

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک  
گروه طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد  
گرایش ساخت و تولید

تهیه الکتروولیت لوله شکل پایه زیرکونیا به روش لایه نشانی الکتروفورتیک

نگارش  
سوده دودانگه‌ای

اساتید راهنما  
دکتر مجتبی قطعی  
دکتر سید هادی قادری

بهمن ۱۳۹۲

تقدیم بہ

پدرم، روشنیِ زندگیم؛

مادرم، گرمیِ وجودم؛

و برادرم، امیدِ بودنم؛

بہ پاسِ محبتِ های بی‌دیشان کہ ہرگز فروکش نمی‌کند.

باسپاس فراوان از لطف خدای مهربان؛

لازم می‌دانم از دو استاد بزرگوارم، آقایان دکتر مجتبی قلعی و دکتر سید مهدی قادری که با اراده‌ی رهنمودها و پیشنهادهایشان، در تمامی مراحل اجرای پایان‌نامه مرا حمایت و تشویق نمودند و با نظرهای اصلاحی ارزنده‌ی خود، ضمن دلگرمی بنده موجب تکمیل این اثر شدند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از آقایان مهندس حسن صالحی و مهندس محسن قربان که همکاری لازم در جهت انجام تعدادی از آزمون‌ها را انجام دادند کمال تشکر را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب سوده دودانگه‌ای دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-ساخت و تولید دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه تهیه الکترولیت لوله شکل پایه زیرکونیا به روش لایه‌نشانی الکتروفوریتیک تحت راهنمایی دکتر مجتبی قطعی و دکتر سید هادی قادری متعهد می‌شوم

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 صنعتی شاهرود می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است 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، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

یک پیل سوختی سیستمی است که انرژی شیمیایی سوخت را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کند. در میان انواع پیل‌های سوختی، این پیل سوختی اکسید جامدی (SOFC) است که تمامی اجزای آن کاملاً در حالت جامدند و بر پایه‌ی الکترولیتی اکسید جامدی می‌باشد که به صورت بالقوه دارای بیشترین بازده انرژی با کمترین میزان اتلاف است و گستره‌ی بزرگی از سوخت‌ها از هیدروژن تا گازهای طبیعی، گاز زغال سنگ و بنزین قابلیت تبدیل به الکتریسیته را دارند. عملکرد و دوام پیل‌های سوختی اکسید جامدی به شدت به ریزساختار و شکل اجزای پیل بستگی دارد. یک تک سل (سلول) اکسید جامدی از یک آند و یک کاتد که توسط یک الکترولیت اکسید جامدی (یک رسانای یونی) جدا شده‌اند، تشکیل می‌شود. الکترولیت جامد باید عایق الکترونیکی (مانع تماس الکترون‌ها و حفره‌های الکترون) و غیر قابل نفوذ گاز (به شکل یک غشای چگال) باشد.

بیشترین الکترولیت مورد تحقیق، بر پایه‌ی رساناهای یونی اکسیژن نظیر زیرکونیای پایدار توسط ایتریا (YSZ)، با ترکیب ۸٪ مول ایتریا، ۹۲٪ مول زیرکونیا، با نام 8YSZ) می‌باشد. پیل‌های سوختی اکسید جامدی بر پایه‌ی YSZ، برای بازدهی بهتر معمولاً در دماهای بالا (۷۵۰-۱۰۰۰°C) کار می‌کنند. ولی برای کاهش هزینه‌ی مواد و افزایش دوام اجزای سیستم، مطلوب است تا دمای کارکرد را کاهش داد، بنابراین الکترولیت باید تا حد ممکن نازک باشد. برای ساخت الکترولیت نازک YSZ روش‌های بسیاری نظیر ریخته‌گری نواری، لایه‌نشانی بخار الکتروشیمیایی (EVD)، لایه‌نشانی بخار فیزیکی (PVD)، و به تازگی روش لایه‌نشانی الکتروفوریتیک (EPD) به کار رفته است. به دلیل اینکه روش‌های EVD و PVD گران تمام می‌شوند، همچنین در روش‌های ارزانتر برای دستیابی به دقت قابل کنترل و کیفیت تکرارشدنی دشواری‌هایی وجود دارد، روش الکتروفوریتیک به عنوان کاندیدای برجسته با قابلیت عملی بالا تبدیل شده است. علاوه بر کاربردهای متداول این روش نظیر ایجاد پوشش‌های سرامیکی مقاوم به خوردگی و ضد اکسایش، تمایل بسیاری برای استفاده از روش الکتروفوریتیک در وسایل ریزالکترونیکی پیشرفته و پیل‌های سوختی اکسید جامدی بوجود آمده است. بنابراین روش الکتروفوریتیک برای ساخت الکترولیت لوله‌ای در پیل سوختی اکسید جامدی در پروژه‌ی حاضر انتخاب شد.

در طی فرآیند الکتروفوریتیک، ذرات باردار در دوغاب تحت یک میدان الکتریکی به سمت الکتروود با بار مخالف حرکت می‌کنند. سپس، این ذرات روی الکتروود لخته شده و یک لایه‌ی چگال تشکیل می‌دهند. لازمه‌ی اساسی کاربرد یک الکتروفوریتیک موفق، تهیه‌ی یک دوغاب پایدار در یک حلال مناسب با پتانسیل زتای بالا می‌باشد. در این پروژه، از روش الکتروفوریتیک برای ساخت لایه‌ی نازک YSZ روی زیرلایه‌ی میله‌ای از جنس گرافیت استفاده شده است. در این فرآیند، ایزوپروپانول به عنوان حلال، ۴-هیدروکسی بنزوئیک اسید به عنوان پراکنده‌ساز و پلی وینیل بوتیرال به عنوان چسب در دوغابی از پودر YSZ به کار رفته است. هدف اصلی پروژه احراز شرایط مناسب برای تهیه‌ی دوغاب پایدار، به منظور دستیابی به لوله‌های ته بسته‌ی متعدد بدون ترک، پس از سوزاندن زیرلایه‌ی گرافیتی، خشک کردن لوله‌های سرامیکی خام و تفجوشی آنها تا استحکام بالا می‌باشد. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کلی بهترین نمونه‌ی قابل ساخت که دارای بالاترین ویژگی‌های ساختاری و شرایط ساخت باشد، نمونه‌ای است که با دوغابی حاوی چسب و به صورت کامپوزیتی از پودرهای 3YSZ و 8YSZ ساخته شود.

کلمات کلیدی: لایه‌نشانی الکتروفوریتیک، پیل سوختی، الکتروولیت، پودر زیرکونیا

مقالات مستخرج از پایان نامه

- S.Dodangei, M.Ghatee, S.H. Ghaderi, “**Evaluation of Mechanical Properties of Yttria Stabilized Zirconia Tubular Thin Films Prepared By Electrophoretic Deposition**” UFGNSM 2013, Tehran, Iran.



## فهرست عنوان‌ها

|   |    |
|---|----|
| فصل ۱ مقدمه.....  | ۱  |
| ۱-۱ معرفی پیل سوختی.....                                      | ۲  |
| ۱-۱-۱ نیاز به پیل سوختی.....                                  | ۲  |
| ۲-۱-۱ پیشینه تاریخی.....                                      | ۲  |
| ۳-۱-۱ تئوری عملکرد پیل سوختی.....                             | ۳  |
| ۴-۱-۱ انواع پیل‌های سوختی.....                                | ۴  |
| ۵-۱-۱ مواد مورد نیاز در ساخت اجزای پیل سوختی.....             | ۶  |
| ۶-۱-۱ ساختمان پیل سوختی.....                                  | ۷  |
| ۷-۱-۱ روش‌های ساخت لایه نازک.....                             | ۸  |
| ۲-۱ مروری بر مطالعات گذشته.....                               | ۹  |
| ۱-۲-۱ معرفی تحقیقات مشابه.....                                | ۱۰ |
| ۲-۲-۱ معرفی تحقیق حاضر.....                                   | ۱۶ |
| فصل ۲ تئوری فرآیند.....                                       | ۱۹ |
| ۱-۲ مکانیزم فرآیند الکتروفوریتیک.....                         | ۲۰ |
| ۱-۱-۲ مکانیزم لخته شدن در اثر انباشتگی ذره.....               | ۲۱ |
| ۲-۱-۲ مکانیزم خنثی سازی بار ذره.....                          | ۲۱ |
| ۳-۱-۲ مکانیزم انعقاد الکتروشیمیایی ذرات.....                  | ۲۱ |
| ۴-۱-۲ مکانیزم نازک شدن و انحراف لایه‌ی دوگانه‌ی الکتریکی..... | ۲۱ |
| ۲-۲ پارامترهای مؤثر در الکتروفوریتیک.....                     | ۲۲ |
| ۱-۲-۲ پارامترهای مربوط به دوغاب.....                          | ۲۳ |
| ۱-۱-۲-۲ اندازه ذره.....                                       | ۲۳ |
| ۲-۱-۲-۲ ثابت دی‌الکتریک حلال.....                             | ۲۳ |
| ۳-۱-۲-۲ رسانایی دوغاب.....                                    | ۲۴ |
| ۴-۱-۲-۲ ویسکوزیته‌ی دوغاب.....                                | ۲۵ |
| ۵-۱-۲-۲ پتانسیل زتلا.....                                     | ۲۵ |
| ۶-۱-۲-۲ پایداری دوغاب.....                                    | ۲۶ |
| ۲-۲-۲ پارامترهای مربوط به فرآیند.....                         | ۲۷ |

|    |   |         |
|----|---|---------|
| ۲۷ | ..... تأثیر زمان لایه‌نشانی               | ۱-۲-۲-۲ |
| ۲۷ | ..... ولتاژ اعمالی                        | ۲-۲-۲-۲ |
| ۲۷ | ..... غلظت جسم جامد در دوغاب              | ۳-۲-۲-۲ |
| ۲۸ | ..... رسانایی الکتروود زیرلایه            | ۴-۲-۲-۲ |
| ۲۸ | ..... خصوصیات دوغاب الکتروفوریتیک         | ۳-۲     |
| ۲۸ | ..... نقش چسب‌های پلیمری در الکتروفوریتیک | ۴-۲     |
| ۲۹ | ..... خشک‌کردن لایه‌ی راسب شده            | ۵-۲     |

### فصل ۳ روش آزمایشگاهی ..... ۳۱

|    |  |     |
|----|--|-----|
| ۳۲ | ..... مواد اولیه، ساخت دوغاب و شیوه‌ی انجام آزمایش | ۱-۳ |
| ۳۶ | ..... خشک‌کردن                                     | ۲-۳ |
| ۳۸ | ..... پخت و تف‌جوشی                                | ۳-۳ |
| ۳۹ | ..... آماده‌سازی نمونه برای انجام آزمون‌ها         | ۴-۳ |
| ۴۰ | ..... روش انجام آزمون پتانسیل زتا                  | ۵-۳ |
| ۴۱ | ..... اندازه‌گیری وزن لایه‌نشانی                   | ۶-۳ |
| ۴۱ | ..... آزمون پراش اشعه ایکس (XRD)                   | ۷-۳ |
| ۴۱ | ..... اندازه‌گیری میکروسختی                        | ۸-۳ |
| ۴۲ | ..... آزمون نانوفوروفتگی                           | ۹-۳ |

### فصل ۴ نتایج و بحث ..... ۴۷

|    |  |     |
|----|--|-----|
| ۴۸ | ..... شرایط گرافیت‌های مختلف پس از سوختن در کوره | ۱-۴ |
| ۴۹ | ..... شرایط ایده‌آل زمان و ولتاژ                 | ۲-۴ |
| ۵۱ | ..... شرایط تف‌جوشی                              | ۳-۴ |
| ۵۳ | ..... نتایج اندازه‌گیری پتانسیل زتا              | ۴-۴ |
| ۵۳ | ..... نتایج اندازه‌گیری وزن لایه‌نشانی           | ۵-۴ |
| ۵۵ | ..... نتایج آزمون میکروسکوپ الکترونی (SEM)       | ۶-۴ |
| ۵۷ | ..... نتایج آزمون پراش اشعه ایکس (XRD)           | ۷-۴ |
| ۵۸ | ..... نتایج اندازه‌گیری میکروسختی                | ۸-۴ |
| ۶۰ | ..... نتایج بررسی نانوفوروفتگی                   | ۹-۴ |

### فصل ۵ نتیجه‌گیری ..... ۶۹

|    |                         |     |
|----|-------------------------|-----|
| ۷۰ | ..... نتیجه‌گیری        | ۱-۵ |
| ۷۲ | ..... پیشنهاد ادامه کار | ۲-۵ |



## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ شماتیک پیل سوختی (intechopen.com)..... ۳
- شکل ۲-۱ دماها و عملکردهای متفاوت انواع پیل‌های سوختی (fuelcells.org)..... ۵
- شکل ۳-۱ طراحی لوله‌ای پیل سوختی (netl.doe.gov)..... ۷
- شکل ۴-۱ طراحی صفحه‌ای پیل سوختی (aki.che.tohoku.ac.jp)..... ۷
- شکل ۵-۱ شماتیک سلول الکتروفوریک مورد استفاده در آزمایش..... ۱۲
- شکل ۶-۱ شماتیک توده پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای..... ۱۶
- شکل ۱-۲ شماتیک فرآیند الکتروفوریک..... ۲۰
- شکل ۲-۲ شماتیک مکانیزم لایه‌نشانی ناشی از نازک شدن و انحراف..... ۲۲
- شکل ۳-۲ شماتیک مفهوم پتانسیل زتا [۲۹]..... ۲۶
- شکل ۴-۲ شماتیک حالت‌های احتمالی مختلف پوشش..... ۲۹
- شکل ۱-۳ تعدادی از تجهیزات مورد استفاده؛ الف: همزن مغناطیسی..... ۳۵
- شکل ۲-۳ شماتیک سلول الکتروفوریک..... ۳۶
- شکل ۳-۳ نمونه‌های ترک خورده حین خشک شدن..... ۳۷
- شکل ۴-۳ نحوه‌ی خشک کردن نمونه‌ها در محیط ایزوپروپانول..... ۳۷
- شکل ۵-۳ کوره (paragon industries, L.P.)..... ۳۸
- شکل ۶-۳ کوره (Azar Furnaces, Molybdenum Disilicide)..... ۳۹
- شکل ۷-۳ دستگاه پولیش (METCO)..... ۴۰
- شکل ۸-۳ دستگاه سختی‌سنج و بکرز..... ۴۲
- شکل ۹-۳ طرح شماتیک از، الف: یک نمونه منحنی نیرو-جابجایی..... ۴۳
- شکل ۱۰-۳ سیستم TriboScope (Hysitron Inc. USA)..... ۴۴

- شکل ۳-۱۱ شماتیک مفهوم زبری سطح  $R_a$ ،  $R_{max}$ ، RMS..... ۴۴
- شکل ۳-۱۲ نمودار تابع بارگذاری-باربرداری تست Nanoindentation..... ۴۵
- شکل ۴-۱-۴ گرافیت‌های اولیه مورد استفاده به عنوان کاتد... ۴۸
- شکل ۴-۲ نمونه‌ی گرافیت خالص؛ الف: پس از لایه‌نشانی..... ۴۹
- شکل ۴-۳ نمونه‌های آسیب دیده ناشی از دمای بالای تف‌جوشی..... ۵۲
- شکل ۴-۴ نمونه‌های سالم پس از تف‌جوشی در دمای مناسب..... ۵۲
- شکل ۴-۵ رابطه‌ی وزن لایه‌نشانی با ولتاژ در زمان‌های متفاوت..... ۵۴
- شکل ۴-۶ تصاویر SEM نمونه‌های تف‌جوشی شده؛ الف: 3YSZ..... ۵۵
- شکل ۴-۷ تصاویر SEM مربوط به دو نمونه‌ی 5YSZ؛..... ۵۶
- شکل ۴-۸ اندازه‌گیری XRD نمونه‌های تف‌جوشی شده..... ۵۷
- شکل ۴-۹ الگوهای XRD نمونه‌های الف: 25-3YSZ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۰ تفاوت اثر فروشونده در دو نمونه‌ی..... ۶۰
- شکل ۴-۱۱ تصویر ضخامت از مقطع نمونه..... ۶۰
- شکل ۴-۱۲ سختی متوسط نمونه‌های تست شده..... ۶۱
- شکل ۴-۱۳ مدول الاستیک و سفتی متوسط نمونه‌های تست شده..... ۶۱
- شکل ۴-۱۴ منحنی‌های نیرو-جابجایی نمونه‌ها (Triboscope®3.5PL)..... ۶۲
- شکل ۴-۱۵ تصویر سه بعدی از سطح نمونه..... ۶۳
- شکل ۴-۱۶ تصویر AFM و اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ی 3YSZ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۷ تصویر AFM و اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ی 5YSZ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۸ تصویر AFM و اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ی 8YSZ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۹ تصویر AFM و اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ی (3,8)YSZ..... ۶۷

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱ مزایا و معایب بعضی روش‌های مورد استفاده..... ۸
- جدول ۱-۲ خصوصیات فیزیکی حلال‌های آلی [۲۷]..... ۲۴
- جدول ۲-۲ رابطه‌ی پتانسیل زتا با درجات پایداری سیستم کلئیدی..... ۲۵
- جدول ۱-۳ خصوصیات مکانیکی پودرهای زیرکونیای پایدار شده [۳۳] ۳۳
- جدول ۲-۳ خصوصیات ایزوپروپانول [۳۴]..... ۳۳
- جدول ۳-۳ خصوصیات ۴-هیدروکسی بنزویک اسید [۳۵]..... ۳۴
- جدول ۴-۳ درصد وزنی اجزای دوغاب..... ۳۴
- جدول ۱-۴ شرایط ولتاژ و زمان ایده‌آل برای قطره‌های کاتد .. ۵۰
- جدول ۲-۴ شرایط ولتاژ و زمان ایده‌آل برای قطره‌های .. ۵۱
- جدول ۳-۴ مقادیر متوسط پتانسیل زتا و قابلیت تحرک الکتروفورتیک..... ۵۳
- جدول ۴-۴ مقادیر پارامترهای ثابت معادله (۱-۳)..... ۵۴
- جدول ۵-۴ اندازه‌ی متوسط دانه‌ها..... ۵۶
- جدول ۶-۴ میکروسختی اندازه‌گیری شده (GPa)..... ۵۹

## فهرست نشانه‌ها

|              |                       |            |                   |
|--------------|-----------------------|------------|-------------------|
| $C$          | غلظت دوغاب            | $E$        | پتانسیل پیل سوختی |
| $\epsilon_0$ | ثابت دی‌الکتریک خلأ   | $E_0$      | پتانسیل استاندارد |
| $\epsilon_r$ | ثابت دی‌الکتریک حلال  | $T$        | دما               |
| $\zeta$      | پتانسیل زتا           | $R$        | ثابت گازها        |
| $\eta$       | ویسکوزیته             | $F$        | ثابت فارادی       |
| $L$          | فاصله‌ی بین الکترودها | $P_{H_2}$  | فشار جزئی هیدروژن |
| $t$          | زمان لایه‌نشانی       | $P_{O_2}$  | فشار جزئی اکسیژن  |
|              |                       | $P_{H_2O}$ | فشار جزئی آب      |

## فصل ۱ مقدمه



در این فصل پیشینه‌ای از پیل‌های سوختی، معرفی آن، انواع پیل‌ها و روش‌های ساخت آن را به اختصار بیان می‌کنیم. سپس با معرفی روش الکتروفوریتیک و خصوصیات آن ادامه داده و به مرور کارهای صورت گرفته در زمینه تولید اجزای پیل سوختی به این روش می‌پردازیم.

## ۱-۱ معرفی پیل سوختی

### ۱-۱-۱ نیاز به پیل سوختی

همان‌طور که نیاز به منابع انرژی پاک و کارآمد بیشتر مشهود می‌شود، پیل‌های سوختی به عنوان راه‌حلی مناسب در تولید انرژی الکتریکی پدیدار می‌شوند.

در مقایسه با فن‌آوری‌های تولید انرژی معمول، پیل‌های سوختی قابلیت کاهش انتشار  $\text{CO}_2$  از ۴۰٪-۶۰٪ و  $\text{NO}_x$  از ۵۰٪-۹۰٪ را دارا می‌باشند. پیل‌های سوختی اکسید جامدی<sup>۱</sup> بازده الکتریکی بیش از ۵۰٪ را نشان می‌دهند و برخلاف توربین‌های بخار و گاز، پیل‌های سوختی وقتی در اندازه‌های کوچکتر ساخته شوند، افت بازده را متحمل نمی‌شوند [۱].

### ۲-۱-۱ پیشینه تاریخی

پیل‌های سوختی اکسید جامدی دارای تاریخچه‌ای طولانی و متمایز هستند. سر ویلیام گروو<sup>۲</sup> پیل سوختی را در سال ۱۸۳۹، با استفاده از سولفوریک اسید به عنوان الکترولیت اختراع کرد. اولین الکترولیت جامد  $\text{YSZ}$ <sup>۳</sup> در اواخر قرن نوزده میلادی توسط نرنست<sup>۴</sup> ابداع شد و شاتکی<sup>۵</sup> بر روی جنبه‌های نظری الکترولیت‌های جامد بررسی‌هایی انجام داد. اولین پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از یک الکترولیت سرامیکی، توسط بور<sup>۶</sup> و پریس<sup>۷</sup> در سال ۱۹۳۷ ساخته شد. این پیل متشکل از یک الکترولیت پایه زیرکونیا، و کک و اکسید آهن به ترتیب به عنوان آند و کاتد بود.

<sup>۱</sup> Solid Oxid Fuel Cells(SOFCs)

<sup>۲</sup> Sir William Grove

<sup>۳</sup> Ytria Stabilized Zirconia

<sup>۴</sup> Nernst

<sup>۵</sup> Schottky

<sup>۶</sup> Baur

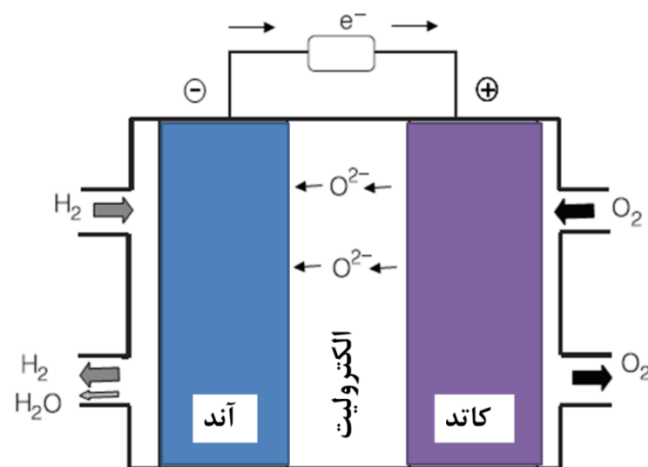
<sup>۷</sup> Preis

پیل‌های سوختی سرامیکی تا زمانی که پیشرفت‌هایی در زمینه‌ی طراحی انباره‌ای<sup>۱</sup> و فرآیندهای سرامیکی گسترش یابد، به حاشیه رفته بودند. اولین پیل سوختی اکسید جامدی مدرن در اوایل دهه‌ی ۶۰ میلادی ساخته شد. در ۱۹۶۲ ویسبارت<sup>۲</sup> و روکا<sup>۳</sup> در شرکت وستینگ هاوس، یک سلول با الکترولیت زیرکونیای پایدارشده توسط کلسیا<sup>۴</sup> و با استفاده از دو الکتروود پلاتینیوم و گاز طبیعی به‌عنوان سوخت ساختند [۱].

از زمان ابداع پیل سوختی، هزینه‌های تولید بالا و فراوانی نسبی سوخت‌های فسیلی مانع به‌کارگیری تجاری از فناوری پیل سوختی شده‌اند. شناخته‌شده‌ترین استفاده از پیل‌های سوختی در مأموریت‌های فضایی جمینای<sup>۵</sup> و آپولو<sup>۶</sup> بوده است [۲].

### ۳-۱-۱ تئوری عملکرد پیل سوختی

یک پیل سوختی متشکل از دو الکتروود (آند و کاتد) است که توسط یک الکترولیت از هم جدا شده‌اند (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱ شماتیک پیل سوختی (intechopen.com)

<sup>1</sup> Stack design

<sup>2</sup> Weissbart

<sup>3</sup> Ruka

<sup>4</sup> Calcia Stabilized Zirconia

<sup>5</sup> Gemini

<sup>6</sup> Apollo

هیدروژن به یک سمت سل (آند) و اکسیژن به سمت دیگر (کاتد) تغذیه می‌گردد و پتانسیل الکتروشیمیایی برقرار می‌شود. برای پیل سوختی نشان داده شده، پتانسیل توسط رابطه‌ی نرنست بدست می‌آید:

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} \right] + \frac{RT}{2F} \ln \left[ P_{O_2}^{1/2} \right] \quad (1-1)$$

که در آن  $E$  پتانسیل بدست‌آمده،  $E_0$  پتانسیل استاندارد واکنش،  $R$  ثابت گازها،  $T$  دما،  $F$  ثابت فارادی،  $P_{H_2}$  فشار جزئی هیدروژن در آند،  $P_{H_2O}$  فشار جزئی آب در آند، و  $P_{O_2}$  فشار جزئی اکسیژن در کاتد است [۱].

این پتانسیل الکتروشیمیایی موجب می‌شود یون‌های باردار از یک سمت پیل به سمت دیگر از طریق الکتروولیت حرکت کنند. با اتصال دو طرف پیل به یک وسیله‌ی رسانای الکتریکی، حرکات یونی منجر به استخراج توان الکتریکی می‌شود. به طور معمول هیدروژن از سوخت‌هایی نظیر گاز طبیعی، و اکسیژن از هوا تأمین می‌شود و محصول واکنش آن آب است [۳].

#### ۱-۱-۴ انواع پیل‌های سوختی

پیل سوختی انواع مختلفی دارد، اما مهم‌ترین آنها شامل پیل سوختی قلیایی<sup>۱</sup>، پلیمری<sup>۲</sup>، متانول مستقیم<sup>۳</sup>، کربنات مذاب<sup>۴</sup>، اسید فسفریک<sup>۵</sup> و اسید جامد می‌باشند. تعدادی از این نوع پیل‌های سوختی امروز به‌صورت تجاری در دسترس هستند. هر نوع پیل سوختی ویژگی‌های منحصر به فرد خود را نظیر دمای عملکرد متفاوت، کاتالیزور و الکتروولیت متفاوت دارد. شاخصه‌های عملکردی یک پیل سوختی، کاربردهای آن را تعیین می‌کند، به‌عنوان مثال پیل‌های سوختی دمای پایین پلیمری و متانول برای تولید برق در وسایط نقلیه‌ی مسافری و جرثقیل‌های کوچک به‌کار می‌روند، در حالیکه از پیل‌های سوختی دمای بالای کربنات مذاب و اسید فسفریک در ایستگاه‌های تولید برق استفاده

<sup>1</sup> Alkaline Fuel Cell (AFC)

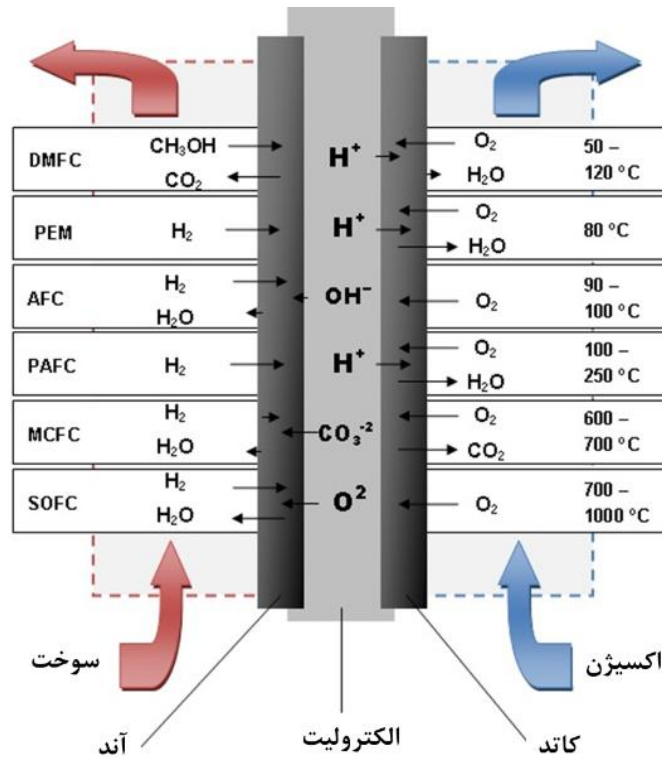
<sup>2</sup> Polymer Electrolyte Membrane (PEM)

<sup>3</sup> Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)

<sup>4</sup> Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

<sup>5</sup> Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)

می‌شود. شکل ۲-۱ تفاوت دماهای عملکرد پیل‌های مختلف و کارکردهای متفاوت آن‌ها را نشان می‌دهد [۴].



شکل ۲-۱ دماها و عملکردهای متفاوت انواع پیل‌های سوختی (fuelcells.org)

پیل‌های سوختی اکسید جامد دمای بالا قادر به تبدیل داخلی<sup>۱</sup> هیدروکربن‌های سبک نظیر گاز طبیعی هستند، اگرچه با تبدیل خارجی می‌توان از سوخت‌های سنگین‌تر نظیر بنزین و سوخت جت نیز بهره برد. این پیل‌ها مناسب برای استفاده در ایستگاه‌های بزرگ تولید برق هستند، همچنین از آن‌ها به‌عنوان واحد کمکی تولید توان در وسایط نقلیه، خانه و آپارتمان‌ها در ایالات متحده، ژاپن و آلمان استفاده شده است [۴]. علاوه بر پیل‌های سوختی ذکر شده در بالا، انواع دیگری از پیل‌های سوختی نظیر پیل‌های بازمولد<sup>۲</sup> و میکروبی<sup>۳</sup> وجود دارند که در آزمایشگاه‌ها در حال توسعه و بررسی می‌باشند و تاکنون کاربرد تجاری و صنعتی نیافته‌اند [۴].

<sup>1</sup> Internal Reform

<sup>2</sup> Regenerative Fuel Cells (RFCs)

<sup>3</sup> Microbial Fuel Cells (MFCs)