بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مکانیک

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

گرایش تبدیل انرژی

بهینه سازی نیروگاه حرارتی ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی به کمک روشهای تکاملی

دانشجو:

فراز خلیل آریا

اساتید راهنما:

دکتر ایرج میرزائی

دکتر شهرام خلیل آریا

دی ماه ۱۳۹۱

تقدیم

از پدر و مادر عزیز، دلسوز و مهربانم که آرامش روحی و آسایش فکری فراهم نمودند تا با حمایت های همه جانبه در محیطی مطلوب، مراتب تحصیلی و نیز پایان نامه درسی را به نحو احسن به اتمام برسانم سپاسگزاری می نمایم و با تشکر از برادر عزیزم که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمود.

تشکر و قدردانی

از اساتید فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر ایرج میرزائی و دکتر شهرام خلیل آریا که به عنوان استاد راهنما، همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند، کمال تشکر را دارم .

با تشکر و سپاس از اساتید دانشمند جناب آقای دکتر صمد جعفرمدار و نادر پور محمود که از محضر پر فیض تدریسشان، بهره ها برده ام .

چکیده

در این پژوهش بهینه‌سازی مدل ترمودینامیکی یک نیروگاه ترکیبی پیل سوختی و توربین گازی مورد بررسی قرار گرفته است. پیل سوختی اکسید جامد به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و سیکل توربین گازی برای افزایش توان تولیدی و بازده کلی سیستم به چرخه اضافه شده است. تحلیل الکتروشیمیائی پیل سوختی، ولتاژ و توان تولیدی آن را مشخص می‌کند و سپس به کمک تحلیل ترمودینامیکی سایر اجزاء نیروگاه مدل می‌شوند. مدل ترمودینامیکی نیروگاه به کمک نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته و بهینه‌سازی نیروگاه به کمک الگوریتم ژنتیک و بر اساس داده‌های حاصل از مدل‌سازی انجام می‌گیرد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که در حالت پایه توان تولیدی خالص نیروگاه ۲/۰۶۷ مگاوات و بازده آن ۵۶/۹۴ درصد است. بهینه‌سازی، حالت بهینه‌ای را معرفی می‌کند که در آن نیروگاه ۱/۷۶۷ مگاوات توان خالص تولید می‌کند و بازده آن ۶۴/۱۰ درصد است که نسبت به حالت پایه ۷/۱۶ درصد افزایش یافته است. در انتها نتایج دقیق مدل‌سازی و بهینه‌سازی و بررسی پارامتریک ارائه شده و مورد بحث و نتیجه-گیری قرار می‌گیرند.

کلید واژه: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، پیل سوختی اکسید جامد، مدل ترمودینامیکی، نیروگاه ترکیبی توان.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده ..... أ
فهرست مطالب ..... ب
فهرست علایم و نشانه‌ها ..... ه
فهرست جدول‌ها ..... ز
فهرست شکل‌ها ..... ح

فصل ۱- مقدمه و ساختار پایان‌نامه ۱
۱-۱- مقدمه ۱
۱-۲- هدف پایان‌نامه ۱
۱-۳- ساختار پایان‌نامه ۲

فصل ۲- مروری بر کارهای انجام شده ۳
۲-۱- مقدمه ۳
۲-۲- تاریخچه پیل سوختی ۳
۲-۳- تاریخچه پیل سوختی اکسید جامد ۳
۲-۴- تاریخچه نیروگاه ترکیبی پیل سوختی و توربین گازی ۴
۲-۵- مطالعات انجام شده در زمینه SOFC/GT ۵

فصل ۳- شناخت کلی پیل سوختی ۷
۳-۱- مقدمه ۷
۳-۲- نحوه کارکرد پیل سوختی ۷
۳-۳- معرفی انواع پیل سوختی ۱۱
۳-۳-۱- پیل‌سوختی اسید فسفریک ۱۳
۳-۳-۲- پیل‌سوختی قلیایی ۱۴
۳-۳-۳- پیل‌سوختی کربنات مذاب ۱۶
۳-۳-۴- پیل‌سوختی اکسید جامد ۱۹
۳-۳-۵- پیل‌سوختی متانولی ۲۰
۳-۳-۶- پیل سوختی سرامیکی پروتونی ۲۱
۳-۳-۷- پیل‌سوختی پلیمری ۲۲

فصل ۴- الگوریتم ژنتیک ۲۴
۴-۱- مقدمه ۲۴

۴-۲- تاریخچه الگوریتم ژنتیک ۲۵
۴-۳- ساختار الگوریتم‌های ژنتیکی ۲۵
۴-۳-۱- کروموزوم ۲۶
۴-۳-۲- جمعیت ۲۶
۴-۳-۳- تابع برازندگی ۲۶
۴-۴- عملگرهای الگوریتم ژنتیک ۲۶
۴-۴-۱ عملگر انتخاب ۲۶
۴-۴-۱-۱- انتخاب نخبگان ۲۷
۴-۴-۱-۲- نمونه‌برداری به روش چرخ رولت ۲۷
۴-۴-۱-۳- انتخاب تورنومنت ۲۷
۴-۴-۲- عملگر آمیزش ۲۸
۴-۴-۲-۱- تلفیق تک نقطه ای ۲۸
۴-۴-۲-۲- روش ادغام دو نقطه ای ۲۹
۴-۴-۲-۳- تلفیق نقطه ای ۲۹
۴-۴-۲-۴- تلفیق جامع ۲۹
۴-۴-۳- عملگر جهش ۲۹
۴-۵- روند کلی الگوریتم‌های ژنتیکی ۳۰
۴-۵-۱- روند کلی بهینه سازی و حل مسائل در الگوریتم ژنتیک ۳۲
۴-۵-۲- شرط پایان الگوریتم ۳۲
۴-۶- برخی از کاربرد الگوریتم‌های ژنتیکی ۳۲
۴-۷- جمع‌بندی ۳۳
فصل ۵- طرح نیروگاه پیشنهادی و معادلات حاکم ۳۴
۵-۱- مقدمه ۳۴
۵-۲- طرح نیروگاه پیشنهادی ۳۴
۵-۳- فرضیات ۳۵
۵-۴- مدل ترمودینامیکی ۳۵
۵-۴-۱- پیش‌تبدیلگر ۳۵
۵-۴-۲- پیل سوختی ۳۶
۵-۴-۳- کمپرسور هوا و سوخت و توربین گازی ۴۰
۵-۴-۴- مبدلهای بازیافت حرارت ۴۰
۵-۴-۵- پس‌سوز ۴۱
۵-۵- الگوریتم حل ۴۱
۵-۶- مدل الگوریتم ژنتیک ۴۲
فصل ۶- تحلیل نتایج مدل‌سازی و بهینه‌سازی ۴۳
۶-۱- مقدمه ۴۳

۶-۲- نتایج حالت پایه ۴۳
۶-۳- نتایج بررسی پارامتریک ۴۶
۶-۴- نتایج بهینه سازی ۵۳
فصل ۷- نتیجه گیری کلی و پیشنهادات برای کارهای آتی ۵۶
۷-۱- مقدمه ۵۶
۷-۲- نتیجه گیری کلی ۵۶
۷-۳- پیشنهادات برای کارهای آینده ۵۷
فهرست مراجع ۵۸

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
ثابت فارادی (C/kmol)	F
بازده بازیافت حرارت	ε_{REC}
بازده توربین گازی	η_{GT}
بازده کمپرسور هوا	η_{AC}
بازده پیل سوختی	η_{Cell}
بازده کل سیستم ترکیبی	η_{Tot}
بازده کمپرسور سوخت	η_{FC}
نسبت بخار آب به کربن	r_{SC}
تعداد الکترون	n_e
ولتاژ (V)	V
مساحت فعال سل (m^2)	A_c
تعداد سلولها	N
مجموع ولتاژ تلف شده (V)	ΔV_{loss}
ولتاژ اتلافی تمرکز(V)	V_{conc}
ولتاژ اتلافی فعال شدن(V)	V_{act}
ولتاژ اتلافی مقاومتی(V)	V_{ohm}
فشار نسبی	p
فشار (bar)	P
نسبت مصرف سوخت در پیل سوختی	U_f
دما (K)	T
نسبت پیش تبدیل	r
چگالی جریان(Am^{-2})	i
ثابت تعادل برای واکنش تبدیل متان	K_r
ثابت تعادل برای واکنش تغییر گاز	K_s
ثابت جهانی گاز(kJ/kmol.K)	R
انرژی ازاد گیبس(kJ/kmol)	G
ولتاژ نرنست (V)	E
ضخامت آند (μm)	δ_{an}
ضخامت کاتد (μm)	δ_{ca}

چگالی جریان محدود کننده (Am^{-2})	i
چگالی جریان محدود کننده آب (Am^{-2})	i_{L,H_2o}
چگالی جریان محدود کننده اکسیژن (Am^{-2})	i_{L,O_2}
چگالی جریان محدود کننده هیدروژن (Am^{-2})	i_{L,H_2}
ضریب موثر پخش گاز (m^2s^{-1})	$\mathrm{D_{eff}}$
درصد تخلخل	ε
ضریب پیچ و خم	τ
ضریب پخش دوتائی	D_{H_2,H_2O}
ضریب پخش نادسون هیدروژن	$D_{H_2,k}$
ضریب پخش نادسون آب	$D_{H_2O,k}$
ضریب پخش نادسون اکسیژن	$D_{O_2,k}$
حجم پخش مخصوص فولر	v_i
شعاع متوسط تخلخل (μm)	r_{por}
مقاومت اهمیک (Ω)	R
طول شار جریان (μm)	δ
مقاومت ماده $(\Omega.m)$	ρ
میزان هیدروژن واکنش یافته در پیل سوختی $(mols^{-1})$	Z
نسبت گرماهای ویژه فشار ثابت به حجم ثابت	k
توان مصرفی کمپرسور سوخت (kW)	$\dot{W}_{FC}$
توان تولیدی توربین گازی (kW)	$\dot{W}_{GT}$
توان مصرفی کمپرسور سوخت (kW)	$\dot{W}_{AC}$
توان تولیدی پیل سوختی AC (kW)	$\dot{W}_{SOFC-AC}$
توان تولیدی کل سیستم ترکیبی (kW)	$\dot{W}_{net}$
بازده متناوب‌گر	η_{inv}
دبی جرمی (kgs^{-1})	$\dot{m}$
دبی مولی $(mols^{-1})$	$\dot{n}$
آنتالپی مخصوص (kJ/kg)	h
آنتالپی (kJ)	H
چگالی جریان تبادلی (Am^{-2})	i_0
انرژی فعال سازی آند $(kJkmol^{-1})$	E^{an}
انرژی فعال سازی کاتد $(kJkmol^{-1})$	E^{ca}

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: نتایج کلی مطالعات دفتر انرژی فسیلی وزارت انرژی آمریکا در رابطه با ترکیب پیل سوختی با توربین گازی در سال ۱۹۹۸ ..... ۴
جدول ۳-۱: مقایسه کلی بین پیل‌های سوختی آلی از نظر دمای کارکرد و بازده و توان تولیدی ۲۳
جدول ۶-۱: مقادیر ورودی به سیستم در حالت پایه ۴۴
جدول ۶-۲: مشخصات جریان در هر نقطه از سیستم ۴۵
جدول ۶-۳: نتایج شبیه‌سازی سیستم ترکیبی ۴۶
جدول ۶-۴: ورودی حالت بهینه سیستم ۵۳
جدول ۶-۵: مشخصات جریان در هر نقطه از سیستم در حالت بهینه ۵۴
جدول ۶-۶: نتایج بهینه‌سازی سیستم ترکیبی ۵۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: نیروگاه ترکیبی پیل‌سوختی و توربین گازی در کالیفرنیا ۵
شکل ۳-۱: شمای کلی یک سلول سوختی ۸
شکل ۳-۲: نمای کلی یک پیل سوختی به همراه گازهای واکنش دهنده و تولید شده و مسیر حرکت یونها ۸
شکل ۳-۳: قسمتهای اصلی یک پیل سوختی ۹
شکل ۳-۴: طرز کار پیل سوختی ۹
شکل ۳-۵: پیل‌سوختی اسید فسفریک ۱۳
شکل ۳-۶: پیل‌سوختی قلیایی ۱۵
شکل ۳-۷: نحوه عملکرد یک پیل سوختی قلیایی ۱۶
شکل ۳-۸: پیل‌سوختی کربنات مذاب ۱۷
شکل ۳-۹: نحوه عملکرد یک پیل سوختی کربنات مذاب ۱۸
شکل ۳-۱۰: پیل‌سوختی اکسید جامد ۱۹
شکل ۴-۱: نحوه ارزیابی شایستگی در چرخ رولت ۲۷
شکل ۴-۲: یک نمونه تلفیق (آمیزش) ۲۸
شکل ۴-۳: روش ادغام دو نقطه ای ۲۹
شکل ۴-۴: روش تلفیق جامع ۲۹
شکل ۴-۵: یک کروموزوم قبل و بعد از اعمال عملگر جهش ۳۰
شکل ۴-۶ :کد برنامه مجازی الگوریتم ژنتیک ساده ۳۱
شکل ۴-۷: فلوچارت الگوریتم ژنتیک ساده ۳۱
شکل ۵-۱: طرح کلی نیروگاه تولید توان ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی ۳۴
شکل ۶-۱: نمودار اثر تغییر بازده کمپرسورها و توربین گازی را بر بازده کل سیستم ترکیبی ۴۶
شکل ۶-۲: نمودار تأثیر دمای سوخت ورودی بر توان تولیدی پیل سوختی و توان مصرفی کمپرسور سوخت ۴۷
شکل ۶-۳: نمودار تأثیر دمای سوخت ورودی بر بازده کل سیستم ترکیبی ۴۸
شکل ۶-۴: نمودار اثر تغییر دمای هوای ورودی بر توان خالص تولیدی توربین گازی و بازده کل سیستم ۴۸
شکل ۶-۵: نمودار مقایسه اثر تغییر دمای هوا و سوخت ورودی بر بازده کل سیستم ۴۹
شکل ۶-۶: نمودار اثر تغییر نسبت تراکم بر ولتاژ کاری پیل سوختی ۵۰
شکل ۶-۷: نمودار اثر تغییر نسبت تراکم بر توان تولیدی کل سیستم ۵۰

شکل ۶-۸: نمودار مقایسه روند تغییرات بازده کل سیستم و بازده پیل سوختی را بر اثر افزایش نسبت تراکم ۵۱
شکل ۶-۹: نمودار اثر تغییر چگالی جریان پیل سوختی بر ولتاژ کاری آن ۵۲
شکل ۶-۱۰: نمودار اثر تغییرات چگالی جریان بر توان تولیدی و بازده کل سیستم ترکیبی ۵۲
شکل ۶-۱۱: روند همگرایی الگوریتم ژنتیک با افزایش اندازه جمعیت ۵۳

فصل ۱– مقدمه و ساختار پایان‌نامه

۱–۱– مقدمه

به دلیل محدود بودن منابع انرژی جهان، بحران انرژی به پدیده‌ای نام آشنا تبدیل شده است. امروزه بیش از ۸۷ درصد کل انرژی جهان و بیش از ۹۵ درصد انرژی مصرفی در ایران را سوخت‌های فسیلی تامین می‌کنند[۱]. استخراج انرژی از سوخت‌های فسیلی با سوزاندن آنها باعث تشدید آلودگی هوا، آب و افزایش دمای کره زمین می‌شود و از نظر اقتصادی نیز چندان مقرون به صرفه نیست. به همین دلیل محققین به دنبال جایگزین کردن سوخت فسیلی با انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر هستند و همزمان می-کوشندکه سیستم‌های جدیدی معرفی کنند که سوخت فسیلی را با بازده بالاتری به انرژی تبدیل کنند.

پیل سوختی ابزاری الکتروشیمیائی است که انرژی شیمیایی حاصل از واکنش را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. امروزه تقاضا برای انرژی پاک و تجدید شدنی، فعالیت های تحقیقاتی را برای یافتن منابعی بهتر شتاب داده است. پیل های سوختی ممکن است جوابی برای افزایش نیاز این نوع منبع انرژی باشد. پیل‌های سوختی دارای کاربردهایی در منابع نیروی ثابت، توزیع شده، قابل حمل، سیار و حتی بیولوژیکی هستند. پیل های سوختی انرژی شیمیایی را مستقیماً به الکتریسیته بوسیله اکسیداسیون آندی سوخت و احیاء کاتدی اکسیژن تبدیل می کنند. پروتون های تولید شده در آند به کاتد رفته، جایی که آنها دوباره با آنیون‌های اکسیژن به شکل آب ترکیب می شوند. پیل های سوختی متشکل از یک بخش آند و یک بخش کاتد و یک غشاء می‌باشند.

از پیل‌های سوختی با دمای کارکرد می‌توان در نیروگاه‌های تولید توان استفاده نمود. بازده ترکیب پیل‌سوختی با توربین گازی به مراتب بالاتر از نیروگاه‌های حرارتی است که با توربین گازی کار می‌کند. در پژوهش حاضر یک نیروگاه ترکیبی تولید توان پیل‌سوختی و توربین گازی مدل‌سازی و بهینه سازی شده است.

۱–۲– هدف پایان‌نامه

در این پایان‌نامه بعد از معرفی نحوه‌ی عملکرد پیل‌سوختی و انواع آن و توضیح مختصری در مورد الگریتم ژنتیک، طرح نیروگاه پیشنهادی معرفی می‌شود و مدل ترمودینامیکی و راوابط مورد نیاز برای شبیه‌سازی آن ارائه می‌گردند. در ادامه الگوریتم حل و مدل استفاده شده برای الگوریتم ژنتیک شرح داده شده و سپس مقادیر ورودی و خروجی مدل ارائه و بررسی می‌گردند. بعد تاثیر پارامترهای مختلف بر بازده و دیگر خروجی‌های سیستم به صورت نمودارهای نشان داده شده و تحلیل می‌شوند. در انتها نتایج حاصل از بهینه سازی داده‌های حاصل از مدل ترمودینامیکی ارائه می‌گردند. پس هدف کلی از این پایان‌نامه را

می‌توان در معرفی و تحلیل ترمودینامیکی نیروگاه پیشنهادی ترکیبی پیل‌سوختی اکسید جامد و توربین گازی و نیز بهینه‌سازی آن خلاصه کرد.

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

در این پایان‌نامه پس از فصل حاضر که به مقدمه اختصاص داده شده است به مروری بر پژوهش‌های قبلی که در زمینه نیروگاه ترکیبی پیل سوختی و توربین گازی انجام شده پرداخته و به تاریخچه پیل سوختی اشاره مختصری می‌شود. فصل سوم مربوط به شناخت کلی پیل‌سوختی است که در آن نحوه عملکرد و نیز انواع آن شرح داده می‌شود. در ادامه، کلیات، ساختار، عملگرها و روند کلی الگوریتم ژنتیک در فصل چهارم آورده شده است. در فصل پنجم طرح پیشنهادی نیروگاه معرفی می‌گردد و روابط حاکم برای مدل‌سازی نیروگاه ارائه می‌گردند و این فصل با توضیح الگوریتم حل و مدل استفاده شده برای الگوریتم ژنتیک به پایان می‌رسد. در ابتدای فصل ششم، مقادیر پایه ورودی به مدل و نتایج حاصل مشخص گردیده و سپس بررسی پارامتریک انجام گرفته و نمودارهای مربوطه نشان داده می‌شوند. نتایج بهینه سازی به کمک الگوریتم ژنتیک نیز در این فصل ارائه شده‌اند. در نهایت پایان‌نامه با نتیجه‌گیری کلی و پیشنهاد برای مطالعات آینده به پایان می‌رسد.

فصل ۲– مروری بر کارهای انجام شده

۲–۱– مقدمه

در این فصل ابتدا به تاریخچه پیل سوختی و بخصوص پیل سوختی اکسید جامد بعنوان بخشی از موضوع پایان‌نامه پرداخته شده، سپس تاریخچه نیروگاه ترکیبی پیل سوختی و توربین گازی ارائه گردیده و در انتها مطالعات انجام شده در زمینه این نوع سیکل ترکیبی آورده شده است.

۲–۲–تاریخچه پیل سوختی

در سال ۱۸۸۹ لودویک مند[۱] و کارل لنجر[۲] توانستند یک نوع پیل سوختی که هوا و سوخت ذغال‌سنگ را مصرف می‌کرد، بسازند. از آن زمان تلاشهای متعددی بخصوص در اوایل قرن بیستم جهت ساختن پیل-سوختی انجام شد که به دلیل عدم درک علمی مسئله هیچ یک موفقیت آمیز نبود. در سال ۱۹۳۲ فرانسیس بیکن[۳] فعالیتهای خود را برای ساختن پیل‌سوختی آغاز کرد و در اواسط دهه پنجاه موفق به ساخت پیل‌سوختی آلکالین پنج کیلوواتی شد[۲].

۲–۳– تاریخچه پیل‌سوختی اکسید جامد

در سال ۱۸۹۹ اولین اکسید جامد با خاصیت هدایت یونی توسط نرنست[۴] با فرمول $(ZrO_2)_{0.85}(Y_2O_3)_{0.15}$ ساخته شد. درسال ۱۹۳۷ بار[۵] و پریس[۶] این مواد را برای ساخت اولین پیل سوختی اکسید جامد مورد استفاده قرار دادند. آند در این پیل سوختی از جنس کک و کاتد از جنس اکسید آهن بود و دمای کارکرد این پیل سوختی ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد و گازهای واکنش دهنده در این پیل سوختی هیدروژن و هوا بودند. دانسیته جریان $\frac{mw}{cm^2}$ ۱و ولتاژ تولیدی سل ۶۵۰mV بود[۲۸].

در تحقیقات بعدی ویسبارت[۷] و روکا[۸] پیل سوختی اکسید جامدی را تهیه کردند که در آن زیرکونیا پایدار شده توسط کلسیم به عنوان الکترولیت استفاده شده بود. در این نوع پیل سوختی هیدروژن و هیدروکربن‌ها به عنوان سوخت مورد استفاده قرار گرفتند. مقاومت لایه ضخیم الکترولیت، ولتاژ خروجی را محدود می‌کرد[۲].

---

[1] Ludwig Mond
[2] Carl Langer
[3] Francis Thomas Bacon
[4] Nernst
[5] Baur
[6] Preis
[7] Weissbart
[8] Ruka

اولین توده پیل سوختی اکسید جامد[1](SOFC) توسط آرچر[2] و همکارانش در سال ۱۹۶۵ تولید شد[۳]. توان این پیل ۱۰۰ وات و الکترولیت آن زیرکونیای پایدار شده توسط کلسیم بود و الکترودها از جنس پلاتین سینتر شده بودند. الکترودهای گران قیمت پلاتین که در ابتدا در این نوع پیل سوختی مورد استفاده قرار می‌گرفت، با الکترودهایی از جنس سرمیت (مخلوط سرامیک و فلز) نیکل و زیرکونیا جایگزین شدند. الکترودهایی از جنس اکسیدهای فلزی هادی الکتریسته نیز مورد تست و بررسی قرار گرفتند.

۲-۴- تاریخچه نیروگاه ترکیبی پیل سوختی و توربین گازی

اولین امتیاز اختراع تکنولوژی پیل سوختی ترکیبی در اواسط دهه ۱۹۷۰ میلادی در آمریکا به ثبت رسید[۴]. اخیراً انواع مختلفی از چرخه ترکیبی سیکل ترکیبی به ثبت رسیده است[۵]. شاخص‌ترین تفاوت بین این امتیازنامه‌ها محل قرار گرفتن پیل سوختی و توربین گازی در چرخه و نیز فشار کاری پیل سوختی است.

در اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی، تکنولوژی تولید پیل‌های سوختی دما بالا پیشرفت وسیعی کرد و در آن زمان بود که تولید پیل‌های سوختی دما بالایِ بزرگ مورد توجه قرار گرفت و مطالعه دقیق و تحقیقات آزمایشگاهی بر روی چرخه ترکیبی پیل سوختی و توربین گازی با جدیّت آغاز شد. در سال ۱۹۹۸ دفتر انرژی فسیلی وزارت انرژی آمریکا، ۵ مطالعه را برای ارزیابی ایده ترکیب پیل‌سوختی با توربین گازی آغاز کرد. نتایج این مطالعه در جدول ۲-۱ آمده است.

جدول ۲-۱: نتایج کلی مطالعات دفتر انرژی فسیلی وزارت انرژی آمریکا در رابطه با ترکیب پیل‌سوختی با توربین گازی در سال ۱۹۹۸

نام شرکت	FuelCell Energy	Siemens Westinghouse	Siemens Westinghouse	M-C Power	McDermott
ویژگی چرخه	MCFC Indirect	SOFC Turbine Bottoming	Staged SOFC Turbine Bottoming	MCFC Turbine Bottoming	SOFC Indirect
اندازه	۲۰ MW	۲۰ MW	۲۰ MW	۲۰ MW	۷۵۰ KW
بازده	٪۷۱	٪۶۰	۶۷ تا ٪۷۰	۶۶ تا ٪۷۰	٪۷۱

در سال ۲۰۰۲ اولین نیروگاه ترکیبی پیل‌سوختی اکسید جامد و توربین گازی توسط شرکت زیمنس[3] در محوطه دانشگاه کالیفرنیا ساخته شد. این نیروگاه با بازده اولیه ٪۵۳ و توان تولیدی ۱۹۰ KW شروع به کار کرد.

[1] Solid Oxide Fuel Cell
[2] Archer
[3] Siemens Westinghouse

شکل ۲-۱ بزرگترین نیروگاه ترکیبی پیل‌سوختی و توربین گازی حال حاضر در جهان را نشان می‌دهد که با ظرفیت ۲/۸ MW و بازده الکتریکی ۴۷٪، در یک تصیفه‌خانه‌ی آب در کالیفرنیا ساخته شده است. سوخت مصرفی در این نیروگاه بیوگاز است.

شکل ۲-۱: نیروگاه ترکیبی پیل‌سوختی و توربین گازی در کالیفرنیا

۲-۵- مطالعات انجام شده در زمینه SOFC/GT

رینش[1] و همکاران در سال ۱۹۹۷ مطالعه دقیقی در رابطه با نحوه‌ی مدل‌سازی و بهینه‌سازی نیروگاه ترکیبی ۲۰۰ kW پیل‌سوختی اکسید جامد و توربین گازی انجام دادند که شرکت زیمنس چند سال بعد به کمک آنها، اولین نیروگاه از این نوع را راه‌اندازی کرد[۷،۶]

ریموند جورج[2] در سال ۱۹۹۹ مطالعه خود را که بر مبنای اولین نیروگاه ترکیبی پیل‌سوختی اکسید جامد و توربین گازی در حال ساخت توسط شرکت زیمنس بود، منتشر کرد[۸].

چان[3] و همکاران ابتدا در سال ۲۰۰۰، کارکرد پیل‌سوختی اکسید جامد تحت شرایط مختلف بررسی کردند[۹] و در مقالات بعدی مدل‌سازی سیستم ترکیبی پیل‌سوختی اکسید جامد و توربین گازی را انجام

[1] Riensche
[2] Raymond A. George
[3] Chan

انجام داده و تأثیر تغییرات فشار کاری و دبی سوخت را بر ولتاژ و توان تولیدی سیستم را مورد تحقیق قرار دادند[۱۱،۱۰].

پانگالیس[۱] و همکاران در سال ۲۰۰۲ یک نیروگاه ترکیبی پیل‌سوختی اکسید جامد و توربین گازی را مورد بررسی قرار دادند و با مدل‌سازی هر جزء آن مطالعه پارامتریک برای بعد وسیعی از شرایط کاری انجام دادند[۱۳،۱۲]

کالیس[۲] و همکاران در سال ۲۰۰۵ چندین مطالعه در زمینه سیکل ترکیبی پیل‌سوختی و توربین گازی انجام دادند و در آنها بازده قانون اول و دوم چرخه را بررسی کرده و آن را برای حالت کارکرد با بار کامل و بار جزئی شبیه‌سازی کرده و در نهایت به کمک بهینه‌سازی مقادیر ورودی برای بهترین بازده و کمترین هزینه را ارائه کردند[۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷].

وو[۳] و همکارانش در سال ۲۰۰۷ و چاکرابورتی[۴] در سال ۲۰۰۹ پیل سوختی اکسید جامد را به کمک الگوریتم ژنتیک مدل‌سازی کردند[۱۹،۱۸].

آکایا[۵] مدل الکتروشیمیائی برای تحلیل عملکرد پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای در سال ۲۰۰۷ ارائه کرده است[۲۰]. آکایا و همکارانش همچنین تحلیل اگزرژتیک سیستم ترکیبی SOFC/GT را انجام داده‌اند[۲۳،۲۲،۲۱].

ذبیحیان و همکارش، در سال ۲۰۰۹ مطالعات اصلی که در زمینه سیکل ترکیبی پیل سوختی تا آن زمان انجام شده بود را مرور کرده و آن را در قالب مقاله منتشر کردند[۲۴].

در سال ۲۰۱۰ ژاوو[۶] و همکاران در پژوهشی به مقایسه بین استراتژی‌های مختلف برای بهینه سازی سیکل ترکیبی SOFC/GT پرداختند[۲۵].

چِدی[۷] در سال ۲۰۱۰ بررسی کرد که اضافه کردن پیل سوختی اکسید جامد به یک توربین گازی ۱۰ مگا واتی، چه تأثیری بر بازده سیستم دارد و هزینه این عملیات را نیز بررسی نمود[۲۶].

[1] Pangalis
[2] Calise
[3] Wu
[4] Charkraborty
[5] Akkaya
[6] Zhao
[7] Cheddie

فصل ۳– شناخت کلی پیل سوختی

۳–۱– مقدمه

پیل سوختی واحدی است که بوسیله واکنش شیمیایی برق تولید می کند. هر پیل سوختی دو عدد الکترود دارد که یکی مثبت و دیگری منفی می‌باشد که بطور عام کاتد و آند نامیده می شوند. واکنش-هایی که تولید الکتریسیته می کنند در الکترودها اتفاق می افتد. همچنین هر پیل سوختی یک الکترولیت دارد که ذرات دارای بار الکتریکی را از یک الکترود به الکترود دیگر منتقل می کند و یک کاتالیست که انجام واکنش در الکترودها را تسریع می کند.

هیدروژن سوخت اصلی است ولی پیل‌های سوختی به اکسیژن نیز نیاز دارند. یکی از مزیّت‌های بزرگ پیل‌های سوختی، تولید الکتریسیته با ایجاد حداقل آلودگی می‌باشد. بیشتر اکسیژن و هیدروژنی که در تولید الکتریسیته بکار میرود در نهایت با ترکیب شدن با یکدیگر تولید آب می کنند. یک پیل سوختی ساده[1] مقدار کوچکی از جریان برق (DC) تولید می کند. در عمل بسیاری از پیل‌های سوختی بصورت یک سری[2] سوار می شوند.

پیل‌های سوختی بر چند گونه اند که هر کدام دارای فرآیند شیمیایی خاص خود می باشند. پیل‌های سوختی بسته به نوع الکترولیت آنها دسته بندی می گردند که هر کدام از آنها برای کاربرد خاصی مناسب می باشد.

۳–۲– نحوه کارکرد پیل سوختی

پیل سوختی در واقع یک وسیله الکتروشیمیایی است که بطور مداوم انرژی شیمیایی یک سوخت را به انرژی الکتریکی (اکسیداسیون سوخت) تبدیل می کند. یک پیل سوختی، سوخت و اکسید کننده را در الکترودهای جداگانه دریافت کرده و انرژی شیمیایی اضافی را به جریان الکتریسیته مستقیم تبدیل می-نماید. پیل‌های سوختی سریع و تمیز بوده و محصول جانبی آنها آب، دی اکسید کربن و گاهی نیتروژن می‌باشد. در باتری‌ها الکترودها در طول شارژ یا دشارژ دچار تغییر شیمیایی می شوند. اما در پیل سوختی از آنجا که الکترود ها کاتالیزور هستند دچار تغییر شیمیایی نمی شوند.

1 Single
2 Stack