Journal Of Energy Conversion
Volume: 7, Issue: 3, 1399

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹

بررسی عملکرد پیل های سوختی اکسید جامد و نقش نانو تکنولوژی در ساخت آن

عبدالکریم افروزه *

* استادیار مجتمع آموزش عالی لارستان، لار، ایران

دریافت: مهر ۹۹، بازنگری: آذر ۹۹، پذیرش: آذر ۹۹

چکیده

نانوتکنولوژی در توسعه و بهبود عملکرد پیل های سوختی اکسید جامد (SOFC) به خوبی استفاده می شود. دمای عملیاتی بالای SOFC (۷۰۰-۹۰۰ درجه سلسیوس) منجر به نواقصی جدی در ارتباط با عملکرد کلی و دوام آنها شده است. از این رو، دمای عملیاتی بالا به دامنه دمای متوسط تقریبا ۴۴-۷۰۰ سلسیوس کاهش یافته است که عملکرد را بهبود بخشیده است و متعاقبا SOFC را به عنوان منابع انرژی قابل حمل تجاری کرده است. با این حال، در دمای کاهش یافته، چالش هایی مانند افزایش مقاومت داخلی اجزای پیل سوختی بوجود می آیند. اگر چه، این مساله نمی تواند به اندازه مشکلاتی که در دمای بالا بوجود می آید، جدی باشد، هنوز به شکل قابل توجهی بر عملکرد SOFC تاثیر می گذارد. این مقاله به کار محققان در زمینه کاربرد نانوتکنولوژی در ساخت SOFC از طریق روش های متمایز می پردازد. این روش ها با موفقیت مقاومت داخلی را حذف یا حداقل کاهش داده اند و بهبود قابل توجه در تراکم انرژی SOFC در دماهای کاهش یافته را نشان داده اند.

* **عهده‌دار مکاتبات:** afroozeh@lar.ac.ir

کلمات کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد، توسعه مواد، نانوماده ها، عملکرد پیل سوختی.

۱- مقدمه

پیل های سوختی نسبت به سیستم های دیگر به دلیل بازده برقی بالا و انعطاف پذیری سوخت مزیت دارند. واکنش های الکتروشیمیایی بهینه هستند و از طریق تامین هیدروژن و اکسیژن (معمولا هوا) صورت می گیرند. در نتیجه، اکسایش الکتروشیمایی سوخت هیدروژن را می توان با عملکرد بالا بدست آورد. مهم ترین عاملی که بر عملکرد پیل سوختی تاثیر می گذارد ماده مورد استفاده به عنوان کاتالیزگر است. کاتالیزگرها واکنش های را در آنود و کاتود سرعت می بخشند. انواع مختلفی از پیل های سوختی وجود دارندکه بسته به ماهیت الکترولیت طبقه بندی می شوند.هر نوع از پیل سوختی نیازمند مواد و سوخت های خاصی برای کاربردهای مختلف است. انواع پیل های سوختی به نامهای پیل سوختی غشا پلیمری[1] (PEMFC)، پیل

[1] Proton-exchange membrane fuel cell

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

سوختی متانولی مستقیم ۲ (DMFC)، پیل سوختی اسید فسفریک۳ (PAFC)، پیل سوختی آلکالین۴ (AFC)، پیل سوختی کربنات مذاب۵ (MCFC) و پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) معروف می باشند. امروزه، بسیاری از محققان بر ساخت و بهبود پیل سوختی اکسید جامد تمرکز کرده اند. پیل های سوختی اکسید جامد مزایای زیادی برای دامنه گسترده ای از کاربردها به دلیل بازده برقی، پتانسیل استفاده از گاز، بیوگاز یا متان(CH_4)به عنوان سوختدارند. بسیاری از محققان اشاره کرده اند که پیل های سوختی به دلیل عدم آلودگی زیست محیطی و نداشتن سر و صدا و بازدهی بالا مهم هستند [1-5].

پیل سوختی اکسید جامد، نوع مهمی از پیل سوختی است و متشکل از دو جزء متخلخل آنود و کاتود مجزا شده با یک جز شدیدا متراکم به عنوان الکترولیت مانند گالیدیم و زیرکونیم می باشد. اگر چه بسیاری از مواد الکترود برای پیل سوختی اکسید جامد در طول سه دهه گذشته توسعه پیدا کرده اند ولی چالش هایی هنوز وجوددارد. از این رو، تلاش زیادی در حال صورت گرفتن برای غلبه بر این چالش ها از طریق ترکیب و طراحی مواد جدید در یک سطح نانومقیاس است که ممکن است منجر به بهبود عملکرد پیل سوختی اکسید جامد در کاربردهای مختلف در دمای کاهش یافته شود. علاوه بر این، تلاش های بسیاری برای تولید مواد الکترود برای این پیل در طول سی سال گذشته صورت گرفته است. بعضی از مواد، مخصوصا Ni/YSZ به دلیل فعالیت الکتروشیمیایی بالای آنها برای اکسیداسیون هیدروژن و ثبات بالا تحت شرایط عملیاتی پیل به عنوان آنودهای پیل ترجیح داده می شوند. کاربرد ماده کاتدی ثابت شده است که عملکرد بالایی را برای کاربرد در این پیل سوختی عرضه می کند. تحقیقات کنونی بر روی توسعه پیل سوختی اکسید جامد بر دمای کمتر از ۱۰۰۰ درجه سلسیوس (معمولا ۴۰۰-۷۰۰) با هدف کاهش هزینه ماده و بهبود ثبات تمرکز کرده اند [6-9].

استفاده ازسوخت های فسیلی (نفت، زغال سنگ و گاز طبیعی) به عنوان یک منبع انرژی طولانی مدت به سختی قابل توجیه است. مخصوصا، انتشار گازهای گلخانه ای، کربن دی اکسید و اکسیدهای نیتروز به عنوان عوامل مشارکت کننده اصلی در گرمایش جهانی در نظر گرفته می شوند. علاوه بر این، افزایش سریع جمعیت جهان نیاز به انرژی را یک منبع ضروری می سازد.تخمین زده می شود که این نوع انرژی حدود دو سوم از برق و عملا کل حمل و نقل ما را تغذیه می کند. علاوه بر این، این نوع منابع پایدار نیستند و روزی تمام خواهند شد[10-13].

مصرف کل انرژی در جهان و در سال ۲۰۱۱ و سال ۲۰۴۰ در شکل ۱ نشان داده می شود. برای مصرف جهانی کل، مقدار کل ۶۰۰ کواد توسط نفت غالب است (۳۷ درصد)، و کل سوخت های فسیلی ۸۳ درصد از کل سوخت های مصرفی تا سال ۲۰۱۱ را در بر می گیرند و به دلیل مصرف بیشتر منابع انرژی تجدیدپذیر تا سال ۲۰۴۰ به ۷۸ درصد کاهش می یابد. در اصل انرژی تجدیدپذیر، عمدتا از باد، خورشید، زیست ماده، هسته ای و ژئوترمال در سال ۲۰۱۶ به طور کلی ۱۷ درصد سوخت جهان را شامل می شود[14-16].

[2] Direct methanol fuel cell

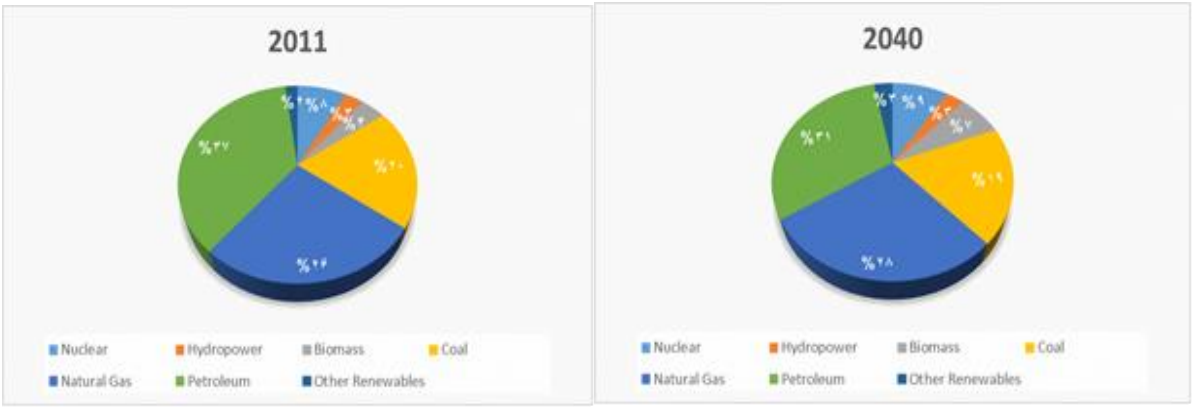
[3] Phosphoric acid fuel cell

[4] Alkaline fuel cell

[5] Molten carbonate fuel cell

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]



شکل ۱: مصرف کل انرژی درجهان [12-1]

نیازهای انرژی در آینده در دنیا این امر را ضروری می سازد تا مصرف انرژی مصرفی را تخمین زد و پیش بینی کرد. با درنظر گیری مقادیر کمینه و بیشینه، این مساله تضمین می شود که این نوع از پیش بینی ها می توانند ریسک هایی را کاهش دهند که ممکن است در آینده اتفاق بیفتند.

بررسی کاربرد منابع جایگزین پایدار و تجدیدپذیر بسیار حیاتی است. و می توان نیازهای انسانی را تحمل کرد و آشکارترین روش مبنی بر این که مزارع پایدار کوچک می توانند به کاهش وابستگی ملت به سوخت های فسیلی (نفت؛ زغال سنگ و گاز طبیعی) کمک کنند را می توان با گسترش این فن آوری در مقیاس های مختلف صورت داد. از این رو، کار با انواع پیل های سوختی یک آینده نوید بخش برای این نوع از انرژی را به دلیل پایداری و مصرف ایمن و پاک آن عرضه می کند [19-17].

مزایای اصلی که نقش مهم پیل سوختی اکسیدجامد را تاکید می کنند عبارتند از:

الف) بازده بسیار بالا از ۶۰ تا ۸۵ درصد در توربین،پیل سوخت هیبریدی، الکتریکی

ب) کاهش انتشار دی اکسید کربن از ۹۰ درصد به ۳۵ درصد

ج) کاهش مصرف سوخت های فسیلی از کمتر از ۸۰ درصد به ۹۰ درصد برای پیل سوختی و وسایل نقلیه الکتریکی د) کاهش آلودگی هوای ۹۰ درصدی

ه) نقش پیل های سوختی را می توان به عنوان یک منبع انرژی تجدید پذیر مورد توجه قرار داد.

از آنجایی که پیل سوختی اکسیدجامدبه عنوان یکی از پایدارترین منابعی در نظر گرفته می شود که از مقیاس های بزرگ تا مقیاس های نانو بخاطر تقویت بازده فوق العاده ای آنها می توان آن را استفاده کرد و بکار برد. همچنین مواد دارای ساختار نانو اکنون مخصوصا در دماهای پایین و برای دستگاه های هوشمند پرتابل بسیار مطلوب هستند. اما هنوز چالش هایی در این فن آوری وجود دارد که در قسمت های بعدی به آنها اشاره می کنیم.

۲- تاریخچه پیل سوختی و دستاوردها

پیل های سوختی به عنوان منبع انرژی مدت ها پیش استفاده می شده اند و در ابتدا زمانی شروع شد که دانشمندان در جستجو منابع جایگزین برای غلبه بر تمام شدن سوخت های فسیلی را شروع کردند. با این حال،هیچ کس انتظار نداشت که این پیل های سوختی می توانند تا قرن بیستم به یک منبع انرژی ضروری و نوید بخش تبدیل شوند. اولین دستگاه سوخت سلولی توسط سرویلیام روبرت گرو (۱۸۱۱-۱۸۹۶) با معرفی و تولید یک باتری سلول مرطوب در سال ۱۸۳۸ بود. علاوه بر این، ایده اصلی این تحقیق به واکنش های الکترولیز و استفاده از الکتریسیته برای تقسیم آب به اکسیژن و هیدروژن در طول واکنش و این که واکنش مخالف بتواند الکتریسیته تولید کند، وابسته بود. از این رو، ویلیام گرو اولین پیل مبتنی بر ترکیب اکسیزن وهیدروژن را برای تولید الکتریسیته طراحی کرد. لودویگ مند (۱۸۳۹-۱۹۰۹) و کارل لانگر آزمایشاتی با یک پیل سوختی

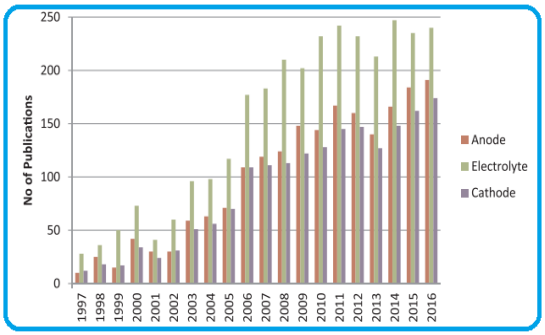
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

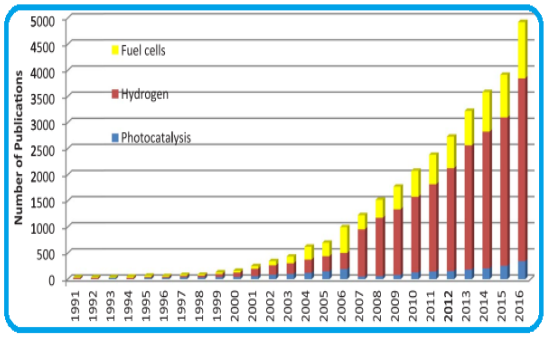
هیدروژنی انجام دادند که در ولتاژ ۰,۷۳ ولت ۶ آمپر را تولید کرد. علاوه بر این، فردریک ویلیهم استوالد (۱۸۵۳-۱۹۳۲) ، موسس شیمی فیزیک، رابطه بین اجزای مختلف پیل سوختی را از تحقیقات تجربی خود بدست آورد که شامل الکترودها، الکترولیت ها، عامل های اکسید کننده و کاهش دهنده (آنیون ها و کاتیون ها) می شد. سپس فرانسیس توماس باکن (۱۹۰۴-۱۹۹۲) توسعه های قابل توجهی با پیل های سوختی پر فشار صورت داد. او موفق شد یک الکترود نیکل بهینه در پیل هایی را عرضه کند که در فشارهایی تا ۳۰۰۰ پاسکال می توانست عملیات داشته باشد. در دهه ی ۱۹۶۰، پیل سوختی بین المللی[6] (IFC) در ویندسور، کانکتیکات، امریکا یک نیروگاه پیل سوختی برای فضاپیمای آپولو طراحی کرد. در دهه ی ۱۹۷۰، IFC، پیل سوختی آلکالینی قوی تری را برای شاتل فضایی ناسا اربیتر طراحی کرد [20-25].

۳- تحقیقات و پیشرفت در پیل سوختی اکسیدجامد

در میان انواع مختلف پیل های سوختی که می توان مورد استفاده قرار داد و به دلیل کاربرد بالقوه آنها در مقیاس های مختلف ، پیل سوختی اکسیدجامد نوعی سوخت شیمیایی به عنوان منبع انرژی آن ظاهر شدند و نقش فن آوری پیل سوختی را در زندگی ما ارائه می کند. برای پیل سوختی اکسیدجامد، تقویت ویژگی های سطح، رابط بین ماده و جو شاخص های عملکرد کلی دستگاه مهم هستند.با این حال، فرآیند واکنش شیمیایی رخ داده شامل جنبش های اکسیژن (میزان تغییر سطح و پراکنش یون)، رسانش الکترونیکی و فعالیت الکتروکاتالیزی توجه قابل توجهی به سیستم های SOFC در تنوعی از کاربردهای الکتروشیمیایی کم دما و دما بالا نشان می دهند. علاوه بر این، کل انرژی های جنبشی وابسته اکسیژن (استوکیومتری و ترمودینامیک اکسیژن) می باشد. در بعضی از موارد، بکارگیری یک ماده افزودنی به طور مثال استرانسیوم[7] می تواند منجر به افزایش غلظت خلا و عدم استقرار شود که به انتقال الکترونیکی بیشینه با کنترل میزان اندازه دانه و جداسازی ناخالصی می شود. به دلیل اهمیت SOFC، تمرکز تحقیق آشکارا مورد توجه قرار گرفت و دانشمندان تمرکز زیادی بر توسعه و تقویت اجزای مواد SOFC (آنود، الکترولیت و کاتود) نشان می دهند که در شکل ۲ که میزان پیشرفت تحقیقات در این زمینه از سال ۱۹۹۷ تا به اکنون را نشان می دهد، قابل مشاهده است. بکارگیری علم نانو در بخش انرژی، مخصوصا در فن آوری پیل سوختی را می توان به خوبی در شکل ۳ مشاهده کرد و می توان متوجه شد که در این دهه های گذشته با چه سرعت بالایی رو به افزایش بوده است[26-30].



شکل۲: میزان پیشرفت تحقیقات در SOFC



شکل۳: میزان پیشرفت فن آوری پیل سوختی

[6] International fuel cell
[7] Sr

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

۴- رویکرد عملیاتی اصلی SOFC

عملیات کارکردی SOFC عمدتا با استفاده از هیدروژن و اکسیژن در واکنش های الکتروشیمیایی به فرآیند حمل و نقل بستگی دارد. تبدیل انرژی شیمایی یک سوخت و اکسایندە به انرژی الکتریکی توسط بار از طریق سه جز اصلی ارائه می شود. یک الکترولیت متراکم شامل آنود و کاتود (ساختار پشتیبان متخلخل) می شد که کارکرد اصلی براساس نتایج یون اکسیژن حامل بار (O_{2-}) از تقسیم هوا به یون های اکسیژن و الکترون ها است.در نتیجه، یون های حاصله از طریق الکترولیت متراکم بکار گرفته می شوند تا در الکترون های آزادو آنود با هیدروژن تثبیت شوند. توان الکتریکی بدست آمده توسط الکترون های آزاد شده به یک مدار خارجی توسط گرمابه خارج حرکت می کند. واکنش های اصلی یک SOFC بر آنود تغذیه شده با هیدروژن، کاتود تغذیه شده با اکسیژن و کل فرآیند انتقال مبتنی است که در معادلات زیر به صورت آشکار ارائه می شود. نظریه این فرآیند توسط تسفای و همکاران توضیح داده شده است [35-31].

واکنش‌های پیل‌سوختی اکسید جامد به صورت زیر است:

(۱) واکنش آند $2\ H_2 + 2\ O^{2-} => 2\ H_2O + 4\ e-$

(۲) واکنش کاتد $O_2 + 4\ e- => 2\ O^{2-}$

(۳) واکنش کلی پیل $2\ H_2 + O_2 => 2\ H_2O$

بهینه سازی بازده و عملکرد پیل های سوختی توسط بهبود مواد (با ساختارهای نانو) مورد استفاده به عنوان اجزای پیل سوختی در حال حاضر موضوع بررسی است. به طور مثال، استفاده از مغناطیس لانتانیم به عنوان بخش کاتود مانند کبالت (Co) و مواد دیگر با آرایش های دیگر مورد استفاده به عنوان آنود مانند منگنز (Mn) و بکارگیری قشرهای نازک الکترولیت.

مواد مختلف و ترکیبات مختلف آنها برای براورده سازی بهبودSOFC می باشد .با این حال، برای مواد چند کاربره برای کاربرد در دستگاه های SOFC نیاز به توسعه و بررسی بیشتر است و هر جزء در پیل با ویژگی های تقویت شده بهتر است. این مسائل عمدتا به عملکرد مواد در سطح مقیاس بستگی دارد. بنابراین، اجزای اصلی بسته پیل سوختی (الکترولیت، آنود، کاتود و رابط) نیازمند درک عمیق در علم این فرآیند برای انطباق است. با این حال، چالش های تکنولوژیک زیاد همراه با این توسعه SOFC به صورت مستقیم به علم مواد مرتبط می شود و به طور مثال چالش های ماده در ارتباط با القاگرهای الکترولیت از لحاظ فرآیند ساخت و هزینه را می توان در نظر گرفت. علاوه بر این، هر بهبود ویژگی های مادی در SOFC عمدتا رسانش الکتریکی، فعالیت کاتالیزگر، سازگاری شیمیایی و ثبات گرمایی را پوشش می دهد. علاوه بر این، ویژگی های مشترک این اجزا باید شامل موارد زیر باشد: اولا، الکترولیت و رابط هر دو باید به شدت متراکم باشند تا از ترکیب گاز جلوگیری نمایند. دوما، آنود و کاتود باید به اندازه کافی متخلخل و سازماندهی ساختار یافته داشته باشند تا به انتقال گاز در مکان های واکنش به همراه بیشترین رسانش الکترونیکی و یونی دو الکترود امکان دهند. علاوه بر این، از دیدگاه الکتروشیمیایی، الکترولیت باید به شدت یک القاگر یونی باشد و رابط ها باید یک القاگر الکترونیکی در کنار الکترودها باشند. موضوعات فرعی پیش رو بر اجزای پیل پر کاربرد در دستگاه SOFC تاکید دارند [40-36].

۵- مواد آنود

تولید یک ماده آنودی به عنوان بخش اصلی پیل اجزای پیل سوختی اهمیت دارد، زیرا درصد ماده مورد استفاده در این بخش تقریبا حدود ۹۵ درصد ماده استفاده در پیل های پشتیبانی شده با آنود است. همچنین واکنش اکسایش سوختی در آنود اتفاق می افتد و واکنش سوخت با اکسیژن را کاتالیز می کند. به منظور حفظ بالاترین عملکرد ماده آنودی، این ماده باید شدیدا رسانا (یونی، الکترونیکی)، از لحاظ شیمیایی سازگار، از لحاظ گرمایی با ثبات، دارای ساختار شدیدا متخلخل و دارای اندازه ذره

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

ریز با یک ساختار سازمان یافته باشد. با این حال، در عین حال، مواد آنودی رایج موادی سنتی هستند که برای مدتی طولانی علی رغم ارائه عملکرد ضعیف مورد استفاده قرار گرفته اند [44-41].

۶- الکترولیت ها و مواد رابط

در یک SOFC، می تواند یک پیل سوختی پشتیبانی شده توسط آنود یا پیل سوختی پشتیبانی شده توسط الکترولیت باشد، در هر دو مورد نقش الکترولیت ضروری است و باید رسانش یونی بالا، سازگاری شیمیایی و مکانیکی بالا با اجزای دیگر پیل داشته باشد. ویژگی اصلی این الکترولیت این است که باید شدیدا متراکم باشد و بهتر است نازک باشد تا مقاومت داخلی پیل را در طول واکنش های الکتروشیمیایی به حداقل برساند. این یون های اکسید از الکترولیت عبور می کنند و با سوخت (به طور مثال، مولکول های مونوکسید کربن و هیدروژن) واکنش می دهند که به سمت آنود ، در آنود و رابط الکترولیت پخش می شوند که این مساله را می توان با معادله ۴ توصیف کرد.

$$CO + O2 \rightarrow CO2 + 2e \qquad (۴)$$

موادی که به عنوان الکترولیت استفاده می شوند از قرار زیر هستند: ایتریم و زیرکونیم[8] و گادولنیوم دوپد سریا[9] (GDC) . GDC رایج ترین و مواد اصلی درنظر گرفته شده در دستگاه های SOFC هستند. بنابراین، با افزایش رسانش یونی، اتریتم در زیرکونیم تخدیر می شود که غلظت جاهای خالی اکسیژن را افزایش می دهد و ثبات بالایی را بدست می آورد. از سوی دیگر، سریوم اکسید به عنوان یک ماده الکترولیتی خود به دلیل رسانش یونی بالاتر آن نسبت به زیرکونیم در نظر گرفته می شود و عملیات در دماهای پایین تر مخصوصا در هنگام بکارگیری SOFC تک محفظه را فراهم می کند. معمولا در SOFC، روش درست پیوند بین آنود و کاتود به صورت الکتریکی را می توان با رابط بدست آورد. علاوه بر این، مانعی فیزیکی بین اکساینده و جوهای سوختی کاهنده ارائه می کند. از این رو، رابط باید یک ماده متراکم مانند الکترولیت باشد که یک رسانش الکترونیکی مطلوب و عایق اکسید یونی مطلوب است. از لحاظ شیمایی در جوهای اکساینده و کاهنده با ثبات باشد، از لحاظ گرمایی با آنود و کاتود مجاور متناظر باشد و در نهایت باید از لحاظ فیزیکی عایق گاز باشد [48-45].

۷- مواد کاتد

دومین جزء اصلی در پیل سوختی بخش کاتد است که یک لایه تماس با الکترولیت دارد و در معرض هوا/اکسیزن است. اهمیت این بخش الکترود را می توان با کار کاربردی در عملیات پیل از طریق واکنش های کاتد و اکسیژن توضیح داد که به عنوان حامل برای الکترون ها از مدار خارجی به محل اکسیژنی که یون عرضه می کند و انتقال یون های اکسیژن به رابط الکترولیت عمل می کند. انتخاب مواد کاتدی نیازمند ویزگی های متمایزی مانند تخلخل و ثبات بالا در جو اکسیژن می باشد. آرایش لانتانوم مانگانیت تخدیرده با عناصر خاک نایب مانند Ce, Co یا Cr عملکرد مطلوبی را به عنوان کاتد در SOFC نشان داد. این مواد باید ویژگی های مهمی داشته باشد تا انطباق مکانیکی گرمایی با الکترولیت داشته باشد و رسانش الکتریکی و یونی ترکیبی داشته باشند [50-49].

ترکیب مواد برای بخش کاتد بر کنترل غیر استوکیومتری بودن و نقص اکسیژن تمرکز دارد که می توان تقویت رساناش الکترونیکی و یونی و ویژگی های کاتالیزگری را تقویت کند. برای هر ماده استفاده شده در SOFC به عنوان کاتد، در ابتدا باید

[8] YSZ

9 Gadolinium-doped ceria

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

یک القاگرشدیدا الکترونیکی باشد، دوما باید از لحاظ شیمیایی سازگار باشد و از لحاظ گرمایی ثبات داشته باشد و با اجزای دیگر واحد پیل سوختی انطباق داشته باشد. سوما، ریزساختار باید در درصد بالایی از تخلخل برای واکنش های اکساش در رابط کاتد/الکترولیت باشند. چهارما، باید فعالیت های کاتالیزی شدیدی را برای اکسیژن در طول واکنش کاهنده ارائه کند و در نهایت باید در پردازش ساده و در ساخت مقرون به صرفه باشد. با توجه به متون علمی، انتخاب مناسب مواد کاتدی عمدتا به مواد الکترولیتی مورد استفاده بستگی دارد و مخصوصا بر انطباق ضریب انبساط گرمایی در پیل کامل تمرکز دارد. جدول سه نشان دهنده چند ماده کاتدی پر کاربرد است.

از این رو، مواد انتخابی برای SOFC عمدتا به کارایی انها در کاربردهای خاص بستگی دارد. این مواد باید روی هم رفته در پیل با همدیگر انطباق پیدا کنند. کیگان وهمارن یک نمودار بلوکی شماتیک را ارائه کردند که مواد پر کاربرد و جایگزین های ساخت پر کاربرد را برای SOFC نشان می دهد که در جدول ۱ نیز ارائه شده است.

۸- چالش ها و محدودیت های SOFC

هدف اصلی هر ژنراتور برق بسیار بهینه به انعطاف پذیری و تحمل ناخالصی های ورودی سوخت بستگی و توجه دارد. از این رو، SOFC این ویژگی های مهم را در میان انواع مختلف پیل های سوختی دارا بود. علاوه بر این، مزیت دماهای عملیاتی در سطوح بالا (۸۰۰-۱۰۰۰ درجه سلسیوس را داراست، با این حال هنوز چالش ها و محدودیت هایی برای دمای عملیاتی از طریق دمای مواد استفاده شده در دماهای بالا با ویژگی های ثابت وجود دارد. چالش ها و محدودیت های اصلی در دستگاه های SOFCانتخاب مناسب ماده براساس ویژگی های آن است که به صورت زیر می توان شناسایی کرد:

الف) خطر سمی شدی به دلیل رسوب سولفور و زغال کوک، پراکنش سطح انحراف انتقال بار در آنود

ب)محدودیت جابجایی اکسیژن که مسئول بروز واکنش های الکتروشیمیایی در الکترولیت جامد است

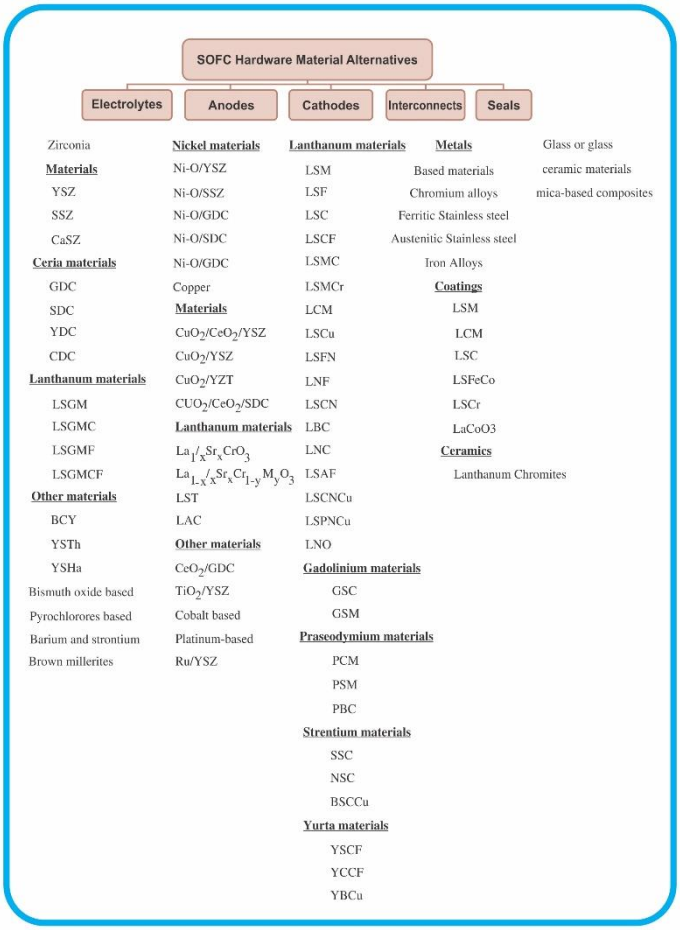
ج)عوامل تعیین کننده آهنگ چندگانه کاتدی، مانند وجود بالقوه بهمراه هندسه سطح فعال

د) عدم انطباق کلی ضریب انبساط گرمایی برای اجزایی کلی پیل ه)بی ثباتی و ناسازگاری شیمایی در محیط های اکساینده و کاهنده

جدول۱: موادهای پرکاربر جهت ساخت SOFC

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]



در نهایت و فرآیند جداسازی سوخت و گازهای اکساینده در طول فرآیند انطباق برای اجزای پیل با استفاده از عایق، نیازمندی های دستگاه های SOFC با عملیات کارکردی مناسب از لحاظ عملکرد بالا، و بدست آوردن هدف نهایی ،باید انتخاب مناسب مواد مقرون به صرفه باشد که مقاومت الکترونیکی الکترولیتها، کاتالیزگر ، عایق ها و رابط ها پایین و مقاومت یونی الکترولیت ها پایین باشد. به طور خلاصه، به صورت زیر می توان بر این چالش ها غلبه کرد: ۱) شروع گسترش یافته احتراق سوخت، از این ر، زمان های شروع برای عملیات SOFC طولانی می شوند ؛ ۲)مشکلات عایق را می توان با مواد مجاور که با قسمت های متصل واکنش نشان نمی دهند، برطرف کرد و ۳) فشارهای گرمایی القایی در رابط های الکترولیت-الکترود که باعث پراکنش داخلی بین اجزای پیل می شود را می توان با نگه داشتن آن در زیر پوشش در طول عملیات SOFC کنترل کرد.

۹- روند SOFC از سطوح بزرگ تا سطح نانو

مصرف شدید و زیاد منابع انرژی طبیعی (سوخت های فسیلی) چالش های انرژی جهای را از لحاظ صنعتی و زیست محیطی تحریک کرده است. علاوه بر این، تقاضای رو به رشد مصرف انرژی در جهان دانشمندان را ملزم می کند تا جایگزین هایی را برای غلبه و مواجهه با مشکلات ظاهر شده پیدا کنند. در نتیجه، در میان انواع مختلف منابع انرژی پایدار، دستگاه های SOFC عملکرد بالایی را ثابت کرده اند، بهینه ترین هستند و انرژی پاکی را در شاخه انرزی تجدیدپذیر و پایدار تولید می کند، چرا که افزیش سریعی در نیازمندی های توان ارائه می کنند و اثر افزایش مصرف انرژی بر محیط زیست را به حداقل می رسانند. پیشرفت SOFC در طول ۱۰۰ سال از انواع سنتی تا انواع نانومقیاس توسعه یافته است تا نیازمندی ها را مقیاس های مختلف از روستای دور دست گرفته تا دستگاه های هوشمند پرتابل برطرف کند. ضروری ترین مساله در بررسی توسعه روندهای SOFC

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

دوام چنین دستگاهی در کاربردهای مخصوص از طریق آ) تعیین ویژگی های پیل ب) سنجش فرآیند تجزیه و ج) طراحی شرایط کاری (مخصوصا آرایش سوخت و هوا).

از زمان کاربرد نانوتکنولوژی در شروع قرن نوزدهم در بخش انرژی، نقشی بسیار مهم در پیشرفت و توسعه ویژگی های الکتروکاتالیزی برای واکنش های کاهش اکسیداسیون ایفا کرد و از این رو تاثیری زیاد بر هزینه های دستگاه پیل سوختی دارد. بسیاری از مواد دارای ساختار نانو در دستگاه های پیل سوختی بکار گرفته شدند تا بازده را تقویت کنند و بارگذاری کاتالیزگر را کمینه سازند. دلیل اصلی برای این مساله که نانوماده ها برای SOFC ضروری هستند ، کاهش دمای عملیاتی پیل از ۹۰۰ به ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس است. نکته جالت تر در مورد بکارگیری نانوماده ها در SOFC احتمال عرضه ثبات گرمایی بالا با مقادیر رشانس الکتروشیمیایی پذیرفته شده است. علاوه بر این، آنها توانایی تحمل سولفور و نبود رسوب کربن در سمت آنود را با تغذیه سوخت هیدروکربنی نشان دادند. مجموعه دارای ساختار نانو همچنین حفره های به هم متصلی را می تواند داشته باشد و همچنین به عنوان نقاط تماس برای جداسازی مرزهای سه مرحله ای در اجزای الکترود عمل کند. از این رو، بدست آوردن کل جنبه های پیشین باعث می شود که انتخاب نانوماده ها برای اجزای پیل نسبت به یکدیگر بسیار سازگار باشند و همچنین ثبات گرمایی، شیمیایی و مکانیکی مورد نیاز را داشته باشد.

یافته های جالب انتخاب نانوماده ها در SOFC را ضروری ساخته است، زیرا این مجموعه های دارای ساختار نانو می توانند مقادیر عملکرد مورد نیاز را با تلاش کمتری ارائه کنند. تلاش های بسیاری صورت گرفته است تا در مورد بیشترین توان خروجی بدست آمده از SOFC در کاربردهای مختلف در دامنه دماهای پایین را بررسی و عرضه کند. ضروری ترین نیازمندی ها در جدول ۱ براساس متون علمی ارائه می شود.

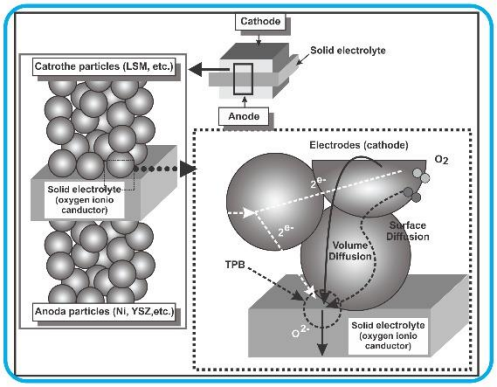
۹-۱- مفاهیم بنیادی SOFC دارای ساختار بزرگ، کوچک و نانو

تقویت دستگاه های SOFC از مقیاس بزرگ به نانو این پتانسل را دارد تا از فن آوری SOFC کنونی از لحاظ قیمت، قدرت، اعتمادپذیری و دوام پیشی بگیرد. اما ملاحظات اصلی و مفاهیم اصلی این فن آوری باید به خوبی شفاف سازی شوند تا به دقت بررسی گردند. از این رو، نیازمندی های اصلی SOFC (مکانیکی، الکتریکی و ساخت) می توانند از طریق بکارگیری معماری ها یا مجموعه های مادی جدید در طراحی های تقلیدی با بیشترین تراکم حجمی کنترل شوند. مطابق با بنیادی ترین طراحی های SOFC، از پیل انتظار می رود تا مزایایی را ارائه کند که در اصل، سیستم تبدیل باید بیشترین بازده، انعطاف پذیری، مدولار بودن و کمترین سطح سمی شدن انتشار را نشان دهد. علاوه بر این، باید از لحاظ الکتروشیمیایی و مکانیکی ثابت باشد و عملیات بدون ارتعاش و آرامی را عرضه کند.

مفاهیم اصلی در کل سطوح (بزرگ و نانو) مشابه است و فرآیند انتقال در طول واکنش ها توسط مدیریت اکسیزن کنترل می شود. این فرآیند عمدتا به اکساینده بستگی دارد که برای اکسایش سوخت های واکنش داده نشده نیاز است. دلیل اسن مساله طراحی روش توزیعی برای هیدروژن یا دی اکسید کربن است که در معرض محدودیت های خلوص یا آلاینده های دیگر قرار دارند. آدامز و همکاران اشاره کردند که کیندر مورگان، وی بورن، اسلیپتر خطوط لوله با غلظت بیشینه نیتروژن ۳۰۰، غلظت اکسیژن بیشینه ۱۰-۱۵و غلظت دی اکسید کربن کمینه ۹۳-۹۶ درصد را ارائه می کند. از این رو، اکسیژن با کیفیت بهتر است. فریبرا و همکاران یک روش بسیار بهینه برای بدست آوردن اکسیژن با خلوص بالا (۹۵ درصد) برای گازی کردن و اهداف دیگر ارائه کردند. این روش به ارائه اکسیزن برای پسا اکسایش آنود نیز کمک می کند. اما مهم ترین عواملی که ثبات الکتروشیمیایی بالا و تقویت مطلوب را عرضه می کنند جنبش یک یون و کنترل ریزساختاری است که در شکل ۴ نشان داده می شود و توسط مکانیسم رسانی رابط توضیح داده شد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

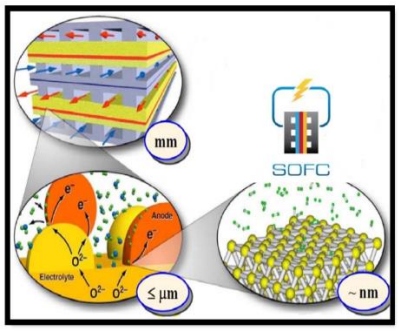


شکل ۴: نمایش شماتیک مولکولها به یونها

مفاهیم اصلی مواد دارای ساختار نانو از آماده سازی نانوذره/نانولوله/نانوقشر (اتم) نیازمند انتخاب مناسی روش های ترکیبی است که روش رسوب شیمیایی ، روش واکنش شیمایی کمکی، روش واکنش شیمیایی (راه حل کلوئیدی)، رسوب شیمیایی از روش راه حل همگون، روش سول-ژل، روش هیدروگرمایی، روش کمکی فراصوت، واکنش از طریق ریز امولسیون ، روش پردازش الکتروشیمیایی، آماده سازی در ماتریکس، قالب، قشر نازک نانوبلوری با استفاده از رسوب بخار فیزیکی یا روش اسپری کردن، روش ابلیشن لیزری و روش حلال گرمایی با کمک میکروویو. ویژگی های این نانوماده ها مشابه روش های SOFC سنتی است. دو مفهوم اصلی (ترکیب و ویژگی ها) مواد دارای ساختار نانو دستاوردی تکنولوژیک در SOFC با یک کارایی کنترل شده و کاملا توسعه یافته در منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر بدست آورد.

۹-۲- طبقه بندی

عموما هر ماده ای که از دستگاه های SOFC استفاده می کند را می توان بدست آورد و از طریق روش های مختلف ترکیب کرد. این روش ها شیمی مرطوب یا شیمی خشک هستند که نانوساختار. ساختارریز/ساختار بزرگ مورد نظر را بدست می اورد. سپس این مواد از سطح ساختاری با بررسی سطح اتمی طبقه بندی می شوند. تعیین ویژگی های مواد SOFC را می توان توسط روش های مختلف مانند پراکنش پودر اشعه اکس، شکست نور، طیف بینی فوتوالکترون اشعه ایکس، طیف بینی رامان، طیف بینی پراکنده انرژی انجام داد. برای تحلیل ریزساختاری، شامل میکروسکوپ الکترونی روبشی، میکروسکوپ الکترونی انتقالی و تحلیل رنگ بینی و غیره می شود. این ویژگی ها شناسایی درست از مقیاس بزرگ تا مقیاس نانو (سطوح مختلف) را نشان می دهند که در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۵: شناسایی درست از مقیاس بزرگ تا مقیاس نانو

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

ویژگی های مواد نه تنها به مشاهده ویژگی های فیزیکی با چشم مسلح در سطوح میکروسکوپی وابسته هستند، بکه همچنین بر تعامل پیچیده در سطح کوچک مقیاس میکرو یا مقیاس نانو مبتنی است. علاوه بر این، اثر قابل توجه بر عملکرد ماده SOFC در معرض شناسایی ساختار آنها است که منجر به ارزیابی درست ویژگی های مکانیکی، رفتار فوتوکاتالیزی، ویژگی های الکترومغناطیسی، ویژگی های شیمیایی و عملکرد الکتروشیمایی می شود. با گسترش سریع فن آوری هوشمند در امروزه، توسعه SOFC با مقیاس چندگانه مهم است. از این رو، نیازمند شناسایی دقیق با پیش بینی های مطمئن با بررسی مکانیسم های کار در راستای سطوح ماکرو/میکرو.نانو است.

اگر چه، کار تحقیقاتی SOFC از سال ۱۹۳۸ منبع انرژی شدیدا نوید بخش و اینده داری ثابت شده است، نیاز به بهبودعملکرد آن از لحاظ بازده و طراحی محققان را متعهد کرده است تا سطوح ساختاری را توسعه دهند (سنتی یا نانومقیاس). کارهای تحقیقاتی مختلفی در توسعه دستگاه های SOFC از طریق تقویت مواد صورت گرفته است.

بودر و همکاران یک روش برای بهبود فعالیت های کاتالیزی آنودهای SOFC سنتی برای اصلاح داخلی مستقیم گاز طبیعی توسعه داده اند. انها گزارش کردند که می توان عملکرد SOFC را با اصلاح داخلی هیدروکربن ها با عملکرد الکتروشیمیایی قابل قیاس با پیل های استاندارد بهبود بخشید. اندر وبر و همکاران برای انتخاب بهینه مواد پیشنهاداتی عرضه کردند. انها به طراحی بسته ای به عنوان یک مساله قابل توجه برای کنترل فن آوری پیل سوخت اشاره می کنند. علاوه بر این، ویژگی های برجسته ریزساختار اساسا برای بدست آوردن SOFC شدیدا بهینه که در دماهای مختلف کار می کند، ضروری شده است. پیل سوختی اکسید جامد میکرو (که در سال ۱۹۹۹ تولید شده است)، پتانسیل بالایی در کاربرد در دستگاه های الکترونیکی پرتابل نشان داده است و عملکرد مطلوبی در دامنه دماهای بین ۷۰۰ تا ۳۰۰ سلسیوس دارد. با توجه به این تقویت بازده پیل در سطوح ریز مقیاس از طریق ترکیب و آماده سازی، مواد مختلفی طراحی شده اند. جدول ۲ مواد مورد استفاده در SOFC ریز را نشان می دهد[51-53].

جدول۲: مواد مورد استفاده در SOFC

Nano-SOFCs parameters	Merits /Strength	Limitation/ Weakness	Opportunity/ availability	Threat
Cost		*		*
Efficiency	*		*	
Power density	*		*	
Fuel utilization		*		*
Degradation rate		*		
Modularity		*		*
Design	*	*	*	
Manufacturability		*	*	
Durability	*		*	
Environmental Impact	*		*	
Scalability	*			
Economic entitlement	*		*	
Applications	*	*	*	*
Transportation and storage	*		*	
Technological developments	*		*	
Life time		*		*
Stability	*		*	
Fuel utilization		*	*	
Reforming process		*		*
Temperature ranges	*		*	

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

جفری و همکاران رویکردی برای ساخت و مونتاژ SOFC ریز با بازده قابل توجه در دامنه های قابل قبول LT-SOFC و IT-SOFC از متون علمی نشان داده اند. این پیشرفت در مقیاس ریز موجب شروع بررسی های سطح نانو از تبدیل انرژی الکتروشیمیایی و دستگاه های ذخیره سازی به عنوان منبع انرژی جایگزین برای قرن بیستم شد. از طریق تخذیر القاگرهای الکترون یونی ترکیبی مانند فاصله گذاری رابط Ce+3انتظار می رود تا بر رفتار رسانش در قیاس با پهنای فضایی که بار دانه ها را در کامپوزیت در بلورهای نسبتا بزرگ حمل می کند.تاثیر بگذارد. بعضی از تلاش ها برای بررسی SOFC ریز با مواد مختلف صورت گرفته است که در جدول ۳ نشان داده می شود. لیستی از نانوماده های مورد استفاده در SOFC در جدول ۴ ارائه می شود [54-56].

جدول ۳: ریزمواد مورد استفاده در SOFC

Anode	Cathode	Electrolyte	Substrate	Temperature (°C)
Pt	Pt	8YSZ	Foturan, silicon wafer	450–550
Ni	LSCF	GDC	–	450–550
Ni	LSM	8YSZ	–	400–700
Pt	Pt, LSCF	8YSZ	Foturan, glass-ceramic	400–600
Pt	Pt	8YSZ	Silicon wafer, SiO_2	500
Pt	Pt	8YSZ	Silicon wafer, Si_3N_4	350–400
Pt	Pt	8YSZ, CGO	Silicon wafer, Si_3N_4	350
Ru	Pt	8YSZ	Silicon wafer, Si_3N_4	265–350
Pt	Pt	8YSZ	Silicon wafer, Si_3N_4	400–450
Ni	Pt, LSCF	CGO	Ni plate	450
Ni	Pt	8YSZ	Porous Ni	370–400
Ni + SDC	BSCF + SDC	SDC	–	500–600

جدول۴: نانوماده های مورد استفاده در SOFC

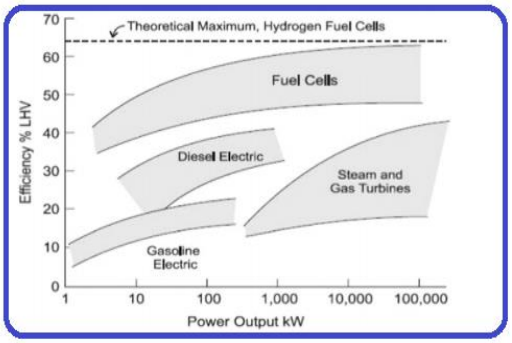
Anode	Cathode	Electrolyte	Substrate	Temperature (°C)
Ni	–	GDC	–	450–550
Ni	LSM-YSZ	ScSZ	–	700
–	LSCF-GDC	GDC	–	650–850
Pt	LSCF	YSZ	Silicon wafer, Si_3N_4	450–500
Ni-SDC	SSC	ScSZ	–	600–700
Ru	Pt	CGO-YSZ	–	470–520
Pt	Pt	YSZ		350–500
Ni	Pt	YSZ	–	600
Pt	LSCF	YSZ	–	400–500
Pt- ZrO_2	LSM	YSZ	–	650–800
LSCF	LSCF	CGO	–	700
PSM	PSM	YSZ	–	500–800
SSC-NiO-YSZ	SSC-LSF-GDC	YSZ	–	700–800
LSM-YSZ	LSM-YSZ	YSZ	–	600–800
LSM-YSZ	LSM-YSZ	YSZ		650–850
NiO-YSZ	LSF-YSZ	YSZ		700–800
NiO-YSZ	LSM-GD	YSZ		750
LSM-YSZ	LSM-YSZ	YSZ		650–800

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

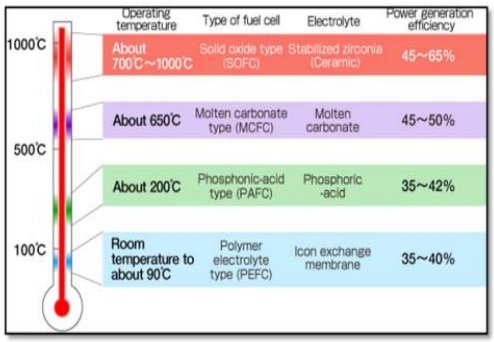
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

۱۰- عملکرد و بازده SOFC

مزایای فوق العاده دستگاه های SOFC عملکرد فوق العاده و خدمات شدیدا بهینه در تنوع گسترده ای از کاربردها (SOFC/توربین هیبریدی بزرگ مقیاس و همچنین وسایل الکترونیکی پرتابل) است.این فن آوری گسترده با نوع دیگری از منابع انرژی مانند نوع تجدیدپذیر و پایدار رقابت می کند، زیرا بازده برتری به عنوان یک نکته برجسته در کل دامنه های توان مربوطه دارد. از این رو، از کار تحقیقاتی پیل سوختی (نشان داده شده در شکل ۱۶) این فن آوری در قیاس با انواع دیگری از منابع انرژی از لحاظ بازده در برابر توان در جایگاه اول قرار گرفت. شکل ۶ مقایسه بازده انرژی بین پیل های سوختی و روش های تولید انرژی دیگر را نشان می دهد. پیل های سوختی بیشترین پتانسیل بازده را از ۴۰ تا ۶۵ درصد نشان می دهند. به شکل مشابه، شکل ۷ برتری SOFC نسبت به انواع دیگر پیل های سوختی را نشان می دهد [57-68].



شکل :۶ مقایسه بازده انرژی بین پیل های سوختی و روش های تولید انرژی دیگر



شکل ۷ : برتری SOFC نسبت به انواع دیگر پیل های سوختی

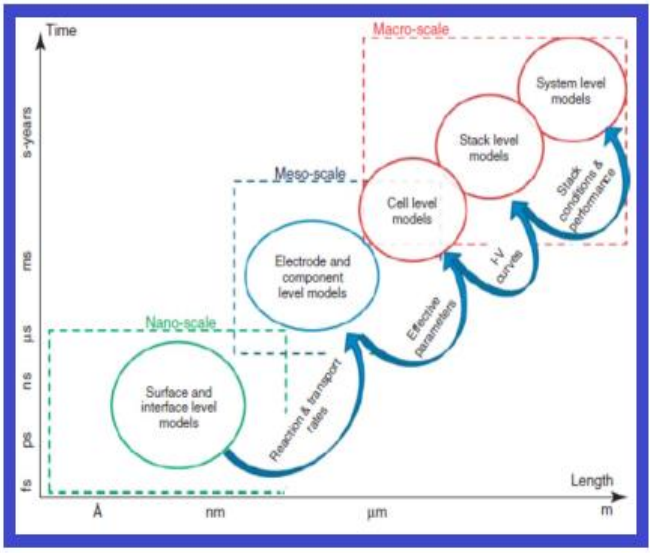
با این حال، نیازمندی های زیست محیطی برای فن آوری های انرژی مهم هستند و پیل های سوختی در میان روش های انرژی دیگر نوید بخش ترین و آینده دارترین هستند. فن آوری پیل سوختی می تواند با عرضه پاک ترین و بهینه ترین روش ها بر چالش های زیست محیطی غلبه کند.

اصول عملیات SOFC به مواد استفاده شده مرتبط می شوند که نیازمند شناسایی دقیق ویژگی های آن از طریق تعیین ویژگی های دقیق است که در بحث قبلی به آن اشاره شد. رفتار الکتروشیمیایی یون ها و کاتیون ها از طریق فرآیند واکنش را می توان از تحلیل ساختاری با استفاده از XRD یا ND بررسی کرد [68-80].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

پیش بینی دقیق واکنش های انتقال را می توان از طریق تحلیل نظری یا مدل سازی و شبیه سازی بدست آورد که در بررسی انتقال انواع روی سطوح الکترودهای SOFC (سطح نانومقیاس) مشارکت می کنند. همچنین کنترل سیسنم را می توان (سطح مقیاس ماکرو) را با مقیاس زمانی عرضه شده در شکل ۸ بدست آورد. از این رو، نتایج بدست آمده از لحاظ عملکردی می تواند ویژگی های بازده و عملکرد را برای SOFC در مقیاس های مختلف (از ماکرو تا نانو) ارائه کند. علاوه بر این، می تواند یک محیط کافی برای سوخت های تجدیدپذیر ارائه کند.



شکل ۸: مقیاس زمانی برای ساخت SOFC

عملکرد SOFC در مقیاس های مختلف را می توان از طریق تراکم توان درک کرد که مسائلی کلیدی در کاربردهای صنعتی گسترده است. سنجش های بازده پیل عموما به ویزگی های ماده و تحمل دامنه های مختلف دماهای عملیاتی مرتبط می شود. از این رو، بررسی های صورت گرفته در مقیاس های مختلف با قیمت های مقرون به صرفه باعث می شوند SOFC نسبت به بهینه ترین نوع فن آوری پیل سوختی برتری داشته باشد. از این رو، مزایای عملکرد ۶۵ درصدی از دستگاه های SOFC با اصلاح مداوم باعث می شود این فن آوری از دورافتاده ترین روستاها تا دستگاه های الکترونیکی پرتابل بکار برده شود [80-75].

۱۱-مزایای نانوماده ها در SOFC

مواد نانومقیاس نقشی حیاتی در جامعه علمی پیدا کرده اند. در دهه های اخیر، انها در توسعه ویژگی های جدید شدیدا مطلوب پدیدار شده اند که در فازهای حجمی وجود ندارد و از این رو توسعه این سطوح از مواد به شدت مورد نیاز هستند.پیشرفت SOFC در کاهش دمای عملیاتی خود چشم اندازهای جدیدی را برای بکارگیری مواد میکرو و نانو باز کرده است. این مساله را به صورت آشکار می توان از مزایای بدست آمده از SOFC میکرو/نانو با توجه به عملکرد مواد مورد استفاده در دامنه دماهای متوسط درک کرد. به طور مثال،Ni/ZSZ/Pt در دمای ۶۰۰ درجه به مدت ۱۰ ساعت با هیدروژن خشک و آب بررسی شده است، تراکم توان بدست آمده ۲۳,۳ میلی وات بر سانتی متر مربع بوده است. از سوی دیگر، با استفاده از خروجی توان Pt/YSZ/Pt ۱۵۰ میلی وات بر سانتی متر مربع در دمای ۵۵۰ سلسیوس در H2:N2(۱:۴) مرطوب مشاهده شد. امروزه، بیشترین عملکرد در یک اندازه کوچک هدف اصلی برای کاربردهای فن آوری هوشمند است.

۱۰ توصیه هایی نانوتکنولوژی برای SOFC

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

در طول سه دهه گذشته، بکارگیری نانوتکنولوژی در بخش های انرژی توسعه و پیشرفت قابل توجهی از لحاظ توان و بازده را نشان داده است. نوید بخش ترین مسائلی که وجود داشته است کاتالیزگرهای بدون فلز کربنی برای تبدیل و ذخیره سازی انرژی بوده است. دلیل استفاده از مواد کربی ثبات مکانیکی، گرمایی و شیمایی آنها است. آنها در ویژگی های الکتروشیمیایی و الکتریکی و همچنین موجود بودن و مقرون به صرفه بودن عملکرد بهتری را عرضه می کند. پیوند نانوماده در پلیمرهای فلزی ترکیبی برای فعالیت های کاتالیزی اصلاح شده است. همچنین یک نانوکامپوزیت حاصله است که به شدت پتانسیل مدار باز دستگاه های مربوطه با پلیمرفلزی سبک را تقویت کرده است.

یافته های ججالب دیگری از طریق نانوبلورهای فلزی استفاده شده در هنگام تنظیم فعالیت و انتخاب اکسیژن، کاهش دی اکسید کربن و اکسایش اتانول در بخش انرژی (تبدیل و ذخیره سازی). ضروری ترین بخش در این کاربردها به نانوحفره هایی مرتبط بود که مکان هایی کمتر سازمان یافته برای واکنش های الکتروشیمیایی عرضه می کند و از این رو می تواند انتخاب و طول زمان کنترل شده را تغییر دهد.

چالش های طول عمر و دوام، هزینه بیشتر پیل های سوختی تاثیرگذارترین عواملی بود که بکارگیری نانوماده ها را در دستگاه های آنها و کاربردهای آنها را مطلوب کرد. همچنین مسائل پایداری و زیست محیطی انتخاب ماده دارای ساختار نانو را ضروری می کند. مطالعات بسیار جدید ی در زمینه بهبود کاتود، آند و الکترولیت در SOFC انجام گرفته است، اما بسیار محدود هستند و نیاز به گسترش دارند. بکارگیری نانوتکنولوژی بعضی از مواد دارای ساختار نانو نوید بخش را برای اجزای SOFC و پشتیبان های کاتالیزگر ارائه می کند.

براساس این مشاهدات، بکارگیری مجموعه دارای ساختتار نانو با موا کربنی یا مواد گرافنی در اجزای مرتبط با SOFC بهتر است. این کار دستاوردی نوید بخش در ویژگی های الکتروشیمیایی و الکتریکی در زمینه انرژی ارائه می کند و تاثیری مثبت بر مسائل پایداری و زیست محیطی دارد.

۱۲- نتیجه گیری

بررسی SOFC در مقیاس های مختلف از مقیاس خرد گرفته تا مقیاس نانو، به دلیل مزایا و پیشرفت ها صورت گرفتند. بازده تبدیل انرژی بالا، انعطاف پذیری سوخت بالا، مسائل امنیتی زیست محیطی در مقیاس های مختلف و احتمال تبدیل گرمای اتلاف شده (پیامدهای در طول واکنش ها) به کاربردی دیگر باعث می شود SOFC نسبت به منابع انرژی تجدیدپذیر دیگر برتری داشته باشد. تقاضای انرژی جهانی به سرعت در حال افزایش است و ذخیره سوخت های فسیلی طبیعی در حال کاهش است، بنابراین تولید ضروری انرژی از جایگزین های دیگر مورد نیاز است.SOFC یکی از بهینه ترین و نوید بخش ترین روش های تولید انرژی برای حل این معضلات است. مساله مهمی که فرآیند کل را حل می کند به عملکرد مادی در طول دماهای عملیاتی بستگی دارد. این مساله را می توان با استفاده از مواد دارای ساختار نانو توسعه داد و تقویت کرد و برای دستگاه های SOFC بکار برد. ویژگی ها و تحلیل های مختلفی مانند XRD، ND، SEM، TEM، TGA، EIS و سنجش های عملکرد الکتریکی برای اجزای پیل در نظر گرفته شدند و ویژگی هایی را برای هر مقیاس بدست آوردند. چند کار نظری انجام شد، اما باید به صورت مفصل توضیح داده شود تا نتایجی را پیش بینی کند که می تواند به افزایش عملکرد کمک کند. چنین بررسی هایی در سطوح مقیاسی مختلف (از ماکرو تا نانو) به صورت نظری و تتجربی به افزایش طول عمر کمک می کند، آن را مقرون به صرفه می سازد و عملکرد بالایی را در دماهای پایین برای کاربردهای مختلف بدست می آورد. پیشنهاد نانوماده هایی با ادغام کربن یا گرافن ممکن است نقشه راه SOFC را تغییر دهد و دستگاه هایی بهینه تر با توان و عملکرد بالا در کاربردهای مختلف عرضه کند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

منابع

[1] Menzler NH, Tietz F, Uhlenbruck S, Buchkremer HP, Stöver D. Materials and manufacturing technologies for solid oxide fuel cells. J Mater Sci 2010;45:3109–35.
[3] Hossain S, Abdalla AM, Binti Jamain SN, Zaini JJH, Azad AK. A review on proton conducting electrolytes for clean energy and intermediate temperature-solid oxide fuel cells. Renew Sustain Energy Rev 2017;79:750–64.
[2] Haile SM. Fuel cell materials and components. Acta Mater 2003;51:5981–6000.
[4] Jiang SP, Chan SH. A review of anode materials development in solid oxide fuel cells. J Mater Sci 2004;39:4405–39.
[5] Suntivich J, Gasteiger H, Yabuuchi N, Nakanishi H, Goodenough JB, Shao-Horn Y. Design principles for oxygen-reduction activity on perovskite oxide catalysts for fuel cells and metal-air batteries. Nat Chem 2011;3:546–50.
[6] Azad AK, Kim JH, Irvine JTS. Structural, electrochemical and magnetic characterization of the layered-type PrBa0.5Sr0.5Co2O5+δ perovskite. J Solid State Chem 2014;213:268–74.
[7] Azad AK, Irvine JTS. High density and low temperature sintered proton conductor BaCe0.5Zr0.35Sc0.1Zn0.05O3-d. Solid State Ion 2008;179:678–82.
[8] Rossmeisl J, Bessler WG. Trends in catalytic activity for SOFC anode materials. Solid State Ion 2008;178:1694–700.
[9] Sustainable Table. Fossil fuel and energy use; 2009. ⟨Www.Sustainabletable.Org⟩. p. 1–3.
[10] Chen FF. An indispensable truth: how fusion power can save the planet. Springer Science+Business Media, LLC; 2011.
[11]Energy Outlook; 2013.
http://www.instituteforenergyresearch.org/analysis/ fossil-fuels-still-king-in-eias-annual-energy-utlook-2013/⟩.
[12] Energy sources can be categorized as renewable or nonrenewable. ⟨https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?Page=about_home⟩.
[13] Global Future Energy. ⟨https://energyroutes.eu/2016/06/08/global-futureenergy-mix-fossil-fuels-vs-alternative-sources-of-energy/⟩.
[14] AN Conference, MW Melaina, Renewable N. Biogas and Fuel Cell Opportunities,7;2013.
[15] Möbius H-H. Chapter2 - History. High Temp Solid Oxide Fuel Cells 2003:23–51.
[16] Ghosh A, Azad A, Irvine JTS. Study of Ga doped LSCM as an anode for SOFC. ECS Trans 2011;35:1337–43. Fig. 21. Performance of SOFCs at different scales a) macro-scale, b) micro-scale and c) nano-scale [139,148,149].A.M. Abdalla et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 353–368 366
[17] Cook B. Introduction to fuel cells and hydrogen technology. Eng Sci Educ.J.2002;11:205.
[18] Singhal SC. Advances in solid oxide fuel cell technology. J Solid State.Ion.2000;135(1–4):305–13.
[19] Andjar JM, Segura F. Fuel cells: history and updating. A walk along two centuries.J Renew Sustain Energy Rev 2009;13:2309–22.
[20] Fuel Cell Origins.
⟨http://americanhistory.si.edu/fuelcells/origins/origins.htm⟩.2015-12-10.
[21] Hikosaka N. Fuel cells. Current technology challenges and future research needs. Elsevier B.V; 2013.
[22] Gross JH. Fuel cell technology. Jt Legis Air Water Pollut Comm I 2002;2:1–7.
[23] EG & G Technical Services I. Fuel Cell Handbook. Fuel Cell,; 2004, 7th ed. p.1–352.
[24] Feng H, Tim VG, Robert M, Hans PB. Development of nanostructured evelopment of nanostructured YSZ elecrolyte layers for SOFC applications via Sol-gel route. Ceram Mater Compon Energy Environ Appl 2010:165–75.
[25] Masaru T, Bo-Kuai L, Shriram R. Scalable nanostructured membranes for solidoxide fuel cells. Nat Nanotechnol 2011;6:282–6.
[26] Nanotechnology in Fuel Cells. ⟨http://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3032⟩.
[27] Development of handy fuel cell system. ⟨https://phys.org/news/2013-03-handyfuelcell.html⟩.
[28] Ishihara T. Nanomaterials for advanced electrode of low temperature Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs). J Korean Ceram Soc 2016;53(5):469–77.
[29] Next generation fuel cells. ⟨http://www.ntnutechzone.no/en/2017/01/nextgeneration-fuel-cells/⟩.
[30] Park JS, An J, Lee MH, Prinz FB, Lee W. Effects of surface chemistry and microstructure of electrolyte on oxygen reduction kinetics of solid oxide fuel cells. J Power Sources 2015;295:74–8.
[31] Mogni L, Prado F, Jiménez C, Caneiro A. Oxygen order–disorder phase transition in layered GdBaCo2O5+δ perovskite: thermodynamic and transport properties.Solid State Ion 2013;240:19–28.
[32] Tsipis EV, Naumovich EN, Patrakeev MV, Yaremchenko AA, Marozau IP, Kovalevsky AV, et al. Oxygen deficiency, vacancy clustering and ionic transport in (La,Sr)CoO3-δ. Solid State Ion 2011;192:42–8.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

[33] Yokokawa H, Tu H, Iwanschitz B, Mai A. Fundamental mechanisms limiting solid oxide fuel cell durability. J Power Sources 2008;182:400–12
[34] Goodenough JB. Electrochemical energy storage in a sustainable modern society. J Energy Environ Sci 2014;7:14–8.
[35] Stambouli AB, Traversa E. Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy. J Renew Sustain Energy Rev2002;6:433–55.
[36] Orera VM, Laguna-Bercero M, Larrea A. Fabrication methods and performance in fuel cell and steam electrolysis operation modes of small tubular solid oxide fuel cells: a review. Front Energy Res 2014;2:1–13.
[37] Radenahmad N, Afif A, Petra PI, Rahman SMH, Eriksson SG, Azad AK. Protonconducting electrolytes for direct methanol and direct urea fuel cells – A state-ofthe-art review. Renew Sustain Energy Rev 2016;57:347–1358.
[38] Afif A, Radenahmad N, Cheok Q, Shams S, Kim JH, Azad AK. Ammonia-fed fuel cells: a comprehensive review. Renew Sustain Energy Rev 2016;60:822–35.
[39] Das V, Padmanaban S, Venkitusamy K, Selvamuthukumaran R, Blaabjerg F, Siano P. Recent advances and challenges of fuel cell based power system architectures and control – A review. Renew Sustain Energy Rev 2017;73:10–8.
[40] Ahn M, Lee J, Lee W. Nanofiber-based composite cathodes for intermediate temperature solid oxide fuel cells. J Power Sources 2017;353:176–82.
[41] Evans A, Bieberle-Hutter A, Galinski H, Rupp JLM, Ryll T, Scherrer B. Micro-solid oxide fuel cells: status, challenges, and chances. Mon Fur Chem 2009;140:975–83.
[42] Nakajo A, Mueller F, Brouwer J, Van Herle J, Favrat D. Mechanical reliability and durability of SOFC stacks. Part II: modelling of mechanical failures during ageing and cycling. Int J Hydrog Energy 2012;37:9269–86.
[43] Mazumder SK, Acharya K, Haynes CL, Williams R, Von Spakovsky MR, Nelson DJ. Solid-oxide-fuel-cell performance and durability: resolution of the effects of powerconditioning systems and application loads. IEEE Trans Power Electron 2004;19:1263–78.
[44] Tesfi A, irvine JTS. solid oxides fuel cells: theory and material. Compr Renew Energy 2012;4:241–56.
[45] Abdalla AM, Hossain S, Petra PMI, Savaniu CD, Irvine JTS, Azad AK. Novel layered perovskite SmBaMn2O5+δ for SOFCs anode material. Mater Lett 2017;204:29–132.
[46] Tietz F, Buchkremer H-P, Stöver D. 10 Years of materials research for solid oxide fuel cells at Forschungszentrum Jülich. J Electroceram 2006;17:701–7.
[47] Huang X, Ni C, Zhao G, Irvine JTS. Oxygen storage capacity and thermal stability of the CuMnO2–CeO2 composite system. J Mater Chem A 2015;3:12958–64.
[48] Ge XM, Chan SH, Liu QL, Sun Q. Solid oxide fuel cell anode materials for direct hydrocarbon utilization. Adv Energy Mater 2012;2:1156–81.
[49] Bharadwaj SR, Varma S, Wani BN. Electroceramics for fuel cells, batteries and sensors. Funct Mater 2012:639–74.
[50] Steele BCH, Heinzel A. Materials for fuel-cell technologies. Nature2001;414:345–52.
[51] Shaikh SPS, Muchtar A, Somalu MR. A review on the selection of anode materials for solid-oxide fuel cells. Renew Sustain Energy Rev 2015;51:1–8.
[52] Holtappels P, Stimming U. Solid oxide fuel cells (SOFC). John Wiley & Sons, Ltd;2010.
[53] Arabacı A, Oksuzome MF. Preparation and characterization of 10 mol% Gd doped CeO2 (GDC) electrolyte for SOFC applications. Ceram Int 2012;38:6509–15.
[54] Rideal E. The fuel cell. Nature 1966;210:51–2.
[55] Brochu M, Loehman RE. Hermetic sealing of solid oxide fuel cells. Microjoin Nanojoin 2000:718–40.
[56] Haile SM. Mater Fuel Cells Mater Today 2003;63:24–9.
[57] Sun C, Hui R, Roller J. Cathode materials for solid oxide fuel cells: a review. J Solid State Electrochem 2010;14:1125–44.
[58] Kim YN, Kim JH, Huq A, Paranthaman MP, Manthiram A. (Y0.5In0.5)Ba(Co,Zn)4O7 cathodes with superior high-temperature phase stability for solid oxide fuel cells. J Power Sources 2012;214:7–14.
[59] Sammes NM, Roy BR. Fuel cells – solid oxide fuel cells|Cathodes. Encycl Electrochem Power Sources 2009:25–33.
[60] McCarthy BP, Pederson LR, Chou YS, Zhou XD, Surdoval WA, Wilson LC. Lowtemperature sintering of lanthanum strontium manganite-based contact pastes for SOFCs. J Power Sources 2008;180:294–300.
[61] Meixner DL, Cutler RA. Sintering and mechanical characteristics of lanthanum strontium manganite. Solid State Ion 2002;146:273–84.
[62] Khandale P, Lajurkar RP, Bhoga SS. Nd1.8Sr0.2NiO4−δ:Ce0.9Gd0.1O2−δ composite cathode for intermediate temperature solid oxide fuel cells. Int J Hydrog Energy 2014;39:19039–50.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

[63] Jeong C, Lee J-H, Park M, Hong J, Kim H, Son J-W. Design and processing parameters of La2NiO4+δ-based cathode for anode-supported planar solid oxide fuel cells(SOFCs). J Power Sources 2015;297:370–8.
[64] Meng F, Xia T, Wang J, Shi Z, Zhao H. Praseodymium-deficiency Pr0.94BaCo2O6-δ double perovskite: a promising high performance cathode material for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. J Power Sources 2015;293:741–50.
[65] Raharj J, Muchtar AT, Dawood WRW, Muhamad N, Majlanlie EH. Fabrication of porous LSCF-SDC carbonates composite cathode for Solid Oxide Fuel Cell (SOFC).Trans Tech Publ 2011;471:179–85.
[66] Kim JH, Cassidy M, Irvine JTS, Bae J. Advanced electrochemical properties of LnBa0.5Sr0.5Co2O5+δ (Ln=Pr, Sm, and Gd) as cathode materials for IT-SOFC. J Electrochem Soc 2009;156:B682.
[67] Wincewicz KC, Cooper JS. Taxonomies of SOFC material and manufacturing alternatives. J Power Sources 2005;140:280–96.
[68] Laosiripojana N, Wiyaratn W, Kiatkittipong W, Arpornwichanop A, Soottitantawat A, Assabumrungrat S. Reviews on solid oxide fuel cell technology. Eng J 2009;13:65–83.
[69] Wang Y, Leung DYC, Xuan J, Wang H. A review on unitized regenerative fuel cell technologies, part B: unitized regenerative alkaline fuel cell, solid oxide fuel cell, and microfluidic fuel cell. Renew Sustain Energy Rev 2017;75:775–95.
[70] Holland B, Zhu J, Jamet L. Fuel cell technology and application. Univ Technol;2007.
[71] Zhu B, Albinsson I, Mellander BE, Meng G. Intermediate-temperature protonconducting fuel cells present experience and future opportunities. J Solid State Ion 1999;125:439–46.
[72] Mahato N, Banerjee A, Gupta A, Omar S, Balani K. Progress in material selection for solid oxide fuel cell technology: a review. Prog Mater Sci 2015;72:141–337.
[73] Andersson M, Yuan J, Sundén B. SOFC modeling considering electrochemical reactions at the active three phase boundaries. Int J Heat Mass Transf 2012;55:773–88.
[74] Föger K. CFCL, challenges in commercialising an ultra-efficient SOFC residential generator. IPHE Work Station Fuel Cells 2011:1–29.
[75] Kan WH, Thangadurai V. Challenges and prospects of anodes for solid oxide fuel cells (SOFCs). J Ion 2014;21:301–18.
[76] Hathathreyan KSD, Rajalakshmi N, Balaji R. Nanomaterials for fuel cell technology,nanotechnology for energy sustainability, FirstEdition; 2017.
[77] Jiang SP. Nanoscale and nano-structured electrodes of solid oxide fuel cells by infiltration advances and challenges. Int J Hydrog Energy 2012;37:449–70.
[78] Zhuiykov S. Nanostructured semiconductor oxides for the next generation of electronics and functional devices. Woodhead Publishing Limited; 2014.
[79] Brahmayy M, Dai SA, Yi Suen S. Sulfonated reduced graphene oxide catalyzed cyclization of hydrazides and carbon dioxide to 1,3,4-oxadiazoles under sonication. Sci Rep 2017;7:4675.
[80] Chen Y, Gerdes K, Song X. Nanoionics and nanocatalysts: conformal mesoporous surface scaffold for cathode of solid oxide fuel cells. Sci Rep 2016;6:32997.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]

چکیده انگلیسی:

Investigating the performance of solid oxide fuel cells and the role of nanotechnology in its construction

Abdolkarim Afroozeh

Department of Electrical Engineering, University of Larestan, Lar, Iran

Received: October 2020, Accepted: December 2020

Abstract

Nanotechnology is well used in the development and performance improvement of solid oxide fuel cells (SOFCs). Extremely high SOFC performance (700-900 ° C) is available due to its serious overall performance and durability. Hence, the operating temperature is high as the average range decreases to at least 44-700 Celsius, which improves performance and belongs to SOFC, which is a portable energy source. Under these conditions, due to the reduction, the challenges increase the internal strength of the fuel cell components. Although this may not be a serious measure of the problems that arise at high temperatures, it still does not significantly affect SOFC performance. This article is for researchers in the field of application of nanotechnology in the construction of SOFC through different methods. These methods successfully eliminate or minimize internal resistance and show considerable attention to the SOFC energy absorption system as a result.

Key words: Solid oxide fuel cell, material development, nanomaterial, fuel cell performance
*corresponding author: afroozeh@lar.ac.ir

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.6.7]