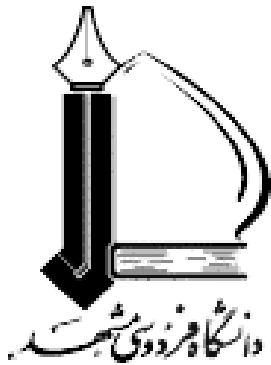


محمد بن عبد الله



دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

مدل سازی دینامیکی و بهینه سازی سیستم هیبرید

پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی

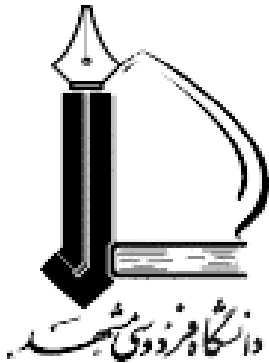
پایان نامه کارشناسی ارشد فرآیندهای جداسازی

طیبه سلطانی

استاد راهنما

دکتر محمد علی فنائی شیخ الاسلامی

۱۳۹۲



دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی (فرآیندهای جداسازی) خانم طیبه سلطانی

تحت عنوان

**مدل سازی دینامیکی و بهینه سازی سیستم هیبرید**

**پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی**

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۱۴ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر محمد علی فنائی شیخ الاسلامی

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر رضا قشلاقی

۲- استاد داور و نماینده تحصیلات تکمیلی

دکتر مصطفی نوعی

۳- استاد داور

دکتر مهدی پورافشاری چنار

مدیر گروه مهندسی شیمی

## پاسکزاری

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قوتست و به شکر اندرش فرید نعمت، حر نفسی که فرومی رود مدحیاتش و چون برمی آید مفرح ذات. پس در حر نفسی دو نعمت موجود است و هر نعمتی شکرش واجب.

از دست و زبان که برآید      کز همه شکرش به درآید

به مصداق آیه ((من لم یسکر الخلق لم یسکر الخلق)) بسی شایسته است از استاد راهنمای فرزانه و فریخته ام جناب آقای دکتر محمد علی فنا فی شیخ الاسلامی که با صبر و درایتان در مراحل مختلف این پروژه به بنده یاری رسانده و با دقت نظر ویژه و راهنمایی های کلیدی و بسیار موثر حق استادی خود را بر من تمام کرده اند، تقدیر و شکر نمایم.

اینجانب طیبه سلطانی دوره کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، نویسنده پایان‌نامه: مدل‌سازی دینامیکی و بهینه‌سازی سیستم هیبرید پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی، تحت راهنمایی آقای دکتر محمدعلی فنائی شیخ الاسلامی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد و مقالات مستخرج با نام دانشگاه فردوسی مشهد و یا Ferdowsi University of Mashhad به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به‌دست آوردن نتایج اصلی پایان‌نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر گردد.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تاریخ

امضای دانشجو

تقدیم بہ پدر و مادر

کہ از محاسن صلابت

از رفتارشان محبت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم

## چکیده

با توجه به روند رو به رشد مصرف انرژی در جهان و آثار آن بر محیط زیست، امروزه به دست آوردن سیستم‌های تولید توان با راندمان بالا و میزان آلاینده‌گی کم‌تر، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. قابلیت پیل‌های سوختی در ترکیب با موتورهای حرارتی، سبب شده است که سیستم هیبرید حاصل به عنوان پیشنهادی برای سیستم‌های حرارتی جدید مد نظر باشد. از این رو در پایان‌نامه حاضر یک سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی به همراه ریفورمر خارجی، در محیط نرم‌افزار متلب و با استفاده از روش مدل‌سازی بدون بعد، از طریق موازنه جرم و انرژی و با در نظر گرفتن واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی مدل‌سازی شده است. هدف از این کار طراحی یک سیستم هیبرید پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی در شرایط عملکرد بهینه، به منظور تبدیل دبی مشخصی از سوخت متان به انرژی الکتریکی می‌باشد. بدین منظور هر یک از اجزاء برای مثال کمپرسور، توربین، مبدل‌های حرارتی، ریفورمر سوخت، محفظه احتراق، استک پیل سوختی و... در داخل مدل‌های جعبه‌ای مستقل شبیه‌سازی و سپس با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، از طریق آنالیز حرارتی (انرژی و اکسرژی) و اقتصادی، مقادیر پارامترهای تصمیم‌گیری با توجه به قیود سیستم محاسبه شده است. تابع هدف‌های بررسی شده به منظور بهینه‌سازی چند هدفه، عبارتند از بازده اکسرژی و نرخ کلی هزینه‌ها (شامل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری، هزینه‌ی سوخت و بخار آب) که به ترتیب مقدار حداکثر و حداقل آن‌ها مد نظر می‌باشد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی، بازده اکسرژی ۵۱/۹٪ و نرخ کلی هزینه برابر با  $0.0715 \$/S$  را برای نقطه بهینه انتخابی از نمودار پارتو نشان می‌دهد. در ادامه تاثیر متغیرهای مختلف بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش جریان برگشتی، دبی هوای ورودی، فاکتور مصرف سوخت و دبی بخار آب، عملکرد سیستم بهبود می‌یابد و به عبارتی بازده اکسرژی سیستم افزایش و نرخ کلی هزینه‌ها کاهش پیدا می‌کند. از طرفی با افزایش فشار سیستم، بازده و نرخ هزینه سیستم هر دو افزایش می‌یابند. همچنین با افزایش دمای ریفورمر سوخت، نرخ هزینه سیستم ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد در حالی که بازده سیستم همچنان افزایشی است. در انتها اثر تغییر دبی سوخت بر نتایج بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. از نتایج به دست آمده به روشنی ملاحظه می‌گردد که با افزایش دبی سوخت متان و به عبارتی طراحی سیستم هیبریدی در ابعاد بزرگتر، محدوده جواب‌های بهینه سیستم به سوی کارآمدی ترمودینامیکی بهتر (افزایش بازده اکسرژی) تغییر می‌کند.

**کلمات کلیدی:** سیستم هیبرید پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی، مدل‌سازی بدون بعد، الگوریتم ژنتیک، بازده اکسرژی، نرخ هزینه

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
شش	فهرست مطالب
نه	فهرست شکل ها
یازده	فهرست جداول
دوازده	جدول علائم
چهارده	جدول زیرنویس ها
۱	چکیده
۲	فصل اول مقدمه
۳	۱-۱- پیل سوختی و اصول عملکرد آن
۵	۲-۱- تاریخچه ی پیل های سوختی
۶	۳-۱- چرا به پیل سوختی نیاز داریم
۸	۴-۱- انواع پیل های سوختی
۱۳	۵-۱- پیل سوختی اکسید جامد
۱۳	۱-۵-۱- ساختمان پیل سوختی اکسید جامد
۱۴	۲-۵-۱- اصول عملکرد پیل سوختی اکسید جامد
۱۵	۳-۵-۱- پیکربندی پیل سوختی اکسید جامد
۱۷	۶-۱- معرفی سیستم هیبرید توربین گازی و پیل سوختی اکسید جامد
۱۹	فصل دوم مروری بر کارهای انجام شده
۲۰	۱-۲- مدل سازی انتقال جرم
۲۱	۲-۲- مدل سازی انتقال حرارت
۲۲	۳-۲- مدل های الکتروشیمیایی
۲۲	۴-۲- سیستم های ترکیبی توربین گازی و پیل سوختی
۲۳	۵-۲- مدل های جدید



۲۵	۶-۲- مدل‌های کنترلی .....
۲۸	فصل سوم مدل‌سازی .....
۲۸	۱-۳- مقدمه .....
۳۱	۲-۳- توصیف سیستم هیبرید پیل سوختی و توربین گازی .....
۳۳	۳-۳- فرضیات مدل .....
۳۳	۴-۳- مدل الکتروشیمیایی .....
۳۳	۱-۴-۳- پتانسیل نرنست و ولتاژ مدار باز .....
۳۵	۲-۴-۳- جریان و چگالی جریان .....
۳۵	۳-۴-۳- تلفات فعال‌سازی .....
۳۶	۴-۴-۳- تلفات غلظتی .....
۳۷	۵-۴-۳- تلفات اهمی .....
۳۸	۶-۴-۳- ولتاژ مدار بسته .....
۳۸	۷-۴-۳- توان الکتریکی .....
۳۸	۵-۳- مدل‌سازی ریفورمر سوخت .....
۴۱	۱-۵-۳- موازنه جرم .....
۴۱	۲-۵-۳- موازنه انرژی .....
۴۳	۶-۳- مدل‌سازی استک پیل سوختی .....
۴۳	۱-۶-۳- موازنه جرم .....
۴۴	۲-۶-۳- موازنه انرژی .....
۴۵	۷-۳- محفظه احتراق .....
۴۶	۱-۷-۳- موازنه جرم .....
۴۷	۲-۷-۳- موازنه انرژی .....
۴۸	۸-۳- ریکوپراتورها و مبدل حرارتی .....
۴۹	۹-۳- توربین گازی .....
۵۰	۱۰-۳- توربین قدرت .....
۵۰	۱۱-۳- کمپرسورها .....
۵۱	۱۲-۳- مخلوط‌کن‌ها .....

۵۲	۱۳-۳- تبدیل کننده‌ی جریان DC به AC و شیرهای کنترل
۵۲	۱۴-۳- بازده الکتریکی و بازده کل
۵۳	۱۵-۳- پارامترهای طراحی
۵۶	فصل چهارم بهینه‌سازی
۵۶	۱-۴- هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری و هزینه عملیاتی
۶۰	۲-۴- بازده اکسرژی
۶۲	۳-۴- پارامترهای تصمیم‌گیری و قیود بهینه‌سازی
۶۳	۴-۴- روند حل مسئله
۶۵	۵-۴- روش بهینه‌سازی
۶۶	۶-۴- نتایج بهینه‌سازی
۶۹	۷-۴- بررسی تاثیر متغیرهای مختلف بر عملکرد SOFC
۷۹	۸-۴- آنالیز حساسیت
۸۲	فصل پنجم جمع‌بندی و پیشنهادات

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): اجزاء پیل سوختی و نحوه عملکرد آن ..... ۳
- شکل (۲-۱): الف) استک پیل سوختی. ب) نحوه اتصال پیل‌های سوختی منفرد در کنار هم ..... ۴
- شکل (۳-۱): مقایسه فرآیندهای کلی و نحوه انتقال یون‌ها در انواع پیل سوختی ..... ۱۲
- شکل (۴-۱): پیل سوختی اکسید جامد و نحوه عملکرد آن ..... ۱۴
- شکل (۵-۱): نمای کلی از پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای ..... ۱۵
- شکل (۶-۱): نمای کلی از پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای ..... ۱۶
- شکل (۷-۱): ساختارهای مختلف پیل سوختی اکسید جامد ..... ۱۷
- شکل (۱-۳): مقاطع عمودی از پیل سوختی به منظور مدل‌سازی دوبعدی ..... ۲۹
- شکل (۲-۳): انتقال حرارت و منابع آن‌ها در داخل لایه‌های پیل سوختی ..... ۳۰
- شکل (۳-۳): نمای کلی سیستم ترکیبی توربین گازی و پیل سوختی ..... ۳۲
- شکل (۱-۴): روند حل مسئله ..... ۶۴
- شکل (۲-۴): نمودار توزیع جواب‌های بهینه‌سازی دوهدفه سیستم هیبریدی SOFC/GT ..... ۶۶
- شکل (۳-۴): انتخاب نقطه بهینه مناسب از نمودار پارتو ..... ۶۷
- شکل (۴-۴): اثر فشار بر راندمان و نرخ هزینه سیستم ..... ۷۰
- شکل (۵-۴): اثر فشار بر توان خروجی از پیل سوختی و توربین قدرت و تغییر اکسرژی در مبدل حرارتی ..... ۷۰
- شکل (۶-۴): اثر فشار بر درصد ریفورمینگ متان در داخل ریفورمر ..... ۷۰
- شکل (۷-۴): اثر جریان برگشتی بر راندمان و نرخ هزینه سیستم ..... ۷۱
- شکل (۸-۴): اثر جریان برگشتی بر درصد ریفورمینگ متان ..... ۷۲
- شکل (۹-۴): اثر جریان برگشتی بر توان خروجی از پیل سوختی و توربین قدرت و تغییر اکسرژی در مبدل حرارتی ..... ۷۲
- شکل (۱۰-۴): اثر دبی هوای ورودی بر راندمان و نرخ هزینه سیستم ..... ۷۳
- شکل (۱۱-۴): اثر دبی هوای ورودی بر توان خروجی از پیل سوختی و توربین قدرت و تغییر اکسرژی در مبدل حرارتی ..... ۷۳
- شکل (۱۲-۴): اثر دبی هوای ورودی بر ولتاژ پیل سوختی ..... ۷۴
- شکل (۱۳-۴): اثر فاکتور مصرف سوخت بر راندمان و نرخ هزینه سیستم ..... ۷۴
- شکل (۱۴-۴): اثر فاکتور مصرف سوخت بر توان خروجی از پیل سوختی و توربین قدرت و تغییر اکسرژی در مبدل حرارتی ..... ۷۵
- شکل (۱۵-۴): اثر فاکتور مصرف سوخت بر جریان و ولتاژ پیل سوختی ..... ۷۵

- شکل (۴-۱۶): اثر دبی بخار آب بر راندمان و نرخ هزینه سیستم ..... ۷۶
- شکل (۴-۱۷): اثر دبی بخار آب بر درصد ریفورمینگ متان ..... ۷۷
- شکل (۴-۱۸): اثر دبی بخار آب بر توان خروجی از پیل سوختی و توربین قدرت و تغییر اکسرژی در مبدل حرارتی ..... ۷۷
- شکل (۴-۱۹): اثر دمای ریفورمینگ بر راندمان و نرخ هزینه سیستم ..... ۷۸
- شکل (۴-۲۰): اثر دمای ریفورمینگ بر درصد ریفورمینگ متان ..... ۷۸
- شکل (۴-۲۱): اثر دمای ریفورمینگ بر توان خروجی از پیل سوختی و توربین قدرت و تغییر اکسرژی در مبدل حرارتی ..... ۷۸
- شکل (۴-۲۲): اثر دمای ریفورمینگ بر قیمت خرید دستگاه‌ها ..... ۷۹
- شکل (۴-۲۳): نتایج حساسیت‌سنجی نسبت به تغییر دبی سوخت ..... ۸۰

## فهرست جداول

- جدول (۱-۱): انواع رایج پیل سوختی و برخی خصوصیات آنها ..... ۱۰
- جدول (۲-۱): انواع رایج پیل سوختی و برخی کاربردها، مزایا و معایب آنها ..... ۱۱
- جدول (۳-۱): واکنش‌های انجام شده در انواع پیل سوختی ..... ۱۲
- جدول (۱-۳): ثابت‌های محاسباتی چگالی جریان تبدیلی ..... ۳۶
- جدول (۲-۳): پارامترهای مربوط به افت ولتاژ اهمی ..... ۳۸
- جدول (۳-۳): پارامترهای مربوط به مدل **Xue** ..... ۴۰
- جدول (۴-۳): ضرایب مربوط به محاسبه ظرفیت حرارتی ویژه گاز ..... ۴۲
- جدول (۵-۳): مقادیر انرژی گیس استاندارد ..... ۴۶
- جدول (۶-۳): پارامترهای ورودی به منظور مدل‌سازی سیستم هیبرید **SOFC/GT** ..... ۵۳
- جدول (۱-۴): تابع هزینه دستگاه‌های مختلف در سیستم هیبریدی پیل سوختی و توربین گازی ..... ۵۹
- جدول (۲-۴): اکسرژی شیمیایی استاندارد ..... ۶۱
- جدول (۳-۴): قندهای بهینه‌سازی ..... ۶۲
- جدول (۴-۴): پارامترهای الگوریتم ژنتیک ..... ۶۵
- جدول (۵-۴): شرایط عملکردی سیستم هیبریدی پیل سوختی و توربین گازی در نقطه بهینه ..... ۶۸
- جدول (۶-۴): آنالیز حساسیت تغییر مقدار عددی پارامترهای طراحی بهینه با تغییر در دبی سوخت ..... ۸۰

## جدول علائم

نشانه	متغیر	نشانه	متغیر
A	سطح انتقال حرارت ( $m^2$ )	$\dot{H}$	شار آنتالپی ( $J/s$ )
$A_S$	سطح فعال آند ( $m^2$ )	$H^{vap}$	گرمای نهان تبخیر ( $J/kg$ )
C	ظرفیت حرارتی ( $J/K$ )	HW	تعداد ساعات کارکرد سالانه
$\dot{C}$	نرخ هزینه ( $\$/s$ )	i	جریان (A)
$\bar{C}_{elec}$	هزینه تولید برق ( $\$/J$ )	I	چگالی جریان ( $A/m^2$ )
$C_p$	ظرفیت حرارتی ویژه در فشار ثابت گازها: ( $J/mol K$ )، جامدات: ( $J/kg K$ )	J	سرعت مصرف سوخت ( $mol/s$ )
CRE	ضریب بازگشت سرمایه	K	نسبت جریان برگشتی
$C_v$	ظرفیت حرارتی ویژه در حجم ثابت ( $J/mol K$ )	k	نسبت گرمای ویژه
$D_{eff}$	ضریب نفوذ موثر ( $m^2/s$ )	LHV	ارزش حرارتی ( $J/kg$ )
E	ولتاژ (V)	M	جرم (kg)
e	بار الکترون (C)	$\dot{M}$	دبی جرمی ( $kg/s$ )
$E_{act}$	انرژی فعال سازی ( $J/mol$ )	m	نرخ بهره
EX	اکسرژی (J)	N	مول (mol)
$\dot{E}X$	نرخ اکسرژی (W)	$\bar{N}$	عدد آووگادرو
F	ثابت فارادی (C)	$\mathcal{N}$	تعداد پیل ها
$\mathcal{F}$	ضریب تصحیح مبدل	$\dot{\mathcal{N}}$	دبی مولی ( $mol/s$ )
$f_i$	مقدار با بعد تابع	n	تعداد سال های عملکرد دستگاه
$f_i^n$	تابع بدون بعد	P	فشار (Pa)
G	انرژی آزاد گیبس (J)	$P^*$	فشار بخار (mmHg)
h	ارتفاع (m)	Pr	نسبت فشار
H	آنتالپی (J)	$\dot{Q}$	شار گرما ( $J/s$ )
		R	سرعت واکنش ( $mol/s$ )
		R	مقاومت اهمی ( $\Omega m^2$ )

## جدول علائم

متغیر	نشانه	متغیر	نشانه
ضریب تراکم پذیری گازها	$Z^g$	ثابت گازها (J/mol K)	$R^g$
گرمای استاندارد واکنش (J)	$\Delta H_{298}^0$	آنتروپی (J/K)	S
متوسط لگاریتمی دما	$\Delta T_m$	نسبت بخار آب به کربن	S/C
ضریب فعالیت	a	دما (K)	T
ضریب استوکیومتری	$\alpha$	زمان (s)	t
ضریب انتقال بار	$\beta$	ضریب انتقال حرارت (W/m <sup>2</sup> °C)	U
ضریب پیش‌نمایی (A/m <sup>2</sup> )	$\gamma$	فاکتور مصرف هوا	U <sub>a</sub>
ضخامت (m)	$\delta$	فاکتور مصرف سوخت	U <sub>f</sub>
ضریب تخلخل	$\epsilon$	حجم (m <sup>3</sup> )	V
بازده	$\eta$	دبی حجمی (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{V}$
چگالی	$\rho$	توان (W)	$\dot{W}$
گازها: (mol/m <sup>3</sup> )، جامدات: (kg/m <sup>3</sup> )		جزء مولی	X
مقاومت الکتریکی ویژه (Ωm)	$\sigma$	هزینه اولیه خرید (\$)	Z
افت ولتاژ (V)	$\vartheta$	نرخ هزینه سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری (\$/s)	$\dot{Z}$
ضریب تعمیر و نگهداری	$\phi_r$		

## جدول زیر نویس ها

a	هوا	h	گرم
AC	کمپرسور هوا	HRE	مبدل حرارتی
act	فعال سازی	in	ورودی
an	آند	int	اتصال دهنده
anch	محفظه آند	inv	تبدیل کننده جریان
aux	جانبی	is	آیزن تروپیک
bulk	بالک	net	مقدار خالص
c	سرد	OCV	مدار باز
ca	کاتد	ohm	اهمی
cach	محفظه کاتد	OM	تعمیر و نگهداری
Cat	کاتالیست	out	خروجی
CC	محفظه احتراق	P	تولید
ch	شیمیایی	ph	فیزیکی
CI	سرمایه گذاری	PT	توربین قدرت
Conc	غلظت	REC	ریکوپراتور
DC	مستقیم	s	بخار
e	الکترو شیمیایی	SOFC	پیل سوختی
el	الکترو لیت	SR	ریفورمر سوخت
elec	الکتریکی	Stack	استک پیل سوختی
ex	اکسرژی	sur	محیط
f	سوخت	tot	کل
FC	کمپرسور سوخت	TPB	محل نقطه سه گانه
g	گاز	Vessel	مخزن
G	مولد جریان	w	آب
GT	توربین گازی	0	شرایط استاندارد



## فصل اول

### مقدمه

سوخت‌های فسیلی منابع انرژی رو به زوالی هستند که جامعه‌ی رو به توسعه انسانی را در آینده‌ای نه چندان دور دچار مشکل کمبود سوخت می‌کنند. با رشد سریع جمعیت و رسیدن آن به مرز ۱۰ میلیارد نفر تا ۵۰ سال آینده، نیاز به منابع پایان‌ناپذیر سوخت افزایش خواهد یافت. از طرفی وسعت آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی زندگی در کره‌ی خاکی را دچار مشکل ساخته است.

در طی قرن گذشته سطح آب دریا و دمای زمین به ترتیب ۱۰ تا ۲۵ سانتی‌متر و ۰/۳ تا ۰/۶ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش یافته است. به‌علاوه اگر اقدامی مؤثر برای کاهش گازهای گلخانه‌ای در آینده‌ی نزدیک صورت نگیرد، ۴۰ درصد گونه‌های جهانی در معرض انقراض قرار می‌گیرند [۱]. در این ارتباط شاهد وضع قوانین سخت زیست محیطی و تخصیص اعتبارهایی برای تحقیق در زمینه بهره‌برداری از انرژی‌های نو بوده‌ایم.

پس از بحران انرژی در سال ۱۹۷۳ و احتمال وقوع بحرانی دیگر در اوایل قرن آتی، استفاده از منابع سالم انرژی نظیر انرژی‌های تجدید پذیر خورشیدی، باد، آب، امواج دریا، جزر و مد، استخرهای خورشیدی<sup>۱</sup>، هیدروژن، زیست‌گاز<sup>۲</sup> و غیره لازم بوده و نیز ضرورت استفاده از سیستم‌های مبدل انرژی نظیر قدرت‌زای نوری<sup>۳</sup>، پیل‌های سوختی<sup>۴</sup> و گداخت هسته‌ای<sup>۵</sup> را ناگزیر نموده است [۲]. از میان انرژی‌های

---

1 Solarkar

2 Biogas

3 Photovoltaic

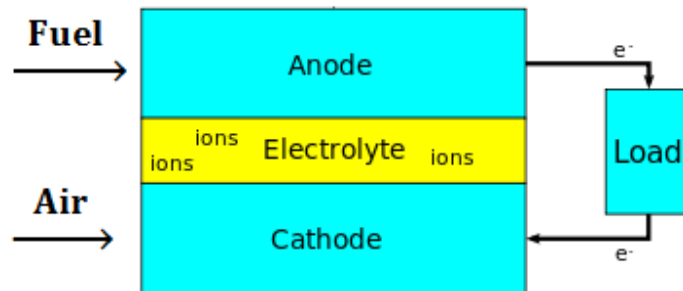
4 Fuel Cell

5 Fusion

مطرح، انرژی الکتریکی تولید شده به وسیله ی پیل های سوختی، به دلیل بازدهی بسیار بالا و عدم آلودگی محیط زیست، در حال حاضر به عنوان راه حل مناسبی جهت عبور از تنگنای انرژی و آلودگی محیط زیست بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

### ۱-۱- پیل سوختی و اصول عملکرد آن

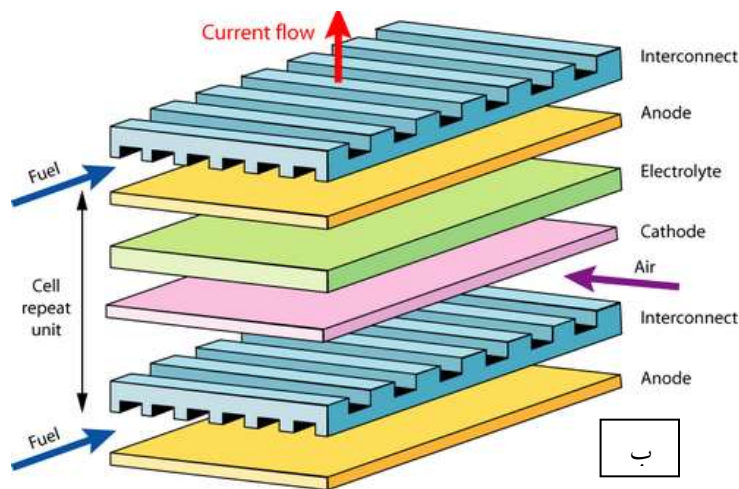
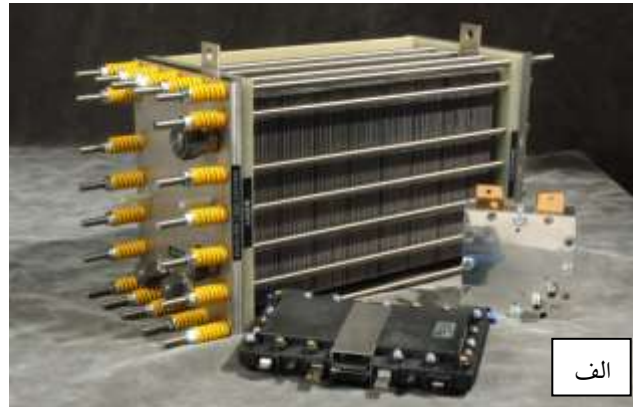
پیل سوختی یک وسیله الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی سوخت و اکسید کننده را بدون هیچ گونه احتراق به انرژی الکتریکی، آب و گرما تبدیل می کند. اصول عملکرد انواع پیل سوختی مشابه یکدیگر است. همه پیل های سوختی از یک الکترولیت<sup>۱</sup> و دو الکترود<sup>۲</sup> به نام های کاتد<sup>۳</sup> (الکترود مثبت) و آند<sup>۴</sup> (الکترود منفی) که در دو طرف الکترولیت قرار دارند تشکیل شده است. سوخت که معمولاً هیدروژن است به محفظه آند و اکسیژن به محفظه کاتد تزریق می شود. واکنش های الکتروشیمیایی به منظور تولید جریان الکتریکی در داخل الکترودها انجام می گیرند؛ که این واکنش ها با توجه به نوع الکترولیت متفاوت است. الکترولیت وظیفه جابجایی ذرات دارای بار الکتریکی را از یک الکترود به الکترود دیگر بر عهده دارد. این ذرات باردار با توجه به نوع پیل سوختی می توانند:  $O^{2-}$ ،  $CO_3^{2-}$ ،  $H^+$  و  $OH^-$  باشند. طی واکنش های الکتروشیمیایی، در بخش آند پیل سوختی الکترون تولید می شود. این الکترون ها نمی توانند از الکترولیت عبور کنند و از یک اتصال خارجی به کاتد می رسند. این حرکت الکترون ها در مدار خارجی، تولید جریان الکتریکی می کند. با قرار دادن موتور الکتریکی در مسیر جریان الکتریکی سیستم پیل سوختی کامل می شود. اجزاء پیل سوختی و نحوه عملکرد آن به صورت شماتیکی در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



شکل (۱-۱): اجزاء پیل سوختی و نحوه عملکرد آن

- 
- 1 Electrolyte
  - 2 Electrode
  - 3 Cathode
  - 4 Anode

به منظور استفاده مناسب از پیل سوختی و برای رسیدن به ولتاژ و توان مورد نیاز معمولاً تعداد زیادی پیل سوختی منفرد در کنار هم، به صورت استک<sup>۱</sup> پیل سوختی استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده، استک پیل سوختی از تعداد زیادی سلول تشکیل شده است که کاتد هر یک به صورت الکتریکی به آنند سلول مجاور متصل است. اجزاء اصلی استک شامل الکتروود، الکترولیت، صفحات دوقطبی<sup>۲</sup>، آب‌بند<sup>۳</sup> و صفحات انتهایی<sup>۴</sup> می‌باشد [۳].



شکل (۱-۲): الف) استک پیل سوختی. ب) نحوه اتصال پیل‌های سوختی منفرد در کنار هم

پیل سوختی و باتری از لحاظ این که هر دو طی یک فرآیند الکتروشیمیایی انرژی شیمیایی را به انرژی سوخت تبدیل می‌کنند، شبیه یکدیگرند. البته تفاوت‌هایی هم بین باتری‌ها و پیل سوختی وجود دارد. اول این که الکترودهای پیل سوختی در حین واکنش از نظر شیمیایی تغییری پیدا نمی‌کنند. دوم این که پیل‌های

- 
- 1 stack
  - 2 Bipolar Plates
  - 3 Gasket
  - 4 End plates

سوختی سیستم‌های بازی هستند که سوخت و اکسیدکننده وارد آن‌ها می‌شود ولی باتری‌ها سیستم‌های بسته‌ای هستند که شامل مقداری سوخت و اکسیدکننده می‌باشند و به‌وسیله‌ی واکنش شیمیایی مصرف می‌شوند و نهایتاً باتری تخلیه می‌شود. تفاوت دیگری که بین پیل سوختی و باتری وجود دارد این است که پیل سوختی محصولات واکنشی مانند آب و گرما تولید می‌کند که باید برای آنها فکری شود؛ در حالی که باتری با نرخ بسیار کم‌تری نسبت به پیل سوختی، فقط گرما تولید می‌کند و نیازی به تجهیزات اضافی ندارد [۴].

### ۱-۲- تاریخچه‌ی پیل‌های سوختی

در سال ۱۸۳۹ ویلیام روبرت گرو<sup>۱</sup> فیزیکدان و روزنامه‌نگار انگلیسی اصول کار پیل سوختی را کشف کرد. او در ابتدا با استفاده از الکتریسیته توانست آب را الکترولیز کرده و به هیدروژن و اکسیژن تبدیل کند. بعداً به این نتیجه رسید که با انجام این واکنش در جهت معکوس می‌توان تولید الکتریسیته کرد. گرو با استفاده از این فرضیه دستگاهی طراحی کرد که با ترکیب هیدروژن و اکسیژن تولید الکتریسیته می‌کرد به این ترتیب ویلیام گرو اولین باتری گازی که امروزه به نام پیل سوختی می‌شناسیم را ساخت.

در سال ۱۸۸۹ لودویگ مند<sup>۲</sup> به همراه چارلز لنجر<sup>۳</sup> طی آزمایش‌هایی توانستند پیل سوختی با مشخصات: (چگالی جریان  $6A/ft^2$  و ولتاژ  $0.73V$ ) طراحی کنند. مند و لنجر در استفاده از الکترولیت‌های مایع به مشکل برخوردند و تنها در استفاده از الکترولیت نیمه جامد که در واقع سرامیک اشباع شده با اسید سولفوریک رقیق بود، موفق شدند.

فردریک ویلهلم<sup>۴</sup> (۱۸۵۳-۱۹۳۲) بنیان‌گذار رشته شیمی فیزیک نخستین کسی بود که به طور آزمایشگاهی رابطه بین اجزاء مختلف پیل سوختی از جمله الکترودها، الکترولیت، عامل کاهش و اکسایش، آنیون‌ها و کاتیون‌ها را تعیین کرد.

در اوایل قرن بیستم امیل بار<sup>۵</sup> تحقیقاتی در جهت ساخت پیل سوختی با دمای بالا که از نقره مذاب به عنوان الکترولیت استفاده می‌کرد، انجام داد.

فرانسیس توماس باکن<sup>۶</sup> (۱۹۰۴-۱۹۹۲) عملکرد پیل‌های سوختی را در فشار بالا بررسی کرد و موفق شد پیل سوختی با الکترولیت نیکل و فشار عملیاتی  $3000 \text{ psi}$  را طراحی کند. در سال ۱۹۵۸ کارهای او منجر به ساخت پیل سوختی آلکانی شد [۵].

1 William Robert Grove

2 Ludwig Mond

3 Carl Langer

4 Friedrich Wilhelm Ostwald

5 Emil Baur

6 Francis Thomas Bacon