

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه بیرجند

دانشکده مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - گرایش تبدیل انرژی

مدل سازی و بهینه سازی دوفاز و غیر همدمای پیل سوختی پلیمری

سید هادی گل کار

استاد راهنما:

دکتر حسن حسن زاده

استاد مشاور:

دکتر علی صفوی نژاد

«بهار ۱۳۹۳»

تاییدیه هیات داوران

(مختص پایان نامه های تحصیلات تکمیلی)

تقدیم به:

تقدیم بابوسه بردستان پدرم:

به او که نمی دانم از بزرگی اش بگویم یا مردانگی، سخاوت، سکوت، مهربانی و...

پدرم راه تمام زندگیست

پدرم دهنخوشی بیسکلیت.

تقدیم به مادر عزیزتر از جانم:

مادرم هستی من ز هستی توست تا، هستم و هستی دارم دست دوست

نگلسار جاودانی مادر است

چشمه سار مهربانی مادر است.

تقدیم به خواهرم:

که وجودش شادی بخش و صفایش مایه آرامش من است.

و تقدیم به تمامی جویندگان دانش و معرفت.

تشکر و قدردانی

بر حسب وظیفه و ادب لازم می‌دانم که:

از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عنو کشیده و گریانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام

عرصه های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده اند؛

از اساتید شایسته و دلسوز؛ جناب آقای دکتر حسن حسن زاده و جناب آقای دکتر علی صفوی نژاد که در کمال سه صدر، با حسن خلق و فروتنی،

پیچ کگی را در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی و مشاوره این رساله را بر عهده گرفتند؛

از اساتید فرزانه و دلسوز؛ جناب آقای دکتر سید مجید ملک جعفریان و جناب آقای دکتر سید علیرضا ذوالفقاری که زحمت داوری این رساله

را متقبل شدند؛

و همچنین از دوستان عزیزم حسین شریعتی اوری، مجد باروتی اردستانی، مهدی عباس زاده و تمامی دانشجویان ورودی ۹۰ کمال تشکر و قدردانی

را دارم.

باشد که بخشی از زحمات ایشان را پاس گفته باشم.

چکیده

در پایان‌نامه حاضر، جریان دوفازی، غیر هم‌دما و غیر هم‌فشار در پیل سوختی پلیمری مدل‌سازی شده است. معادلات حاکم شامل معادلات بقاء جرم، بقاء مومنتم و بقاء انرژی در اجزای مختلف پیل سوختی است که توسط روش تفاضل محدود حل شده‌اند. جهت بررسی صحت مدل‌سازی، منحنی عملکرد پیل سوختی با نتایج تجربی و منحنی توزیع دما با نتایج موجود در مقالات مقایسه شده است که از دقت قابل قبولی برخوردارند.

نتایج مدل‌سازی نشان داد که افزایش فشار مخلوط گاز در کانال کاتد، باعث مرطوب شدن بیشتر غشاء و کاهش افت اهمی می‌شود. علاوه بر این، فشار جزئی اکسیژن در لایه کاتالیست کاتد بیشتر شده و عملکرد پیل سوختی ارتقاء می‌یابد. بر خلاف کاتد، افزایش فشار آند، افت اهمی در غشاء را افزایش داده و باعث کاهش ولتاژ خروجی از پیل سوختی می‌شود. منحنی توزیع دما در طول پیل سوختی نشان داد که بیشترین دما در غشاء و در سمت کاتالیست کاتد است که محل وقوع واکنش الکتروشیمیایی است. با افزایش فشار گاز در کانال کاتد، اختلاف دمای کانال با دمای بیشینه، کمتر می‌شود. اثر افزایش فشار گاز در کانال آند روی توزیع دما، بر خلاف کاتد است و با افزایش فشار آند دما در پیل سوختی افزایش می‌یابد.

همچنین، مقادیر بهینه ضریب تخلخل الکترودها، ضخامت لایه‌های نفوذی گاز و رطوبت نسبی ورودی به کاتد با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری بهینه‌سازی (ژنتیک، آنیل شبیه‌سازی شده و جستجوی الگویی) محاسبه شده است. بهینه‌سازی با در نظر گرفتن چگالی قدرت پیل سوختی به عنوان تابع هدف انجام شده است. در تحقیق حاضر، الگوریتم آنیل شبیه‌سازی شده به عنوان بهترین روش بهینه‌سازی پارامترهای جریان دوفازی شناخته شده است. مقدار بهینه ضریب تخلخل الکترودها ۰/۴۴، ضخامت لایه‌های نفوذی گاز ۰/۲۴ میلی‌متر و رطوبت نسبی ۹۹ درصد محاسبه شده است. در چگالی جریان ثابت (۱ آمپر بر سانتی‌متر مربع)، چگالی قدرت پیل سوختی در حالت بهینه، ۶ درصد نسبت به حالت پایه افزایش داشته است.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی، جریان دوفازی، بهینه‌سازی، غیر هم‌دما.

فهرست مطالب

(الف)	فهرست مطالب
(د)	فهرست علائم و نشانه‌ها
(و)	فهرست جدول‌ها
(ح)	فهرست شکل‌ها
۱	۱ فصل اول: مقدمه و معرفی پیل سوختی
۱	۱-۱. مقدمه
۲	۲-۱. پیل سوختی و کاربردها
۳	۳-۱. ساختار پیل سوختی
۶	۴-۱. مزایا و معایب پیل سوختی
۶	۱-۴-۱. مزایای پیل سوختی
۸	۲-۴-۱. معایب پیل سوختی
۹	۵-۱. انواع پیل سوختی
۱۰	۱-۵-۱. پیل سوختی پلیمری
۱۲	۶-۱. جایگاه تکنولوژی پیل‌های سوختی در جهان
۱۴	۷-۱. ترمودینامیک پیل سوختی
۱۵	۱-۷-۱. ولتاژ برگشت‌پذیر
۱۵	۲-۷-۱. رابطه نرنست
۱۶	۳-۷-۱. افت‌های سه‌گانه
۱۸	۲ فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته
۲۰	۱-۲. تحقیقات مربوط به مدل‌سازی پیل‌های سوختی پلیمری
۲۰	۱-۱-۲. مدل‌سازی‌های تک‌فاز و هم‌دما
۲۳	۲-۱-۲. مدل‌سازی‌های دو‌فاز و هم‌دما

۲۶	مدل‌سازی‌های تک‌فاز و غیر هم‌دما	۳-۱-۲
۲۸	مدل‌سازی‌های دوفاز و غیر هم‌دما	۴-۱-۲
۳۲	ضرورت مدل‌سازی غیر هم‌فشار	۵-۱-۲
۳۲	مدل‌سازی‌های غیر هم‌فشار	۶-۱-۲
۳۵	تحقیقات مربوط به بهینه‌سازی پیل‌های سوختی پلیمری	۲-۲
۴۲	جمع‌بندی تحقیقات و ضرورت تحقیق کنونی	۳-۲
۴۶	۳ فصل سوم: مدل‌سازی ریاضی	
۴۶	مدل‌سازی جریان در لایه نفوذی گاز کاتد	۱-۳
۴۸	معادلات بقای جرم	۱-۱-۳
۵۰	معادلات بقای مومنتم	۲-۱-۳
۵۴	معادله بقای انرژی	۳-۱-۳
۵۶	مدل‌سازی لایه کاتالیست	۲-۳
۵۷	مدل‌سازی غشاء پلیمری	۳-۳
۵۷	معادلات مربوط به جریان آب در غشاء	۱-۳-۳
۶۰	معادله انرژی	۲-۳-۳
۶۱	مدل‌سازی لایه نفوذی گاز	۴-۳
۶۲	معادلات بقای جرم	۱-۴-۳
۶۲	معادلات بقای مومنتم	۲-۴-۳
۶۲	معادله بقای انرژی	۳-۴-۳
۶۳	محاسبه افت‌های سه‌گانه	۵-۳
۶۳	دامنه حل و شرایط مرزی	۶-۳
۶۶	۴ فصل چهارم: روش حل و اعتبارسنجی	
۶۶	بازآرایی معادلات	۱-۴
۷۰	روش حل و اعتبارسنجی	۲-۴
۷۳	شبکه‌بندی و استقلال حل از شبکه	۳-۴

۷۳	روش بهینه‌سازی	۴-۴.
۷۴	جعبه ابزار بهینه‌سازی متلب	۴-۴-۱.
۷۴	الگوریتم ژنتیک	۴-۴-۲.
۷۵	الگوریتم آنیل شبیه‌سازی شده	۴-۴-۳.
۷۶	الگوریتم جستجوی الگویی	۴-۴-۴.
۷۷	تابع هدف و متغیرهای بهینه‌سازی	۴-۴-۵.
۸۰	۵ فصل پنجم: نتایج مدل‌سازی	
۸۱	مقایسه نتایج مدل‌سازی تک‌فاز و دوفاز	۵-۱.
۸۸	نتایج مدل‌سازی غیر هم‌فشار	۵-۲.
۹۹	۶ فصل ششم: نتایج بهینه‌سازی	
۹۹	نتایج بهینه‌سازی	۶-۱.
۱۰۹	۷ فصل هفتم: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	
۱۰۹	جمع‌بندی نتایج	۷-۱.
۱۱۰	محدودیت‌ها و پیشنهادات	۷-۲.
۱۱۲	مراجع	
۱۱۵	پیوست (الف). فلوجارت حل عددی α	
۱۱۶	پیوست (ب). فلوجارت حل عددی جریان در پیل سوختی	
۱۱۷	پیوست (ج). الگوریتم آنیل شبیه‌سازی شده	
۱۱۸	پیوست (د). الگوریتم ژنتیک	

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
سطح موثر واکنش به ازای واحد سطح لایه کاتالیست (m^2/m^2)	A_s
سطح موثر واکنش به ازای واحد حجم لایه کاتالیست (m^2/m^3)	A_v
نفوذپذیری موثر	D_i^{eff}
نفوذپذیری	D^i
ضریب نفوذ آب در غشاء	D_λ
عدد اکی‌والان غشا	EW
عدد فارادی (Cmol^{-1})	F
چگالی جریان (Am^{-2})	j
هدایت حرارتی لایه نفوذ گاز	K
نفوذپذیری مطلق (m^2)	k_{abs}
ضریب میعان (s^{-1})	k_{cond}
ضریب هدایت حرارتی غشاء	K_{eff}
نفوذپذیری هیدرولیکی غشاء (m^2)	K_m
ضریب تبخیر ($\text{N}^{-1}\text{m}^2\text{s}^{-1}$)	k_{vap}
نرخ تبادل جرم میان فازها به ازای واحد حجم (kgm^{-3}s)	$\dot{m}''_{\text{H}_2\text{O}}$
جرم مولکولی گونه i	M_i
ضریب کشش الکترواسموتیک	n_d
فشار مویینگی (pa)	P_C
فشار در حالت گاز (pa)	P_g
فشار در حالت مایع (pa)	P_l
ثابت جهانی گازها ($\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$)	R

R_{ohmic}	مقاومت اهمی غشاء (Ωm^2)
S	اشباع (بی بعد)
T	دما (K)
u_L	سرعت ظاهری فاز مایع (ms^{-1})
x_i	کسر مولی گونه i
y_i	کسر جرمی گونه i

علائم یونانی

عنوان	علامت اختصاری
ضریب انتقال آب در غشاء	α
درصد آب وارد شده به لایه نفوذ گاز به صورت بخار	β
زاویه تماس	θ_C
محتوای آب در غشاء	λ
لزجت گاز ($kgm^{-1}s^{-1}$)	μ_g
لزجت مایع ($kgm^{-1}s^{-1}$)	μ_l
چگالی غشای خشک (kgm^{-3})	ρ_{dry}
چگالی مخلوط گاز (kgm^{-3})	ρ_{mix}
چگالی در حالت مایع (kgm^{-3})	ρ_l
قابلیت هدایت یونی (sm^{-1})	σ

فهرست جدول‌ها

۸	مقایسه پیل‌های سوختی با سایر مبدل‌ها	جدول (۱-۱)
۱۶	فعالیت جامدات، مایعات و گازهای ایده‌آل	جدول (۲-۱)
۱۹	مثال‌هایی از دسته‌بندی مدل‌سازی‌های صورت گرفته در مورد پیل سوختی	جدول (۱-۲)
۲۱	تحقیق اسپرینگر و همکاران	جدول (۲-۲)
۲۲	تحقیق برناردی و همکاران	جدول (۳-۲)
۲۳	تحقیق بسچاک و لی	جدول (۴-۲)
۲۴	تحقیق پاساکولاری و وانگ	جدول (۵-۲)
۲۵	تحقیق فردوس آرا	جدول (۶-۲)
۲۶	تحقیق آلوارادو و همکاران	جدول (۷-۲)
۲۷	تحقیق جو و همکاران	جدول (۸-۲)
۲۸	تحقیق افشاری و جزایری	جدول (۹-۲)
۲۹	تحقیق راو و لی	جدول (۱۰-۲)
۳۰	تحقیق سانگ و همکاران	جدول (۱۱-۲)
۳۱	تحقیق برزگری	جدول (۱۲-۲)
۳۳	تحقیق نجیب جلیلی و لو	جدول (۱۳-۲)
۳۴	تحقیق هو و همکاران	جدول (۱۴-۲)
۳۵	تحقیق یو و لیو	جدول (۱۵-۲)
۳۷	تحقیق سوسای و همکاران	جدول (۱۶-۲)
۳۸	تحقیق گروجیکیچ و همکاران	جدول (۱۷-۲)
۳۹	تحقیق گروجیکیچ و چیتاجالو	جدول (۱۸-۲)
۴۰	تحقیق میشرای و همکاران	جدول (۱۹-۲)
۴۱	تحقیق داس و همکاران	جدول (۲۰-۲)
۴۲	تحقیق دوکار و همکاران	جدول (۲۱-۲)

۷۰	مقادیر پایه	جدول (۱-۴)
۷۲	مقایسه خطای حل عددی در مدل حاضر با سایر مراجع	جدول (۲-۴)
۷۹	حد بالا و پایین متغیرهای بهینه‌سازی	جدول (۳-۴)
۹۹	مشخصات الگوریتم ژنتیک	جدول (۱-۶)
۱۰۰	مشخصات الگوریتم آنیل شبیه‌سازی شده	جدول (۲-۶)
۱۰۰	مشخصات الگوریتم جستجوی گویبی	جدول (۳-۶)
۱۰۰	مشخصات روش گرادینانی افمین‌کان	جدول (۴-۶)
۱۰۰	حدس اولیه پارامترهای بهینه‌سازی	جدول (۵-۶)
۱۰۱	مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم‌های مختلف	جدول (۶-۶)
۱۰۲	مقایسه تعداد تکرار و زمان اجرای الگوریتم‌های مختلف	جدول (۷-۶)

فهرست شکل‌ها

۳	شکلی از اجزای پیل سوختی.	شکل(۱-۱)
۵	لایه نفوذی گاز کاغذ کربنی (سمت راست) - پارچه کربنی (سمت چپ).	شکل(۲-۱)
۶	ساختار مولکولی متخلخل لایه کاتالیست.	شکل(۳-۱)
۶	تأثیر کاتالیزور در کاهش انرژی فعال‌سازی.	شکل(۴-۱)
۷	مقایسه موتورهای گرمایی و پیل سوختی.	شکل(۵-۱)
۱۰	شماتیکی از پیل‌های سوختی.	شکل(۶-۱)
۱۱	ساختمان و طریقه کار پیل سوختی غشاء پلیمری.	شکل(۷-۱)
۱۷	منحنی پلاریزاسیون پیل سوختی.	شکل(۸-۱)
۴۷	نمای سه بعدی یک محیط متخلخل.	شکل(۱-۳)
۵۲	نمودار کشش سطحی بر حسب دما.	شکل(۲-۳)
۵۳	نمودار تابع $z(s)$ برای دو حالت آب دوست و آب گریز.	شکل(۳-۳)
۵۴	نمودار فشار مویبندی بر حسب مقدار اشباع به ازای زوایای تماس گوناگون.	شکل(۴-۳)
۵۴	نمودار فشار مویبندی بر حسب مقدار اشباع به ازای ضریب تخلخل‌های گوناگون.	شکل(۵-۳)
۵۵	حجم کنترل در لایه نفوذی گاز کاتد.	شکل(۶-۳)
۵۸	شماتیکی از جریان آب در غشاء پلیمری.	شکل(۷-۳)
۶۱	حجم کنترل در غشاء.	شکل(۸-۳)
۶۴	تصویر شماتیکی از دامنه حل در تحقیق حاضر.	شکل(۹-۳)
۷۱	مقایسه منحنی عملکرد پیل سوختی در حالت هم‌فشار تحقیق حاضر با نتایج تجربی تیسیانلی و همکاران.	شکل(۱-۴)
۷۱	مقایسه منحنی عملکرد پیل سوختی در حالت غیر هم‌فشار تحقیق حاضر با نتایج تجربی تیسیانلی و همکاران.	شکل(۲-۴)
۷۲	مقایسه منحنی توزیع دمای پیل سوختی در حالت تک‌فاز و غیر هم‌فشار تحقیق حاضر با نتایج نجیب جلیلی و لو.	شکل(۳-۴)

- شکل (۴-۴) مقایسه منحنی توزیع دما در کاتد پیل سوختی در تحقیق حاضر با نتایج سانگ و همکاران. ۷۲
- شکل (۴-۵) نمودار توزیع اشباع در لایه نفوذی گاز کاتد به ازای تعداد گره‌های مختلف. ۷۳
- شکل (۵-۱) منحنی نرخ تبخیر آب در لایه نفوذی گاز کاتد در رطوبت نسبی‌های ورودی مختلف. ۸۱
- شکل (۵-۲) منحنی توزیع دما در سراسر پیل سوختی به ازای چگالی جریان‌های مختلف در دو حالت تک‌فاز و دوفاز در رطوبت نسبی ورودی به کاتد ۸۵ درصد. ۸۲
- شکل (۵-۳) منحنی تغییرات رطوبت نسبی در کاتد برای رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد ۸۵ درصد. ۸۳
- شکل (۵-۴) منحنی تغییرات غلظت بخار آب در کاتد برای رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد ۸۵ درصد. ۸۳
- شکل (۵-۵) منحنی تغییرات غلظت اکسیژن در کاتد برای رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد ۸۵ درصد. ۸۴
- شکل (۵-۶) منحنی توزیع دما در سراسر پیل سوختی به ازای چگالی جریان‌های مختلف در دو حالت تک‌فاز و دوفاز در رطوبت نسبی ورودی به کاتد ۱۰۰ درصد. ۸۵
- شکل (۵-۷) منحنی تغییرات غلظت بخار آب در کاتد برای رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد ۱۰۰ درصد. ۸۵
- شکل (۵-۸) منحنی تغییرات محتوای آب غشاء به ازای رطوبت نسبی‌های مختلف کانال کاتد در دو حالت تک‌فاز و دوفاز. ۸۶
- شکل (۵-۹) مقایسه منحنی عملکرد پیل سوختی در دو حالت تک‌فاز و دوفاز برای گازهای ورودی به کاتد با رطوبت نسبی ۸۵ درصد. ۸۷
- شکل (۵-۱۰) مقایسه منحنی عملکرد پیل سوختی در دو حالت تک‌فاز و دوفاز برای گازهای ورودی به کاتد با رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد. ۸۷
- شکل (۵-۱۱) منحنی توزیع چگالی مخلوط گاز در لایه نفوذی گاز کاتد به ازای فشار گاز ورودی به کاتد متفاوت و در فشار آند ۱ اتمسفر. ۸۸
- شکل (۵-۱۲) منحنی توزیع غلظت اکسیژن در لایه نفوذی گاز کاتد به ازای فشار گاز ورودی به کاتد متفاوت و در فشار آند ۱ اتمسفر. ۸۹
- شکل (۵-۱۳) منحنی توزیع غلظت بخار آب در لایه نفوذی گاز کاتد به ازای فشار گاز ورودی به کاتد متفاوت و در فشار آند ۱ اتمسفر. ۸۹
- شکل (۵-۱۴) منحنی تغییرات رطوبت نسبی در لایه نفوذی گاز کاتد به ازای فشار گاز ورودی به کاتد متفاوت و در فشار آند ۱ اتمسفر. ۹۰
- شکل (۵-۱۵) منحنی تغییرات محتوای آب غشاء به ازای فشار گاز ورودی به کاتد متفاوت و در فشار آند ۱ اتمسفر. ۹۱
- شکل (۵-۱۶) منحنی تغییرات محتوای آب غشاء به ازای فشار گاز ورودی به کاتد متفاوت و در فشار کاتد ۱ اتمسفر. ۹۲
- شکل (۵-۱۷) منحنی تغییرات اشباع به ازای فشار گاز ورودی به کاتد متفاوت و در فشار آند ۱ اتمسفر. ۹۲
- شکل (۵-۱۸) منحنی توزیع دما در سراسر پیل سوختی به ازای فشار گاز ورودی به کاتد متفاوت و در فشار آند ۱ اتمسفر. ۹۳
- شکل (۵-۱۹) منحنی توزیع دما در سراسر پیل سوختی به ازای فشار گاز ورودی به کاتد متفاوت و در فشار کاتد ۱ اتمسفر. ۹۳

- شکل (۵-۲۰) منحنی افت اهمی به ازای فشار گاز ورودی به کاتد متفاوت و در فشار آند ۱ اتمسفر. ۹۴
- شکل (۵-۲۱) منحنی افت غلظتی به ازای فشار گاز ورودی به کاتد متفاوت و در فشار آند ۱ اتمسفر. ۹۵
- شکل (۵-۲۲) منحنی افت فعال سازی به ازای فشار گاز ورودی به کاتد متفاوت و در فشار آند ۱ اتمسفر. ۹۵
- شکل (۵-۲۳) منحنی عملکرد پیل سوختی به ازای فشارهای مختلف گازهای ورودی به کاتد و آند. ۹۶
- شکل (۵-۲۴) منحنی شار مولی آب در غشاء ناشی از سه عامل الکترواسموتیک، نفوذ معکوس و اختلاف فشار بین آند و کاتد در چگالی جریان (A/cm^2) ۰/۴. ۹۶
- شکل (۵-۲۵) منحنی شار مولی آب در غشاء ناشی از سه عامل الکترواسموتیک، نفوذ معکوس و اختلاف فشار بین آند و کاتد در چگالی جریان (A/cm^2) ۰/۱۶. ۹۷
- شکل (۶-۱) منحنی افت های سه گانه بر حسب ضریب تخلخل الکتروود کاتد و آند. ۱۰۳
- شکل (۶-۲) منحنی تغییرات ولتاژ خروجی از پیل سوختی بر حسب ضریب تخلخل الکتروود کاتد و آند. ۱۰۴
- شکل (۶-۳) منحنی افت های سه گانه بر حسب ضخامت لایه نفوذی گاز. ۱۰۵
- شکل (۶-۴) منحنی تغییرات ولتاژ خروجی از پیل سوختی به ازای ضخامت لایه نفوذی گاز. ۱۰۵
- شکل (۶-۵) منحنی افت های سه گانه بر حسب رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد. ۱۰۶
- شکل (۶-۶) منحنی تغییرات ولتاژ خروجی از پیل سوختی به ازای رطوبت نسبی گازهای ورودی به کاتد. ۱۰۷
- شکل (۶-۷) مقایسه منحنی عملکرد پیل سوختی در دو حالت پایه و بهینه. ۱۰۷
- شکل (۶-۸) مقایسه منحنی چگالی قدرت پیل سوختی در دو حالت پایه و بهینه. ۱۰۸

مقدمه و معرفی پیل سوختی

۱-۱. مقدمه

بحران انرژی و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، خسارت جبران ناپذیری بر اکوسیستم جهان تحمیل نموده است. پاسخ به تقاضای فزاینده انرژی و همچنین بازدهی کم تکنولوژی‌های متداول امروزی، مستلزم استفاده روز افزون منابع فسیلی انرژی و در نتیجه انتشار بیشتر آلاینده‌ها، اثرات گلخانه‌ای، باران‌های اسیدی و ... خواهد بود. به علاوه با توجه به روند رو به کاهش منابع طبیعی سوخت‌های فسیلی، افزایش قابل توجه قیمت آن‌ها در آینده قابل پیش بینی است. در همین راستا دیدگاه جدیدی برای استفاده از هیدروژن با توجه به خصوصیات منحصر به فرد آن ایجاد شده است. کاربرد هیدروژن به عنوان سوخت، موجب کاهش آلاینده‌های زیست محیطی و حذف اکسیدهای گوگرد و اکسیدهای کربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی می‌شود. این مسائل اهمیت بکارگیری تکنولوژی‌ها و منابع جدید، پاک، ارزان قیمت و تجدیدپذیر انرژی نظیر انرژی هیدروژنی و فن‌آوری پیل سوختی را بیش از پیش آشکار می‌کنند [۱].

پیل سوختی، فن‌آوری جدیدی برای تولید انرژی است که بدون ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی و صوتی، انرژی شیمیایی واکنش یک سوخت (معمولاً هیدروژن) با یک اکسیدکننده (معمولاً اکسیژن از هوای محیط) را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند.

تولید مستقیم الکتریسیته، جایگزینی برای چرخه کارنو جهت تبدیل انرژی شیمیایی حاصل از سوخت به انرژی گرمایی و مکانیکی و در نهایت الکتریسیته می‌باشد که اتلاف انرژی را به حداقل ممکن می‌رساند و بازده بالایی به دست می‌دهد.

۲-۱. پیل سوختی و کاربردها

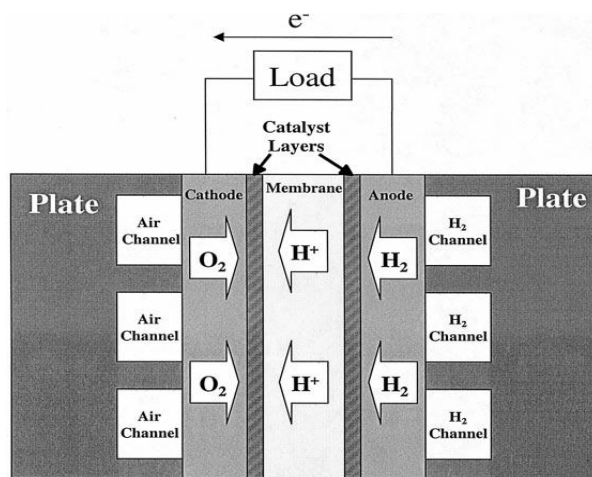
امروزه تقاضا برای انرژی پاک و تجدیدپذیر، فعالیت‌های تحقیقاتی را برای یافتن مبدل‌های پاک و کارآمد شتاب داده است. پیل‌های سوختی ممکن است جوابی برای افزایش نیاز به این نوع مبدل‌های انرژی باشد [۲]. تکنولوژی تولید پیل سوختی در سال ۱۸۳۹ توسط دانشمند انگلیسی به نام گرو^۱ اختراع شده و حدود ۱۲۰ سال طول کشید تا کاربرد جدی پیدا کند، در حدود سال‌های ۱۹۶۰، به تدریج توجه به سمت این تکنولوژی جلب شد به طوری که در سال ۱۹۹۸ شیکاگو اولین شهر در جهان بود که در آن اولین اتوبوس پیل سوختی به کار گرفته شد. همواره کاربردهای فضایی از این تکنولوژی انگیزه مناسبی جهت رشد مطالعات و تحقیقات برای افزایش و بهبود بازده و عملکرد این فن‌آوری بوده است. پیل‌های سوختی در حال حاضر یکی از پرکاربردترین ابزارهای تبدیل انرژی شیمیایی (پتانسیل اکسیداسیون) به انرژی الکتریکی هستند. تا زمانی که جریان سوخت و اکسیدکننده در دو سمت پیل برقرار است، تولید حرارت و انرژی الکتریکی نیز به طور پایدار ادامه می‌یابد. با حذف مرحله تبدیل انرژی شیمیایی به حرارتی که در موتورهای حرارتی متداول وجود دارد، پیل‌های سوختی در دسته ماشین‌های حرارتی قرار نگرفته و بازده آن‌ها به سیکل ایده‌آل کارنو محدود نمی‌شود و به طور تئوریک قابلیت رسیدن به بازدهی ۸۰ درصد نیز برای آن‌ها قابل تصور است. امروزه اغلب کارخانه‌های خودروسازی در دنیا مشغول توسعه خودروهای پیل سوختی هستند. علاوه بر کاربردهای حمل و نقل، استفاده از این نوع پیل‌ها در وسایل قابل حمل نظیر کامپیوترهای لپ‌تاپ،

¹William Grove

تلفن‌های همراه و به خصوص سیستم‌های برق اضطراری^۱ نیز به سرعت در حال افزایش است [۳] و برای این که کاربرد آن‌ها به صورت تجاری درآید باید قیمت آن‌ها کاهش یافته و عملکردشان بهینه شود. این پیل‌ها انرژی شیمیایی یک سوخت را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند و در صورت استفاده از هیدروژن خالص محصول تولیدی آن‌ها آب و حرارت است. به طور کلی بازده تبدیل انرژی شیمیایی به الکتریکی توسط پیل‌های سوختی در مقایسه با دیگر دستگاه‌ها و فرایندهای تبدیل انرژی در نقطه طراحی و غیر طراحی بیشتر است. اغلب محققان بر این عقیده‌اند که همان طور که موتورهای احتراق داخلی باعث تحول عظیم در اوایل قرن بیستم شدند، فن‌آوری پیل سوختی نیز می‌تواند در عصر حاضر نقش اساسی در افزایش بازده تبدیل انرژی، کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و به تبع آن مسائل اقتصادی داشته باشد [۱].

۳-۱ ساختار پیل سوختی

هر پیل سوختی از چند جزء اصلی تشکیل شده است: صفحات توزیع کننده جریان یا کانال‌های عبور جریان، الکترودها یا لایه‌های نفوذی گاز، لایه کاتالیست یا لایه واکنشی و الکترولیت یا غشاء. به جز غشاء که در ساختمان پیل سوختی در وسط پیل قرار می‌گیرد، سایر اجزاء نام برده هم در طرف کاتد و هم در طرف آنند موجود هستند. بنابراین در کل، هفت لایه متفاوت در هر پیل سوختی وجود دارد که در هر کدام پدیده فیزیکی خاصی رخ می‌دهد [۴]. در شکل ۱-۱ اجزای پیل سوختی نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- شماتیکی از اجزای پیل سوختی [۵].

^۱ Uninterruptible power supply

آند^۱: الکترودی است که الکترون‌ها از آن خارج شده و واکنش اکسایش در آن رخ می‌دهد.

کاتد^۲: الکترودی است که الکترون‌ها به آن وارد شده و واکنش کاهش بر روی آن صورت می‌گیرد. کاتد قطب مثبت پیل سوختی را تشکیل می‌دهد. الکترودها (کاتد و آند) که محل انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی هستند توسط یک الکترولیت از یکدیگر جدا می‌شوند.

صفحات توزیع‌کننده گاز: وظیفه اصلی صفحات توزیع‌کننده، فراهم آوردن محیطی برای جریان یافتن سوخت در طرف آند و کاتد است. این کار توسط کانال‌هایی صورت می‌گیرد که از سه طرف بسته و از یک طرف باز می‌باشند و به صورت شیارهایی در داخل صفحات تعبیه می‌شوند. طرف باز با متصل شدن به لایه مجاور خود یعنی الکترودها، مرزی را برای انتقال واکنش‌دهنده‌ها و محصولات فراهم می‌کند. هندسه شیارها از قبیل ضخامت، عمق و شکل کانال نقش بسیار مهمی در نحوه توزیع گازها بر روی لایه‌های نفوذی گاز دارد. صفحات توزیع‌کننده، معمولاً از جنس گرافیت یا استیل ساخته می‌شوند و عمده‌ترین قسمت یک مجموعه پیل سوختی از نظر وزن و قیمت می‌باشند.

لایه نفوذی گاز^۳: عبارت است از یک محیط متخلخل که امکان توزیع یکنواخت گازها روی کاتالیست فراهم می‌کند. ساختار متخلخل این لایه موجب می‌شود گازهای واکنش‌دهنده به خوبی روی سطح الکترودها اسپری شوند و به این ترتیب تماس بیشتری بین گازهای واکنش‌دهنده و لایه کاتالیست به وجود آید. لایه نفوذی گاز از صفحات متخلخل کربنی به ضخامت ۱۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر ساخته می‌شوند. در پیل‌های سوختی عموماً از دو نوع لایه نفوذی گاز که هر دو از الیاف کربن تولید شده‌اند استفاده می‌شود. در یکی الیاف کربن به شیوه‌ای مشابه آنچه در صنعت نساجی استفاده می‌شود به یکدیگر بافته می‌شود که به آن پارچه کربنی گفته می‌شود و در نوع دیگر الیاف کربن به شیوه‌ای مشابه آنچه در تولید کاغذ استفاده می‌شود به هم بافته می‌شود که به آن کاغذ کربنی می‌گویند. در شکل ۱-۲ لایه نفوذی گاز پارچه کربنی و کاغذ کربنی نشان داده شده است.

¹ Anode

² Cathode

³ Gas Diffusion Layer (GDL)