



Simulation of a vehicle equipped with a proton exchange membrane fuel cell and investigating the effect of related parameters

Abolfazl Mohammadebrahim^{*}, Alireza Kocharian

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Proton exchange Membrane Fuel Cell
GT-Suite
Battery Management System
Output Power
Average Fuel Cell Temperature

ABSTRACT

In this paper, while examining the use of fuel cells in vehicles and past research, modeling of vehicles equipped with fuel cells with GT-SUITE software has been performed. In this modeling, various details have been considered and the specifications of a model vehicle have been used. In the following, the effect of effective parameters on the performance of the polymer membrane fuel cell is investigated. The simulation conditions are obtained by considering the existence of battery management system. The obtained results showed that with increasing the number of fuel cells and the surface area of the fuel cells, the output power of the fuel cell increases. Also, according to the simulation performed, with increasing the thickness of the fuel cells, the output power of the fuel cell remains constant. Although some results have been qualitatively predictable, it is important to know the impact of these parameters on the design. Then, the effect of load transfer coefficient and mass transfer coefficient of fuel cell mass was investigated. The results show the sensitivity of each parameter on the performance of the fuel cell and it was found that the effect of the parameters of the number of fuel cells and the surface area of the fuel cells is more pronounced than other parameters. Also, in these simulations the effect of changes made on the average temperature of the fuel cell was evaluated.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

^{*} Corresponding author

E-mail address: m.abraham@arakut.ac.ir (Abolfazl Mohammadebrahim)

Received 22 August 2022; Accepted 7 September 2022

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: A. Mohammadebrahim, A. Kocharian, Simulation of a vehicle equipped with a proton exchange membrane fuel cell and investigating the effect of related parameters, The Journal of Engine Research, 70/1 (2023) 28-46, <https://doi.org/10.22034/er.2023.1975326.0>.

شبیه‌سازی خودروی مجهز به پیل سوختی غشاء تبادل پروتونی و بررسی اثر پارامترهای مرتبط

ابوالفضل محمدابراهیم*، علیرضا کوچاریان

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

چکیده

در این مقاله، ضمن بررسی استفاده از پیل سوختی در خودرو و تحقیقات گذشته، مدل‌سازی خودرو مجهز به پیل سوختی با نرم‌افزار GT-SUITE انجام شده است. در این مدل‌سازی جزئیات مختلفی در نظر گرفته شده و از مشخصات یک خودروی نمونه استفاده شده است. در ادامه اثر پارامترهای مؤثر بر عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری با انجام شبیه‌سازی، بررسی شده است. شرایط شبیه‌سازی با در نظر گرفتن وجود سامانه مدیریت باتری به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش تعداد سلول‌های سوختی و مساحت سطح سلول‌های سوختی، توان خروجی پیل سوختی افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شبیه‌سازی انجام شده با افزایش ضخامت سلول‌های سوختی توان خروجی پیل سوختی ثابت می‌ماند. اگرچه بعضی نتایج از لحاظ کیفی قابل پیش‌بینی بوده است ولی دانستن مقدار تأثیر این پارامترها در طراحی بسیار مهم است. در ادامه نیز اثر ضریب انتقال بار و ضریب افت انتقال جرم پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دهنده حساسیت هر پارامتر بر عملکرد پیل سوختی است و مشخص گردید که اثر پارامترهای تعداد سلول‌های سوختی و مساحت سطح سلول‌های سوختی، نسبت به سایر پارامترها بارزتر است. همچنین در این شبیه‌سازی‌ها اثر تغییرات انجام شده بر دمای متوسط پیل سوختی مورد ارزیابی قرار گرفت.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

پیل سوختی غشاء تبادل پروتونی
جی‌تی سوئیت
سامانه مدیریت باتری
توان خروجی
دمای متوسط پیل سوختی



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

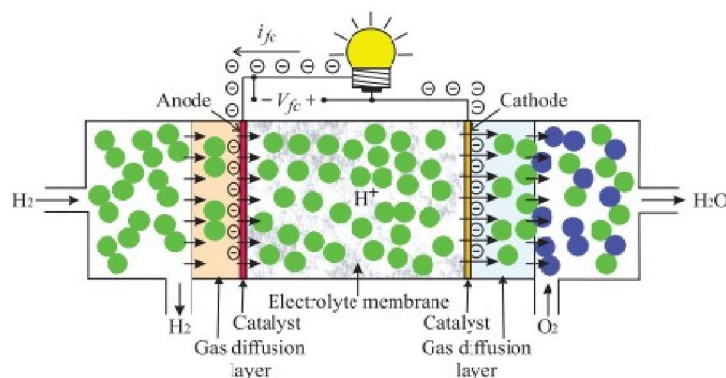
پست الکترونیکی: m.ebrahim@arakut.ac.ir (ابوالفضل محمدابراهیم)

دریافت ۳۱ مرداد ۱۴۰۱؛ پذیرش ۱۶ شهریور ۱۴۰۱
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۳۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: A. Mohammadebrahim, A. Kocharian, Simulation of a vehicle equipped with a proton exchange membrane fuel cell and investigating the effect of related parameters, The Journal of Engine Research, 70/1 (2023) 28-46, <https://doi.org/10.22034/er.2023.1975326.0>.

۱- مقدمه

انتشار گازهای گلخانه‌ای و به تبع آن گرم شدن کره زمین، آب شدن یخ‌های قطبی، آلوده شدن هوا و همچنین باران‌های اسیدی از تأثیرات مخرب استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی می‌باشند. برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در شهرها باید مصرف سوخت ناشی از سوخت‌های فسیلی را کاهش داد. یکی از گزینه‌های جایگزین، استفاده از خودروهای الکتریکی است که در نوعی از آن‌ها انرژی موردنیاز از پیل‌های سوختی تأمین می‌شود. یک دانشمند انگلیسی به نام ویلیام رابرت گرو^۱ در سال ۱۸۳۹ با ترکیب اکسیژن، هیدروژن و تولید آب توانست جریان الکتریسیته تولید کند. این فرایند برعکس فرایند الکترولیز است که از جریان الکتریسیته برای شکستن آب به اجزای سازنده آن استفاده می‌شود (شکل ۱).



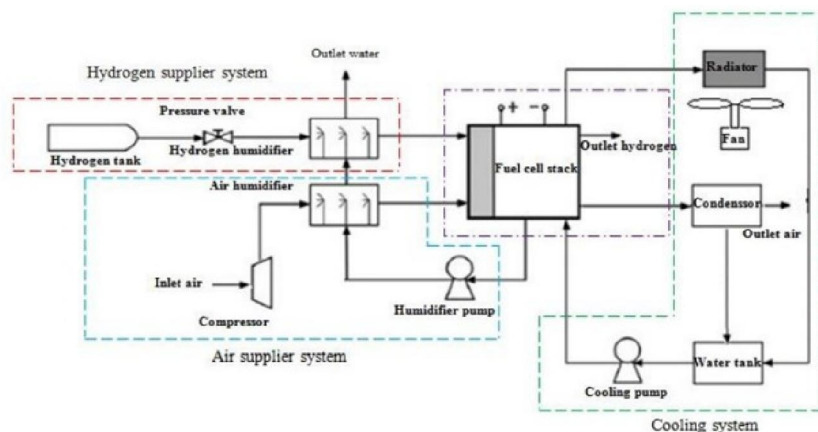
شکل ۱ تصویر ساخت سلول سوختی غشای تبادل پروتون^۲

پیل‌های سوختی، انرژی را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. بازده کلی پیل‌های سوختی بین ۴۵ تا ۷۵ درصد است. پیل‌های سوختی می‌توانند بازده بالا در ظرفیت‌های کوچکی به اندازه ۱۰۰ کیلووات ایجاد نمایند. مزایایی که باعث شده است پیل سوختی پلیمری یکی از گزینه‌های استفاده در حمل‌ونقل باشد عبارت است از: کاهش مصرف سوخت و بالتبع آن کاهش گازهای گلخانه‌ای، چگالی قدرت بالا، کارکرد بدون صدا و شروع به کار سریع، طراحی و هم‌بندی ساده، مستقل از طرز قرارگیری الکترولیت جامد و محدوده کاربرد وسیع.

به‌منظور استفاده از توده پیل سوختی به‌عنوان منبع تأمین قدرت یک خودرو به یک سری تجهیزات جانبی نیاز است. نمای شماتیک ساده از یک سامانه پیل سوختی مورد استفاده در یک خودرو ترسیم و اجزای اصلی آن در شکل ۲ نمایش داده شده است. مطابق شکل، این سامانه از چهار بخش اصلی شامل توده پیل سوختی، سامانه تغذیه هوا (کمپرسور، رطوبت زن و پمپ رطوبت‌زن)، سامانه تغذیه سوخت (مخزن ذخیره، شیر تنظیم فشار) و سامانه خنک‌کننده (رادیاتور، کندانسور، فن دمنده، مخزن آب و پمپ) تشکیل شده است [۱].

¹ William Robert Grove

² Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)



شکل ۲ نمای شماتیک ساده از یک سامانه پیل سوختی

نفیون یکی از بهترین الکترولیت‌های مورد استفاده در این نوع پیل سوختی است. در این پیل سوختی مدیریت بهینه آب از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا غشای تبادل یونی همواره باید هیدراته باشد تا میزان بازدهی افزایش یابد. استفاده از کاتالیست‌های گران یکی از بزرگ‌ترین موانع پیشرفت این نوع پیل‌های سوختی است. از دیگر موانع تجاری شدن تهیه هیدروژن ارزان و نحوه ذخیره آن است. جهت استفاده از سوخت‌هایی مثل متانول و بنزین به جای هیدروژن خالص نیاز به مبدل سوخت است که لازمه این کار وجود تجهیزات جانبی است که موجب کاهش بازده کلی و افزایش وزن و قیمت سامانه پیل سوختی به خصوص در حمل‌ونقل می‌شود. حساسیت پلاتین مورد استفاده در کاتالیست به گاز مونواکسید کربن از دیگر محدودیت‌های پیش رو به شمار می‌رود؛ همچنین نیاز به سامانه رطوبت زن و مدیریت آب و حرارت از دیگر مشکلات این نوع پیل سوختی است.

به‌طورمعمول، یک سامانه پیل سوختی باید حداقل عمری معادل ۴۰۰۰ ساعت داشته باشد (با ۸۰۰۰ ساعت سرویس بدون وقفه و حداقل مصرف ۸۰ درصد توان نامی). برای کاربردهای خودرو، حداقل ۵۰۰۰ ساعت با نرخ تخریب کمتر از ۱٪ در هر ۱۰۰۰ ساعت برای ۲۰۰۰ ساعت عملیاتی مورد نیاز است و البته پارامترهای زیادی بر این عملکرد تأثیر می‌گذارد، مثل، تخلخل و رطوبت نسبی.

تانگ و همکاران^۱، یک PEMFC را برای پیش‌بینی تأثیر پارامترهای عملیاتی برای پیل‌های سوختی توسعه دادند. آن‌ها دریافتند که افزایش فشار و دمای کاری می‌تواند عملکرد پیل سوختی را بهبود بخشد. علاوه بر این، ثابت کردند که با افزایش نسبت استوکیومتری، عملکرد سلول بهبود می‌یابد [۲].

لاربی^۲، یک مدل PEMFC دویبعی ساخت و به این نتیجه رسید که تخلخل بالاتر لایه پستی باعث انتشار مناسب‌تر اکسیژن می‌شود. علاوه بر این، رسانایی با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد [۳].

جنون^۳ یک مطالعه عددی از تأثیر رطوبت نسبی کاتد بر یکنواختی گونه PEMFCها انجام داد و نشان داد که عملکرد و یکنواختی PEMFC تا حد زیادی تحت تأثیر رطوبت نسبی کاتد است [۴].

اکرامی کاخکی، گرافن اکسید با روش اصلاح شده هامر تهیه شد و به‌عنوان بستری برای پراکنده ساختن نانوذرات استفاده گردید. فعالیت کاتالیزوری کاتالیست تهیه شده برای الکترواکسیداسیون متانول با روش‌های ولتاژمتری چرخه‌ای و طیف-سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بررسی گردید و با فعالیت کاتالیزوری کاتالیست پلاتین-گرافن اکسید کاهش یافته مقایسه شد. اثرات برخی عوامل تجربی مؤثر بر اکسایش متانول در سطح کاتالیست Pt-SrCoO₃-RGO مانند

¹ Tang et al

² Larbi

³ Jeon

غلظت متانول، دما و سرعت روبش بررسی گردید و شرایط بهینه پیشنهاد شدند [۵].

اسماعیل^۱، یک مدل سه‌بعدی برای PEMFC با کانال‌های مارپیچ ایجاد کرد و دریافت که رسانایی، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد PEMFC دارد، اما تأثیر آن بر نفوذپذیری گاز کم است [۶].

احمد و همکاران^۲، دریافتند که در چگالی جریان بالاتر، اندازه کانال جریان کوچک‌تر منجر به غلظت پلاریزاسیون کمتری برای PEMFC‌های هندسه تک کاناله نوع مارپیچ می‌شود. از آنجایی که کانال جریان مکانی برای انتقال واکنش دهنده است، ساختار کانال تأثیرگذارترین پارامتر PEMFC است [۷].

پرنگ و همکاران^۳ از یک مطالعه عددی سه‌بعدی از تأثیر بافل دوزنقه‌ای بر انتقال واکنش دهنده‌های غیر هم‌دما در PEMFC استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که کانال گاز جدید با بافل دوزنقه‌ای به میزان زیادی قدرت خالص باتری را در مقایسه با کانال گاز سنتی بدون بافل افزایش می‌دهد [۸].

مانکوسی و همکاران^۴، اثر یک کانال جریان با سطح مقطع ناهموار PEMFC‌ها را مورد بحث قرار داد. یافته‌های آن‌ها نشان داد که توزیع واکنش‌دهنده‌ها در محیط متخلخل با استفاده از کانال‌های مخروطی‌تر منجر به توزیع مؤثر اکسیژن می‌شود [۹].

چودوری و همکاران^۵ دریافتند که افت فشار همبستگی بیشتری با عرض کانال دارد و افت فشار آند به اندازه کاتد قابل توجه نیست [۱۰].

خزایی و همکاران^۶ نشان دادند با افزایش تعداد کانال‌ها و کاهش مساحت کانال می‌توان عملکرد PEMFC را بهبود بخشید [۱۱].

ترکاوآن نژاد و همکاران^۷، سه ساختار لوله‌ای جدید PEMFC را ساختند و آنالیز عددی را روی این سه مدل انجام دادند [۱۲]. ایشان دریافتند که در مقایسه با پیکربندی سنتی PEMFC، سلول‌های سوختی لوله‌ای شکل دایره‌ای و مربعی دارای مزایای متعدد و عملکرد بهتری هستند.

اسانلو^۸، تأثیر سه معماری مختلف غشاء، لایه کاتالیزوری و لایه انتشار گاز را بر عملکرد PEMFC‌های لوله‌ای مربعی تحلیل کرد. آن‌ها دریافتند که در مقایسه با دو ساختار دیگر، ساختار وتر مربعی می‌تواند عملکرد پیل سوختی بهتری ایجاد کند [۱۳].

احمر و همکاران^۹، عملکرد PEMFC دایره‌ای را با معماری‌ها و لایه‌های مختلف تجزیه و تحلیل کرد. آن‌ها پنج طرح از PEMFC لوله‌ای را ارائه کردند [۱۴].

صولتی و همکاران^{۱۰} مشاهده کردند که افزودن یک الکتروود میانی به PEMFC چگالی جریان را افزایش می‌دهد و واکنش‌دهنده‌های بیشتری مصرف می‌کند و عملکرد PEMFC را بهبود می‌بخشد [۱۵].

صادقی، بررسی تأثیر تغییر هندسه بر عملکرد پیل سوختی را انجام داده است. مدل سه‌بعدی پیل سوختی غشای تبادل پروتون به صورت عددی با هندسه مکعبی معمولی شبیه‌سازی شده است. پس از آن، دو مدل استوانه‌ای با نام تجاری جدید برای مقایسه و انتخاب بهترین مدل پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هر سه مدل، با کاهش میزان اختلاف ولتاژ سلول بین آند و کاتد، چگالی جریان بالاتری تولید می‌شود که منجر به مصرف بالای گونه‌های

¹ Ismail

² Ahmed et al

³ Perng et al

⁴ Mancusi et al

⁵ Chowdhury et al

⁶ Khazaei et al

⁷ Torkavannejad et al

⁸ Osanloo

⁹ Ahmar et al

¹⁰ Solati et al

ورودی و در نتیجه تولید آب و گرمای بیشتر می‌شود. از طرفی مدل استوانه‌ای چهار کاناله کارایی بیشتری دارد [۱۶]. خودروهای مجهز به پیل سوختی مجموعه‌ای متفاوت از چالش‌ها و مزایا را ارائه می‌دهند که باید به شیوه اقتصادی و با مصالحه همه موارد، مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند. امروزه ابزارهای شبیه‌سازی رایانه‌ای که در حال استفاده هستند، به‌طور مؤثر، به کاهش هزینه‌ها، صرفه‌جویی در وقت و افزایش کارایی کمک می‌کنند. در این مقاله، یک ابزار شبیه‌سازی پیل سوختی کاملاً یکپارچه ارائه شده است. ویژگی اصلی این ابزار این است که یک کد یکپارچه است که همه اجزا شامل موتور الکتریکی، مولد توان پیل سوختی، وسیله نقلیه، فرامین کنترلی، چرخه رانندگی و باتری را در بر می‌گیرد. مدل پیل سوختی توصیف شده در این مقاله یک مدل الکتروشیمیایی از سلول سوختی غشای تبادل پروتون است. مدل بر اساس همبستگی‌های نیمه تجربی برای تلفات سلول و رویکرد اصل اول برای محاسبه ولتاژ مدار باز است.

۲- شبیه‌سازی

مدل شبیه‌سازی، حداکثر ولتاژ نظری (مدار باز برگشت‌پذیر) را محاسبه می‌کند که می‌تواند در شرایط عملیاتی معین با محاسبه انرژی آزاد گیبس، انجام شود. واکنش پیل سوختی در آن شرایط با در نظر گرفتن خواص مربوطه، مانند آنتالپی و آنتروپی، به‌عنوان تابعی از دما و فشار در مدل در نظر گرفته می‌شوند. سپس ولتاژ واقعی سلول با در نظر گرفتن برگشت‌ناپذیری‌های مختلف که در حین کار رخ می‌دهد محاسبه می‌شود. تلفاتی که مورد بررسی قرار می‌گیرد عبارت‌اند از:

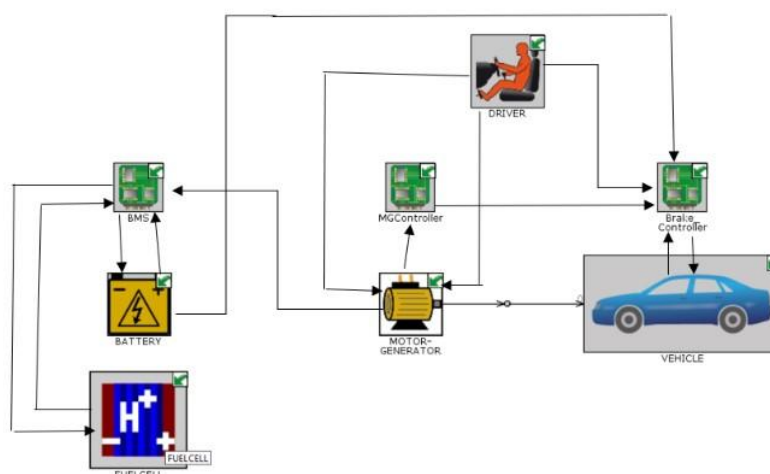
- تلفات ولتاژ فعال‌سازی^۱ که در نتیجه سینتیک واکنش در سطح الکترودها رخ می‌دهد.
 - تلفات اهمی^۲ که به دلیل مقاومت الکتریکی صفحات دوقطبی، الکترودها و مقاومت الکترولیت پلیمر در برابر جریان یون هیدروژن ایجاد می‌شود. برای سادگی، مقاومت‌ها در یک عبارت واحد جمع می‌شوند که مقاومت کلی را برای پیل سوختی تعریف می‌کند.
 - تلفات انتقال جرم^۳ (یا تلفات غلظت) که در نتیجه تغییر غلظت واکنش‌دهنده‌ها در سطح الکترودها رخ می‌دهد.
- ورودی پیل سوختی یک درخواست توان است که چگالی جریان و ولتاژ کار را برای سلول‌ها تعریف می‌کند. در صورت برآورده نشدن تقاضای برق، پیل سوختی حداکثر توان خود را تأمین می‌کند.
- در این شبیه‌سازی، مدل‌سازی یک خودرو با کاربرد ورزشی^۴ به جرم ۱۷۵۰ کیلوگرم مجهز به پیل سوختی مطابق شکل ۳ با نرم‌افزار GT-SUITE انجام شده است. تعداد سلول‌های پیل سوختی ۸۰۰ عدد است که با توجه به توان موردنیاز برای این نوع خودرو، این تعداد در نظر گرفته شده است. مساحت سطح سلول‌ها 232 cm^2 به ضخامت ۱ cm در دمای اولیه ۳۰۰K و ضریب انتقال بار ۰,۴۸ و ضریب افت انتقال جرم ۰,۰۲۷ می‌باشد. از کاتالیزور پلاتین در پیل سوختی (شکل ۴) استفاده شده است.
- در شبیه‌سازی انجام شده، چرخه رانندگی اروپا و سامانه مدیریت باتری خودرو لحاظ شده است که به اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

¹ Activation Voltage Losses

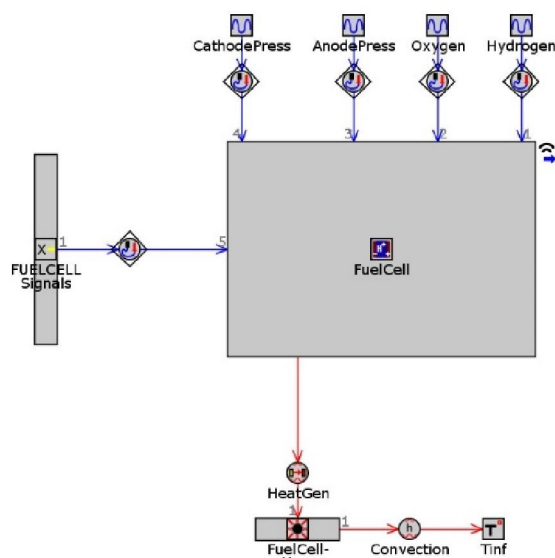
² Ohmic Losses

³ Mass Transport Losses (or Concentration Losses)

⁴ Sport Utility Vehicle (SUV)



شکل ۳ مدل‌سازی خودرو مجهز به پیل سوختی نرم‌افزار GT-SUITE



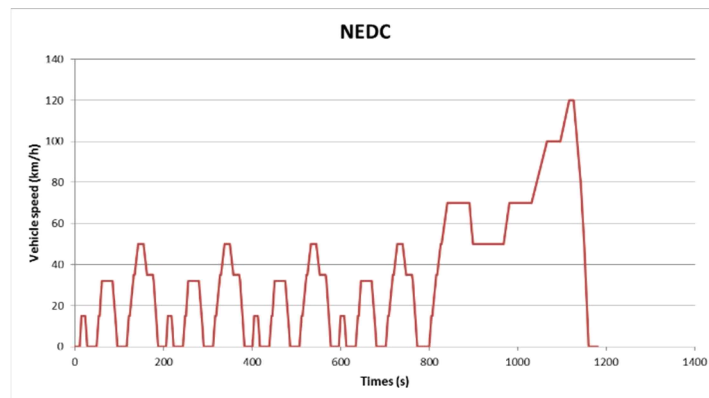
شکل ۴ مدل‌سازی پیل سوختی نرم‌افزار GT-SUITE

۳- چرخه رانندگی اروپا^۱

چرخه رانندگی اروپا یک چرخه رانندگی است که آخرین بار در سال ۱۹۹۷ به‌روز شد و برای ارزیابی میزان انتشار موتورهای خودرو و صرفه‌جویی در سوخت در خودروهای سواری (که شامل کامیون‌های سبک و وسایل نقلیه تجاری نمی‌شود) طراحی شده است.

این چرخه شامل چهار چرخه رانندگی ECE-15 شهری و یک چرخه رانندگی برون‌شهری است. مطابق شکل ۵، NEDC از دو قسمت تشکیل شده است: ECE-15 (چرخه رانندگی شهری)، ۴ بار تکرار شده، از صفر تا ۷۸۰ ثانیه ترسیم شده است. چرخه EUDC از ۷۸۰ ثانیه تا ۱۱۸۰ ثانیه ترسیم شده است. این چرخه برای نشان دادن شرایط رانندگی معمولی در شهرهای شلوغ اروپایی طراحی شده است و با بار کم موتور، دمای پایین گاز خروجی و حداکثر سرعت ۵۰ کیلومتر در ساعت مشخص می‌شود.

¹ New European Driving Cycle (NEDC)



شکل ۵ چرخه رانندگی اروپا (NEDC) [۱۷]

چرخه رانندگی برون‌شهری EUDC که توسط ECE R101 در سال ۱۹۹۰ معرفی شد، برای نشان دادن حالت‌های رانندگی تهاجمی‌تر و سریع طراحی شده است. حداکثر سرعت چرخه EUDC، ۱۲۰ کیلومتر در ساعت است. مجموع زمان آزمایش ۱۱۸۰ ثانیه با سرعت متوسط ۳۳٫۳۵ کیلومتر در ساعت است [۱۷].

۴- سامانه مدیریت باتری^۱ خودرو الکتریکی

خودروهای الکتریکی امروزی عمدتاً از باتری‌های لیتیوم یون استفاده می‌کنند که تعداد آن‌ها صدها تا هزاران عدد است. این بسته‌های بزرگ باتری با ولتاژ حدود ۳۰۰ ولت در خودرو قرار دارند و در حین کار تا ۳۰۰ آمپر را تأمین می‌کنند. در اینجا هرگونه خطایی منجر به یک فاجعه بزرگ خواهد شد، به همین دلیل است که سامانه مدیریت باتری در خودروهای الکتریکی همیشه دارای اهمیت زیادی است. بسیار مهم است که این باتری‌ها در شرایطی که نیاز به کنترل ولتاژ و جریان دارند، هرگز بیش‌ازحد شارژ یا تخلیه نشوند. همچنین برای به دست آوردن حداکثر بازده از یک بسته باتری، باید تمام سلول‌ها را به‌طور همزمان در ولتاژ مشابه شارژ و تخلیه شود.

کنترل تخلیه: عملکرد اصلی سامانه مدیریت باتری حفظ سلول‌های لیتیوم در ناحیه عملکردی ایمن است. به‌عنوان مثال یک سلول معمولی لیتیوم ۱۸۶۵۰ دارای ولتاژ حدود ۳ ولت است. این مسئولیت BMS است که مطمئن شود هیچ یک از سلول‌های بسته زیر ۳ ولت تخلیه نمی‌شوند.

کنترل شارژ: علاوه بر تخلیه، فرآیند شارژ باید توسط BMS نیز کنترل شود. اکثر باتری‌ها در صورت شارژ نامناسب آسیب می‌بینند یا طول عمر آن‌ها کاهش می‌یابد. برای شارژر باتری لیتیوم از شارژر ۲ مرحله‌ای استفاده می‌شود. مرحله اول جریان ثابت نام دارد که طی آن شارژر برای شارژر باتری جریان ثابتی را تولید می‌کند. هنگامی که باتری تقریباً پر می‌شود، از مرحله دوم به نام ولتاژ ثابت استفاده می‌شود.

کنترل گرمایی: عمر و کارایی یک بسته باتری لیتیوم به‌شدت به دمای کار بستگی دارد. باتری در آب‌وهوای گرم در مقایسه با دمای طبیعی اتاق سریع‌تر تخلیه می‌شود. علاوه بر این، مصرف جریان زیاد باعث افزایش دما می‌شود.

توان ایده‌آل کمتر: یک سامانه مدیریت باتری حتی اگر خودرو در حال کار یا شارژ یا در حالت ایده‌آل باشد باید فعال و در حال کار باشد. این باعث می‌شود مدار BMS به‌طور مداوم تغذیه شود و از این رو اجباری است که BMS انرژی بسیار کمتری مصرف کند تا باتری زیاد تخلیه نشود. وقتی یک خودرو الکتریکی تا هفته‌ها یا ماه‌ها شارژ نمی‌شود، BMS و مدارهای دیگر باتری را کم کم تخلیه می‌کنند و در نهایت لازم است قبل از استفاده بعدی باتری شارژ شود. این مشکل هنوز حتی در اتومبیل‌های معروف مانند تسلا نیز همچنان وجود دارد.

¹ Battery Management System (BMS)

سامانه مدیریت باتری به گونه‌ای تنظیم شده است که حداکثر توان خروجی پیل سوختی در این آزمایش ۱۷۵ کیلووات باشد [۱۸].

۵- معادلات حاکم

مدل جریان شامل حل معادلات ناویر-استوکس، یعنی بقای معادلات پیوستگی، تکانه و انرژی است. این معادلات در یک بعد حل می‌شوند، به این معنی که همه کمیت‌ها میانگین‌هایی در جهت جریان هستند. دو انتخاب از روش‌های یکپارچه‌سازی زمانی وجود دارد که بر متغیرهای راه‌حل و محدودیت در مراحل زمانی تأثیر می‌گذارد. روش‌های یکپارچه‌سازی زمانی شامل یک انتگرالگر صریح و ضمنی است. متغیرهای حل اولیه در روش صریح جریان جرمی، چگالی و انرژی داخلی هستند. متغیرهای حل اولیه در روش ضمنی جرم هستند.

کل سامانه به حجم‌های زیادی گسسته شده است که در آن هر تقسیم جریان با یک حجم منفرد نشان داده می‌شود و هر لوله به یک یا چند حجم تقسیم می‌شود. این حجم‌ها توسط مرزها به هم متصل می‌شوند. متغیرهای اسکالر (فشار، دما، چگالی، انرژی داخلی، آنتالپی، گونه غلظت‌ها) در هر حجم یکنواخت فرض می‌شود. متغیرهای برداری (شار جرمی، سرعت، شار کسر جرمی) برای هر مرز محاسبه می‌شوند. معادلات بقای حل شده توسط GT-SUITE در زیر آمده است. سمت چپ نشان دهنده مشتقات متغیرهای اولیه است.

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m} \quad (1)$$

$$\frac{d(me)}{dt} = P \frac{dV}{dt} + \sum (-\dot{m}H) - hA_s(T_f - T_w) \quad (2)$$

$$\frac{d(\rho HV)}{dt} = \sum (\dot{m}H) + V \frac{dP}{dt} - hA_s(T_f - T_w) \quad (3)$$

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = \frac{dpA + \sum (\dot{m}u) - 4C_f \left(\frac{\rho u |u|}{2} \frac{dxA}{D} \right) - k_p \left(\frac{1}{2} \rho u |u| \right) A}{dx} \quad (4)$$

که در آن m جرم، e انرژی داخلی ویژه، H آنتالپی، h ضریب انتقال حرارت، A_s سطح انتقال حرارت، T_f دمای سیال، T_w دمای دیواره، ρ چگالی، V حجم، P فشار، u سرعت سیال، k_p ضریب افت فشار و C_f ضریب جریان می‌باشد [۱].

۵-۱- روش صریح

متغیرهای حل اولیه در روش صریح، نرخ جریان جرم، چگالی و انرژی داخلی هستند. مقادیر جریان جرم، چگالی و انرژی داخلی در زمان جدید بر اساس معادلات پایستگی محاسبه می‌شوند. در روش صریح، سمت راست معادلات با استفاده از مقادیر مرحله زمانی قبلی محاسبه می‌شود. این مشتق متغیرهای اولیه را به دست می‌دهد و اجازه می‌دهد مقدار در زمان جدید با ادغام آن مشتق در مرحله زمانی محاسبه شود. برای اطمینان از ثبات عددی، مرحله زمانی باید محدود شود تا شرایط کورانت را برآورده کند. گام‌های زمانی کوچک مورد نیاز این روش، روش صریح را برای شبیه‌سازی‌هایی که نسبتاً طولانی هستند نامطلوب می‌سازد. اما برای جریان بسیار ناپایدار که در آن درجه وضوح بالایی برای ثبت حداکثری رفتار جریان مورد نیاز است، مناسب است.

در هر مرحله زمانی، فشار و دما به روش زیر محاسبه می‌شود:

(۱) معادلات پیوستگی و انرژی جرم و انرژی در حجم را به دست می‌دهند.

(۲) با حجم و جرم شناخته شده، چگالی محاسبه می‌شود که چگالی و انرژی تولید می‌کند.

(۳) معادلات حالت برای چگالی و انرژی را به عنوان تابعی از فشار و دما تعریف می‌کند. حل کننده فشار و دما را تا زمانی که چگالی و انرژی محاسبه شده برای این مرحله زمانی را برآورده کند، تکرار می‌کند.

۵-۲- روش ضمنی

روش ضمنی با حل مکرر یک سامانه غیرخطی معادلات جبری، مقادیر تمام حجم‌های فرعی را در زمان جدید به‌طور همزمان حل می‌کند. این رویکرد برای سامانه‌های سیال مفید است که در آن نوسانات فشار فرکانس بالا مورد توجه نیستند (یعنی سامانه‌های خنک‌کننده) و مدت‌زمان شبیه‌سازی معمولی بالاتر است، به‌طوری‌که ممکن است گام‌های زمانی بزرگ برداشته شود. برای این نوع سامانه، راه‌حل ضمنی کارآمدتر است.

۵-۳- مدل پیل سوختی

یک مدل الکتروشیمیایی از یک سلول سوختی متشکل از ولتاژ مدار باز (حداکثر ولتاژ نظری) و محاسبات بالقوه اجرا شده است. از معادلات ۵ تا ۹ در تعریف ولتاژ مدار باز، تلفات در نظر گرفته شده و ولتاژ عملکرد سلول سوختی استفاده می‌شود.

$$V_{oc} = -\frac{\Delta \bar{g}_f}{2F} = \frac{(\bar{g})_{H_2O} - (\bar{g}_f)_{H_2} - 0.5(\bar{g}_f)_{O_2}}{2F} \quad (5)$$

$$V_{act} = \frac{R_{gas} \cdot T}{2 \cdot \alpha \cdot F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (6)$$

$$V_{mt} = -C \cdot \ln \left(1 - \frac{i}{i_l} \right) \quad (7)$$

$$V_{ohm} = I \times R \quad (8)$$

$$V_{cell} = V_{oc} - V_{act} - V_{mt} - V_{ohm} \quad (9)$$

که V_{oc} ولتاژ مدار باز، $\bar{g}$ انرژی آزاد گیبس برحسب مول، F ثابت فارادی، V_{act} افت ولتاژ ناشی از فعال‌سازی، R_{gas} ثابت جهانی گازها، i جریان، V_{mt} افت ولتاژ ناشی از انتقال جرم، V_{ohm} افت ولتاژ ناشی از مقاومت اهمی، R مقاومت اهمی، V_{cell} ولتاژ عملکرد پیل سوختی می‌باشد [۱].

۶- نتایج و بحث

۶-۱- تعداد سلول‌های سوختی

در این بخش به بررسی اثر تعداد سلول‌های سوختی بر عملکرد پیل سوختی و حساسیت تغییر این پارامتر پرداخته می‌شود. تعداد سلول‌های سوختی در هر مرحله از شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است.

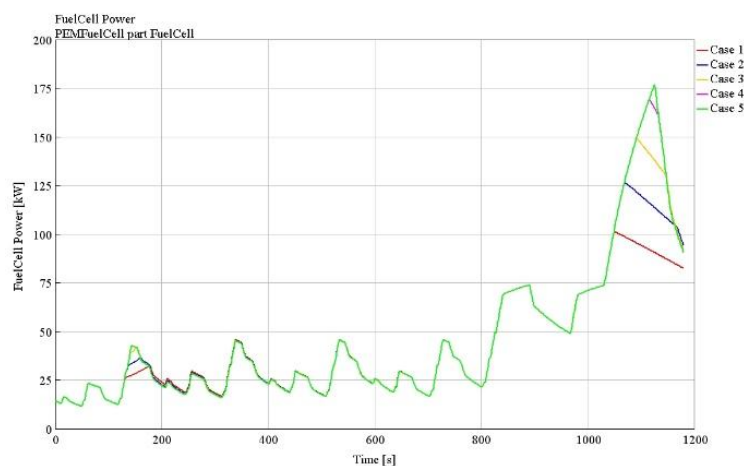
جدول ۱ تعداد سلول‌های سوختی در هر مرحله شبیه‌سازی

مرحله	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰

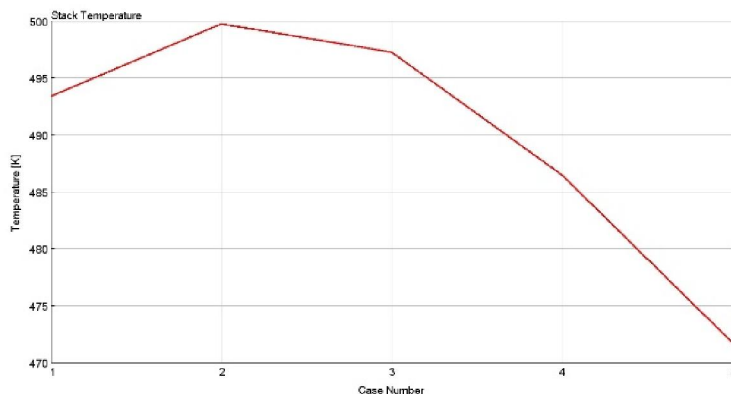
در بررسی نمودار شکل ۶، توان پیل سوختی بر حسب زمان برای تعداد سلول‌های مختلف آورده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش تعداد سلول‌های سوختی توان خروجی پیل سوختی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که زمانی که پیل سوختی شامل ۴۰۰ سلول است حداکثر توان ۱۰۰kW و زمانی که ۸۰۰ سلول است حداکثر توان خروجی برابر ۱۷۵kW می‌باشد.

با افزایش تعداد سلول‌های سوختی توان خروجی افزایش می‌یابد زیرا درون هر سلول سوختی مسیرهایی برای انتقال گاز و واکنش تعبیه شده است که وقتی تعداد سلول‌ها افزایش می‌یابد میزان بیشتری سوخت هیدروژن مصرف می‌شود و واکنش بیشتری انجام می‌شود و هر سلول توان مشخصی تولید می‌کند چون سلول‌ها به‌صورت سری به یکدیگر متصل است. با افزایش تعداد سلول‌ها مقدار ولتاژ کل افزایش می‌یابد و در نتیجه توان خروجی افزایش می‌یابد.

البته دو برابر کردن تعداد سلول‌ها نهایتاً ۷۵٪ توان را افزایش داده است. در تعداد ۸۰۰ سلول توان به مقدار ۱۷۵ kW می‌رسد از آن به بعد با افزایش تعداد سلول‌ها توان افزایش نمی‌یابد چون سامانه دارای BMS است که روی حداکثر توان خروجی ۱۷۵ kW تنظیم شده است و اجازه نمی‌دهد توان خروجی از ۱۷۵ kW بیشتر شود. نمودار شکل ۷، دمای پیل سوختی را نشان می‌دهد. قبل از بحث، ذکر این نکته ضروری است که در سیستم‌های واقعی، یک مدار خنک‌سازی دارد که در اینجا از آن برای بررسی تغییرات دما صرف نظر شده است. در حالتی که کنترلر دما وجود دارد، دمای پیل سوختی از ۳۶۰ کلوین تجاوز نمی‌کند. در شبیه‌سازی مرحله دوم که تعداد سلول سوختی ۵۰۰ عدد است پیل سوختی بیشترین دما یعنی ۵۰۰ K را دارد. در نمودار دما برحسب تعداد سلول‌های سوختی با توجه به افزایش توان خروجی، دما باید افزایش یابد ولی در نقطه‌ای از نمودار به حالتی می‌رسد که انتقال حرارت از سلول سوختی به دلیل بزرگ شدن ابعاد پیل سوختی زیاد می‌شود و بر اثر افزایش دما ناشی از افزایش توان پیل سوختی مقابله می‌کند و از آن نقطه به بعد دمای پیل سوختی کاهش می‌یابد.



شکل ۶ نمودار توان الکتریکی خروجی پیل سوختی برحسب زمان با تغییر تعداد سلول‌های سوختی



شکل ۷ نمودار دمای پیل سوختی برحسب تغییر تعداد سلول‌های سوختی

۶-۲- سطح سلول سوختی

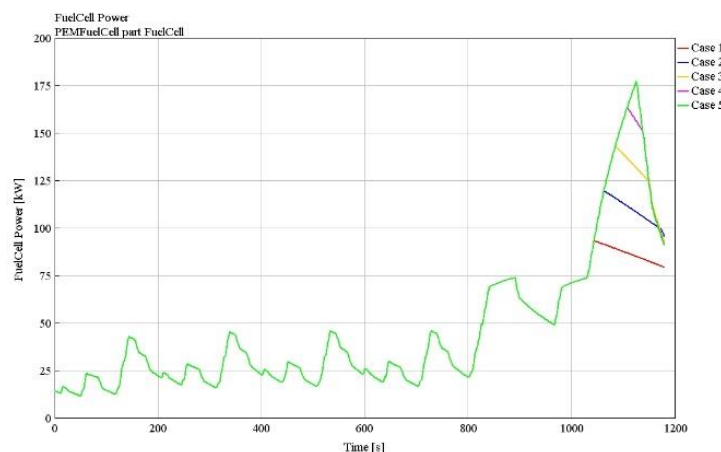
در این بخش به بررسی اثر سطح مؤثر در سلول‌های سوختی بر عملکرد پیل سوختی پرداخته می‌شود. سطح مقطع سلول سوختی به کار گرفته شده در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ سطح سلول سوختی بر حسب cm^2 در هر مرحله شبیه‌سازی

مرحله	۱	۲	۳	۴	۵
سطح مقطع سلول	۱۰۰	۱۳۰	۱۶۰	۱۹۰	۲۳۰

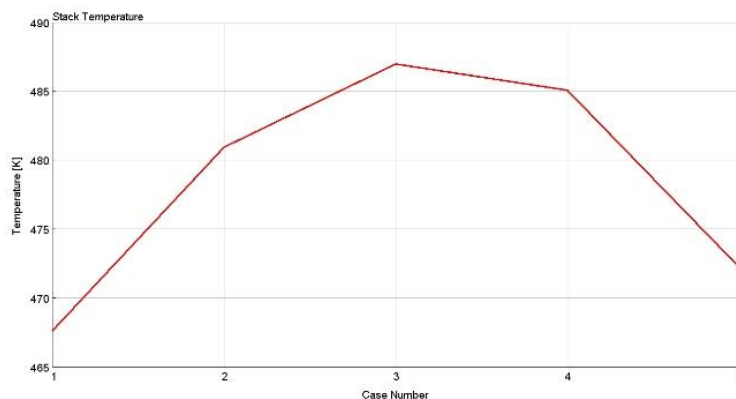
در بررسی نمودار شکل ۸، توان پیل سوختی بر حسب زمان با افزایش مساحت سطح سلول‌های سوختی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که پیل سوختی شامل 130 cm^2 حداکثر توان 120 kW و زمانی که مساحت سلول 230 cm^2 باشد حداکثر توان خروجی برابر 175 kW است.

با افزایش سطح فعال سلول‌های سوختی سطح مجراهای ورود هیدروژن و اکسیژن زیاد می‌شود و مقدار واکنش بیشتری انجام می‌شود در نتیجه توان خروجی افزایش می‌یابد زیرا درون هر سلول سوختی مسیرهایی برای انتقال گاز و واکنش تعبیه شده است که وقتی سطح سلول‌ها افزایش می‌یابد در میزان بیشتری سوخت هیدروژن مصرف می‌شود و واکنش بیشتری انجام می‌شود و هر سلول توان بیشتری تولید می‌کند و چون سلول‌ها به‌صورت سری به یکدیگر متصل است. با افزایش توان تولیدی هر سلول توان خروجی کل افزایش می‌یابد.



شکل ۸ نمودار توان الکتریکی خروجی پیل سوختی بر حسب زمان با تغییر سطح سلول سوختی

نمودار شکل ۹ دمای سلول سوختی را نشان می‌دهد. در ابتدا با افزایش سطح سلول سوختی، دما افزایش می‌یابد و در 160 cm^2 به حداکثر مقدار خود یعنی 487 K می‌رسد و سپس با افزایش سطح سلول‌ها دمای پیل سوختی کاهش می‌یابد. در نمودار دما بر حسب سطح سلول‌های سوختی، دما باید با توجه به افزایش توان خروجی افزایش یابد ولی در نقطه‌ای از نمودار به حالتی می‌رسد که انتقال حرارت از سلول سوختی به دلیل بزرگ شدن ابعاد پیل سوختی زیاد می‌شود و بر اثر افزایش دما ناشی از افزایش توان پیل سوختی مقابله می‌کند و از آن نقطه به بعد دمای پیل سوختی کاهش می‌یابد.



شکل ۹ نمودار دمای پیل سوختی برحسب تغییر سطح سلول سوختی

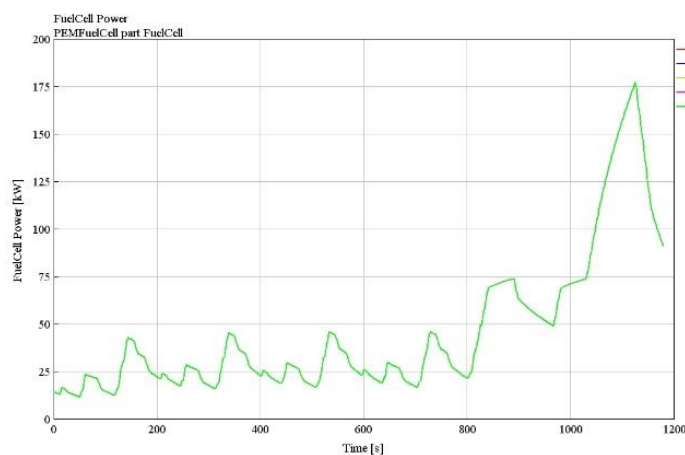
۶-۳- ضخامت سلول سوختی

در این بخش به بررسی اثر ضخامت سلول‌های سوختی بر عملکرد پیل سوختی پرداخته می‌شود. تغییرات ضخامت سلول در هر مرحله از شبیه‌سازی در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳ ضخامت سلول سوختی بر حسب cm در هر مرحله شبیه‌سازی

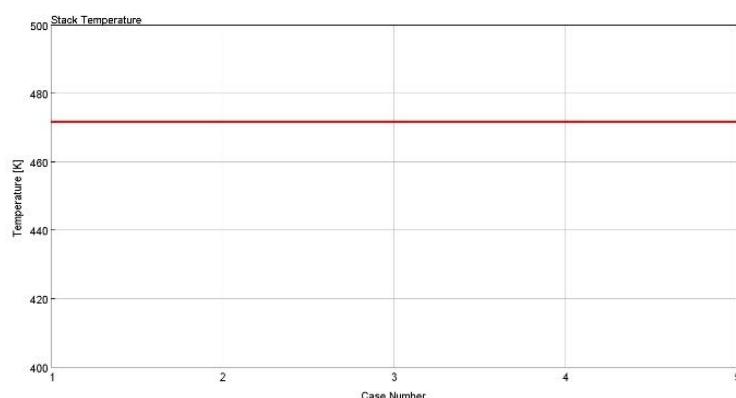
مرحله	۱	۲	۳	۴	۵
ضخامت سلول سوختی	۱	۱,۲	۱,۴	۱,۶	۱,۸

در بررسی نمودار شکل ۱۰، توان پیل سوختی بر حسب زمان که در مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت سلول‌های سوختی توان خروجی پیل سوختی افزایش نمی‌یابد و مقدار ثابتی است و حداکثر توان پیل سوختی در این حالت برابر با 175 kW می‌باشد.



شکل ۱۰ نمودار توان الکتریکی خروجی پیل سوختی برحسب زمان با تغییر ضخامت سلول سوختی

ضخامت تأثیری در افزایش توان پیل سوختی ندارد چون عمل واکنش و در نتیجه تولید توان الکتریکی داخل مجراها صورت می‌گیرد که به ضخامت سلول سوختی بستگی ندارد. این‌که ضخامت سلول سوختی را هرچه بتوان کاهش داد مزیت است البته وقتی ساخت سلول سوختی ظریف‌تر می‌شود، هزینه ساخت بالا می‌رود ولی در نتیجه کاهش ضخامت میزان مواد اولیه کمتری مصرف می‌شود، از طرفی نیز دوام مکانیکی-حرارتی آن باید مورد ارزیابی قرار گیرد. در نمودار دما بر حسب ضخامت در شکل ۱۱، وقتی ضخامت افزایش می‌یابد باعث بزرگ شدن ابعاد پیل سوختی و انتقال حرارت جابه‌جایی با محیط بیشتر می‌شود. اما افزایش ضخامت، مقاومت هدایت سلول‌های سوختی را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۱ نمودار دمای پیل سوختی بر حسب تغییر ضخامت

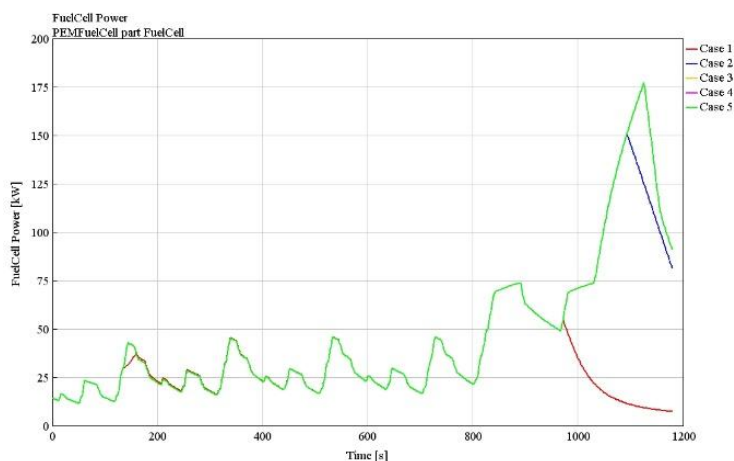
۶-۴- ضریب انتقال بار

در این بخش به بررسی اثر ضریب انتقال شارژ در پیل سوختی پرداخته می‌شود. مقادیر این پارامتر در مراحل مختلف شبیه‌سازی در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴ ضریب انتقال بار در هر مرحله شبیه‌سازی

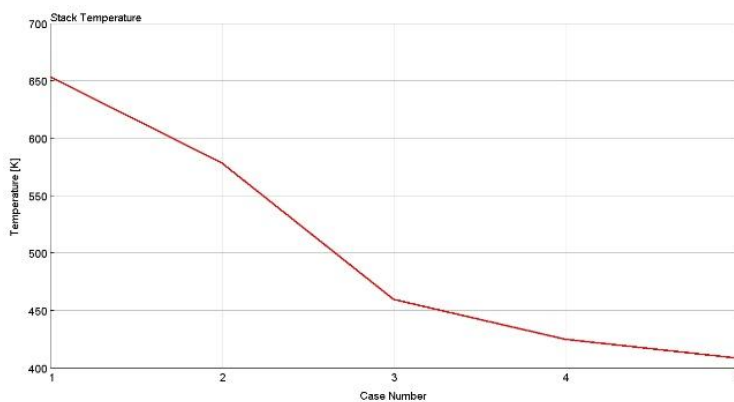
مرحله	۱	۲	۳	۴	۵
ضریب انتقال شارژ	۰,۳	۰,۴	۰,۵	۰,۶	۰,۷

ضریب انتقال بار پارامتر بی‌بعد است. ضریب انتقال بار ناشی از تلفات انرژی فعال‌سازی واکنش است. در سلول‌های سوختی هر چه این پارامتر بیشتر شود تلفات انرژی فعال‌سازی کاهش می‌یابد که باعث افزایش توان خروجی در پیل می‌شود. در بررسی نمودار شکل ۱۲، توان پیل سوختی بر حسب زمان، همان‌طور که در نمودار مشخص است با افزایش ضریب انتقال بار سلول‌های سوختی توان خروجی پیل سوختی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲ نمودار توان الکتریکی خروجی پیل سوختی برحسب زمان با تغییر ضریب انتقال شارژ

زمانی که ضریب انتقال بار ۰,۳ است کمترین توان خروجی دریافت می‌شود. حداکثر توان خروجی در این حالت برابر با ۷۵ kW است و زمانی که ضریب انتقال بار ۰,۷ است بیشترین توان خروجی ۱۷۵ kW است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضریب انتقال شارژ سلول‌های سوختی، توان خروجی پیل سوختی افزایش می‌یابد. در نمودار دما برحسب ضریب انتقال بار (شکل ۱۳) کاملاً مشخص است وقتی تلفات انرژی کاهش می‌یابد حرارت کمتری تولید می‌شود و مقدار دمای پیل سوختی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳ دمای پیل سوختی برحسب تغییر ضریب انتقال شارژ

۶-۵- ضریب افت انتقال جرم

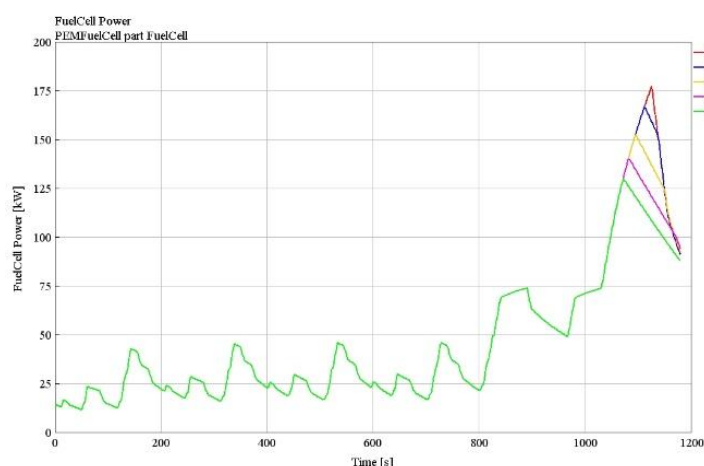
در این بخش به بررسی اثر ضریب افت انتقال جرم سلول‌های سوختی در پیل سوختی پرداخته می‌شود. مقادیر این پارامتر در مراحل مختلف شبیه‌سازی در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵ ضریب افت انتقال جرم در هر مرحله شبیه‌سازی

مرحله	۱	۲	۳	۴	۵
ضریب انتقال جرم	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۹	۰,۱۲	۰,۱۵

ضریب افت انتقال جرم در محاسبه تلفات جرمی استفاده می‌شود. در سلول‌های سوختی تمام سوخت ما واکنش نمی‌دهد بلکه مقداری در واکنش شرکت نمی‌کند. بنابراین هرچه ضریب افت انتقال جرم بیشتر باشد به همان میزان سوخت، در واکنش شرکت نمی‌کند، در نتیجه میزان سوخت بیشتری تلف می‌شود، در سلول‌ها الکتریسیته کمتری تولید می‌شود و در نتیجه توان الکتریکی خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد.

در بررسی نمودار شکل ۱۴ توان پیل سوختی بر حسب زمان، همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود با افزایش ضریب افت انتقال جرم سلول‌های سوختی، توان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد. زمانی که ضریب افت انتقال جرم پیل سوختی ۰,۰۳ است حداکثر توان خروجی و در ۰,۱۵ حداکثر توان در این حالت ۱۳۰ کیلووات است.



شکل ۱۴ نمودار توان الکتریکی خروجی پیل سوختی بر حسب زمان با تغییر افت انتقال جرم

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی شبیه‌سازی پارامترهای مؤثر بر عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری با استفاده از نرم‌افزار GT Suite پرداخته شده است. شرایط شبیه‌سازی با در نظر گرفتن وجود سامانه BMS به دست آمده است. همچنین برای به دست آوردن حداکثر بازده از یک بسته باتری، باید تمام سلول‌ها را به‌طور همزمان در ولتاژ مشابه شارژ و تخلیه شود که در این حالت نیز، وجود BMS لازم است. نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است.

- ۱) با افزایش تعداد سلول‌های سوختی توان خروجی پیل سوختی افزایش می‌یابد.
 - ۲) با افزایش مساحت سطح سلول‌های سوختی توان خروجی پیل سوختی افزایش می‌یابد.
 - ۳) با افزایش ضخامت سلول‌های سوختی توان خروجی پیل سوختی ثابت است.
 - ۴) با افزایش ضریب افت انتقال بار سلول‌های سوختی توان خروجی پیل سوختی افزایش می‌یابد.
 - ۵) با افزایش ضریب افت انتقال جرم پیل سوختی توان خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد.
- بنابراین با توجه به حداکثر توان خروجی مورد نیاز باید تعداد سلول‌ها و مساحت سطح آن‌ها را طراحی کرد و با توجه به اینکه ضخامت سلول تأثیری بر توان خروجی ندارد با لحاظ کردن سایر پارامترهای طراحی، تا حد امکان ضخامت را کاهش داد.

فهرست علائم

$\dot{m}$	نرخ تغییر جرم، kg/s
m	جرم، kg
V	حجم، m^3
p	فشار، pa
A	سطح مقطع جریان، m^2
A_s	مساحت سطح انتقال حرارت، m^2
e	انرژی داخلی کل، z
H	آنتالپی
h	ضریب انتقال حرارت
T_{fluid}	دمای سیال، K
T_{wall}	دمای جداره لوله، K
u	سرعت سیال، m/s
C_f	ضریب اصطکاک
K_p	ضریب افت فشار
D	قطر معادل، m
V	ولتاژ مدار باز، v
$\bar{g}$	انرژی آزاد گیسی
F	ثابت فارادی
I	جریان، A
R_{gas}	ثابت جهانی گازها
R	مقاومت، Ω
C	ضریب تلفات انتقال جرم
	کاتد: $(R_{gas} * T)/4F$ و آند: $(R_{gas} * T)/2F$

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
--------	-----------------

زیرنویس‌ها

oc	مدار باز
act	فعال‌سازی
mt	افت انتقال جرم
ohm	اهمی

تشکر و قدردانی

نویسندگان لازم می‌دانند بدین‌وسیله از حمایت مسئولین و همکاران در دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اراک و همچنین انجمن علمی موتور ایران قدردانی و تشکر نمایند.

References

- [1] A. Hawkes, D.J.L. Brett, N.P. Brandon, Fuel cell micro-CHP techno-economics: Part 1 – model concept and formulation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34/23 (2009) 9545-9557, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.094>.
- [2] W. Yuan, Y. Tang, M. Pan, Z. Li, B. Tang, Model prediction of effects of operating parameters on proton exchange membrane fuel cell performance, *Renewable Energy*, 35/3 (2010) 656-666, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.017>.
- [3] B. Larbi, W. Alimi, R. Chouikh, A. Guizani, Effect of porosity and pressure on the PEM fuel cell performance, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38/20 (2013) 8542-8549, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.022>.
- [4] D.H. Jeon, K.N. Kim, S.M. Baek, J.H. Nam, The effect of relative humidity of the cathode on the performance and the uniformity of PEM fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36/19 (2011) 12499-12511, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.06.136>.
- [5] M.S. Ekrami-Kakhki, N. Farzaneh, S. Abbasi, Improved Electrocatalytic Activity of Pt-SrCoO₃-δ Nanoparticles Supported on Reduced Graphene Oxide for Methanol Electrooxidation, *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 8/3 (2019) 49-58, <https://doi.org/10.30501/jamt.2019.93884>. (in Persian)
- [6] M.S. Ismail, K.J. Hughes, D.B. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, Effects of anisotropic permeability and electrical conductivity of gas diffusion layers on the performance of proton exchange membrane fuel cells, *Applied Energy*, 95 (2012) 50-63, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.003>.
- [7] A. Ahmed, F.H. Mangi, M. Kashif, F.A. Chachar, Z. Ullah, Parametric Analysis of a Serpentine Flow Pattern Proton Exchange Membrane Fuel Cell for Optimized Performance, *International Journal of Heat and Technology*, 38/1 (2020) 69-76, <https://doi.org/10.18280/ijht.380108>.
- [8] S.W. Perng, H.W. Wu, A three-dimensional numerical investigation of trapezoid baffles effect on non-isothermal reactant transport and cell net power in a PEMFC, *Applied Energy*, 143 (2015) 81-95, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.059>.
- [9] E. Fontana, E. Mancusi, A. da Silva, V.C. Mariani, A.A.U. de Souza, S.M.A.G.U. de Souza, Study of the effects of flow channel with non-uniform cross-sectional area on PEMFC species and heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54/21-22 (2011) 4462-4472, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.06.037>.
- [10] M.Z. Chowdhury, O. Genc, S. Toros, Numerical optimization of channel to land width ratio for PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43/23 (2018) 10798-10809, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.149>.
- [11] I. Khazaei, H. Sabadban, Numerical study of changing the geometry of the flow field of a PEM fuel cell, *Heat and Mass Transfer*, 52/5 (2016) 993-1003, <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1621-4>.
- [12] A. Torkavannejad, H. Sadeghifar, N. Pourmahmoud, F. Ramin, Novel architectures of polymer electrolyte membrane fuel cells: efficiency enhancement and cost reduction, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40/36 (2015) 12466-12477, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.038>.
- [13] B. Osanloo, A. Mohammadi-Ahmar, A. Solati, A numerical analysis on the effect of different architectures of membrane, CL and GDL layers on the power and reactant transportation in the square tubular PEMFC, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41/25 (2016) 10844-10853, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.228>.
- [14] A. Mohammadi-Ahmar, B. Osanloo, A. Solati, J. Ghasemi, Performance improvement of the circular tubular PEMFC by using different architectures and number of layers, *Energy Conversion and Management*, 128 (2016) 238-249, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.074>.
- [15] A. Mohammadi-Ahmar, A. Solati, B. Osanloo, M. Hatami, Effect of number and arrangement of separator electrode assembly (SEA) on the performance of square tubular PEM fuel cells, *Energy*, 137 (2017) 302-313, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.021>.
- [16] H. Sadeghi, I. Mirzaei, S. Khalilarya, S. Rezazadeh, M. Rasouli Gareveran, Numerical Investigation of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance Enhancement by Geometrical Configuration Changing, *Journal of Renewable Energy and Environment*, 6/4 (2019) 41-48, <https://doi.org/10.30501/jree.2019.102828>.

- [17] W. Gołębiewski, M. Lisowski, Theoretical analysis of electric vehicle energy consumption according to different driving cycles, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 421/2 (2018), <https://doi.org/10.1088/1757-899X/421/2/022010>.
- [18] H.A. Gabbar, A.M. Othman, M.R. Abdussami, Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards, Technologies, 9/2 (2021), <https://doi.org/10.3390/technologies9020028>.