



دانشکده مکانیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی

# شبیه سازی عددی جریان تپشی در پیل سوختی پلیمری با کانال جریان در هم پیچیده

استاد راهنما:

دکتر عباس رامیار

استاد مشاور:

دکتر قدیر اسماعیلی

دانشجو:

امیر حسین محمودی

دی ماه ۱۳۹۳

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که در تمام زندگی حامی و یاور من بودند.

## تشکر و قدردانی:

برخود لازم میدانم تا از زحمات همه جانبه استاد راهنمای گرانقدر جناب آقای دکتر رامیار تشکر نمایم. همچنین از استاد مشاور ارجمند جناب آقای دکتر قدیر اسماعیلی، تمامی اساتید دانشکده مهندسی مکانیک و تمامی دوستان عزیزم که در رشد و بالندگی من نقش موثر داشته اند تشکر می کنم.

## چکیده

در این پژوهش عملکرد پیل سوختی با کانال جریان در هم پیچیده مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور شبیه سازی فرایندهای پیل سوختی از یک مدل عددی دو بعدی، هم‌دما، گذرا، دو فاز و چند جزئی استفاده شده است. مدل ایجاد شده شامل لایه نفوذ گازی کاتدی می‌باشد و لایه کاتالیستی کاتد به صورت یک لایه بی‌نهایت باریک در نظر گرفته شده است. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با نتایج کارهای موجود نشان دهنده‌ی این امر می‌باشد که شبیه‌سازی با دقت خوبی انجام گرفته است. در این شبیه سازی تأثیر برخی پارامترهای هندسی و عملکردی مورد مطالعه قرار گرفته است. از نتایج به دست آمده مشخص شده است که افزایش اختلاف فشار بین کانال‌های ورودی و خروجی می‌تواند موجب افزایش عملکرد پیل سوختی گردد. همچنین نتایج نشان‌دهنده‌ی اهمیت در نظر گرفتن فشردگی غیریکنواخت لایه نفوذ گازی در اثر نیروی به هم بستن اجزای پیل سوختی در شبیه سازی می‌باشد. در این مطالعه از جریان ورودی هوا به صورت تپشی استفاده گردید که نتایج به دست آمده در مقایسه با نتایج حاصل از جریان ورودی پیوسته نشان‌دهنده‌ی تأثیرگذاری جریان تپشی در دفع آب و کاهش غرقابگی لایه نفوذ گازی کاتد و در نتیجه بهبود عملکرد پیل سوختی می‌باشد. عملکرد پیل سوختی به تغییرات فرکانس در محدوده در نظر گرفته شده در این مطالعه وابستگی چندانی نشان نداده است اما افزایش دامنه‌ی تپش ورودی تأثیر قابل توجهی بر روی افزایش عملکرد دارا می‌باشد. همچنین بررسی‌ها نشان داده است که استفاده از جریان تپشی در فشارهای متوسط پایین‌تر نتایج بهتری را به همراه دارد.

**کلمات کلیدی:** پیل سوختی، کانال جریان درهم‌پیچیده، فشردگی غیر همگن لایه نفوذ گازی، جریان

تپشی

## فهرست عناوین

- فصل ۱: مقدمه ..... ۱
- ۱-۱ مقدمه ..... ۲
- ۲-۱ پیل سوختی ..... ۳
- ۳-۱ پیل سوختی پلیمری ..... ۵
- ۴-۱ اصول کار پیل سوختی پلیمری ..... ۶
- ۵-۱ اجزای پیل سوختی پلیمری ..... ۷
- ۱-۵-۱ الکترودها ..... ۸
- ۲-۵-۱ غشای پلیمری ..... ۸
- ۳-۵-۱ لایه‌های کاتالیست ..... ۸
- ۴-۵-۱ صفحات دوقطبی ..... ۹
- ۱-۴-۵-۱ میدان درهم پیچیده ..... ۱۱
- ۶-۱ منحنی مشخصه‌ی پیل سوختی ..... ۱۴
- ۷-۱ مدیریت آب در پیل‌های سوختی ..... ۱۷
- ۱-۷-۱ امکان‌بسیم‌های انتقال آب از غشاء ..... ۲۰
- ۱-۷-۱-۱ درگ الکتروسموتیک (جریان پتانسیل) ..... ۲۰
- ۲-۷-۱-۱ نفوذ برگشتی (جریان با عامل حرکت تغییر غلظت) ..... ۲۰
- ۳-۷-۱-۱ قابلیت نفوذ هیدرولیکی (جریان با عامل اختلاف فشار) ..... ۲۱
- ۴-۷-۱-۱ ترمو اسموسیز (جریان با عامل اختلاف دما) ..... ۲۱
- ۸-۱ مدل سازی پیل‌های سوختی ..... ۲۲

۲۳..... ۱-۸-۱ ضریب تخلخل

۲۴..... ۲-۸-۱ کسر حجمی اشباع

۲۵..... ۳-۸-۱ نفوذپذیری

۲۶..... ۴-۸-۱ فشار موئینگی

۲۷..... ۹-۱ تعریف مسئله

۲۸..... ۱۰-۱ اهداف پژوهش

۳۰..... فصل ۲: مروری بر منابع

۳۱..... ۱-۲ مقدمه

۳۲..... ۲-۲ مدل سازی های اولیه

۳۳..... ۳-۲ مدل های دو فازی

۳۷..... ۴-۲ کارهای انجام شده در زمینه ی اثر شرایط عملکردی

۳۹..... ۵-۲ کارهای انجام شده در زمینه ی میدان جریان و هندسه پیل

۴۱..... ۶-۲ کارهای انجام شده در زمینه ی میدان جریان درهم پیچیده

۴۳..... ۷-۲ کارهای انجام شده در زمینه ی جریان تپشی

۴۵..... ۸-۲ کارهای انجام شده در زمینه ی تأثیر فشردگی لایه ی نفوذ گازی

۴۸..... فصل ۳: معادلات حاکم

۴۹..... ۱-۳ مقدمه

۵۰..... ۲-۳ روش جریان چندفازی (MFM)

۵۲..... ۱-۲-۳ روابط ساختاری

۵۳	..... ۳-۳ مدل مخلوط چند فازی ( <i>MMM</i> )
۵۳	..... ۱-۳-۳ تعاریف پایه
۵۵	..... ۲-۳-۳ معادلات حاکم مدل <i>MMM</i>
۵۷	..... ۳-۳-۳ کاربرد <i>MMM</i> در سیستم‌های دو فاز دوتایی
۵۹	..... ۴-۳ تئوری جریان غیراشباع ( <i>UTF</i> )
۶۰	..... ۵-۳ معادلات حاکم بر کاتد پیل سوختی با ساختار کاملاً متخلخل
۶۵	..... فصل ۴: نتایج و بحث
۶۶	..... ۱-۴ مقدمه
۶۶	..... ۲-۴ ناحیه‌ی مدل سازی
۶۸	..... ۳-۴ روند حل عددی
۶۸	..... ۱-۳-۴ شرایط مرزی
۷۰	..... ۲-۳-۴ حل معادلات مومنتم
۷۳	..... ۱۳-۳-۴ الگوریتم سیمپل
۷۵	..... ۴-۳-۴ حل معادلات غلظت
۷۸	..... ۵-۳-۴ تعیین مقدار کسر حجمی مایع
۷۸	..... ۶-۳-۴ به روز رسانی متغیرها و محاسبه جریان خروجی پیل
۷۹	..... ۷-۳-۴ فلوجارت کلی حل
۸۰	..... ۸-۳-۴ بررسی استقلال از شبکه
۸۱	..... ۴-۴ اعتبار سنجی
۸۲	..... ۵-۴ نتایج



۸۷	..... ۱-۵-۴ بررسی اثر اختلاف فشار
۹۰	..... ۲-۵-۴ بررسی اثر ضخامت لایه نفوذ گازی
۹۳	..... ۳-۵-۴ بررسی اثر اعمال جریان تپشی در ورودی
۹۴	..... ۱-۳-۵-۴ جریان تپشی
۹۵	..... ۲-۳-۵-۴ اثر فرکانس جریان تپشی بر روی عملکرد پیل
۹۶	..... ۳-۳-۵-۴ اثر دامنه‌ی جریان تپشی بر روی عملکرد پیل
۱۰۸	..... ۴-۳-۵-۴ اثر فشار متوسط بر روی عملکرد پیل
۱۱۰	..... ۶-۴ اثر فشردگی لایه‌ی نفوذ گازی بر روی عملکرد پیل سوختی
۱۱۹	..... فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۲۰	..... ۱-۵ نتیجه‌گیری
۱۲۱	..... ۲-۵ پیشنهادات
۱۲۲	..... مراجع

## فهرست شکل ها

- شکل (۱-۱) شماتیک پیل سوختی ..... ۴
- شکل (۲-۱) نحوه‌ی کارکرد پیل سوختی پلیمری ..... ۷
- شکل (۳-۱) شماتیکی از پیل سوختی غشاء پلیمری و اجزای آن ..... ۷
- شکل (۴-۱) صفحه‌ی توزیع‌کننده‌ی سوخت و اکسیدکننده ..... ۱۰
- شکل (۵-۱) مکانیسم میدان‌های جریان رایج ..... ۱۲
- شکل (۶-۱) مکانیسم میدان جریان درهم‌پیچیده ..... ۱۳
- شکل (۷-۱) منحنی مشخصه‌ی پیل سوختی ..... ۱۴
- شکل (۸-۱) نمایشی از مکان‌های احتمالی وقوع غرقابگی در پیل سوختی غشای تبادل‌کننده‌ی پروتون ..... ۱۸
- شکل (۹-۱) مکانیسم‌های مختلف انتقال آب از غشاء ..... ۲۲
- شکل (۱-۴) نمای سه بعدی از لایه‌ی نفوذگازی و کانال‌های جریان در پیل سوختی غشاء پلیمری ..... ۶۷
- شکل (۲-۴) ناحیه‌ی مدل سازی در راستای عمود بر کانال جریان درهم‌پیچیده ..... ۶۷
- شکل (۳-۴) حجم کنترل دو بعدی سرعت ..... ۷۲
- شکل (۴-۴) حجم کنترل برای معادله‌ی پیوستگی ..... ۷۴
- شکل (۵-۴) فلوچارت کلی مدل سازی ..... ۷۹
- شکل (۶-۴) بررسی استقلال از شبکه‌ی مدل ایجاد شده، الف) اثر تعداد المان شبکه، ب) اثر گام زمانی، بر روی منحنی مشخصه ..... ۸۰
- شکل (۷-۴) اعتبار سنجی مدل ایجاد شده ..... ۸۱
- شکل (۸-۴) بردارهای سرعت مخلوط، فاز گازی و فاز مایع در ولتاژ ۰/۴۵ ولت ..... ۸۳
- شکل (۹-۴) کانتور کسر حجمی اشباع مایع در ولتاژ ۰/۴۵ ولت ..... ۸۴

- شکل (۴-۱۰) کانتور فشار مخلوط در ولتاژ ۰/۴۵ ولت ..... ۸۴
- شکل (۴-۱۱) کانتور غلظت جرمی مخلوط آب در ولتاژ ۰/۴۵ ولت ..... ۸۵
- شکل (۴-۱۲) کانتور غلظت جرمی مخلوط اکسیژن در ولتاژ ۰/۴۵ ولت ..... ۸۶
- شکل (۴-۱۳) اثر اختلاف فشار بر روی عملکرد پیل سوختی با کانال جریان درهم پیچیده ..... ۸۷
- شکل (۴-۱۴) اثر اختلاف فشار بر روی چگالی توان خروجی از پیل سوختی با کانال جریان درهم پیچیده ..... ۸۸
- شکل (۴-۱۵) تغییر سطح آب مایع لایه کاتالیستی بر اثر تغییر اختلاف فشار در ولتاژ ۰/۴۵ ولت ..... ۸۹
- شکل (۴-۱۶) تغییر منحنی چگالی جریان موضعی بر اثر تغییرات اختلاف فشار در ولتاژ ۰/۴۵ ولت ..... ۹۰
- شکل (۴-۱۷) اثر ضخامت لایه نفوذ گازی بر منحنی مشخصه ..... ۹۱
- شکل (۴-۱۸) تغییرات کسر حجمی اشباع در ضخامت‌های مختلف لایه نفوذی گاز در ولتاژ ۰/۴۵ ولت ..... ۹۲
- شکل (۴-۱۹) تغییرات چگالی جریان موضعی در ضخامت‌های مختلف لایه نفوذ گازی در ولتاژ ۰/۴۵ ولت ..... ۹۳
- شکل (۴-۲۰) چگالی جریان تولیدی در پیل سوختی با جریان ورودی تپشی بر حسب زمان ..... ۹۵
- شکل (۴-۲۱) اثر تغییر فرکانس تپش بر روی عملکرد پیل سوختی با کانال جریان درهم پیچیده ..... ۹۶
- شکل (۴-۲۲) اثر تغییر دامنه‌ی جریان تپشی بر روی عملکرد پیل سوختی با کانال جریان درهم پیچیده ..... ۹۷
- شکل (۴-۲۳) اثر تغییر دامنه‌ی جریان تپشی بر روی چگالی توان پیل سوختی با کانال جریان درهم پیچیده .. ۹۸
- شکل (۴-۲۴) مقایسه‌ی عملکرد پیل سوختی با کانال جریان درهم پیچیده با جریان ورودی تپشی (دامنه‌ی ۰/۶ و فرکانس ۵۰۰) در مقابل جریان پیوسته ( $f = 0$ ) (فشار متوسط ۷۰۰ پاسکال) ..... ۹۹
- شکل (۴-۲۵) مقایسه‌ی چگالی توان پیل سوختی با کانال جریان درهم پیچیده با جریان ورودی تپشی (دامنه‌ی ۰/۶ و فرکانس ۵۰۰) در مقابل جریان پیوسته ( $f = 0$ ) (فشار متوسط ۷۰۰ پاسکال) ..... ۹۹
- شکل (۴-۲۶) مقایسه‌ی کانتورهای غلظت مخلوط اکسیژن در لایه‌ی نفوذ گازی پیل سوختی با کانال جریان درهم پیچیده با جریان ورودی تپشی (دامنه‌ی ۰/۶ و فرکانس ۵۰۰) در مقابل جریان پیوسته ( $f = 0$ ) (فشار ۷۰۰ پاسکال)، ولتاژ ۰/۴۵ ولت ..... ۱۰۱

- شکل (۴-۲۷) مقایسه‌ی توزیع غلظت مخلوط اکسیژن در لایه‌ی کاتالیستی پیل سوختی با کانال جریان درهم‌پیچیده با جریان ورودی تپشی (دامنه‌ی ۰/۶ و فرکانس ۵۰۰ هرتز) در مقابل جریان پیوسته ( $f = 0$ ) ( فشار متوسط ۷۰۰ پاسکال) ، ولتاژ ۰/۴۵ ولت ..... ۱۰۲
- شکل (۴-۲۸) مقایسه‌ی کانتورهای کسر حجمی اشباع مایع در لایه‌ی نفوذ گازی پیل سوختی با کانال جریان درهم‌پیچیده با جریان ورودی تپشی ( دامنه‌ی ۰/۶ و فرکانس ۵۰۰ هرتز) در مقابل جریان پیوسته ( $f = 0$ ) ( فشار متوسط ۷۰۰ پاسکال) ، ولتاژ ۰/۴۵ ولت ..... ۱۰۴
- شکل (۴-۲۹) مقایسه‌ی توزیع چگالی جریان موضعی پیل سوختی با کانال جریان درهم‌پیچیده با جریان ورودی تپشی (دامنه‌ی ۰/۶ و فرکانس ۵۰۰ هرتز) در مقابل جریان پیوسته ( $f = 0$ ) ( فشار متوسط ۷۰۰ پاسکال) ، ولتاژ ۰/۴۵ ولت ..... ۱۰۵
- شکل (۴-۳۰) اثر جریان تپشی با دامنه‌های ۰/۶ - ۱/۰ و فرکانس ۵۰۰ هرتز بر روی توزیع سرعت ..... ۱۰۷
- شکل (۴-۳۱) مقایسه‌ی عملکرد پیل سوختی با کانال جریان درهم‌پیچیده با جریان ورودی تپشی (دامنه‌ی ۰/۶ و جریان پیوسته ( $f = 0$ ) ( فشار متوسط ۵۰۰ و ۶۰۰ پاسکال) ..... ۱۰۸
- شکل (۴-۳۲) مقایسه‌ی چگالی توان پیل سوختی با کانال جریان درهم‌پیچیده با جریان ورودی تپشی (دامنه-ی ۰/۶ و فرکانس ۵۰۰ هرتز) در مقابل جریان پیوسته ( $f = 0$ ) ( فشار متوسط ۵۰۰ و ۶۰۰ پاسکال) ..... ۱۰۹
- شکل (۴-۳۳) مقایسه‌ی عملکرد پیل سوختی با کانال جریان درهم‌پیچیده با جریان ورودی تپشی (دامنه‌ی ۰/۶ و فرکانس ۵۰۰ هرتز) و فشار متوسط ۵۰۰ پاسکال در مقابل جریان پیوسته با فشار ۷۰۰ پاسکال ..... ۱۱۰
- شکل (۴-۳۴) فشردگی غیر همگن لایه‌ی نفوذ گازی در پیل سوختی با میدان جریان درهم‌پیچیده ..... ۱۱۱
- شکل (۴-۳۵) فشردگی غیر همگن لایه‌ی نفوذ گازی در پیل سوختی با میدان جریان درهم‌پیچیده ..... ۱۱۳
- شکل (۴-۳۶) تأثیر فشردگی لایه‌ی نفوذ گازی بر روی عملکرد پیل سوختی با کانال جریان درهم‌پیچیده ..... ۱۱۴
- شکل (۴-۳۷) تأثیر فشردگی لایه‌ی نفوذ گازی بر روی توان پیل سوختی با کانال جریان درهم‌پیچیده ..... ۱۱۴
- شکل (۴-۳۸) تأثیر فشردگی لایه‌ی نفوذ گازی روی چگالی جریان موضعی پیل سوختی با کانال جریان درهم‌پیچیده، ولتاژ ۰/۷ ولت ..... ۱۱۵
- شکل (۴-۳۹) تأثیر فشردگی لایه‌ی نفوذ گازی بر روی توزیع غلظت اکسیژن در لایه‌ی کاتالیستی پیل سوختی با کانال جریان درهم‌پیچیده در ولتاژ ۰/۷ ولت ..... ۱۱۶

- شکل (۴-۴۰) تأثیر فشردگی لایه‌ی نفوذ گازی بر روی چگالی جریان موضعی پیل سوختی با کانال جریان درهم‌پیچیده در ولتاژ ۰/۵ ولت ..... ۱۱۷
- شکل (۴-۴۱) تأثیر فشردگی لایه‌ی نفوذ گازی بر توزیع کسر حجمی اشباع در لایه‌ی نفوذ گازی پیل سوختی با کانال جریان درهم‌پیچیده در ولتاژ ۰/۵ ولت ..... ۱۱۷
- شکل (۴-۴۲) تأثیر فشردگی لایه‌ی نفوذ گازی بر توزیع غلظت اکسیژن در لایه‌ی کالیستی پیل سوختی با کانال جریان درهم‌پیچیده در ولتاژ ۰/۵ ولت ..... ۱۱۸

### فهرست جدول ها

- جدول (۱-۱) انواع پیل‌های سوختی به همراه بعضی از مشخصات آن‌ها ..... ۵
- جدول (۲-۱) مزایا و معایب میدان‌های جریان ..... ۱۱
- جدول (۱-۴) ضرایب گسسته سازی ..... ۷۲
- جدول (۲-۴) بررسی استقلال از شبکه ..... ۸۰
- جدول (۳-۴) پارامترهای به کار برده شده در شبیه سازی به همراه مقادیر مربوطه ..... ۸۲
- جدول (۴-۴) مشخصات تپش‌های به کار رفته در این مطالعه ..... ۹۴
- جدول (۵-۴) مشخصات پارامترهای فشردگی لایه‌ی نفوذ گازی ..... ۱۱۲

## فهرست نمادها

$C$ .....	کسر جرمی.....
$g (m/s^2)$ .....	شتاب گرانش زمین.....
$D(m^2/s)$ .....	ضریب نفوذ.....
$F(C/mol)$ .....	ثابت فارادی.....
$I (A/cm^2)$ .....	چگالی جریان.....
$j$ .....	شاری جرمی فازی.....
$P(pa)$ .....	فشار.....
$R(j. mol^{-1}. K^{-1})$ .....	ثابت جهانی گازها.....
$s$ .....	کسر حجمی اشباع مایع.....
$i_0(A/ cm^2)$ .....	چگالی جریان تبادلگی.....
$N (k. m^{-2}. s^{-1})$ .....	شار جرمی.....
$\bar{m}_k (k. m^{-2}. s^{-1})$ .....	نرخ انتقال جرم بین سطحی.....
$J(s)$ .....	تابع لورت .....
$k_r$ .....	نفوذ پذیری نسبی.....
$K$ .....	نفوذ پذیری مطلق.....
$M(kg/mol)$ .....	وزن مولکولی هر گونه.....
$T(K)$ .....	دما.....
$u(m/s)$ .....	سرعت.....
$v(m/s)$ .....	سرعت.....
$x$ .....	مولفه ی مختصات در راستای $x$ .....
$y$ .....	مولفه ی مختصات در راستای $y$ .....
$V(V)$ .....	پتانسیل الکتریکی.....
$E(V)$ .....	پتانسیل معادل.....
$R_{ohmic}(\Omega)$ .....	مقاومت اهمی.....
$\eta(V)$ .....	افت پتانسیل.....
$\varepsilon$ .....	ضریب تخلخل.....
$C$ .....	ضریب اصلاح ادواکسیون.....
$\alpha$ .....	ضریب کلی انتقال آب.....

$\mu(pa.s)$	لزجت دینامیکی
$\tau$	ضریب خمیدگی
$\lambda$	حرکت پذیری نسبی فازها
$\theta_c(^{\circ})$	زاویه ی تماسی
$\sigma(N/m)$	تنش سطحی
$\rho(kg/m^3)$	چگالی
$\nu(m^2/s)$	لزجت سینماتیک
$\alpha_c$	ضریب انتقال بار کاتدی
$\Gamma$	ضریب نفوذ موثر
$g$	گاز
$l$	مایع
$sat$	اشباع
$H_2O$	آب
$O_2$	اکسیژن
$eff$	موثر
$c$	موئینگی
$w$	آب
$ref$	مرجع
$ave$	متوسط
$v$	بخار

# فصل ۱

مقدمه



## ۱-۱ مقدمه

در حال حاضر سوخت‌های فسیلی در حدود ۸۰ درصد از مصرف کل انرژی جهان را به خود اختصاص داده‌اند، که ادامه‌ی استفاده از آن‌ها دو مشکل عمده را به وجود می‌آورد، نخست اینکه منابع آن‌ها محدود می‌باشند و دیر یا زود به پایان خواهند رسید، مشکل دوم این است که مصرف این سوخت‌ها خسارات و صدمات جبران ناپذیر زیادی به محیط زیست؛ از قبیل بالا رفتن دمای زمین، تغییرات آب و هوایی، ذوب شدن یخ‌های قطبی، بالا آمدن سطح دریاها، باران‌های اسیدی، آلودگی هوا، سوراخ شدن لایه‌ی اوزون و غیره، وارد می‌سازد. این عوامل در کنار افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و درگیری‌های سیاسی از جمله دلایلی هستند که بسیاری از سیاستمداران، متخصصین انرژی و محیط زیست را در حرکت به سوی حفظ محیط زیست و افزایش کارایی سیستم انرژی وادار نموده است. بر این اساس هیدروژن یکی از بهترین گزینه‌ها برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی می‌باشد.

از جمله ویژگی‌هایی که هیدروژن را از دیگر سوخت‌ها متمایز می‌نماید، می‌توان به فراوانی، انتشار بسیار ناچیز آلاینده‌ها، برگشت‌پذیر بودن چرخه‌ی تولید و کاهش اثرات گلخانه‌ای اشاره نمود. سیستم انرژی هیدروژنی سیستمی دائمی، پایدار، فنا ناپذیر، فراگیر و تجدیدپذیر می‌باشد و پیش‌بینی می‌شود که در آینده‌ای نه چندان دور تولید و مصرف آن فراگیر شود؛ با این وجود نباید انتظار داشت که هیدروژن از همان ابتدا، از نظر قیمتی بتواند با سایر سوخت‌ها رقابت نماید. عمل تبدیل انرژی شیمیایی موجود در هیدروژن به انرژی الکتریکی توسط پیل سوختی انجام می‌پذیرد که متناسب با کاربرد و خواص ساختاری آن‌ها، پیل‌های سوختی خود به انواع مختلف تقسیم می‌شوند.

## ۱-۲ پیل سوختی

پیل‌های سوختی وسایل الکتروشیمیایی هستند که انرژی شیمیایی سوخت را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. برخلاف باتری‌ها که وسایل ذخیره‌ی انرژی بوده و واکنش‌گرها جزء لاینفک آن‌ها هستند، پیل‌های سوختی مادامی‌که با سوخت و اکسیدکننده تغذیه شوند، انرژی الکتریکی تولید می‌کنند. در مجموع می‌توان پیل سوختی را در شکل کلی به یک موتور احتراق داخلی تشبیه کرد که در آن انرژی شیمیایی سوخت به کار تبدیل می‌شود، حال اینکه پیل‌های سوختی مزیت‌های زیادی نسبت به موتورهای احتراق داخلی دارند. در موتور احتراق داخلی، فرآیند تبدیل انرژی چند مرحله‌ای بوده و مقدار آن وابسته به درجه‌ی حرارت دو منبع حرارتی سرد و گرم است. در حالی که پیل سوختی یک مبدل حرارتی هم‌دما بوده و محدودیت قانون کارنو را ندارد. نداشتن ارتعاشات و سر و صدا، هزینه‌ی تعمیر و نگهداری کم، تنوع سوخت و امکان تهیه‌ی آن (مانند هیدروژن) از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدید ناپذیر و مهم‌تر از همه آلودگی کم را می‌توان از دیگر مزایای پیل سوختی به حساب آورد.

به طور کلی هر پیل سوختی مانند شکل (۱-۱)، شامل یک الکتروود کاتد<sup>۱</sup> و یک الکتروود آند<sup>۲</sup> بوده که در بین آن‌ها الکترولیت<sup>۳</sup> قرار دارد و این مجموعه بین دو صفحه‌ی توزیع‌کننده<sup>۴</sup>ی جریان قرار گرفته است. سوخت و اکسیدکننده توسط این صفحات شیاردار روی لایه‌های نفوذی گاز<sup>۵</sup> توزیع می‌شوند. سوخت و اکسیدکننده از طریق این کانال‌ها وارد پیل سوختی شده و با وقوع واکنش‌های اکسیداسیون و احیاء روی لایه‌های نازک کاتالیست<sup>۶</sup> واقع بر روی الکتروودها، جریان الکتریکی تولید می‌شود.

<sup>۱</sup> Cathode

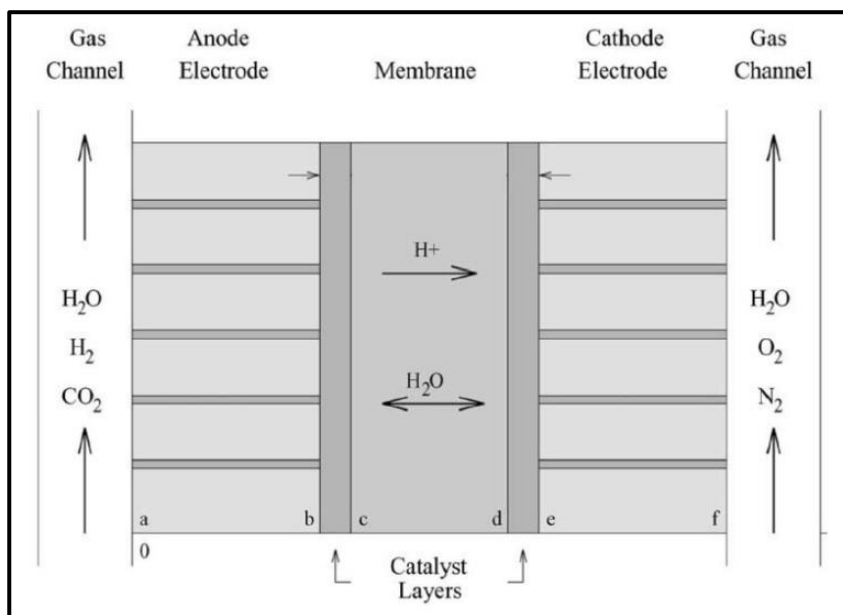
<sup>۲</sup> Anode

<sup>۳</sup> Electrolyte

<sup>۴</sup> Distributor

<sup>۵</sup> Gas diffusion layer (GDL)

<sup>۶</sup> Catalyst



شکل (۱-۱) شماتیک پیل سوختی

جریان تولید شده در پیل سوختی، جریانی مستقیم و با ولتاژ کم است، از این رو امکان استفاده مستقیم از آن در بسیاری از وسایل الکتریکی وجود دارد. البته بسته به نیاز می‌توان پیل‌های سوختی را به صورت سری و یا موازی به یکدیگر متصل نمود تا یک استک<sup>۱</sup> پیل سوختی را تشکیل دهند. همچنین در صورت نیاز به جریان متناوب می‌توان با استفاده از یک مبدل الکتریکی، جریان مستقیم پیل سوختی را به متناوب تبدیل کرد. پیل‌های سوختی را می‌توان بر اساس دمای کارکردی، نوع واکنشگرها، نوع یون عبوری از الکترولیت و یا نوع الکترولیت به کار رفته در آن‌ها تقسیم بندی کرد، ولی معمولاً تقسیم بندی بر اساس نوع الکترولیت به کار رفته در آن‌ها انجام می‌شود و اسم این پیل‌ها از همین‌جا گرفته شده است. در جدول (۱-۱) پیل‌های سوختی متداول به همراه بعضی از مشخصات آن‌ها آورده شده است.

<sup>۱</sup> Stack

جدول (۱-۱) انواع پیل‌های سوختی به همراه بعضی از مشخصات آنها

اکسید جامد (SOFC)	پلیمری (PEMFC)	آلکالین (AFC)	فسفریک اسید (PAFC)	کربنات مذاب (MCFC)	نوع پیل سوختی مشخصه
$O_2^-$	$H^+$	$OH^-$	$H^+$	$CO_3^-$	یون مبادله کننده
۶۰۰ - ۱۰۰۰	۵۰ - ۱۰۰	۵۰ - ۲۰۰	۲۲۰	۶۵۰	درجه حرارت کاری ( $^{\circ}C$ )
۱/۵ - ۲/۶	۲/۶ - ۳/۸	۰/۷ - ۸/۱	۰/۸ - ۱/۹	۰/۱ - ۱/۵	چگالی توان ( $kw/m^2$ )
داخلی یا خارجی	خارجی	خارجی	خارجی	داخلی یا خارجی	نوع مبدل سوخت
۵۰ - ۶۰	۴۰ - ۵۰	۴۵ - ۶۰	۴۰ - ۵۰	۵۰ - ۶۰	بازده (%)
ساعت	ثانیه - دقیقه	دقیقه	ساعت	ساعت	حدود زمان شروع به کار

با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول (۱-۱)، مشاهده می‌شود که پیل سوختی پلیمری<sup>۱</sup> نسبت به سایر انواع پیل سوختی دارای چگالی قدرت<sup>۲</sup> بالاتر و درجه‌ی حرارت کاری پائین تری می‌باشد. ویژگی مهم دیگر پیل سوختی پلیمری زمان شروع به کار کم آن است که آن را برای کاربردهای روزمره مثل حمل و نقل و استفاده در وسایل الکتریکی قابل حمل بسیار مناسب می‌کند.

### ۳-۱ پیل سوختی پلیمری

با توجه به استفاده‌ی روز افزون از اتومبیل برای حمل و نقل و حجم بالای آلاینده‌های تولید شده توسط سوخت‌های فسیلی، لازم است که موتورهای احتراق داخلی را با مبدل‌های انرژی کارآمدتری جایگزین نمود که

<sup>۱</sup> Polymer fuel cell

<sup>۲</sup> Power density