شبیه‌سازی عددی سلول سوختی هیدروژنی غشائی دما بالا و بررسی توان میانگین سلول با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک

عرفان سلطانی[۱،۳]، سمیه یعقوبی[۲،۳*]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
*۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
s.yaghoubi@pmc.iaun.ac.ir
۳- مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل انرژی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
تاریخ دریافت:۱۴۰۱/۵/۵ تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۸/۱۵

چکیده: با پیشرفت مباحث انرژی و افزایش مناقشات پیرامون انرژی، روش‌های مختلفی برای سالم‌سازی و جلوگیری از کمبود منابع انرژی ارائه شده است. بهترین راه حل برای حل بحران، ذخیره انرژی و منابع آن با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و یا ترابری پایدار است که هر کدام مزایا و معایب مربوط به خود را دارند. سلول‌های سوختی به روزترین نمونه حمل و نقل پایدار برای سیستم‌های انرژی بوده و سیالات عامل در این تبدیل انرژی هیدروژن و اکسیژن هستند. پیل‌های سوختی در پنج نوع اصلی با الکترولیت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این مقاله یک پیل سوختی اکسید جامد در دمای بسیار بالا مدل شده به طوری که قادر باشد به توان میانگین حداکثری در این نوع پیل دست یافت. کنترل در پیل سوختی اهمیت فراوانی دارد. از تغییر ولتاژ ابتدایی پولاریزیشن سعی بر کنترل عملکرد پیل شده و یا به عبارت دیگر برای کنترل پیل سوختی ولتاژ ابتدایی تغییر کرده و با این تغییر ولتاژ، توان و آمپر سلول تغییر می کند و در دامنه تغییرات آن، عملکرد بهینه پیل سوختی حاصل خواهد شد. بازه تغییرات این نمودار به ابعاد، هندسه، ولتاژها و انرژی سلول وابسته است. ملاحظه می شود اگر چگالی جریان به مقدار تقریبی ۱۷۰۰ آمپر بر مترمربع برسد، متوسط توان سلول به حداکثر مقدار خود رسیده که هدف اصلی این شبیه‌سازی است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که هرچه میانگین چگالی جریان در سلول بیشتر شود ولتاژ سلول کاهش خواهد یافت، اما با افزایش ولتاژ اولیه، میانگین چگالی جریان هم روندی افزایشی خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی: سلول سوختی، کامسول، توان میانگین سلول، غشائی.

۱- مقدمه

انرژی و تولید آن، یکی از مهمترین مباحث در تاریخ بشری است. انسان در جهان مدرن توانسته است از فناوری‌های خاصی مانند تبدیل انرژی‌ها به یکدیگر استفاده کند. با اینکه تبدیل انرژی بحثی بسیار وسیع است اما مضرات اکوسیستمی و محیط زیستی آن می‌تواند تبدیل انرژی را به یکی از حساس ترین مباحث علوم بشری و عاملی برای تغییرات طرز زندگی این موجود تبدیل کند [۱،۲]. تا جایی که می‌توان گفت بیشتر جنگ‌ها یا کش مکش‌ها و حتی توافقات انسانی بر سر این بحران پر درد سر بوده است. از درگیری‌ها و توافقات بشری در این موضوع می‌توان به توافق بین‌المللی محیط زیستی پاریس، توافق بین‌المللی توکیو و تعداد بسیار زیادی از قطعنامه‌های شورای امنیت و شورای حکام بر سر انرژی-های نو اشاره کرد.

در قرن بیستم با پیشرفت انقلاب‌های انرژی و فوران کردن یکی پس از دیگری مناقشات بر سر این موضوع دانشمندان راه‌هایی را برای سالم-سازی و جلوگیری از کمبود منابع انرژی (حداقل برای نسل حاضر انسان) ارائه کردند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022

بهترین راه‌ها برای این زمینه "ذخیره انرژی و منابع آن" یا استفاده از "انرژی‌های تجدیدپذیر" و یا "ترابری پایدار" بودند که هر کدام سودها یا مضرات خاص خود را داشتند.

ذخیره انرژی هدر رفت بیشتری داشت و گاهی به دلیل پایدار نبودن انرژی حتما باید مصرف شود (مانند برق ناپایدار تولیدی از انرژی شکافت هسته اورانیوم)، ذخیره منابع آن منجر به مناقشات انسانی و بحران‌های بین‌المللی شد.

انرژی‌های تجدیدپذیر مشکلات کمتری نسبت به ذخیره انرژی دارند و حتی سودهایی مانند جلوگیری از ایجاد زباله‌های سوختی در آنها وجود دارد ولی دو مشکل اساسی دارند: هزینه بالای ساخت و پشتیبانی ادوات آن و کفاف ندادن انرژی تجدیدپذیر محیط زیستی به نیازهای جاه‌طلبانه بشر.

ترابری پایدار، عبارت است از پایدار سازی تولیدات و مصرف در انسان و سوخت به آن معنا که اگر انسان بتواند به اندازه نیاز نه بیشتر مصرف کند و در کنار آن انرژی‌های تجدیدپذیر عاملی باشند برای تولید سوختی باشند که طبیعت را هدف نگیرد. بنابراین می‌توان گفت که این معادله مبهم قابل حل است.

یکی از عناصر مهم شیمیایی که خود، سوختی بی‌ضرر است و سوختن آن به مایع حیات یعنی آب منجر شود هیدروژن است. این سوخت فوق-العاده ارزشمند که نه تنها قوی‌ترین منبع انرژی یعنی خورشید را شامل شده است بلکه اساس علم پرژه‌های نوین بشری است.

با جدا سازی عناصر آب، یعنی هیدرون و اکسیژن و استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت، امکان تولید انرژی الکتریکی وجود دارد. این واکنش که الکترولایز یا برق کافت نام دارد به طور غیر مستقیم و در طی دو فرآیند شیمی فیزیکی در قسمت فرآورده ها به همان واکنش دهنده اصلی یعنی آب باز می‌گردد.

سوخت عملیاتی در پیل‌های سوختی، گاز هیدروژن است. معمولاً بیشترین مقدار گاز هیدروژنی که در صنعت استفاده می‌شود، با روش رفرمینگ بخار متان (SMR[1]) تولید شده است. فرآیند اصلاح بخار متان، باعث تولید آلاینده‌های زیادی است که منجر به گرم شدن کره زمین می‌شود [۳].

فرآیند جالب دیگری که برای تولید هیدروژن به کار می‌رود، الکترولیز نام دارد. سیال عامل در این فرآیند اغلب آب است. الکترولیز آب، هیدروژن بسیار کمتری نسبت به اصلاح بخار متان آزاد می‌کند، تا جایی که نرخ تولید هیدروژن با اصلاح بخار متان ۹۵ درصد کل هیدروژن مورد نیاز دنیاست [۴].

الکترولیت پیل‌های سوختی اکسید جامد (SOFC[2]) سرامیکی است [۵، ۶]. پیل‌های سوختی اکسید جامد می‌توانند در دمای بالاتری نسبت به سایر پیل‌های سوختی کار کنند. دمای بهینه آنها به نوع غشاء آنها بستگی دارد. در واقع یکی از مهم ترین پارامترهای تعیین‌کننده برای دمای کارکرد، ویژگی‌های غشاء است. این موضوع همیشه نیاز به تجزیه و تحلیل تجربی در آزمایشگاه دارد. به عنوان مثال، در مرجع [۷] در مورد این مسئله به صورت خاص برای SOFC تحقیق کردند و آخرین نتایج آنها در این مطالعه استفاده شده است. بدیهی است که دمای عملیاتی بر راندمان پیل‌های تأثیر گذار است.

در مرجع [۸] موضوع پیشرفت، چالش‌ها و جهت گیری‌های آینده در فناوری هیدروژن و پیل سوختی مورد بحث قرار گرفته‌است. تحلیل‌های اخیر نشان می‌دهد که وسایل نقلیه الکتریکی سلول سوختی (FCEV[3]) یکی از امیدوارکننده‌ترین گزینه‌ها برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و استفاده از نفت هستند. تجزیه و تحلیل اولیه همچنین نشان می‌دهد که هزینه کل مالکیت FCEV با سایر گزینه‌های خودرو و سوخت پیشرفته قابل مقایسه خواهد بود.

در مرجع [۹] SOFC مسطح برای مطالعه خواص الکتروشیمیایی مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. برای مدلسازی آنها از کامسول مولتی فیزیک استفاده کردند و یک مدل سه بعدی برای پیل سوختی اکسید جامد با دمای متوسط توسعه دادند. نتایج آنها نشان داد که چگالی جریان الکترولیتی A/m^2 (۶۷۰۰-۵۵۰۰) برای مقدار پیک توان یعنی kW/m^2 (۳/۴-۳) با افزایش دمای (۶۰۰ درجه سانتی گراد تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد) است.

در مرجع [۱۰] شبیه سازی یک پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از کامسول مولتی فیزیک در مدل سه بعدی با یک کانال جریان تک انجام شد. در این مقاله دماهای مختلف، جریان جرمی و چگالی جریان مورد بررسی قرار گرفت. آنها به این نتیجه رسیدند که دمای بالاتر می-تواند منجر به عملکرد بهتر شود. همچنین، افزایش جریان ورودی می تواند چگالی توان را افزایش دهد اما منجر به کاهش راندمان مصرف سوخت می‌شود.

در این مقاله مدل یک پیل سوختی اکسید جامد که عمل ایجاد انرژی الکتریکی بهینه در آن حدودا در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می افتد، در نظر گرفته شده است. پیل سوخت هیدروژنی با دو محیط متخلخل اطراف یک غشاء است که در یک طرف غشاء، عمل واکنش یونیزاسیون هیدروژن و در طرف دیگر غشاء، واکنش هیدروژن با اکسیژن هوا و در پی آن تولید آب و حرارت رخ می‌دهد.

در شبیه‌سازی انجام شده ضریب مولی هر یک از مواد و پتانسیل نهایی الکترولیت در نقاط مختلف پیل به صورت کانتور ترسیم شده است. همچنین تغییرات متوسط توان و ولتاژ نسبت به متوسط چگالی جریان پیل نشان داده شده است. حل مسئله با روش المان محدود به صورت سه بعدی و توسط آخرین ورژن نرم افزار COMSOL-Multiphysics6 انجام شده است.

در ادامه مقاله به این شرح است. در بخش دوم به توضیح نرم افزار کامسول مولتی فیزیک و قابلیت های آن پرداخته می شود. در قسمت سوم به واکنش‌های شیمیایی و برخی معادلات حاکم در این شبیه‌سازی اشاره شده است. در قسمت چهارم به هندسه، مش‌بندی فیزیک مورد استفاده پرداخته شده و در قسمت پنجم صحت نتایج مورد ارزیابی قرار

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

گرفته است. در قسمت پنجم بررسی و تحلیل نتایج ارائه شده است. در نهایت در قسمت ششم نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- نرم افزار کامسول مولتی فیزیک و قابلیت های آن

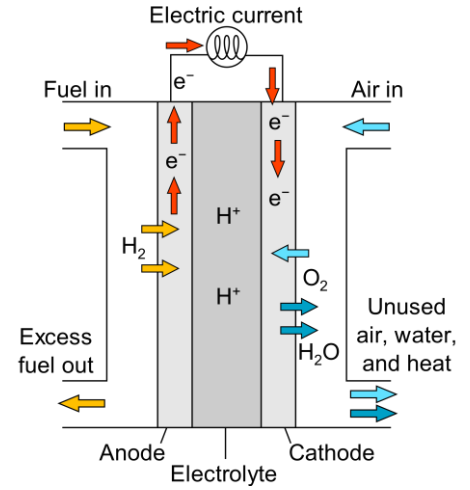
نرم افزار کامسول مولتی فیزیک در سال ۱۹۸۶ توسط دانشجویان پژوهشکده سلطنتی سوئد با نام FEMLAB برنامه نویسی شد. روش ریاضیاتی تحلیل مسائل توسط این نرم افزار، المان محدود می‌باشد. برقراری لینک لایو با نرم افزارهای مختلف از جمله متلب، سیمولینک و رویت بدون هیچ کد نویسی یکی از ویژگی هایی است که کامسول را از دیگر نرم افزار های تحلیلی متمایز می‌سازد. از دیگر ویژگی های این نرم افزار، کتابخانه متریال بسیار قدرتمند است که شامل فیزیک‌های متعدد و کوپلینگ آنها بدون هیچ برنامه نویسی خاصی است. در مسائلی که به برنامه نویسی نیاز دارد، می توان از لایو لینک با نرم افزار متلب استفاده کرد.

۳- واکنش‌های شیمیایی و معادلات

واکنش‌های پیل سوختی اکید جامد شامل سه واکنش آند، واکنش کاتد و واکنش کلی پیل است که به ترتیب با سه معادله زیر بیان می-شوند:

$$2H_2 + 2O^{2-} \longrightarrow 2H_2O + 4e^-$$
$$O_2(g) + 4e^- \longrightarrow 2O^{2-}$$
$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

مسئله انتخاب شده یک نوع پیل سوختی، با دمای بسیار بالا به نام پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) است که می‌توان گفت یکی از جدیدترین انواع پیل‌های سوختی هیدروژنی است. فرآیند این نوع پیل سوختی در شکل (۲) نشان داده شده است. غشاء این نوع پیل سوختی از جنس سرامیک Y-Stabilized Zro2 است.



شکل (۲): فرآیند یک پیل سوخت هیدروژنی اکسید جامد

همان‌طور که دیده می‌شود هیدروژن از یک سمت وارد می‌شود و با پایه آند برخورد می‌کند، الکترون خود را از دست می‌دهد و خارج می‌شود. آند به راحتی الکترون خود را به مصرف کننده انتقال می‌دهد و پایه کاتد که در طرف دیگر غشائی که با بار مثبت است، به هوا متصل می‌گردد. کاتد با اکسیژن هوا واکنش داده و آب و حرارت آزاد می‌کند. دمای پیل سوختی عموما نباید به حدی باشد که غشاء خشک شود چون لازمه این فرآیند رطوبت است. هدف از مسئله مورد نظر بررسی عددی پیل سوختی در دمای بسیار بالا است در حالتی که بتوان به توان میانگین حداکثری در این نوع پیل رسید. پارامترها و معادلات، توسط کد نویسی پارامتریک در این نرم افزار انجام شده که پارامترها در شکل (۴) نشان داده شده است.

پیل سوختی با ساختمان فیزیکی الکتروشیمیایی، یک المان پر بازده در عین حال همراه با تولید انرژی پاک است. ساختمان شیمیایی پیل سوختی در هر نوعی که با سوخت معدنی یا آلی باشد تولید فرآورده‌های معدنی می‌کند. لذا می‌توان از پیل سوختی به عنوان دستگاه تولید انرژی همگام با حفظ محیط زیست یاد کردشصططس.

طبق شکل شماره (۳) که از مرجع[۵] استفاده شده است، یک پیل سوختی حدود ۱۰۰ الی ۳۰۰۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع تولید جریان می‌کند. این در حالی است که سلول‌های خورشیدی از ۱۰ الی ۳۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع و یک باتری از ۰٫۱ تا ۱۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع تولید جریان دارد. پس المانی پر بازده‌تر از موارد مشابه است [۵].

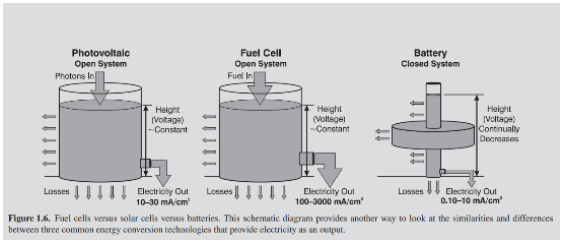


Figure 1.6. Fuel cells versus solar cells versus batteries. This schematic diagram provides another way to look at the similarities and differences between three common energy conversion technologies that provide electricity as an output.

شکل (۳): مقایسه ی پیل سوختی با سلول خورشیدی و باتری

Name	Expression and Value	Description
p_atm	1[atm]	Atmospheric pressure
T	800[degC]	Temperature
dp_a	2[Pa]	Pressure drop, anode
dp_c	6[Pa]	Pressure drop, cathode
perm_a	1e-10[m^2]	Anode permeability
perm_c	1e-10[m^2]	Cathode permeability
V_pol	0.05[V]	Initial cell polarization
V_cell	1[V]-V_pol	Cell voltage
i0_a	0.1[A/m^2]	Exchange current density, anode
i0_c	0.01[A/m^2]	Exchange current density, cathode
Sa_a	1e9[1/m]	Specific surface area, anode
Sa_c	1e9[1/m]	Specific surface area, cathode
kl	5[S/m]	Electrolyte conductivity
fl_a	0.2	Electrolyte conductivity correction factor, anode
fl_c	0.2	Electrolyte conductivity correction factor, cathode
kseff_a	1000[S/m]	Solid effective conductivity, anode
kseff_c	1000[S/m]	Solid effective conductivity, cathode
e_por	0.4	Porosity
Mh2	2[g/mol]	Molar mass, H2
Mo2	32[g/mol]	Molar mass, O2
Mn2	28[g/mol]	Molar mass, N2
Mh2o	18[g/mol]	Molar mass, H2O
w_h2ref	0.4	Inlet weight fraction, H2 at anode
w_h2oref_a	1-w_h2ref	Inlet weight fraction, H2O at anode
Mn0_a	1/(w_h2ref/Mh2+w_h2oref_a/Mh2o)	Initial mean molar mass, anode
x_h2ref	w_h2ref*Mn0_a/Mh2	Inlet mole fraction, H2 at anode
x_h2oref_a	1-x_h2ref	Inlet mole fraction, H2O at anode
w_o2ref	0.15	Inlet weight fraction, O2 at cathode
w_h2oref_c	0.37	Inlet weight fraction, H2O at cathode
w_n2ref	1-w_o2ref-w_h2oref_c	Inlet weight fraction, N2 at cathode
Mn0_c	1/(w_o2ref/Mo2+w_h2oref_c/Mh2o+w_n2ref/Mn2)	Initial mean molar mass, cathode
x_o2ref	w_o2ref*Mn0_c/Mo2	Inlet mole fraction, O2 at cathode
x_h2oref_c	w_h2oref_c*Mn0_c/Mh2o	Inlet weight fraction, H2O at cathode
x_n2ref	1-x_h2oref_c-x_o2ref	Inlet mole fraction, N2 at cathode
p_h2ref	x_h2ref*p_atm	Reference pressure, H2 at anode
p_h2oref_a	x_h2oref_a*p_atm	Reference pressure, H2O at anode
p_o2ref	x_o2ref*p_atm	Reference pressure, O2 at cathode
W_channel	0.5e-3[m]	Gas flow channel width
W_rib	0.5e-3[m]	Rib width
H_gde	1e-4[m]	Gas diffusion electrode thickness
H_electrolyte	1e-4[m]	Electrolyte thickness
H_channel	0.5e-3[m]	Gas flow channel height
L	10e-3[m]	Flow channel length

شکل (۴): پارامترها و معادلات کد نویسی شده

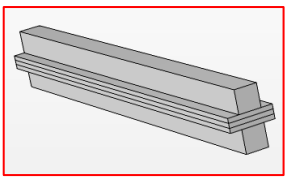
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

لازم به ذکر است پارامتر S (ماتریس S) نمادی از پاسخ درایه‌ها است که رفتار شبکه الکتریکی خطی را در مسائل دائم مدل می‌کند. به‌طوری که اگر فرض گردد یک موج الکتریکی ولتاژی خاص ایجاد کند این ماتریس با درایه‌های مختلط تعدادی از داده‌های جریان را در شرایط پایا بررسی کرده و نمایش می‌دهد.

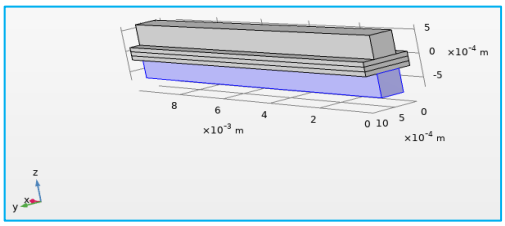
۴- هندسه مسئله، مش‌بندی و فیزیک آن

هندسه مسئله از چند قسمت تشکیل شده که در ابتدا در شکل (۵) یک هندسه کلی از پیل شبیه‌سازی نشان داده شده است.

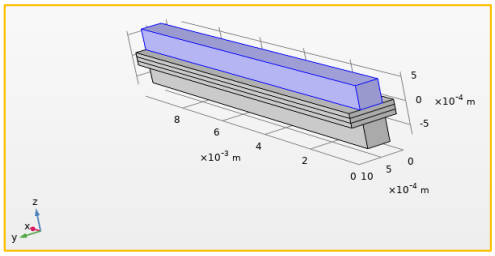
قسمت‌های مختلف این پیل شامل کانال سیال آندی و کاتدی، پایه آند و کاتد و در نهایت غشاء سرامیکی در تصاویری که در ادامه آمده، نشان داده شده‌اند. این قسمت‌ها در تصاویر مربوطه با رنگ آبی قابل مشاهده است. برای شبکه‌بندی (مش‌بندی) مدل، از شبکه با سازمان استفاده شده که ابتدا در سطح به صورت مربعی، ترسیم شده و سپس به حالت سه بعدی تعمیم پیدا کرده است.



شکل (۵): هندسه کلی مسئله

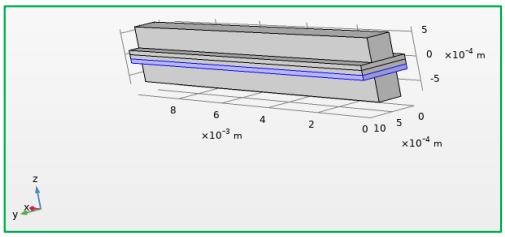


(الف) کانال سیال آندی یا کانال هیدروژن

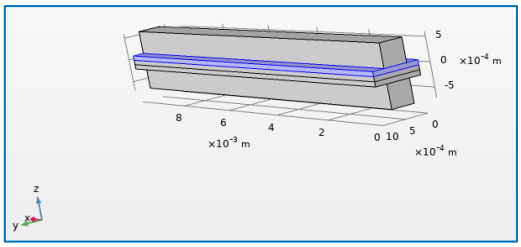


(ب) کانال سیال کاتدی یا کانال اکسیژن

شکل (۶): کانال سیال آند و کاتد

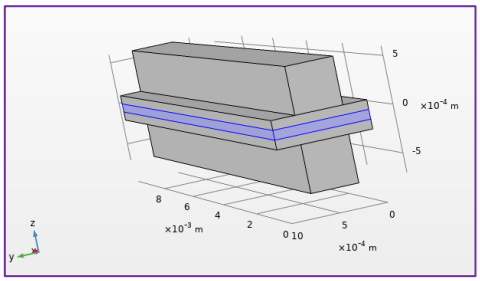


(الف) پایه آند

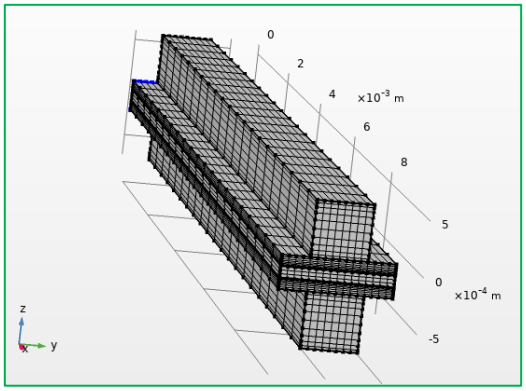


(ب) پایه کاتد

شکل (۷): پایه‌های آند و کاتد



شکل (۸): غشاء سرامیکی



شکل (۹): مش‌بندی مسئله مورد مطالعه

در کل با معیار Skewness، تعداد ۹۷۴۴ المان نقطه‌ای با سازمان و ۴۲۴۶ المان خطی Quadratic برای این مش‌بندی استفاده شده است. فیزیک‌های مسئله در سه بخش قابل توصیف هستند. به طور کلی فیزیک مهم و پایه در این مسئله مربوط به ماژول Fuel Cell است. دو فیزیک دیگر مورد مطالعه Free and Porous Media Flow است. این فیزیک برای مدل کردن جریان آزاد در محیط متخلخل یکی برای محیط آندی و یکی برای محیط کاتدی در نظر گرفته می‌شود و زیر مجموعه ماژول جریان سیال یا Fluid Flow است. جریان مورد نظر برای این مسئله جریان تراکم پذیر با ماخ کمتر از ۰/۳در نظر گرفته شده و جریان کاملا همرفتی است. به دلیل پایا بودن مسئله، شرایط اولیه در مسئله وارد نخواهد شد. شرایط مرزی و مسائل مربوط به تعریف دامنه‌ها به شرح زیر است:

- ورودی و خروجی جریان سیال درکانال‌های کاتدی و آندی
- در دیواره‌های بیرونی کاتد و آند شرط مرزی لغزش
- برای دیگر دیواره‌ها شرط مرزی عدم لغزش
- شرط نفوذ در دامنه‌های کاتدی و آندی
- در دیواره‌های آند شرط مرزی اتصال به زمین بر قرار است

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

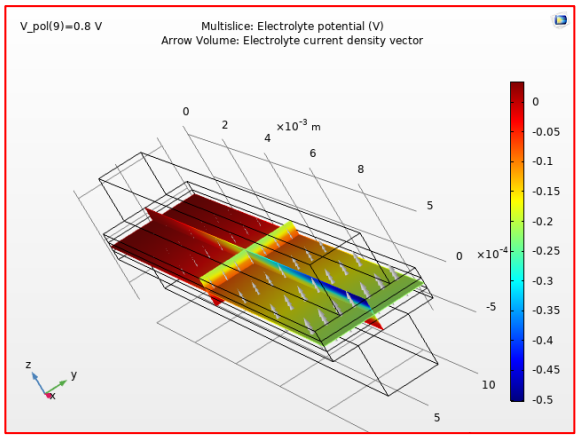
- در دیواره‌های کاتد شرط مرزی پتانسیل بر قرار است

روش حل مسئله و حلگرها به صورت تقسیم کردن رخ داده است به این کیفیت که چند حلگر به طور کوپل شده با هم حل مسئله را انجام می‌دهند این کار حجم معادلات را پایین آورده و مسئله را بهینه‌تر می‌کند. با این روش می‌توان مقدار مشخصه بعضی از پارامترها را پایین‌تر آورد اما ولتاژ بالاتری از مسئله گرفت و بهینه‌تر مسئله را تحلیل کرد. برای به دست آوردن cell current density از Probe در قسمت دامنه الکترود کاتد استفاده شده تا بتوان مقدار نفوذ الکترون‌ها را اندازه‌گیری کرد. برای این Probe از رابطه مقدار انرژی پیل سوختی ضربدر ضخامت کاتد استفاده شده است.

حلگرهای مسئله Current Distribution Initialization وStationary هستند که حلگر اول برای حل فیزیک Hydrogen Fuel Cell در حالت-های اولیه و ثانویه استفاده می شود. از حلگر Stationary دو مرتبه برای فیزیک‌های جریان آزاد در محیط متخلخل و یک مرتبه برای همه فیزیک‌ها و کوپلینگ‌های آنها استفاده شده است. به جرأت می‌توان گفت که این روش حل، یکی از بهینه‌ترین روش‌های حل برای مسائل المان محدود است. زیرا که در این روش حل، پارامترهای مختلف در حلگرها، تقسیم‌بندی می‌شوند و برای هرکدام یک یا دو معادله برای حل نوشته می‌شوند. برای حل‌های Current Distribution Initialization و دو حل Stationary مربوط به فیزیک‌های جریان در محیط متخلخل از روش-هایی استفاده شده است سومین حلگر Stationary از روش Segregated با تلرانس ۱۵۰ حل را انجام می‌دهد. خطای نسبی روش را با کاهش تدریجی ولتاژ سلول از طریق افزایش گام به گام مقدار اولیه ولتاژ پلاریزیشن اندازه می‌گیرد. به منظور به دست آوردن نتایج بهینه و کاملتر برای پارامتر مورد نظر V_pol (Initial Cell Polarization) یک Parameter Sweep در نظر گرفته یا در قسمت Auxiliary Sweep برای حلگر Stationary مربوط به تمام فیزیک‌ها و کوپلینگ‌های آنها عبارت range (0.1, 0.1, 0.8) 0.05 وارد می‌شود.

۵- نتایج شبیه‌سازی

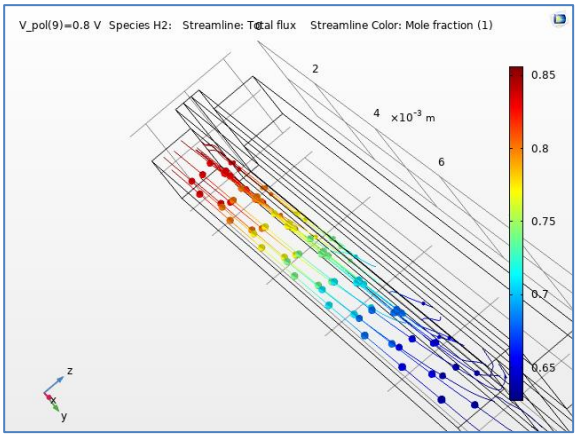
در این قسمت نتایج شبیه‌سازی ارائه و بررسی می‌شود. شکل (۱۰) توزیع پتانسیل در الکترولیت را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار پتانسیل همان‌طور که انتظار می‌رود در کاتد و کمترین مقدار پتانسیل در آند اتفاق می‌افتد، زیرا که به زمین متصل است و دارای پتانسیل صفر خواهد بود. در این شکل سر مثبت بردارهای نشان داده شده، همان جهت حرکت جریان الکتریکی است و از آنجایی که تجمع بارهای منفی در سمت راست و بالای غشاء نسبت به سمت چپ آن بیشتر است، توزیع پتانسیل به صورتی است که در شکل مشاهده می‌شود.



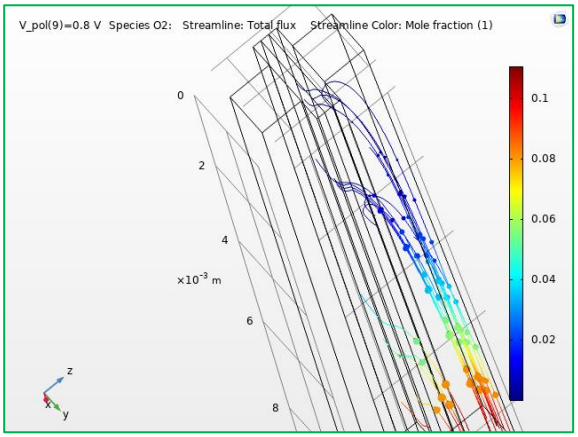
شکل (۱۰): توزیع پتانسیل در الکترولیت

در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که نفوذ هیدروژن از آند به سمت غشاء در بالادست غشاء بیشتر است. هر چه به سمت پایین دست غشاء به پیش حرکت شود، میزان نفوذ هم کاهش می‌یابد.

در شکل (۱۱) چنانچه انتظار می‌رود، نفوذ اکسیژن از کاتد به سمت غشاء در پایین دست غشاء بیشتر بوده و هر چه به سمت بالا دست غشاء حرکت شود، میزان نفوذ هم کاهش می‌یابد. اتفاقی که عکس نفوذ هیدروژن در غشاء است.

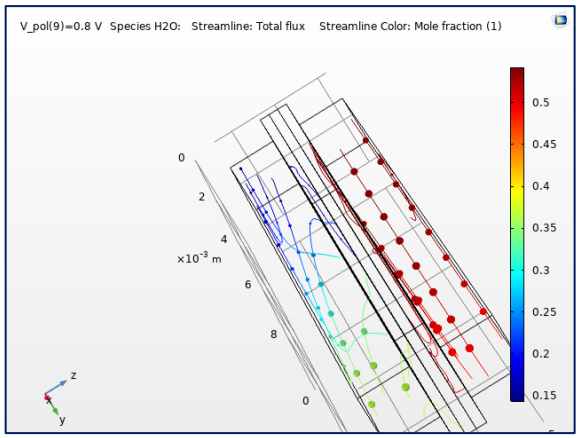


شکل (۱۱): کانتورهای حرکت هیدروژن نشان دهنده نفوذ این عنصر در الکترود آند



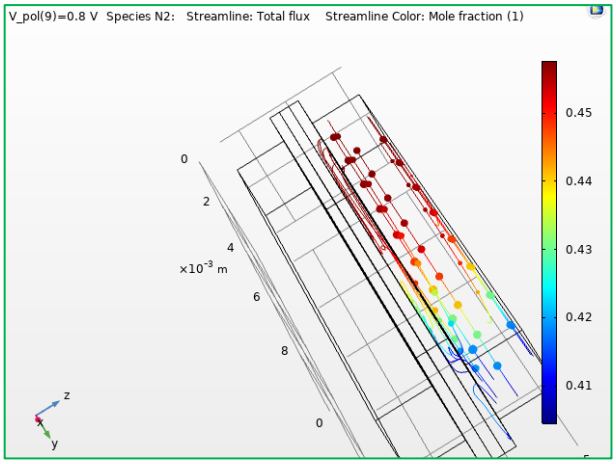
شکل (۱۲): کانتورهای حرکت اکسیژن بیانگر نفوذ مولکول‌های این عنصردر قسمت غشاء

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

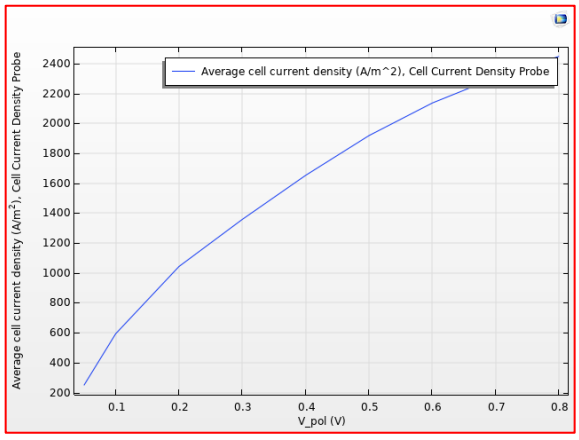


شکل (۱۳): نسبت مولی آب در اطراف غشاء

با نفوذ دو عنصر اکسیژن و هیدروژن در سمت راست غشاء، تعداد مولکول‌های آب تولید شده در آن سمت غشاء افزایش خواهد داشت. در شکل (۱۴) می‌توان نتیجه گرفت که میزان نفوذ مولکول‌های هوا در نقاط مختلف غشاء تقریبا یکسان بوده است.



شکل (۱۴): نسبت مولی نیتروژن هوا در اطراف غشاء

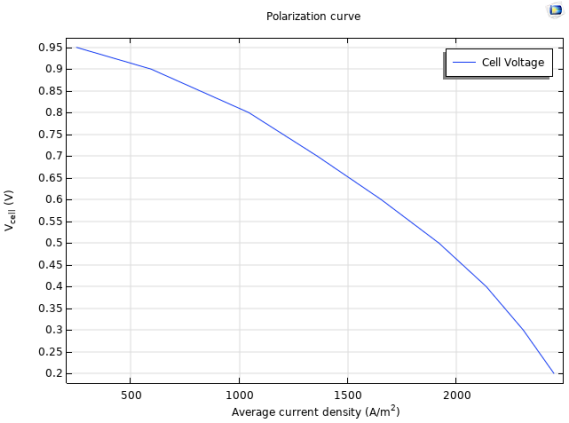


شکل (۱۵): نمودار میانگین چگالی جریان پیل بر واحد سطح غشاء نسبت به ولتاژ اولیه

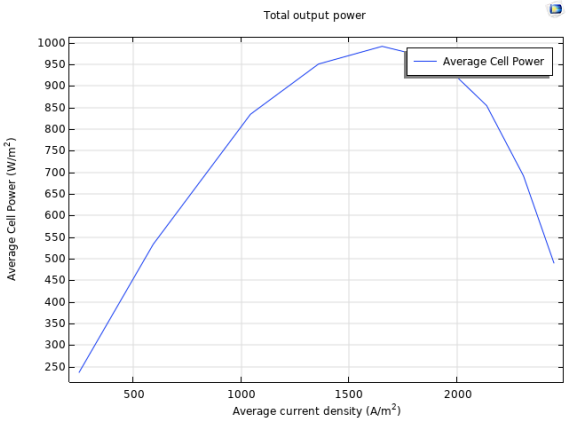
چنانچه در شکل (۱۵) دیده می‌شود، افزایش ولتاژ پلاریزیشن منجر به افزایش میانگین چگالی جریان پیل بر واحد سطح غشاء شده ولی همزمان کاهش شیب این نسبت به ولتاژپلاریزیشن اتفاق افتاده است.

از آنجایی که ولتاژ سلول به صورت $V_{cell} = 1 - V_pol$ تعریف شده است، پس انتظار می‌رود روند تغییرات ولتاژ سلول نسبت به میانگین چگالی جریان پیل، همان‌طور که در شکل (۱۶) قابل مشاهده است، روندی کاهشی داشته باشد، اما در این نمودار شیب تغییرات افزایشی است.

در شکل (۱۷) تغییرات متوسط توان سلول نسبت به میانگین چگالی جریان پیل نشان داده شده است. در حقیقت میانگین توان پیل مهمترین خروجی از شبیه‌سازی است و همان حاصلضرب ولتاژ سلول در میانگین چگالی جریان پیل است. در این نمودار مشاهده می‌شود اگر چگالی جریان به مقدار تقریبی ۱۷۰۰ آمپر بر مترمربع برسد، متوسط توان سلول به حداکثر مقدار خود رسیده که هدف اصلی این شبیه‌سازی است.



شکل (۱۶): نمودار میانگین چگالی جریان پیل نسبت به ولتاژ پیل



شکل (۱۷): نمودار میانگین توان پیل نسبت به میانگین چگالی جریان پیل

استفاده از ولتاژ پولاریزیشن یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های این مسئله است. کنترل پیل سوختی از مباحث مهم در پیل سوختی محسوب می‌شود. در این مسئله به جای این موضوع که ولتاژ سلول را بالا یا پایین برده و به گسترش مسئله پرداخته شود، از تغییر ولتاژ ابتدایی

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

پولاریزیشن استفاده شده است. به عبارت دیگر برای کنترل پیل سوختی ولتاژ ابتدایی تغییر کرده و با این تغییر ولتاژ، توان و آمپر سلول تغییر می‌کند و در دامنه تغییرات آن، عملکرد بهینه پیل سوختی حاصل خواهد شد.

۶- نتیجه‌گیری

پیل سوختی اکسید جامد نوعی پیل سوختی دارای غشاء سرامیکی هستند که یک طرف آنها هیدروژن جریان دارد و طرفی دیگر آن اکسیژن. با بررسی نوعی از این پیل سوختی و خروجی‌های به دست آمده از مسئله فوق، می‌توان به صورت خلاصه نتایج زیر را بیان کرد:

- در دماهای بالا (حدود ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) در صورت خشک نشدن غشاء سلول‌های سوختی می‌توان به بررسی آنان پرداخت.
- هرچه میانگین چگالی جریان در سلول بیشتر شود ولتاژ سلول کاهش خواهد یافت، اما هر چه ولتاژ اولیه بالاتر رود میانگین چگالی جریان هم روندی افزایشی خواهد داشت.
- نمودار میانگین توان سلول بر حسب میانگین چگالی جریان، یک نمودار دارای حداکثر است به آن معنا که توان سلول تا حدی می تواند با افزایش میانگین چگالی جریان در سلول، روندی افزایشی داشته باشد ولی بعد از آن با افزایش این پارامتر، رو به کاهش خواهد گذاشت. بازه تغییرات این نمودار به ابعاد، هندسه، ولتاژ ها و انرژی سلول وابسته است. مقدار میانگین چگالی جریان در سلول که به ازاء آن، میانگین توان سلول به حداکثر خود می‌رسد، جریانی است که در آن، مقدار بهینه توان حاصل خواهد شد.

مراجع

[۱] کفایت م.، لشکرآرا ا.، نبوی‌نیاکی س.ع.، **"مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه نیروگاه بادی مبتنی بر DFIG، پیل سوختی و نیروگاه خورشیدی با استفاده از ترکیب منطق فازی و الگوریتم اجتماع ذرات"**، تحقیقات نوین در برق، سال ۱، ش.: ۳، ص.: ۲۷-۳۶، ۱۳۹۱.

[۲] نجاتی ز.، شیخ‌الاسلام ف.، محمودیان ح.، **"کنترل فازی پیل سوختی پلیمری به منظور جذب ماکزیمم توان"**، روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۴، ش.: ۱۶، ص.: ۶۳-۷۰، ۱۳۹۲.

[3] M.A. Abdelkareem, K. Elsaid, T. Wilberforce, M. Kamil, E.T. Sayed, A. Olabi, "*Environmental aspects of fuel cells: A review*," Science of The Total Environment, vol. 752, no. 141803, 2021.

[4] S.M. Soltani, A. Lahiri, H. Bahzad, P. Clough, M. Gorbounov, Y. Yan, "*Sorption-enhanced Steam Methane Re- forming for Combined CO2 Capture and Hydrogen Production: A State-of-the-Art Review*" Carbon Capture Science & Technology, vol. 1, no. 100003, 2021

[5] R. O'Hayre, S.W. Cha, W.G. Colella, F.B. Prinz, "*Fuel Cell Fundamentals"*, New Jersey: WILEY, 2016.

[6] J.M. Park, D.Y. Kim, J.D. Baek, Y.J. Yoon; P.C. Su, S.H. Lee, "*Numer- ical Study on Electrochemical Performance of Low-Temperature Micro-Solid Oxide Fuel Cells with Submicron Platinum Electrodes*" Energies, vol. 11, no. 5, 2018.

[7] G. Yang, C. Su, H. Shi, Y. Zhu, Y. Song, W. Zhou, Z. Shao, "*Toward Reducing the Operation Temperature of Solid Oxide Fuel Cells: Our Past 15 Years of Efforts in Cathode Development*" Energy & Fuels, vol. 34, no. 12, pp. 15169-15194, 2020.

[8] N.L. Garland, D.C. Papageorgopoulos, J.M. Stanford "*Hydrogen and fuel cell technology: Progress, challenges, and future directions",* Energy Procedia, vol. 28 pp. 2 – 11, 2012.

[9] J. Hussain, R. Ali, M.N. Akhtar, M.H. Jaffery, I. Shakir, R. Raza, "*Modeling and simulation of planar SOFC to study the electrochemical properties*", Current Applied Physics, vol. 20, pp. 660–672, 2020.

[10] Q. Yaoxuan, F. Cheng, S. Kening, *"Multiphysic simulation of a Solid Oxide fuel cell based on COMSOLl method",* E3s, web of conferences, 245, 01005, 2021

رزومه



سمیه یعقوبی تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی مکانیک (طراحی مکانیکی)، کارشناسی‌ارشد مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی) و دکتری مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی) را به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نموده‌اند. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه تبدیل انرژی، روش‌های عددی شبیه‌سازی، بایومکانیک و انرژی‌های تجدیدپذیر است.

عرفان سلطانی تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی مکانیک در سال ۱۳۹۹از دانشگاه آزاد نجف آباد اخذ نموده‌اند. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه تبدیل انرژی، روش-های عددی شبیه‌سازی، انرژی‌های تجدیدپذیر است.

زیرنویس‌ها

[1] Steam methane reforming
[2] Solid Oxide Fuel Cells
[3] Fuel cell electric vehicles

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.4.0]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022

Numerical Simulation of High Temperature Membrane Hydrogen Fuel Cell and Optimization of Average Cell Power

Erfan Soltani[1, 3], Somaye Yaghoubi[2,3]

1- MSc- Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
2- Assistant Professor- Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, s.yaghoubi@pmc.iaun.ac.ir
3- Aerospace and Energy Conversion Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract: With the advancement of energy issues and the increase of disputes over energy, various methods have been proposed to sanitize and prevent the shortage of energy resources. The best solution to the crisis is to save energy and its resources using renewable energy or sustainable transportation, each with its own advantages and disadvantages. Fuel cells are the most up-to-date example of sustainable transport for energy systems, and the fluids involved in this conversion are hydrogen and oxygen. Fuel cells have been studied in five main types with electrolytes. In this paper, a solid oxide fuel cell is modeled at a very high temperature so that it can achieve the maximum average power in this type of cell. Control in the fuel cell is very important. From the change of the initial polarization voltage, an attempt is made to control the performance of the cell, or in other words, to control the fuel cell. The range of changes in this diagram depends on the dimensions, geometry, voltages and energy of the cell. It is observed that if the current density reaches approximately 1700 amps per square meter, the average cell power reaches its maximum value, which is the main purpose of this simulation. The results also show that the higher the average current density in the cell, the lower the cell voltage, but with increasing initial voltage, the average current density will increase.

Keywords: Fuel cell, COMSOL, Average cell power, Membrane.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.4.0]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.4.0]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 3- Autumn 2022