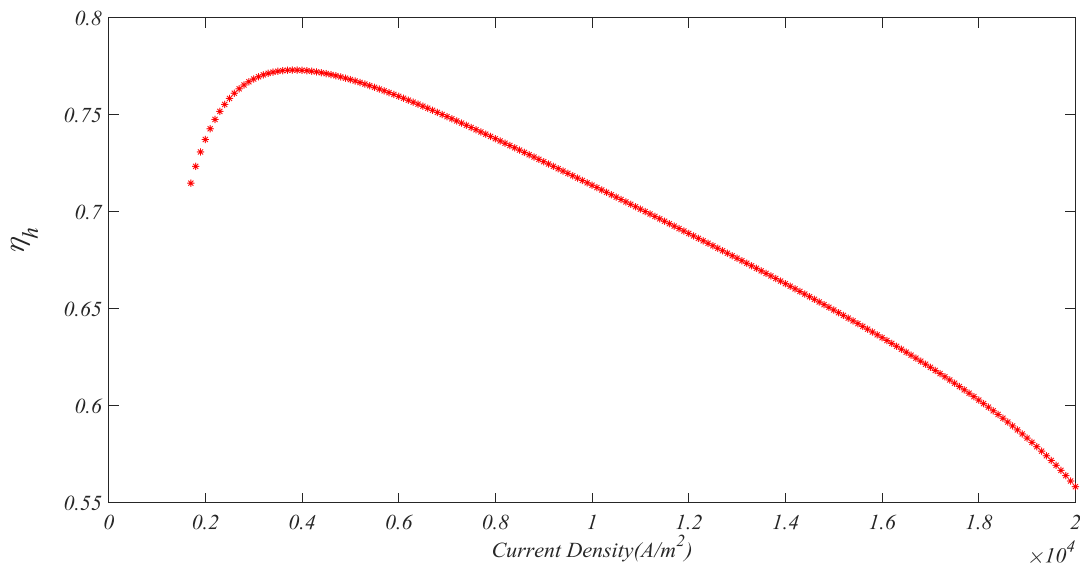
تغییرات توان خروجی از سیستم هیبریدی با چگالی جریان در شکل (۴-۱۹) مورد بررسی قرار داده شده است، همانطور که در شکل دیده می‌شود در چگالی جریان  $i = 14300$  توان سیستم هیبریدی به ماکسیمم مقدار خود که  $P = 7447$  رسیده است. با افزایش چگالی جریان، چگالی توان سیستم

هیبریدی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان، تلفات افزایش یافته و ولتاژ جریان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد، توان خروجی از سیستم هیبریدی نیز ابتدا به سبب بالا بودن ولتاژ خروجی ابتدا افزایش یافته و با کاهش بیشتر ولتاژ خروجی توان نیز کاهش می‌یابد.



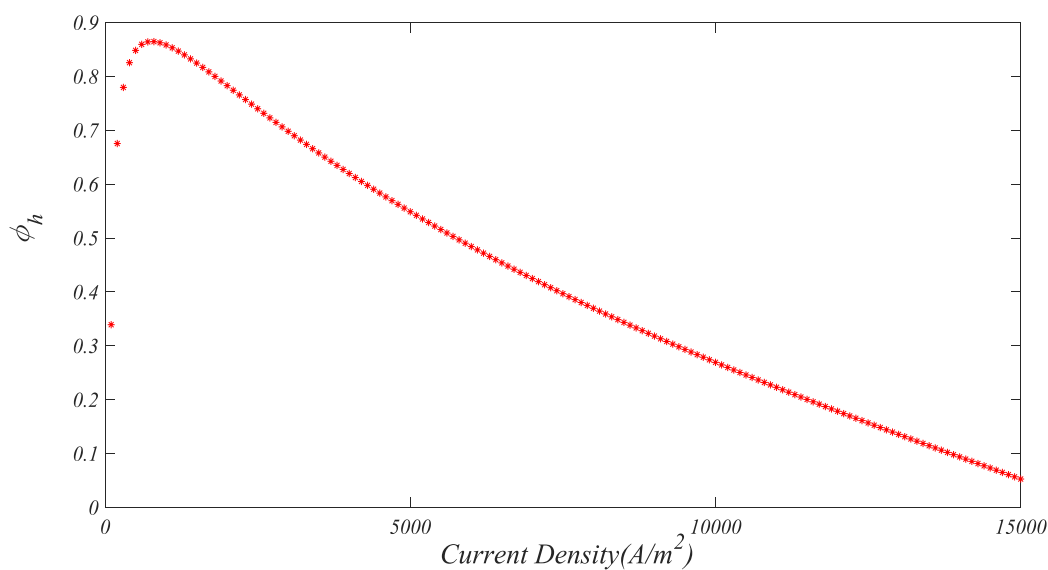
شکل ۴-۱۹- نمودار توان سیستم هیبریدی با چگالی جریان مختلف

تغییرات راندمان انرژی سیستم هیبریدی با چگالی جریان در شکل (۴-۲۰) نشان داده شده است. ماکسیمم مقدار مطلوب راندمان انرژی هیبریدی در چگالی جریان  $i=3600$  برابر با  $0.77$  می‌باشد. با افزایش چگالی جریان، راندمان سیستم هیبریدی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش چگالی جریان، اتلافات افزایش یافته و عملکرد کلی سیستم هیبریدی کاهش می‌یابد، و همچنین افزایش اتلافات انرژی به دلیل برگشت ناپذیری در سیستم هیبریدی باعث کاهش بیشتر راندمان سیستم هیبریدی می‌شود.



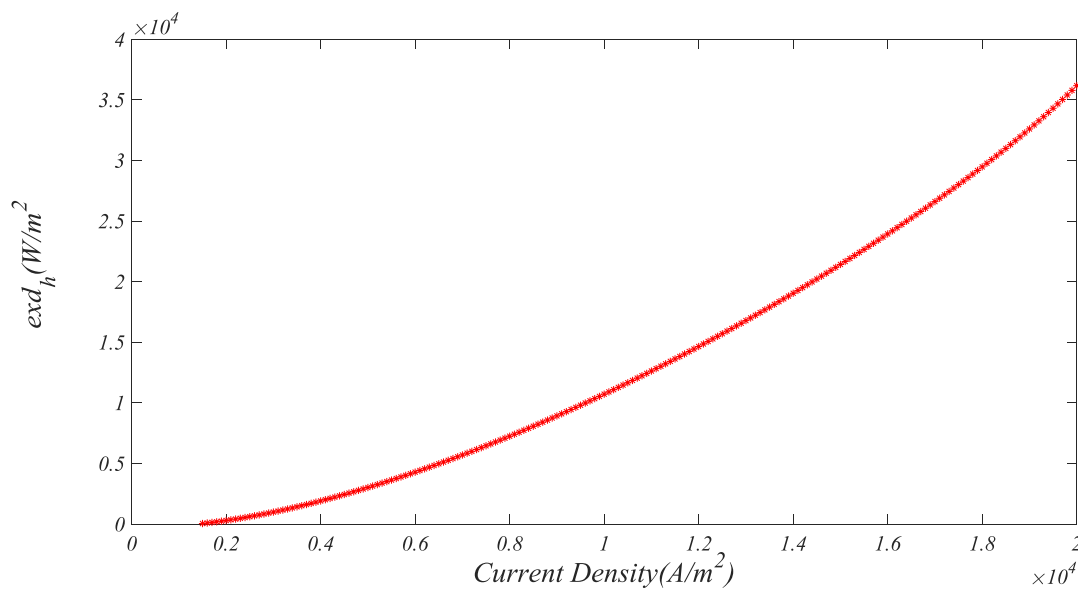
شکل ۴-۲۰- نمودار راندمان سیستم هیبریدی با چگالی جریان مختلف

تغییرات بازده انرژی و انرژی سیستم هیبریدی با چگالی جریان در شکل (۴-۲۱) نشان داده شده است. ماکسیمم مقدار مطلوب بازده انرژی و انرژی هیبریدی در چگالی جریان  $i=900$  برابر با  $1/0.3$  می باشد. با افزایش چگالی جریان اتلافات افزایش می یابد و با افزایش اتلافات، برگشت ناپذیری سیستم افزایش می یابد در نتیجه باعث کاهش بیشتر راندمان انرژی و انرژی نیز می شود.



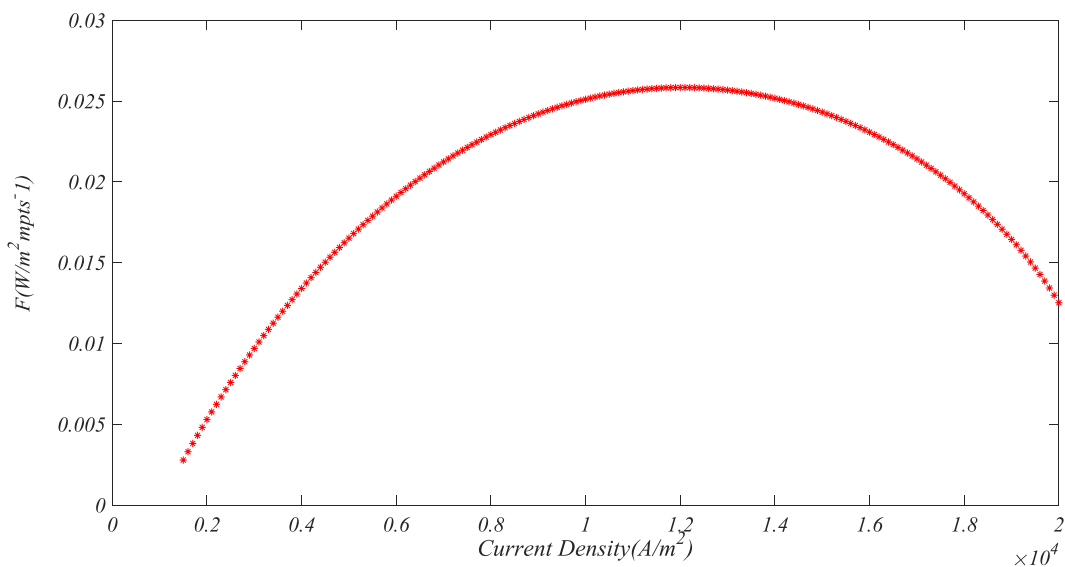
شکل ۴-۲۱- نمودار بازده انرژی و انرژی سیستم هیبریدی با چگالی جریان مختلف

همانطور که در شکل (۴-۲۲) مشخص شده است، تغییرات چگالی تخریب اگزوزی سیستم هیبریدی با چگالی جریان مورد بررسی قرار داده شده است. طبق شکل مقدار چگالی تخریب اگزوزی به طور پایدار لگاریتمی افزایش می یابد. ماکسیمم مقدار چگالی تخریب اگزوزی در چگالی جریان  $i = 20000$  برابر با  $exd = 36170$  شده است. همانطور که در شکل دیده شده است با افزایش چگالی جریان مقدار اتلافات افزایش و در نتیجه چگالی تخریب اگزوزی به طور پیوسته افزایش می یابد.



شکل ۴-۲۲- نمودار چگالی تخریب اگزوزی سیستم هیبریدی با چگالی جریان مختلف

تأثیر چگالی جریان بر چگالی تابع ترمو زیست محیطی در شکل (۴-۲۳) مشخص شده است. همانگونه که در شکل نشان داده شده است در یک چگالی جریان ثابت  $i = 11800$  مقدار ماکسیمم چگالی تابع ترمو زیست محیطی سیستم هیبریدی برابر با  $F = 0.258$  شده است. با توجه به شکل با افزایش چگالی جریان، با افزایش بیشتر چگالی جریان تابع ترمو زیست محیطی ابتدا افزایش سپس کاهش می یابد، اما ابتدا چون مقدار ولتاژ یک مقدار زیادی است توان ابتدا افزایش در نتیجه تابع ترمو زیست محیطی نیز ابتدا افزایش و سپس با کاهش بیشتر ولتاژ توان و همچنین تابع ترمو زیست محیطی نیز کاهش می یابد.

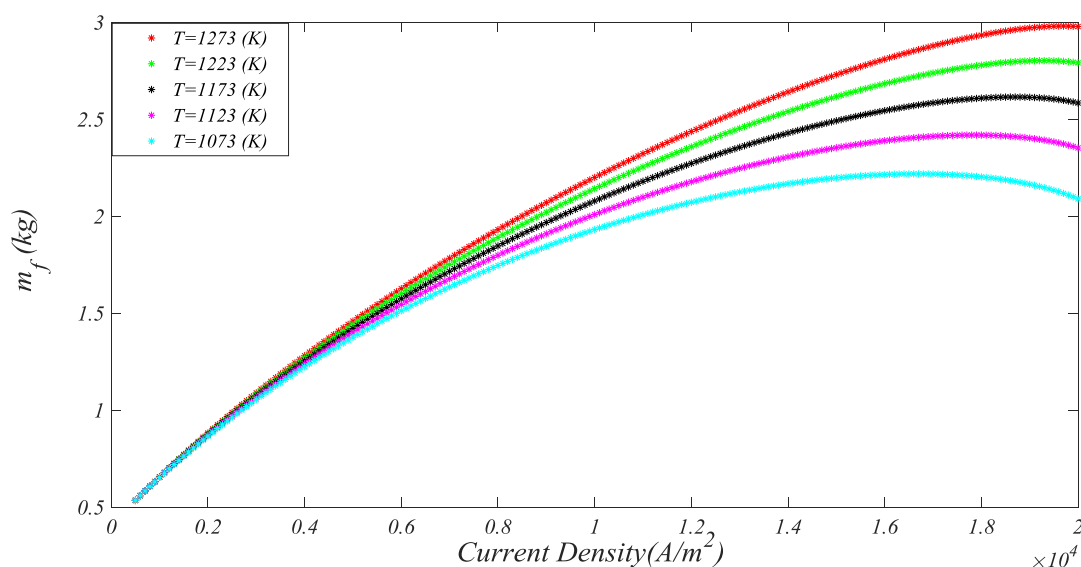


شکل ۴-۲۳- نمودار تابع ترمو زیست محیطی با چگالی جریان مختلف

جدول زیر نتایج بدست آمده از نمودارهای شبیه سازی شده می باشد، ماکسیمم تمامی پارامترها در جدول آورده شده است، و سپس درصد خطای ماکسیمم پارامترها از کار حاضر و کار مشابه در جدول محاسبه شده است. در این جدول ابتدا به معتبرسازی ماکسیمم توان، راندمان و ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد برای پارامترهای مختلف دما، فشار، ضریب سوخت، ضریب هوا، ضخامت الکترولیت پرداخته شده است و درصد خطاها برای هر پارامتر محاسبه شده است. و همچنین اعتبار سنجی توان و چگالی تخریب اگزرژی موتور استرلینگ با پارامتر چگالی جریان بررسی و درصد خطا محاسبه شده است. برای سیستم هیبریدی نیز توان، چگالی تخریب اگزرژی و راندمان انرژی و اگزرژی در چگالی جریان های مختلف بررسی شده و خطای سیستم هیبریدی نیز محاسبه شده است.

### ۴-۳-۴ تجزیه و تحلیل میزان دبی آب شیرین

همانطور که در شکل (۴-۲۴) نشان داده شده است در یک چگالی جریان ثابت با افزایش دما مقدار دبی جرمی ( $m_f$ ) افزایش می‌یابد، زیرا دبی جرمی با مقدار توان خروجی از پیل سوختی در ارتباط مستقیم بوده و مقدار توان خروجی از پیل در ارتباط با دما می‌باشد بنا براین با افزایش دما مقدار توان افزایش یافته و در نتیجه مقدار دبی جرمی ( $m_f$ ) نیز افزایش می‌یابد. همچنین در یک مقدار دمای ثابت با افزایش چگالی جریان دبی جرمی ( $m_f$ ) کاهش می‌یابد، زیرا توان پیل سوختی با مقدار چگالی جریان رابطه عکس دارد و افزایش چگالی جریان باعث کاهش توان خروجی و در نهایت باعث کاهش دبی جرمی ( $m_f$ ) می‌گردد. پس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دما مقدار دبی جرمی تولیدی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۲۴- نمودار دبی آب خروجی با چگالی جریان برای دماهای مختلف

### ۴-۴ بهینه سازی چند هدفه

#### ۴-۴-۱ مقدمه ای بر بهینه سازی چند هدفه

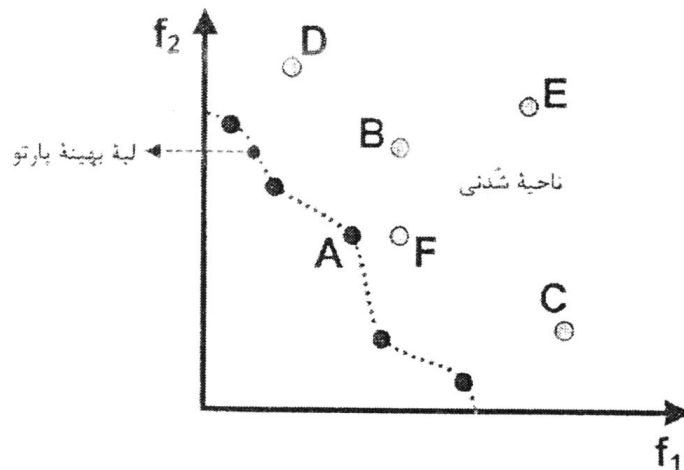
بهینه سازی چند هدفه (*Multi-Objective Optimization*)، حوزه‌ای از تصمیم‌گیری چند معیاری (*Multi-Criteria Decision Making*) محسوب می‌شود. روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه در بسیاری

از شاخه‌های علوم مهندسی به کار گرفته می‌شوند و زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که برای رسیدن به تصمیمات بهینه در سیستم، نیاز است میان دو یا چند هدف متناقض، موازنه برقرار شود. در مسائل بهینه سازی منظور تعیین متغیرهای اثرگذار بر پارامتر هدف به گونه‌ای است که هدف بهترین حالت را دارا باشد، به عنوان مثال کمترین هزینه یا بالاترین کیفیت. هنگامی که متغیرهای زیادی بر پارامتر هدف تأثیر می‌گذارند با مسأله پیچیده‌ای مواجهیم و تعیین دقیق همه متغیرها بوسیله روش‌های دقیق ریاضی بسیار دشوار و یا عملاً غیرممکن است در چنین مسأله‌ای از رویکرد جستجوی پاسخ‌های بهینه استفاده می‌شود. یافتن پاسخ بهینه مطلق نیازمند محاسبه تمامی حالت‌های ممکن در فضای جستجو است که در این صورت تعداد محاسبات تقریباً بی‌نهایت شده و انجام آن امکان‌پذیر نیست. لذا با حذف شرط بهینگی مطلق فرایند جستجو را برای یافتن پاسخ‌های رضایت‌بخش در نزدیکی نقطه بهینه مطلق برنامه ریزی می‌کنیم. بدین ترتیب میان هزینه جستجو و کیفیت جواب تعادل برقرار می‌گردد. در بسیاری از مسایل بهینه‌سازی مهندسی با بهینه سازی چند هدفه روبرو هستیم و رسیدن به شرایط مطلوب برای چند هدف به صورت همزمان موردنظر است. در اکثر موارد این اهداف با هم تناقض دارند که این پیچیدگی مسأله را دو چندان می‌کند. به عنوان مثال کاهش هزینه تولید و افزایش کیفیت محصول دو هدف متناقض است. در چنین شرایطی یک نقطه بهینه منحصر به فرد وجود ندارد بلکه می‌بایست مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه را بیابیم و طی فرایند تصمیم سازی با حفظ تعادل منطقی میان اهداف نقطه بهینه مطلوب و رضایت بخشی را برگزینیم. مدل یک مسأله بهینه سازی شامل سه جزء اصلی است که عبارتند از:

- متغیرهای تصمیم: متغیرهایی که تغییر در آنها می‌تواند حالت‌های احتمالی گوناگون را بوجود آورد.
- قیدها: فضای شدنی محدودیت متغیرهای تصمیم را معلوم می‌کند.
- تابع‌های هدف: ارزش هر حالت احتمالی توسط آن مشخص می‌گردد. در واقع هدف مسأله بهینه کردن این تابع است.



تفاوت اساسی میان بهینه سازی تک هدفه و چند هدفه در این مثال به خوبی روشن است. مسأله بهینه چند هدفه مانند مثال شکل ۳-۱۴ محدود به یک پاسخ بهینه منفرد نمی‌شود. بلکه مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه برای آن وجود دارد که هیچ یک بر دیگری برتری ندارد و تنها ترجیحات تصمیم ساز است که از میان این پاسخ‌ها یکی را برمی‌گزیند.



شکل ۴-۲۵- بهینگی پارتو در فضای هدف

در پژوهش حاضر برای نمودار پارتو اول شکل (۴-۲۶) از روش‌های الگوریتم *TOPSIS* و *LINMAP* و *FUZZY* استفاده شده است. توابع هدف نیز توان (*Power*)، راندمان انرژی و انرژی ( $\phi$ )، چگالی تخریب انرژی (*exd*) انتخاب شده و متغیرهای تصمیم نیز چگالی جریان (*I*) و مساحت سطح پیل سوختی (*A*) و دما (*T*) در نظر گرفته شده است. همچنین برای نمودار پارتوی دوم شکل (۴-۲۷) از همان سه روش الگوریتم قبلی برای سه تابع هدف دبی آب شیرین ( $m_f$ ) و راندمان انرژی و انرژی ( $\phi$ )، چگالی تخریب انرژی (*exd*) انتخاب شده، و متغیرهای تصمیم نیز همان (*I*) و (*A*) و (*T*) می‌باشند.

#### ۴-۴-۲ تحلیل نمودارهای بهینه سازی چند هدفه

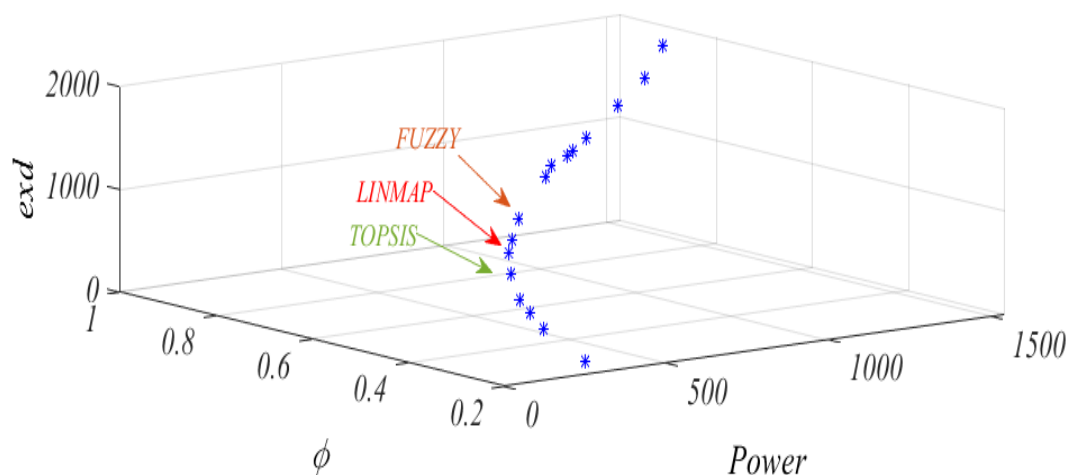
همانطور که در شکل (۴-۲۵) مشخص شده است جبهه پرتو بهینه برای سه تابع هدف (*Power*, *exd*,  $\phi$ ) نمایش داده شده است، بر اساس روش‌های تصمیم‌سازی مختلف مانند: (*TOPSIS*, *LINMAP*, *FUZZY*) نقاط بهینه بر روی نمودار انتخاب شده است که در شکل نمایان است روش‌های بهینه

سازی انتخاب شده سه روش قوی از بهینه سازی می باشند که *TOPSIS* بیشترین فاصله تا نقطه غیرایده آل و کمترین فاصله تا نقطه ایده آل می باشد ، در حالی که نقطه *LINMAP* کمترین فاصله تا نقطه ایده آل می باشد و همچنین *FUZZY* از توابع وزنی با مقایسات زوجی محاسبه شده است. متغیر- های بهینه سازی شامل دما (*T*) و چگالی جریان (*I*) و مساحت سطح پیل سوختی اکسید جامد (*A*) که در بازه های زیر تعریف می شود:

$$1073 < T < 1273$$

$$7000 < I < 15000$$

$$0/075 < A < 0/38$$



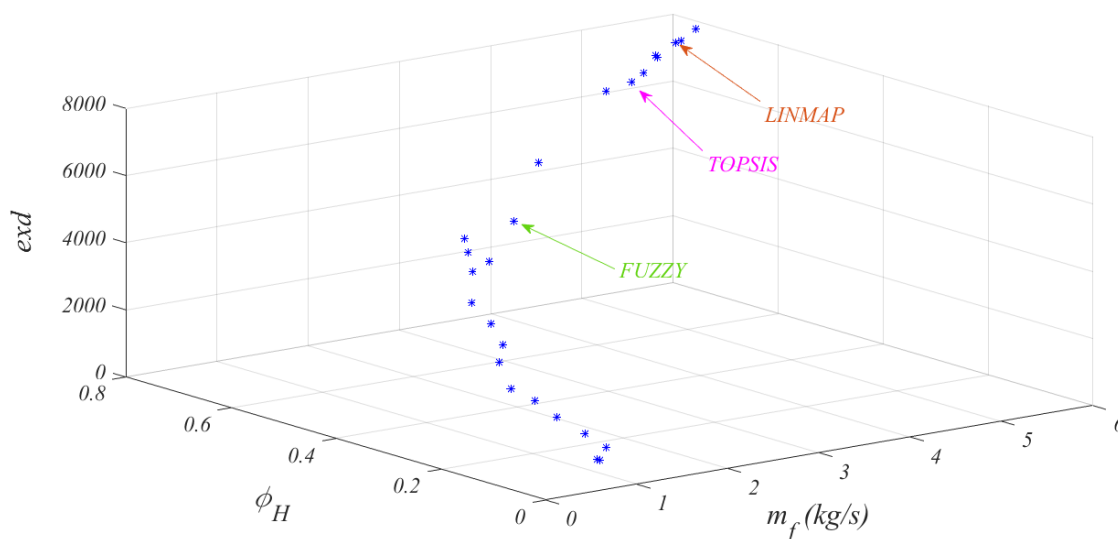
شکل ۴-۲۶- نمودار بهینه سازی توان و چگالی تخریب انرژی و بازده انرژی و انرژی

همانطور که در شکل (۴-۲۶) مشخص شده است جبهه پرتو بهینه برای سه تابع هدف ( $m_f, Q_H$ ) نمایش داده شده است ، بر اساس روش های تصمیم سازی مختلف مانند: (*TOPSIS, LINMAP, FUZZY*) نقاط بهینه بر روی نمودار انتخاب شده است که در شکل نمایان است. متغیر های بهینه سازی شامل دما (*T*) و چگالی جریان (*I*) و مساحت سطح (*A*) که در بازه های زیر تعریف می شود:

$$1073 < T < 1273$$

$$7000 < I < 15000$$

$$0/075 < A < 0/38$$



شکل ۴-۲۷- نمودار بهینه سازی دبی آب شیرین و چگالی تخریب انرژی و بازده انرژی و انرژی

#### ۴-۳-۴ نتایج بهینه سازی چند هدفه

در جدول (۴-۹) نتایج بهینه که توسط الگوریتم های تصمیم سازی (*TOPSIS*, *LINMAP*, *FUZZY*) بدست آمده برای سه متغیر چگالی جریان ( $I$ ) و دمای موجود در کل سیکل ( $T$ ) و مساحت سطح پیل سوختی اکسید جامد ( $A$ ) گزارش شده است. که در جدول نتایج (۴-۹) هر سه تابع هدف چگالی تخریب انرژی، توان، راندمان انرژی و انرژی در الگوریتم *TOPSIS* بیشترین مقدار را دارند.

جدول ۴-۹- نتایج بهینه توسط الگوریتم های تصمیم سازی

Decision variable	Power (kw)	$\phi$	exd ( $w/m^2$ )	$I$ ( $A/m^2$ )	$T$ (k)	$A$ ( $m^2$ )
<i>TOPSIS</i>	939/393261	0/83819664	1139/85	7367/137	1073/183	0/290582
<i>LINMAP</i>	939/293261	0/76982658	858/1006	7323/969	1073/167	0/234602
<i>FUZZY</i>	939/293261	0/76982658	858/1006	7323/969	1073/167	0/234602

در جدول (۴-۱۰) برای سه الگوریتم تصمیم سازی (*TOPSIS*, *LINMAP*, *FUZZY*) مقدار ماکسیمم و میانگین خطا برای سه پارامتر، توان خروجی (*Power*)، راندمان انرژی و انرژی ( $\phi$ )، چگالی

تخریب انرژی ( $exd$ )، گزارش شده است. خطای محاسبه شده بر این اساس است که بعد از گرفتن چندین ران سپس تمام ران ها را نسبت به ران اول می‌سنجیم تا مشخص شود که وضعیت بهینه سازی به ازای ران های اولیه مناسب تر است یا به ازای ران های بیشتر بنابراین مقدار ماکسیمم و میانگین خطا را برای هر سه الگوریتم محاسبه شده است. برای الگوریتم *TOPSIS* همانطور که در جدول مشخص شده است برای ماکسیمم خطا و میانگین خطا چگالی تخریب انرژی بیشترین مقدار و راندمان انرژی و انرژی کمترین مقدار را دارد. همچنین برای الگوریتم *LINMAP* برای هر دو مقدار ماکسیمم خطا و میانگین خطا چگالی تخریب انرژی ( $exd$ ) بیشترین خطا و راندمان انرژی و انرژی ( $\phi$ ) کمترین خطا را دارد. برای الگوریتم *FUZZY* نیز مانند دو الگوریتم قبلی برای هر دو مقدار ماکسیمم خطا و میانگین خطا چگالی تخریب انرژی ( $exd$ ) بیشترین خطا و راندمان انرژی و انرژی ( $\phi$ ) کمترین مقدار را دارد. اما به طور کلی بین سه الگوریتم ارائه شده الگوریتم *FUZZY* کمترین خطا را دارد و *TOPSIS* بیشترین خطا را دارا است. و همچنین برای سه تابع هدف نیز راندمان انرژی و انرژی ( $\phi$ ) کمترین خطا و چگالی تخریب انرژی ( $exd$ ) بیشترین خطا را دارد.

جدول ۴-۱۰- نتایج آنالیز خطا برای نتایج بهینه سازی

Amount	TOPSIS			LINMAP			FUZZY		
	Power	$\phi$	$exd$	Power	$\phi$	$exd$	Power	$\phi$	$exd$
Max error (%)	18/935	10/226	27/49	18/935	7/91	27/49	8/955	3/597	14/05
Average error (%)	14/576	7/149	22/49	11/392	5/19	17/66	5/338	2/035	9/860

در جدول (۴-۱۱) نتایج بهینه که توسط الگوریتم های تصمیم سازی (*TOPSIS*, *LINMAP*, *FUZZY*) بدست آمده برای سه متغیر چگالی جریان ( $I$ ) و دمای موجود در کل سیکل ( $T$ ) و

مساحت سطح پیل سوختی اکسید جامد ( $A$ ) گزارش شده است در این جدول علاوه بر بررسی چگالی تخریب انرژی ( $exd$ ) و راندمان انرژی و انرژی ( $\phi$ ) مقدار دبی آب تازه ( $m_f$ ) نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۴-۱۱- نتایج بهینه توسط الگوریتم های تصمیم سازی

<i>Decision valuble</i>	$m_f$ (kg/s)	$\phi$	$exd$ (w/m <sup>2</sup> )	$I$ (A/m <sup>2</sup> )	$T$ (k)	$A$ (m <sup>2</sup> )
<i>TOPSIS</i>	4/7728113	0/71428093	6664/39	13937/84	1141/644	0/34874
<i>LINMAP</i>	3/10963692	0/60181479	4080/088	11902/86	1208/147	0/255684
<i>FUZZY</i>	5/69766052	0/74212518	7561/192	14470/36	1222/069	0/375563



## فصل پنجم: بحث و نتیجه گیری

## ۵-۱ نتیجه گیری

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، اثرات ترمودینامیکی و برگشت‌ناپذیر الکتروشیمیایی روی عملکرد فیزیکی و شیمیایی پیل سوختی اکسید جامد برگشت‌ناپذیر در شرایط عملیاتی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته شده است، و همچنین معیارهای بهینه از پارامترهای مهم مانند: توان خروجی، راندمان و چگالی جریان عملیاتی از پیل سوختی بدست آمده است. از این مطالعه نتایجی که حاصل شده است نشان می‌دهد که افزایش دما باعث افزایش مقدار توان خروجی از پیل، راندمان پیل سوختی و ولتاژ پیل سوختی شده است. و علاوه بر آن افزایش ضخامت الکترولیت و مقاومت ناشی باعث کاهش راندمان پیل سوختی، توان خروجی از پیل و ولتاژ حاصل از پیل سوختی می‌شود. و همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب  $H_2$  و کاهش ضریب  $H_2O$  باعث افزایش توان خروجی از پیل سوختی و راندمان پیل شده است. در مطالعه بهسازی داخلی پیل سوختی نشان داده شده است که چگالی جریان و توان خروجی مورد نیاز از پیل سوختی و مقدار بهینه از دمای پیل، نرخ جریان سوخت و هوا قابل محاسبه هستند. اثرات چندین پارامتر، مانند دمای پیل سوختی، چگالی جریان، نرخ جریان هوا و نرخ جریان سوخت روی بازده پیل سوختی اکسید جامد مورد بررسی قرار گرفته شده است، نتایج حاصل نشان می‌دهد که افزایش دما و فشار پیل سوختی روی افزایش ولتاژ و بازده پیل سوختی تاثیر می‌گذارد، و افزایش چگالی جریان باعث کاهش ولتاژ پیل سوختی خواهد شد. در مطالعه سیستم هیبریدی و موتور استرلینگ پارامترهای مهم توان خروجی، راندمان، بازده انرژی و اگزرژی، چگالی تخریب اگزرژی و چگالی تابع ترمو زیست محیطی با چگالی جریان مورد بررسی قرار گرفته شده است، که نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد تمام پارامترها به جز پارامتر بازده انرژی و اگزرژی، بقیه پارامترها در سیستم هیبریدی بیشترین مقدار را دارند. و همچنین از نتایج واضح است که با افزایش دما مقدار دبی آب تولیدی نیز افزایش می‌یابد بنابراین برای بهبود راندمان سیستم و افزایش آب تولیدی باید مقدار دمای سیستم افزایش یابد. در نتایج حاصل از بهینه سازی برای سه الگوریتم تصمیم سازی (*TOPSIS*, *LINMAP*, *FUZZY*) که برای سه پارامتر، توان خروجی



(Power)، بازده انرژی و انرژی ( $\phi$ )، چگالی تخریب انرژی ( $exd$ )، گزارش شده است، که ( $exd$ ) برای سه الگوریتم تصمیم سازی (*TOPSIS, LINMAP, FUSSY*) به ترتیب برابر ۱۳۹/۸۵ و ۸۵۸/۱۰۰۶ و ۸۵۸/۱۰۰۶ بیشترین مقدار را دارد و هم چنین برای سه پارامتر چگالی تخریب انرژی ( $exd$ ) و بازده انرژی ( $\phi$ ) مقدار دبی آب تازه ( $m_f$ ) نیز مجدداً ( $exd$ ) بیشترین مقدار برای سه الگوریتم دارد که به ترتیب ۶۶۶۴/۳۹ و ۴۰۸۰/۰۸۸ و ۷۵۶۱/۱۹۲ داده شده است.

## ۲-۵ پیشنهاد ها

پیشنهاد می‌شود، مطالعه حاضر در تحقیقات آینده در زمینه ی مسائل زیر توسعه داده شود:

- ارزیابی چرخه عمر یک سیستم هیبرید شامل یک پیل سوختی اکسید جامد، موتور استرلینگ، آب شیرین کن اسمز معکوس.
- بررسی سیستم هیبریدی جدیدی نسبت به طراحی حاضر با اضافه کردن سیستم تولید هیدروژن و تبدیل سیستم به یک سیستم تولید چندگانه.
- انجام تحلیل های جدیدی نظیر آنالیزهای *Emergy* و *Entransy* بر روی سیستم حاضر.

- [1] N. Laosiripojana, W. Wiyaratn, W. Kiatkittipong, A. Arpornwichanop, A. Soottitantawat, and S. Assabumrungrat, "REVIEWS ON SOLID OXIDE," vol. 13, no. 1, pp. 65–83, 2009.
- [2] L. Giorgi and F. Leccese, "Fuel Cells : Technologies and Applications Fuel Cells : Technologies and Applications," no. July 2013, 2014.
- [3] "Types of fuel cells," U.S. Non-Automotive Fuel Cell Ind. Status Outlook, pp. 113–120, 2012.
- [4] M. Irshad et al., "A brief description of high temperature solid oxide fuel cell's operation, materials, design, fabrication technologies and performance," Appl. Sci., vol. 6, no. 3, 2016.
- [5] B. De Boer, SOFC anode for enhanced stability, vol. 4, no. 31. 2001.
- [6] C. F. Report, "Solid oxide fuel cells," no. November, pp. 1–44, 2016.
- [7] "Heat engine Heat engine Q C what i," pp. 1–8.
- [8] Valkeakoski and N. NasrollahNaddaf, "Stirling engine cycle efficiency," Bachelor's thesis Autom. Eng., p. 51, 2012.
- [9] F. Normani, "A Review of Design of Stirling Engines," no. 3, pp. 18–26, 2015.
- [10] H. Schumacher, "An Introduction to Hybrid Dynamical Systems."
- [11] E. Açikkalp, "Thermo-environmental performance analysis of irreversible solid oxide fuel cell–Stirling heat engine," Int. J. Ambient Energy, vol. 39, no. 7, pp. 751–758, 2018.
- [12] R. Valavala, J. Sohn, J. Han, N. Her, and Y. Yoon, "Pretreatment in Reverse Osmosis Seawater Desalination : A Short Review Pretreatment in Reverse Osmosis Seawater Desalination : A Short Review," no. December 2011, 2014.
- [13] J. S. Johnson and J. W. McCutchan, "Desalination of Sea Water By Reverse Osmosis.," AIChE Symp. Ser., vol. 69, no. 129, pp. 493–507, 1973.
- [14] Y. Haseli, I. Dincer, and G. F. Naterer, "Thermodynamic modeling of a gas turbine cycle combined with a solid oxide fuel cell," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 33, no. 20, pp. 5811–5822, 2008.
- [15] L. Khani, S. M. S. Mahmoudi, A. Chitsaz, and M. A. Rosen, "Energy and exergoeconomic evaluation of a new power / cooling cogeneration system based on a solid oxide fuel cell," Energy, vol. 94, pp. 64–77, 2016.
- [16] Y. Zhao, C. Ou, and J. Chen, "A new analytical approach to model and evaluate the performance of a class of irreversible fuel cells," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 33, no. 15, pp. 4161–4170, 2008.
- [17] P. Chinda and P. Brault, "The hybrid solid oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine (GT) systems steady state modeling," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 37,

- no. 11, pp. 9237–9248, 2012.
- [18] S. Su, X. Gao, Q. Zhang, W. Kong, and D. Chen, “Anode- Versus Cathode-Supported Solid Oxide Fuel Cell : Effect of Cell Design on the Stack Performance,” vol. 10, pp. 2487–2503, 2015.
- [19] M. Beigzadeh, F. Pourfayaz, M. H. Ahmadi, S. M. Pourkiaei, and M. Beigzadeh, “A Simplificative Approach-based Modeling of SOFC Power Systems Fed by Natural Gas,” *Fuel Cells*, vol. 17, no. 6, pp. 843–853, 2017.
- [20] H. Zhang, G. Lin, and J. Chen, “Multi-objective optimisation analysis and load matching of a phosphoric acid fuel cell system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 4, pp. 3438–3446, 2011.
- [21] M. Zheng, J. Wang, B. Hou, and J. Wang, “Preparation of low-fouling reverse-osmosis membranes on an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> carrier for desalination exploratory research,” *Glob. Energy Interconnect.*, vol. 2, no. 3, pp. 197–204, 2019.
- [22] A. M. Delgado-torres, L. García-rodríguez, and V. J. Romero-ternero, “Preliminary design of a solar thermal-powered seawater reverse osmosis system,” vol. 216, pp. 292–305, 2007.
- [23] R. Dashtpour and S. N. Al-zubaidy, “Fig. 2. Comparisons between the submerged reverse osmosis system current schemes,” vol. 3, no. 4, 2012.
- [24] P. Fahmida and A. Sultana, “Desalination Technologies for Developing Countries : A Review Desalination Technologies for Developing Countries : A Review,” no. January, 2018.
- [25] F. Banat and N. Jwaied, “Exergy analysis of desalination by solar-powered membrane distillation units,” vol. 230, pp. 27–40, 2008.
- [26] D. Manolakos, G. Kosmadakis, S. Kyritsis, and G. Papadakis, “On site experimental evaluation of a low-temperature solar organic Rankine cycle system for RO desalination,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 646–656, 2009.
- [27] D. Manolakos, G. Papadakis, S. Kyritsis, and K. Bouzianas, “Experimental evaluation of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination,” *Desalination*, vol. 203, no. 1–3, pp. 366–374, 2007.
- [28] D. Manolakos, G. Kosmadakis, S. Kyritsis, and G. Papadakis, “Identification of behaviour and evaluation of performance of small scale , low-temperature Organic Rankine Cycle system coupled with a RO desalination unit,” *Energy*, vol. 34, no. 6, pp. 767–774, 2009.
- [29] A. Z. M. Sc, S. Jamalodin, H. Ph, M. Taghi, and G. Ph, “Performance Study of Reverse Osmosis Plants for Water Desalination in Bandar-Lengeh , Iran,” vol. 2, no. 1, pp. 8–14, 2013.
- [30] A. Rodríguez-calvo, G. A. Silva-castro, F. Osorio, and J. González-, “Reverse osmosis seawater desalination : current status of membrane systems Desalination and Water Treatment Reverse osmosis seawater desalination : current status of membrane systems,” vol. 2018, no. August, 2014.
- [31] G. Xia, Q. Sun, X. Cao, J. Wang, Y. Yu, and L. Wang, “Thermodynamic analysis

- and optimization of a solar-powered transcritical CO<sub>2</sub> (carbon dioxide) power cycle for reverse osmosis desalination based on the recovery of cryogenic energy of LNG (liquefied natural gas),* *Energy*, vol. 66, pp. 643–653, 2014.
- [32] F. Zabihian and A. S. Fung, “Performance analysis of hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine cycle: Application of alternative fuels,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 76, pp. 571–580, 2013.
- [33] Y. Zhao and J. Chen, “Modeling and optimization of a typical fuel cell-heat engine hybrid system and its parametric design criteria,” *J. Power Sources*, vol. 186, no. 1, pp. 96–103, 2009.
- [34] X. Zhang and J. Chen, “Performance analysis and parametric optimum criteria of a class of irreversible fuel cell/heat engine hybrid systems,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 284–293, 2010.
- [35] X. Zhang, S. Su, J. Chen, Y. Zhao, and N. Brandon, “A new analytical approach to evaluate and optimize the performance of an irreversible solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 23, pp. 15304–15312, 2011.
- [36] X. Zhang, J. Guo, and J. Chen, “Influence of multiple irreversible losses on the performance of a molten carbonate fuel cell-gas turbine hybrid system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 10, pp. 8664–8671, 2012.
- [37] L. Chen, S. Gao, and H. Zhang, “Performance analysis and multi-objective optimization of an irreversible solid oxide fuel cell-stirling heat engine hybrid system,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 8, no. 8, pp. 10772–10787, 2013.
- [38] E. Gholamian, P. Hanafizadeh, and P. Ahmadi, “Exergo-economic analysis of a hybrid anode and cathode recycling SOFC/Stirling engine for aviation applications,” *Int. J. Sustain. Aviat.*, vol. 4, no. 1, p. 11, 2018.
- [39] M. Rokni, “Thermodynamic and thermo-economic analysis of a system with biomass gasification, solid oxide fuel cell (SOFC) and Stirling engine,” *Energy*, vol. 76, pp. 19–31, 2014.
- [40] M. Rokni, “Thermodynamic analysis of SOFC (solid oxide fuel cell)-Stirling hybrid plants using alternative fuels,” *Energy*, vol. 61, pp. 87–97, 2013.

## Abstract

Evaluation of fresh water production system using reverse osmosis desalination based on solid oxide fuel cell and Stirling engine has been investigated. Fuel cells are a chemical to electrical energy converter that is nowadays considered as a new technology in energy production, among the available fuel cells, solid oxide fuel cells have great potential for use in cogeneration systems due to their high operating temperatures ( $700-1000$  °C). Output Heat Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) act as a high-temperature heat source that can be used as a heat source for heat engines such as a Stirling engine. The hybrid system consists of a solid oxide fuel cell and a Stirling engine, be a power plant that uses fuel cell output heat to generate power in a Stirling engine, that this recycle heat improves overall system efficiency. Also according to the problems of water scarcity in the world and the need for freshwater, reverse osmosis desalination systems have become very common, that in this study, we investigated a hybrid fuel cell-Stirling engine and desalination system that the system is a freshwater manufactured product. In this research, important objective functions such as power and exergy destruction density and exergy and energy efficiencies are investigated. Overall, this research investigates the performance of a hybrid system fuel cell-Stirling engine and reverse osmosis desalination for production freshwater that first done a thermodynamic analysis for all components of the system, therefore by a multi-objective optimization of the performance of the hybrid power generation system fuel cell-Stirling engine, the amount of water produced for reverse osmosis desalination has been calculated. The modeling results show that in a constant current density with increasing temperature the amount of power and efficiency of solid oxide fuel cell increases, and also, by decreasing the leakage resistance, the amount of power and efficiency of the solid oxide fuel cell increases, and besides, in a constant current density, by increasing the molar fraction

of  $H_2$  and decreasing the molar fraction of  $H_2O$ , the amount of power and efficiency of the solid oxide fuel cell increases. In a constant current density, as the pressure increases, the amount of power and voltage increases. The results show that, The highest amount of power in the hybrid system is  $7747$  and also the highest value of exergy destruction density is  $3617$  and maximum efficiency is  $0.77$  and the exergy destruction density is  $3617$  and the energy and exergy efficiency is  $0.86$ , also the maximum volume is obtained at the mass flow rate of freshwater is  $3$  kg/s.

## **Keywords**

Solid oxide Fuel cell, Reverse osmosis Desalination, Stirling engine, Irreversibility, energy and exergy efficiencies, exergy destruction density, Multi-objective optimization.



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.NO, Thesis of Energy Conversion Engineering

**Exergy analysis and multi-objective optimization of a hybrid system  
consisting of solid oxide fuel cell, Stirling engine, reverse osmosis  
desalination**

By: Omolbanin shakuri

**Supervisors:**

Dr. Mahmood farzanehgord

Dr.mohamad hosine ahmadi

December ۲۰۱۹