نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۱۱۷، جلد ۵۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۵، صفحه ۴۱-۵۰ – پژوهشی کامل
DOI: 10.22034/jmeut.2026.62071.3427

بررسی عددی تأثیر ضخامت لایه پخش گاز بر چگالی جریان در پیل سوختی الکترولیت جامد با درنظرگرفتن جریان دوفازی

توحید پاشائی گلمرز* استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، tuhid.pashaee@tabrizu.ac.ir
نیلوفر فرج‌پور شمالی دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، n.farajpour@tabrizu.ac.ir
سیدکاظم یکانی استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، s.k.yekani@tabrizu.ac.ir

چکیده
مدیریت بهینه آب و واکنش‌دهنده‌ها در پیل‌های سوختی الکترولیت جامد نقش مهمی در بهبود بازدهی و افزایش طول عمر آن‌ها دارد. با وجود تحقیقات گسترده، درک جامعی از رفتار دینامیکی و ناپایای جریان دوفازی تحت تأثیر تغییرات میکرومتری ضخامت لایه پخش گاز همچنان به‌عنوان یک خلأ پژوهشی مطرح است. هدف این مطالعه، رفع این خلأ از طریق شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی و ناپایا با در نظر گرفتن جریان دوفازی در ساختاری نوین شامل کانال‌های تغذیه جفت در آند و کاتد است. در این تحقیق، چگالی جریان در بازه ۰/۴ تا ۱ آمپر بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شده و اثر سه ضخامت ۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ میکرومتر برای لایه پخش گاز بر انتقال جرم و عملکرد پیل بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد کاهش ضخامت این لایه موجب کاهش مقاومت نفوذی و بهبود عملکرد پیل می‌شود. به‌گونه‌ای که افزایش متوسط ۱۳/۵ درصدی ضخامت، باعث کاهش ۱ درصدی ولتاژ خروجی می‌گردد که در مقیاس استک اهمیت زیادی دارد. همچنین، افزایش کسر جرمی آب در کاتد برای ضخامت کمتر نشان‌دهنده تولید بیشتر آب، تسهیل خروج رطوبت و افزایش اختلاف پتانسیل است.
واژه‌های کلیدی: پیل سوختی الکترولیت جامد، لایه پخش گاز، جریان دو فازی، چگالی جریان، حل ناپایا، دینامیک سیالات محاسباتی.

Numerical investigation of the effect of gas diffusion layer thickness on current density in solid electrolyte fuel cell considering two-phase flow

T. Pashaee Golmarz Department of Mechanical Engineering, Professor, University of Tabriz, Tabriz, Iran
N. Farajpour Shomaly Department of Mechanical Engineering, M.Sc. Student, University of Tabriz, Tabriz, Iran
S. K. Yekani Department of Mechanical Engineering, Professor, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract
Optimal management of water and reactants in solid electrolyte fuel cells plays a decisive role in enhancing their efficiency and lifespan. Despite extensive research in this field, the lack of a comprehensive understanding regarding the dynamics, unsteady behavior of two-phase flow as directly influenced by micrometric variations in the gas diffusion layer (GDL) thickness remains a critical research gap. The objective of the present study is to bridge this gap through an unsteady, three-dimensional numerical simulation of a solid electrolyte fuel cell, accounting for two-phase flow within a novel configuration utilizing paired feed channels on both the anode and cathode sides. In this simulation, the current density varies within the operational range of 0.4 to 1 A/cm², and the impact of three different GDL thicknesses (130, 150, 170 µm) on mass transport phenomena and cell performance is rigorously investigated. The quantitative results demonstrate that reducing the GDL thickness decreases the species diffusion resistance and improves cell performance specifically, a 13.5% average increase in layer thickness leads to a 1% reduction in output voltage, an architectural loss that can be highly significant in a fuel cell stack's total power. Furthermore, contour analysis reveals that the water mass fraction on the cathode side is higher for the thinner GDL (130 µm), indicating enhanced water production, facilitated moisture removal, and consequently, a higher potential difference in this region.
Keywords: solid electrolyte fuel cell, Gas Diffusion Layer (GDL), Two-Phase Flow, Current Density, Unsteady Solver, Computational Fluid Dynamics (CFD).

۱- مقدمه

دست‌یابی به روش‌های جدید و با بازدهی بالا جهت تبدیل انرژی سوخت‌ها به انرژی قابل استفاده یکی از چالش‌های مهم بوده که بشر از ابتدا پیش روی خود داشته است [۱]. چرخه‌های ترمودینامیکی یکی از پرکاربردترین و رایج‌ترین روش‌ها برای این تبدیل هستند ولی امروزه بشر به فناوری پیل سوختی دست یافته است که به واسطه فرآیند شیمیایی، انرژی سوخت را به الکتریسیته تبدیل می‌کند و وابسته به سوخت می‌تواند بازدهی بین ۳۰ تا ۸۰ درصد را داشته باشد [۲]. پیل‌های سوختی انواع مختلفی دارند که نسبت به دیگر پیل‌های سوختی، پیل سوختی الکترولیت جامد یا غشاء پلیمری بالاترین دانسیته توان را به خود اختصاص می‌دهد. در این نوع از پیل سوختی در مقیاس مولکولی، تماس بین مولکول‌های اکسیژن و هیدروژن سبب انجام واکنشی احتراقی می‌گردد. در این واکنش مولکول‌های هیدروژن اکسید می‌شوند و گرما و آب تولید می‌کنند [۳]. در ارتباط با پیل‌های سوختی الکترولیت جامد مطالعات متعددی صورت پذیرفته است.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: tuhid.pashaee@tabrizu.ac.ir
تاریخ دریافت: ۰۳/۰۳/۲۳
تاریخ پذیرش: ۰۵/۰۴/۲۲

کوسترز و همکاران [۴] شبیه‌سازی عددی را در کنار کار آزمایشگاهی بر روی پیل سوختی پلیمری انجام دادند ایشان موضوع خنک‌کاری را در کار خود مورد مطالعه قرار دادند. افرا و همکاران [۵] در یک مدل آزمایشگاهی با انتخاب یک‌لایه انتشار گاز شفاف به آشکارسازی ساختار انتقال آب در پیل سوختی غشاء پلیمری پرداخته و حرکت و مکانیزم آن را در لایه انتشار گاز مورد مطالعه قرار دادند. شمسی زاده و افشاری [۶] به بررسی عددی تأثیر ابعاد هندسی مانع زانویی بر عملکرد مرطوب‌ساز غشائی تخت در کاربرد پیل سوختی غشاء پلیمری پرداختند. در کار دیگری، تحلیل ترمودینامیکی یک سیستم تولید توان پیل سوختی غشاء تبادل پروتونی در یک هواپیمای بدون سرنشین توسط رستمی و منشادی [۷] ارائه گردید. شاکرمی و همکاران [۸] بیان داشتند که مدیریت گرما در پیل سوختی پلیمری جهت نگه داشتن دمای آن در یک بازه دمایی محدود و مناسب و تلاش جهت یکنواختی توزیع دما ضروری است. زیرا کنترل دمایی پیل سوختی، تأثیر زیادی بر کارایی، بازده و عمر مفید پیل سوختی غشاء پلیمری دارد. ایشان گزارش دادند که یکی از روش های خنک‌کاری پیل استفاده از مکانیزم تغییر فاز برای کنترل دمایی غیر فعال پیل است. آن ها در کار خود از یک لوله گرمایی برای خنک‌کاری پیل با توان پایین پیل ۲۰۰ واتی بهره گرفتند و به مدلسازی دو فازی و گذرا لوله گرمایی با سیال کاری آب پرداختند. کاظمی نسب و همکاران [۹] منحنی پلاریزاسیون پیل سوختی پلیمری را مورد تحلیل قرار دادند و برزاش ریاضی بر روی آن صورت داده و نتایج را با داده‌های تجربی مقایسه نمودند. پاشائی و همکاران [۱۰] در کاری عددی و سه‌بعدی و با فرض جریان تک‌فازی تغییر ساختار هندسی کلی پیل سوختی الکترولیت جامد را از مستطیلی به استوانه‌ای مورد بررسی قرار دادند و پدیده‌های انتقال جرم را بهبود بخشیدند. همچنین در کار دیگری [۱۱] ایشان تأثیر کانال‌های تغذیه سینوسی شکل را بر بازدهی پیل سوختی پلیمری مطالعه نمودند که نتایج آن‌ها نشان داد تغییرات هندسی مسیر جریان می‌تواند توزیع گونه‌ها را یکنواخت‌تر سازد.

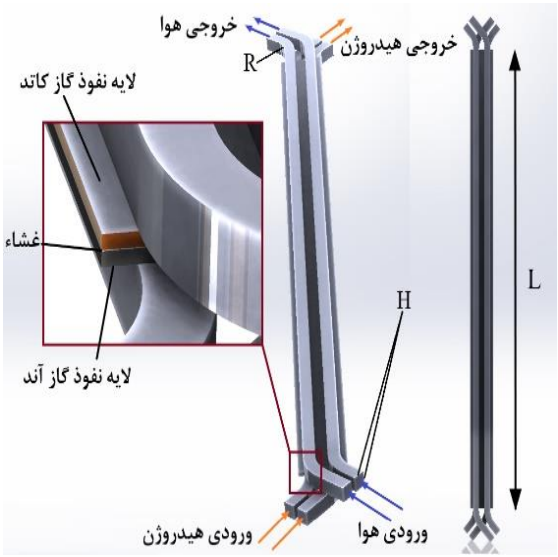
پیل‌های سوختی غشاء پلیمری از چندین جزء تشکیل شده‌اند که یکی از اجزاء مهم آن‌ها لایه پخش گاز[1] می‌باشد. این لایه عموما ضخامتی بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ میکرون داشته و مسیری برای عبور یکنواخت گاز به سمت لایه کاتالیست ایجاد می‌کند و وظیفه انتقال آب، دفع گرما از کاتالیست و انتقال الکترون را بعهده دارد [۱۲]. جو و وانگ [۱۳] با ارائه یک مدل عددی دوفازی نشان دادند که توزیع چگالی جریان به شدت تحت تأثیر تجمع آب مایع در لایه پخش گاز قرار دارد و اشباع این لایه مانع از رسیدن اکسیژن به لایه کاتالیست می‌گردد. ارتباط پژوهش حاضر با این مطالعات، تحلیل همزمان پدیده ناپایا و رفتار دوفازی سیال تحت تأثیر تغییرات میکرومتری ضخامت لایه پخش گاز در یک هندسه سه‌بعدی با کانال‌های جفت است که امکان مدیریت بهینه آب و پتانسیل خروجی را فرآهم می‌آورد.

با توجه به اهمیت موضوع، نوآوری این مقاله، مطالعه عددی تأثیر ضخامت لایه پخش گاز بر چگالی جریان در پیل سوختی الکترولیت جامد در یک ساختار ناپایا و سه‌بعدی با جریان دو فازی و استفاده از کانال‌های تغذیه جفت در دو سمت آند و کاتد با بهره‌گیری از روش انتقال فاز در جریان محیط آزاد و متخلخل برای تحلیل دقیق‌تر پدیده‌های انتقال می‌باشد. اگرچه مطالعات پیشین بر بهینه‌سازی اجزاء تمرکز داشته‌اند اما تحلیل همزمان پدیده‌های ناپایا و جریان دوفازی در حضور تغییرات ضخامت لایه پخش گاز، به ویژه با استفاده از کانال‌های تغذیه جفت، کمتر مورد توجه قرار گرفته بود. هدف اصلی این تحقیق، درک دقیق‌تر چگونگی تأثیر فیزیکی ضخامت بر توزیع گونه‌ها و مدیریت آب در شرایط گذرا است.

۲- بیان مسأله و معادلات حاکم

۲-۱- طرح مسأله

هندسه مورد مطالعه در کار حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است. این میدان حل از هفت حجم مجزا تشکیل شده که شامل دو کانال تغذیه آند، دو کانال تغذیه کاتد، لایه‌های پخش گاز آند و کاتد و لایه غشاء پلیمری می‌گردد. کانال‌های آند و کاتد وظیفه تغذیه واکنش‌دهنده‌ها را بر عهده دارند، لایه‌های پخش گاز مسیر نفوذ یکنواخت گاز به کاتالیست و خروج آب را فراهم می‌کنند. غشاء پلیمری به عنوان الکترولیت، وظیفه هدایت پروتون‌ها و جداسازی الکتریکی را عهده‌دار است. ابعاد هندسی و شرایط مرزی در شکل ۱ و جدول ۱ آورده شده است. همچنین جدول ۲ مقادیر مربوط به پارامترهای ترمودینامیکی تحلیل حاضر را ارائه می‌کند. این شرایط شامل دبی جرمی ورودی برای آند و کاتد (M_an و M_cath)، با کسر جرمی مشخص گونه‌های ورودی هیدروژن و اکسیژن (wO2 و wH2)، رطوبت نسبی جریان ورودی (RH) و در مرزهای خروجی کانال‌های آند و کاتد، شرط مرزی فشار خروجی معادل با فشار جو در نظر گرفته شده است. برای تمامی دیواره‌های خارجی نیز شرط عدم لغزش برای سرعت و شرط عایق گرمایی اعمال گردیده است. همچنین در مرزهای بین لایه‌های مختلف، پیوستگی شار جرم و پتانسیل در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- هندسه مورد مطالعه برای پیل سوختی الکترولیت جامد

[1] Gas Diffusion Layer

جدول ۱- مشخصات هندسی پیل سوختی مورد مطالعه

پارامتر	توضیح	مقدار
L	طول سطح واکنش	۵۰ میلیمتر
H	عرض و ارتفاع کانال تغذیه	۰/۸ میلیمتر
R	شعاع خم ورودی و خروجی	۲ میلیمتر
h-mem	ضخامت غشاء	۹ میکرومتر
h-GDL	ضخامت لایه پخش گاز	۱۳۰-۱۵۰-۱۷۰ میکرومتر

جدول ۲- مقادیر پارامترهای ترمودینامیکی به‌کار رفته در مطالعه حاضر

پارامتر	توضیح	مقدار
alphaa_ORR	ضریب انتقال آندیک	۳
alphac_ORR	ضریب انتقال کاتدیک	۱
Av_HOR	سطح ویژه، اکسیداسیون هیدروژن	$۱۰^{۷}$ یک بر متر
Av_ORR	سطح ویژه، کاهش اکسیژن	$۱۰^{۷}$ یک بر متر
i0_ref_HOR	چگالی جریان تبادل مرجع، اکسیداسیون هیدروژن	۱۰۰ آمپر بر متر مربع
i0_ref_ORR	چگالی جریان تبادل مرجع، کاهش اکسیژن	۰/۰۰۰۱ آمپر بر متر مربع
RH	رطوبت نسبی گاز ورودی	۱
kw	ثابت نرخ چگالش	۱۰۰۰۰۰ مول مکعب بر ثانیه
wO2_in	کسر جرمی اکسیژن در ورودی	۰/۱۸
wH2_in	کسر جرمی هیدروژن در ورودی	۰/۲
M_an	دبی جرمی ورودی آند	$۱۰^{-۷}\times$ ۱/۶۵۸۳کیلوگرم بر ثانیه
M_cath	دبی جرمی ورودی کاتد	$۱۰^{-۶}\times$ ۱/۸۴۲۵کیلوگرم بر ثانیه

همانگونه که قبلاً اشاره شد، در کار پیش رو ضخامت لایه پخش گاز پارامتری است که مورد مطالعه قرار می‌گیرد و تاثیر آن بر میزان چگالی جریان در سطح پیل سوختی بررسی می‌شود. بنابراین سه مقدار ۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ میکرومتر برای این پارامتر همانگونه که در جدول ۱ اشاره شده در نظر گرفته می‌شود.

پارامتر ضخامت لایه پخش گاز نقشی دوگانه و تعیین‌کننده در عملکرد پیل سوختی ایفا می‌کند. از یک سو، کاهش ضخامت این لایه مسیر نفوذ گونه‌های واکنشگر (اکسیژن و هیدروژن) را کوتاه‌تر کرده و طبق قانون فیک، مقاومت در برابر انتقال جرم را به شدت کاهش می‌دهد که این امر به بهبود چگالی جریان موثر منجر می‌شود. از سوی دیگر، ضخامت کمتر لایه پخش گاز، مقاومت هیدرودینامیکی کمتری در برابر دفع آب تولیدی ایجاد کرده و پدیده اشباع را تعدیل می‌سازد. با این حال، ضخامت لایه باید به‌گونه‌ای بهینه‌سازی شود که هدایت الکتریکی و مکانیکی ساختار آسیب نبیند. از این رو، تبیین صریح رابطه بین این متغیر هندسی و عملکرد کل سیستم، محور اصلی بیان مسئله کار حاضر است.

۲-۲- معادلات حاکم

پدیده‌های فیزیکی که در یک پیل سوختی الکترولیت جامد رخ می‌دهند با معادلات بقاء جرم، بقاء مومنتوم، بقاء انرژی، بقاء اجزاء و انتقال جریان مشخص می‌گردند. البته شایان ذکر است که معادلات دیگری نیز وابسته به محل و شرایط وقوع در پیل سوختی به‌کار گرفته می‌شوند که این مجموعه، معادله دارسی[1] برای جریان محیط متخلخل، قانون فیک[2] برای پخش اجزاء، معادله استفان-ماکسول[3] برای پخش چند فاز، قانون فوریه[4] برای هدایت گرما، قانون فارادی[5] برای جریان الکتریکی، معادله باتلر-ولمر[6] برای ارتباط بین جریان پتانسیل و جریان الکتریکی همچنین قانون اهم برای هدایت جریان الکتریکی را شامل می‌گردد. از معادلات بقاء جرم و مومنتوم برای تحلیل میدان جریان لایه ای و تراکم‌ناپذیر در کانال‌ها و محیط متخلخل استفاده شده است. توزیع گرما در تمامی اجزاء پیل توسط معادله انرژی محاسبه می‌شود، و معادلات فیک و استفان-ماکسول برای پخش اجزاء دوفازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین پتانسیل الکتریکی و واکنش‌های الکتروشیمیایی با معادلات باتلر-ولمر و قانون اهم پیوند داده شدند. برای محاسبه کسر جرمی گازها و بخار آب از بقاء اجزا استفاده کردیم و از بقاء پتانسیل برای انتقال بار الکتریکی و یونی در فازهای جامد و الکترولیت استفاده کردیم. علاوه بر این معادلات اشاره شده، روابط تجربی مربوط به رفتار آب از قبیل ضریب پسا الکترو-اسمزیک، هدایت یونی غشاء نیز در شبیه‌سازی لحاظ می‌گردد. روابط (۱) تا (۶) معادلات اساسی و کلی مورد استفاده در شبیه‌سازی پیل سوختی پلیمری را ارائه می کنند.

واکنش کلی صورت پذیرفته در پیل سوختی الکترولیت جامد به قرار زیر می‌باشد.

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \Leftrightarrow H_2O \qquad (۱)$$

بقاء جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho \vec{u}) = 0 \qquad (۲)$$

در این معادله $\vec{u}$ بردار سرعت و ρ چگالی سیال است.

بقاء مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla.(\rho \vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla.\left(\mu^{eff}\nabla \vec{u}\right) + S_m \qquad (۳)$$

در معادله بالا p فشار، μ^{eff} لزجت متوسط مخلوط و S_m جمله چشمه است.

بقاء انرژی:

$$\left(\rho c_p\right)_{eff}\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\rho c_p\right)_{eff}\left(\vec{u}.\nabla T\right) = \nabla.\left(k_{eff}\nabla T\right) + S_e \qquad (۴)$$

در این معادله T دما بر حسب کلوین، c_p گرمای ویژه، k رسانایی گرمایی و S_e جمله چشمه انرژی است.

1 Darcy
2 Ficks Law
3 Stefan-Maxwel
4 Fourier
5 Faraday
6 Butler-Volmer

بقاء اجزا:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho X_i)+\nabla.(\ddot{u}\varepsilon\rho X_i)=\nabla.\left(\rho D_{i,eff}\nabla X_i\right)+S_{s,i} \quad (۵)$$

که در این رابطه X_i نسبت جرمی جزء و $S_{s,i}$ جمله‌های چشمه یا چاه برای اجزاء می‌باشد.

بقاء پتانسیل:

$$\nabla.\left(k_s{}^{eff}\nabla\phi_s\right)=S_{\phi s}$$
$$\nabla.\left(k_m{}^{eff}\nabla\phi_m\right)=S_{\phi m} \quad (۶)$$

در این معادلات $k_s{}^{eff}$ رسانایی الکتریکی در فاز جامد، $k_m{}^{eff}$ رسانایی یونی در فاز یونومر، ϕ_s پتانسیل فاز جامد، ϕ_m پتانسیل فاز الکترولیت و S جمله چشمه مربوط به جریان انتقال حجمی است. در حل این معادلات فرضیات زیر استفاده می‌گردد:

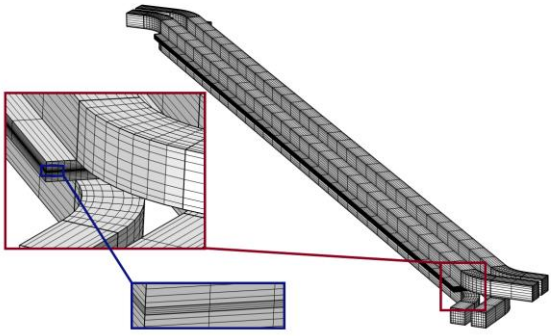
۱- گازهای واکنش‌گر و بخار آب به صورت گاز کامل هستند.
۲- جریان داخل پیل سوختی آرام و تراکم ناپذیر است.
۳- ساختار غشاء و الکترود همگن و ایزوتروپیک می‌باشد.
۴- از افت پتانسیل اهمی در اجزاء جامد صرف‌نظر می‌شود.

لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی حل ناپایا بوده و مدت زمان حل ۶۰ ثانیه لحاظ می‌گردد.

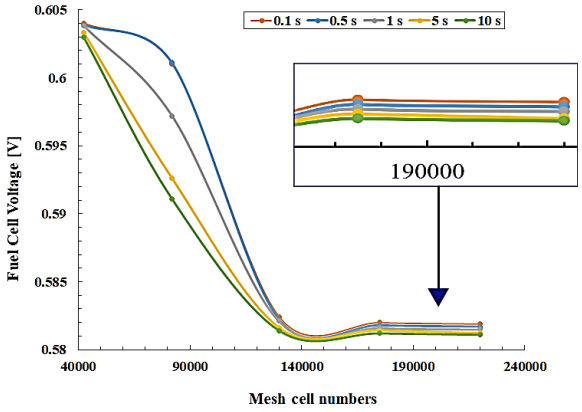
۳- شبکه‌بندی و اعتبارسنجی

۳-۱- شبکه‌بندی

شبکه‌بندی مورد استفاده در شبیه‌سازی حاضر از نوع شبکه‌بندی سازمان یافته است. دلیل انتخاب این شبکه‌بندی دقت زیاد مورد نیاز و یکنواختی شبکه ایجاد شده برای پوشش واکنش‌های صورت پذیرفته شده در پیل سوختی خصوصا در فضای بسیار کوچک غشاء می‌باشد. شکل ۲ نمایی از شبکه ایجاد شده را نشان می‌دهد. شکل ۳ نیز بررسی استقلال از شبکه حل را نمایش می‌دهد.



شکل ۲- شبکه‌بندی سازمان یافته ایجاد شده بر روی میدان حل



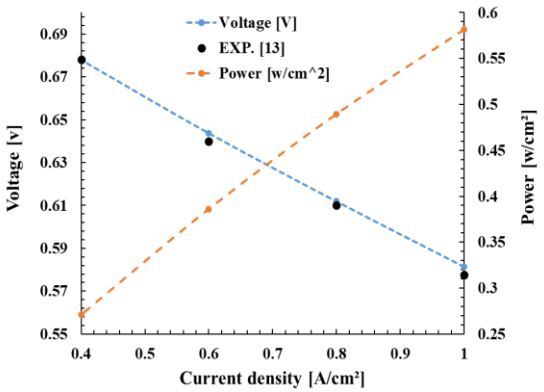
شکل ۳- استقلال حل از شبکه ایجاد شده

شکل ۳ نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی حاضر از پنج حالت شبکه‌بندی با تعداد سلول مش متفاوت بهره گرفته شده است که عبارتند از ۴۲۵۰۰، ۸۲۰۰۰، ۱۳۰۰۰۰، ۱۷۵۰۰۰ و ۲۲۰۰۰۰ سلول. برای مقایسه نتایج این حالات از مقدار ولتاژ خروجی پیل سوختی استفاده شده است. نتایج حاکی از این است که بعد از تعداد سلول ۱۷۵۰۰۰ نتایج تغییرات محسوسی را نشان نمی‌دهند و تغییر موجود در این نقطه از نمودار ۰/۰۲ درصد می‌باشد که مقدار مطلوبی است و بنابراین همین تعداد سلول برای شبکه‌بندی مسأله حاضر لحاظ می‌گردد.

به منظور تضمین دقت شبیه‌سازی، تحلیل استقلال از شبکه نه‌تنها برای کل میدان حل، بلکه با تمرکز ویژه بر نقاط حساس و استراتژیک پیل سوختی انجام گرفته است. اصلی‌ترین ناحیه حساس، سطح مشترک بین لایه کاتالیست، غشاء پلیمری و لایه پخش گاز می‌باشد چراکه نرخ واکنش‌های الکتروشیمیایی و بیشترین شدت تغییرات پتانسیل در این لایه‌های بسیار نازک رخ می‌دهد. با اعمال تکنیک اعتبارسنجی موضعی، تراکم شبکه در این نواحی مرزی و فضاهای فوق‌العاده کوچک غشاء به طور فزاینده‌ای افزایش یافت. نتایج استقلال از شبکه در این نقاط حساس نشان داد که افزایش تعداد سلول‌ها به بیش از ۱۷۵۰۰۰ سلول، تغییر محسوسی در ولتاژ موضعی و چگالی جریان در سطح مشترک کاتالیست ایجاد نمی‌کند، که این امر پایداری و دقت محاسبات عددی را در لایه‌های واکنشی تضمین می‌نماید.

۳-۲- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی الگوریتم‌های به‌کار رفته در شبیه‌سازی، شرایط حاکم بر مسأله بر اساس منبع [۱۳] تنظیم گردیده و نمودار قطبش شکل ۴ استخراج شده است.



شکل ۴- نمودار قطبش و مقایسه داده‌های عددی و تجربی

این نمودار نشان می‌دهد که نتایج عددی تطبیق خوبی با داده‌های تجربی موجود دارند و بنابراین الگوریتم‌ها و شبکه‌بندی به‌کار رفته در شبیه‌سازی حاضر از قابلیت اعتماد مطلوبی برخوردار است.

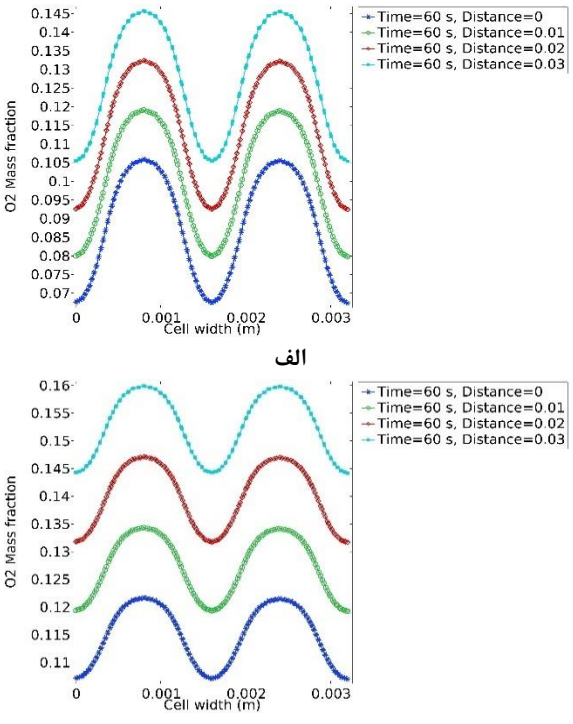
۴- نتایج

شکل‌های ۵ تا ۸ توزیع اکسیژن، آب، چگالی جریان و دبی جرمی کل را در عرض سلول برای چهار مقطع در سطح مشترک بین کاتالیست کاتد و لایه غشاء در فواصل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متری از خروجی کانال برای دو ولتاژ نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که در این نمودارها ضخامت لایه پخش گاز ۱۵۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. توضیح اینکه در نمودارها مقطع با شاخصه distance=0 همان z=10 mm و نزدیک خروجی کانال و مقطع با شاخصه distance=0.03 همان z=40 mm و نزدیک ورودی کانال می‌باشد (شکل ۹) و نمودارها برای پایان حل ۶۰ ثانیه استخراج شده‌اند. نمودار کسر جرمی اکسیژن نشان می‌دهد اکسیژن در طول مسیر حرکت خود تا رسیدن به انتهای کانال تغذیه و خروج مصرف شده است و در نتیجه بایستی آب بیشتری تولید گردد. کاهش کسر جرمی اکسیژن در طول کانال ناشی از مصرف در واکنش کاتدی و تولید همزمان آب است. افزایش اختلاف ولتاژ که منجر به کاهش چگالی جریان می‌شود، نرخ واکنش را پایین آورده و به تبع آن مصرف اکسیژن کمتر می‌شود لذا کسر جرمی اکسیژن در خروجی افزایش می‌یابد که همین امر در نمودار شکل ۶ مشاهده می‌گردد. شکل‌های ۵ تا ۸ روابط متقابل و پیچیده فیزیکی میان کسر جرمی اکسیژن، کسر جرمی آب، چگالی جریان و دبی جرمی کل را در عرض سلول نشان می‌دهند. تحلیل دقیق فیزیکی این تغییرات و رابطه بین متغیرها به شرح زیر است:

رابطه معکوس و مستقیمی میان کسر جرمی اکسیژن (شکل ۵) و کسر جرمی آب (شکل ۶) برقرار است. با حرکت سیال در طول کانال، اکسیژن در واکنش کاتدی کاتالیست مصرف شده و بر اساس موازنه بقای اجزاء، آب به عنوان محصول واکنش تولید می‌شود. به همین دلیل در مقاطع نزدیک به خروجی distance = 0، کسر جرمی اکسیژن به حداقل و کسر جرمی آب به حداکثر خود می‌رسد.

توزیع چگالی جریان (شکل ۷) وابستگی شدیدی به کسر جرمی اکسیژن دارد. در مقاطع ورودی که غلظت اکسیژن بالاست، طبق معادله باتلر-ولمر نرخ واکنش الکتروشیمیایی و در نتیجه چگالی جریان موضعی به اوج خود می‌رسد. همچنین، با افزایش اختلاف ولتاژ از ۰/۵۸ به ۰/۶۸ ولت، چگالی جریان افت چشمگیری پیدا می‌کند. این افت جریان، مصرف واکنش‌دهنده‌ها را کندتر کرده و در نتیجه کسر جرمی اکسیژن در ولتاژ بالاتر (شکل ۵-ب) نسبت به ولتاژ پایین‌تر (شکل ۵-الف) بیشتر باقی می‌ماند.

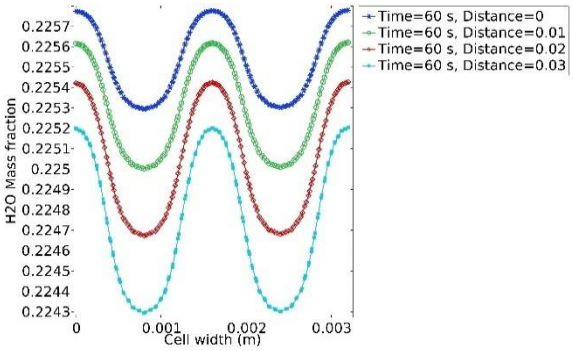
نمودار دبی جرمی کل (شکل ۸) بازتاب‌دهنده تعادل هیدرودینامیکی در لایه‌های پیل است. افت چگالی در حوالی مرز x = 0.001 متر و منفی شدن مقادیر دبی جرمی، اثبات‌کننده وقوع پدیده دیفیوژن معکوس است، جاییکه اختلاف پتانسیل شیمیایی و تجمع آب در سمت کاتد، جریانی از رطوبت را بر خلاف جهت جریان اصلی به سمت آند می‌راند تا تعادل غلظتی برقرار گردد. همچنین می‌توان دید که بیشترین توزیع چگالی جریان در سمت ورودی کانال می‌باشد. نمودار دبی جرمی کل نیز پدیده دیفیوژن معکوس را در حوالی x=0.001 m نشان می‌دهد جاییکه دبی جرمی مقادیر منفی به خود می‌گیرد.



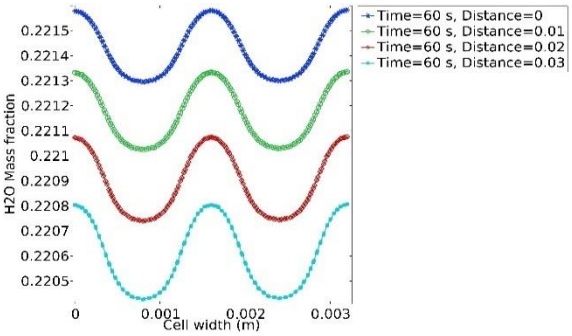
الف

ب

شکل ۵- توزیع کسر جرمی اکسیژن در عرض سطح واکنش سمت کاتد برای دو اختلاف ولتاژ مختلف الف) ۰/۵۸ ولت ب) ۰/۶۸ ولت

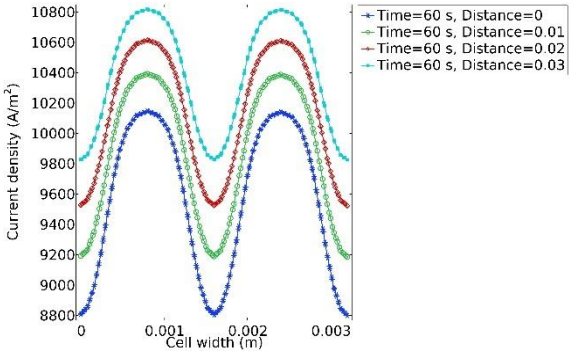


الف

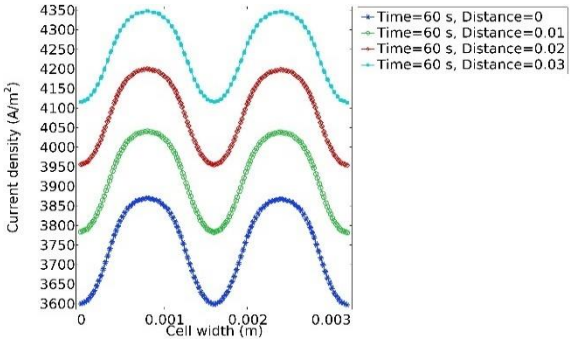


ب

شکل ۶- توزیع کسر جرمی آب در عرض سطح واکنش سمت کاتد برای دو اختلاف ولتاژ مختلف الف) ۰/۵۸ ولت ب) ۰/۶۸ ولت

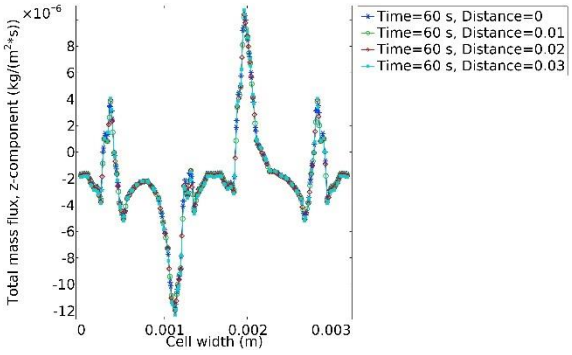


الف

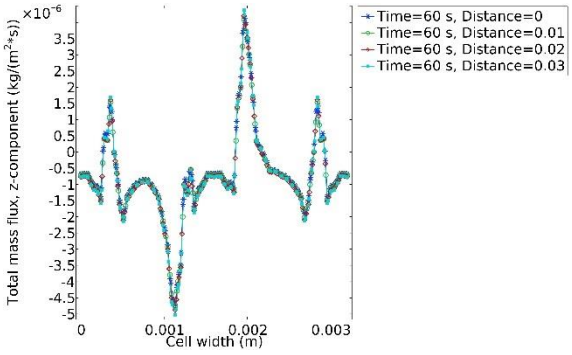


ب

شکل ۷- توزیع چگالی جریان در عرض سطح واکنش سمت کاتد برای برای دو اختلاف ولتاژ مختلف الف) ۰/۵۸ ولت ب) ۰/۶۸ ولت



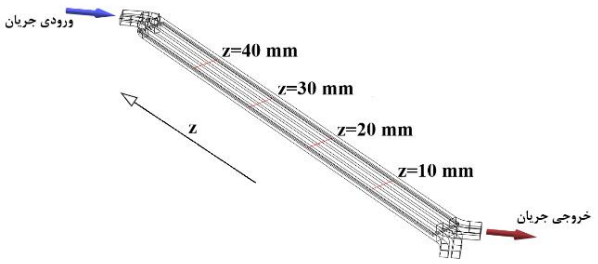
الف



ب

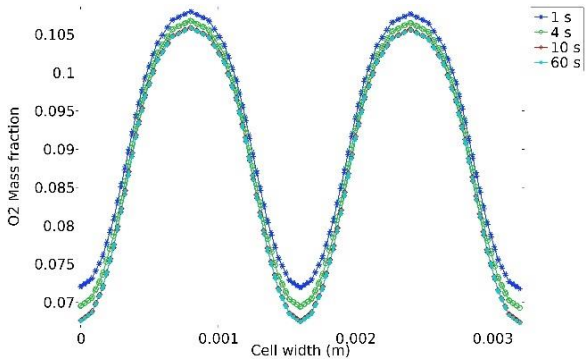
شکل ۸- توزیع دبی جرمی کل در راستای آند به کاتد در عرض سطح واکنش سمت کاتد برای دو اختلاف ولتاژ مختلف الف) ۰/۵۸ ولت ب) ۰/۶۸ ولت

از نمودارهای ۵ تا ۷ می‌توان چنین استنباط نمود که با بالارفتن اختلاف ولتاژ و در نتیجه کاهش جریان، مقادیر کسر جرمی اکسیژن افزایش را نشان می‌دهد که حاکی از مصرف کمتر این گاز در پیل سوختی است که به تبع آن آب کمتری نیز تولید می‌شود. نمودار دبی جرمی کاهش ۵۰ درصدی عبور جرم را با افزایش ۱۷/۲ درصدی اختلاف ولتاژ نمایش می‌دهد.

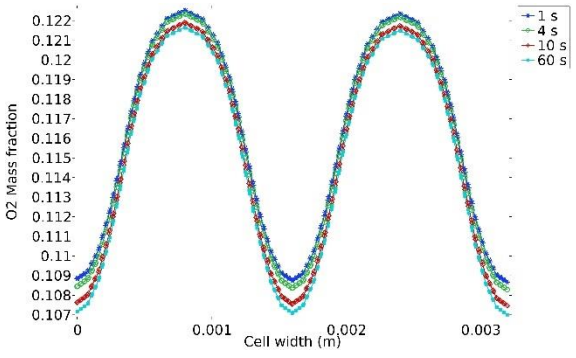


شکل ۹- مقاطع ایجاد شده بر روی میدان حل

در نمودارهای قبلی زمان ثابت و ۶۰ ثانیه بعد از حل در نظر گرفته شده است در شکل ۱۰ برای بررسی تاثیر زمان، کسر جرمی اکسیژن در مقطع z=10 mm برای زمان‌های مختلف برای هر دو ولتاژ ارائه می‌گردد. مشاهده می‌شود که با گذشت زمان مصرف اکسیژن افزایش پیدا می‌کند.



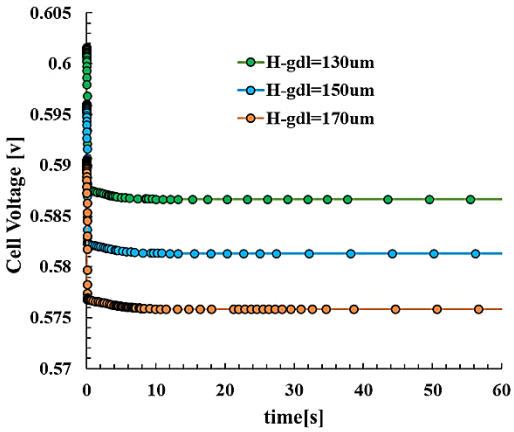
الف



ب

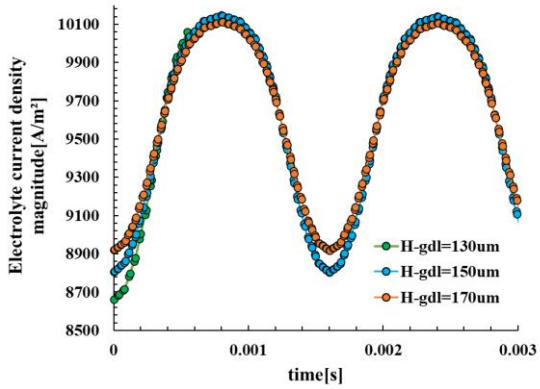
شکل ۱۰- توزیع کسر جرمی اکسیژن در عرض سطح واکنش سمت کاتد برای دو اختلاف ولتاژ مختلف الف) ۰/۵۸ ولت ب) ۰/۶۸ ولت در زمان های مختلف

همانگونه که قبلا هم اشاره شد، در کار حاضر ضخامت لایه پخش گاز تغییر می‌کند. اثرات این تغییر در شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ نشان داده می‌شود.



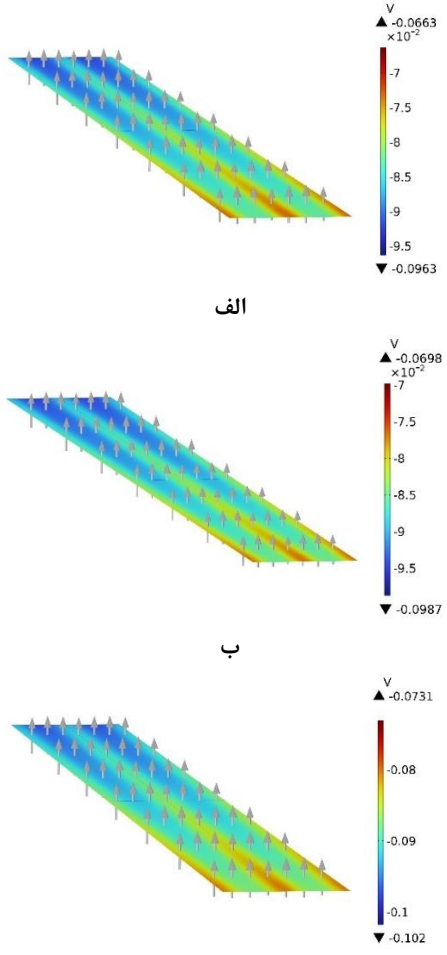
شکل ۱۱- تاثیر ضخامت لایه پخش گاز بر روی ولتاژ پیل سوختی

از شکل ۱۱ چنین استنباط می‌گردد که با افزایش ضخامت لایه پخش گاز میزان ولتاژ ایجاد شده در پیل سوختی کاهش می یابد به نحوی که با افزایش متوسط ۱۳/۵٪ ضخامت این لایه، مقدار ولتاژ یک درصد کاهش را نشان می‌دهد. این مقدار در توان یک استک پیل سوختی می‌تواند قابل توجه باشد. شکل ۱۲ چگالی جریان را برای مقطع z=10mm بر حسب زمان در عرض پیل سوختی نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- توزیع چگالی جریان برای ضخامت‌های مختلف لایه پخش‌گاز

در شکل ۱۲ دیده می‌شود که میانگین چگالی جریان برای ضخامت ۱۷۰ میکرومتر لایه پخش گاز ۹۵۸۹ آمپر بر متر مربع، برای ضخامت ۱۵۰ میکرومتر لایه پخش گاز ۹۵۲۱ آمپر بر متر مربع و برای ضخامت ۱۳۰ میکرومتر لایه پخش گاز ۹۴۱۱ آمپر بر متر مربع می‌باشد. بیشینه اختلاف در چگالی جریان ۱۷۸ آمپر بر متر مربع می‌باشد که مقدار قابل توجهی است.



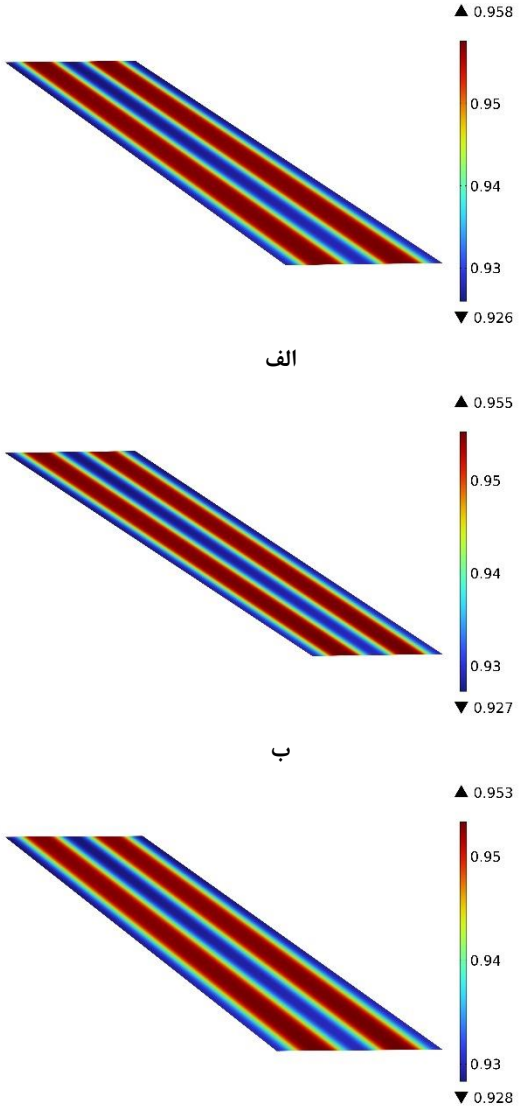
الف

ب

ج

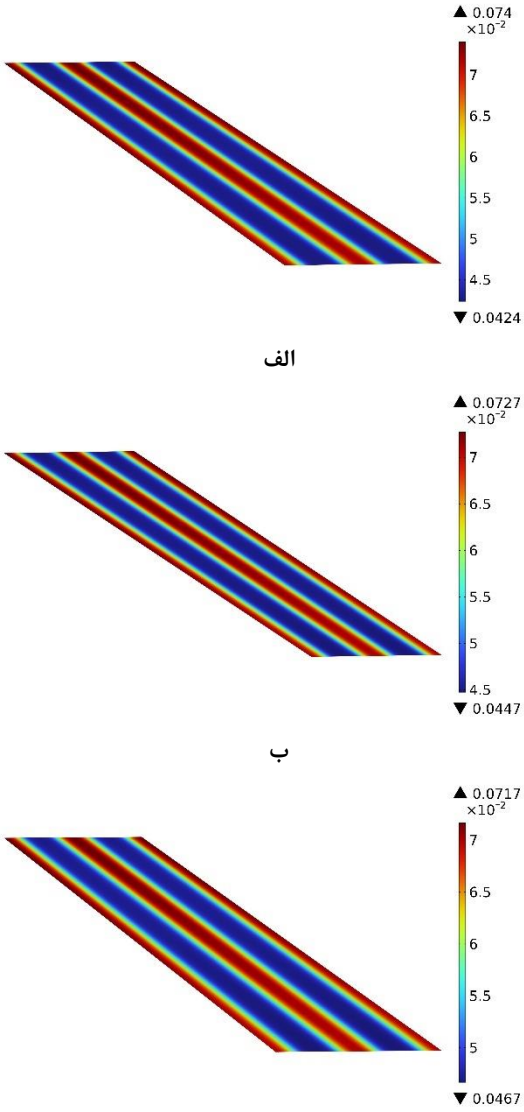
شکل ۱۳- کانتور پتانسیل و بردارهای چگالی جریان الکترولیت برای الف) H-GDL=130µm ب) H-GDL=150µm ج) H-GDL=170µm

شکل ۱۳ نشان می‌دهد که بردارهای چگالی جریان از سمت آند به سمت کاتد می‌باشد و توزیع کاملا یکنواخت است. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ کسر جرمی گاز و مایع را بر روی لایه کاتالیست سمت کاتد نشان می‌دهند. در شکل ۱۴ دیده می‌شود هنگامی که ضخامت لایه پخش گاز مقدار کمتری دارد کسر جرمی گاز در ناحیه زیرین کانال‌های تغذیه مقداری به مراتب بیشتر دارد. البته شایان ذکر است که گاز در این ناحیه متشکل از بخارآب، اکسیژن و نیتروژن می‌باشد.

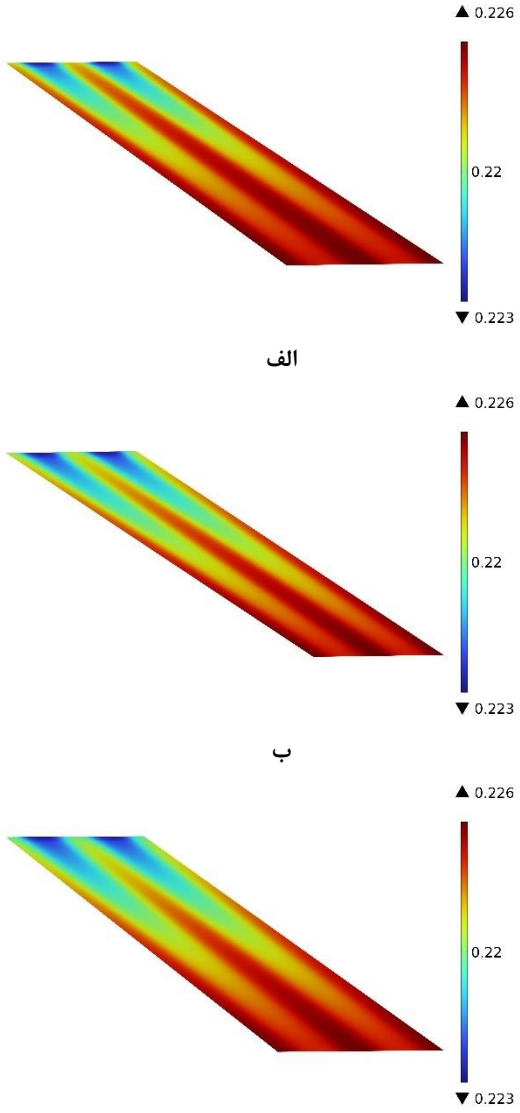


شکل ۱۴- کسر جرمی گاز برای الف) H-GDL=130µm ب) H-GDL=150µm ج) H-GDL=170µm

شکل ۱۵ مقادیر مایع بیشتری را برای لایه پخش گاز با ضخامت کمتر نشان می‌دهند. برای بررسی بهتر کسر جرمی آب در همین سطح در شکل ۱۶ نمایش داده می‌شود. کانتورها نشان می‌دهند که کسر جرمی آب در سمت کاتد برای ضخامت کمتر لایه پخش، بیشتر است.



شکل ۱۵- کسر جرمی مایع برای الف) H-GDL=130µm ب) H-GDL=150µm ج) H-GDL=170µm



شکل ۱۶- کسر جرمی آب برای الف) H-GDL=130µm ب) H-GDL=150µm ج) H-GDL=170µm

به منظور ارزیابی اعتبار و قدرت پیش‌بینی شبیه‌سازی عددی حاضر، نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های مقالات مشابه مورد مقایسه تطبیقی قرار گرفت. تطابق میان روند تغییرات ولتاژ خروجی پیل در اثر تغییر ضخامت لایه پخش گاز با نتایج آزمایشگاهی مرجع معتبر جو و وانگ [۱۳] مشاهده می‌شود. شبیه‌سازی حاضر نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه پخش گاز از ۱۳۰ به ۱۷۰ میکرومتر، ولتاژ ایجاد شده کاهش می‌یابد؛ به طوری که با افزایش متوسط ۱۳/۵درصدی در ضخامت، مقدار ولتاژ حدود یک درصد افت نشان می‌دهد. این روند نزولی دقیقاً با رفتار فیزیکی گزارش‌شده همخوانی دارد. دلیل این همخوانی در این حقیقت علمی نهفته است که با افزایش ضخامت، مقاومت نفوذی گونه‌ها افزایش یافته و دسترسی لایه کاتالیست به اکسیژن محدودتر می‌شود؛ پدیده‌ای که در مراجع عددی دوفازی پیشین نیز به عنوان عامل اصلی افت عملکرد پیل در شرایط اشباع معرفی شده است. همچنین، بیشینه اختلاف چگالی جریان بین ضخامت‌های مختلف کاملاً هم‌راستا با یافته‌های تجربی حوزه پیل‌های الکترولیت جامد قرار دارد که صحت ساختار مدل‌سازی دوفازی حاضر را تأیید می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر شبیه‌سازی عددی و سه بعدی و البته ناپایای پیل سوختی الکترولیت جامد بوده است. این مدلسازی برای دامنه چگالی جریان ۰/۴ تا ۱ آمپر بر سانتی‌متر مربع و سه ضخامت لایه پخش گاز ۱۳۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ میکرومتر برای بررسی تأثیر این پارامتر بر خروجی پیل سوختی با الکترولیت جامد صورت پذیرفته است. با افزایش اختلاف ولتاژ و در نتیجه کاهش جریان، مقادیر کسر جرمی اکسیژن نیز افزایش می‌یابد که حاکی از مصرف کمتر این گاز در پیل سوختی است که به تبع آن آب کمتری نیز تولید می‌شود. مطابق با معادله بقاء اجزاء، اکسیژن در طول مسیر مصرف شده و بر اساس واکنش کلی پیل، آب تولید می‌گردد. این امر منجر به کاهش کسر جرمی اکسیژن و افزایش متناظر کسر جرمی آب در نزدیکی خروجی کانال می‌شود. کاهش ضخامت لایه پخش گاز منجر به کاهش مسیر نفوذ گونه‌ها و در نتیجه کاهش مقاومت در برابر انتقال جرم می‌شود. این پدیده باعث می‌گردد واکنش‌دهنده‌ها با سهولت بیشتری به لایه کاتالیست رسیده و نرخ واکنش افزایش یابد که نتیجه آن تولید آب بیشتر و پتانسیل بالاتر در ضخامت‌های کمتر است. با افزایش اختلاف ولتاژ، پتانسیل فعال‌سازی کاهش یافته و طبق معادله باتلر-ولمر، نرخ تولید جریان افت می‌کند. کاهش جریان به معنای کاهش سرعت واکنش‌های الکتروشیمیایی است بنابراین مصرف اکسیژن کمتر شده و کسر جرمی آن در نمودارها مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد.

نتایج دبی جرمی کاهش ۵۰ درصدی عبور جرم را با افزایش ۱۷/۲ درصدی اختلاف ولتاژ نشان می‌دهد. همچنین از داده‌های به دست آمده می‌شود چنین استنباط کرد که با افزایش ضخامت لایه پخش گاز میزان ولتاژ ایجاد شده در پیل سوختی کاهش می‌یابد به نحوی که با افزایش متوسط ۱۳/۵٪ ضخامت این لایه، مقدار ولتاژ یک درصد کاهش نشان می‌دهد. این مقدار در توان یک استک پیل سوختی می‌تواند قابل توجه باشد. در کانتورهای استخراج شده مشاهده می‌شود که کسر جرمی آب در سمت کاتد برای ضخامت کمتر لایه پخش بیشتر است و این نشانگر این مطلب می‌باشد که آب بیشتری در این ناحیه تولید شده و در نتیجه اختلاف پتانسیل بالاتری ایجاد می‌شود.

۶- نمادها

k	رسانایی گرمایی (w/m.K)
L	طول (m)
p	فشار (Pa)
R	شعاع (m)
S	جمله منبع (چشمه یا چاه)
T	دما (K)
t	زمان (s)
u	سرعت (m/s)
X	نسبت جرمی

حروف یونانی

μ	لزجت دینامیکی (Pa.s)
ρ	چگالی (kg/m^3)
ϕ	تابع پتانسیل

۷- مراجع

[1] Cengel YA, Boles MA, Thermodynamics: An engineering approach. 5th ed. 2000.

[2] Hayre RP, Cha SW, Collela WF, Prinz B. Fuel cell fumdamentals. John Wiley & Sons. New York. 2006.

[3] Barbir F. PEM fuel cells: theory and practice. Elsevier Academic Press. 2005.

[4] Kösters TL, Schweinitz AG, Heere M, Friedrichs J, Gao X. Experimental Study and Simulations of Hydrogen Cooling Effectiveness for Aviation PEM Fuel Cells, 08 August 2023, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3221197/v1]

[۵] افرا, مهران, نظری, محسن, کیهانی, محمد حسن. بررسی تجربی و آشکارسازی انتقال آب در لایه انتشار گاز پیل سوختی غشای پلیمری. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*, ۱۳۹۹; ۵۰(۱): ۲۷-۳۶ . doi: 10.22034/jmeut.2020.9743

[۶] شمسی زاده, پدرام, افشاری, ابراهیم. بررسی عددی تأثیر ابعاد هندسی مانع زانویی بر عملکرد مرطوب‌ساز غشایی تخت در کاربرد پیل سوختی غشا پلیمری. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*, ۱۴۰۲; ۵۳(۳): ۹-۱۸. doi: 10.22034/jmeut.2023.47722.2971

[۷] رستمی, محسن, دهقان منشادی, مجتبی. تحلیل ترمودینامیکی یک سیستم تولید توان پیل سوختی غشایی تبادل پروتونی در یک هواپیمای بدون سرنشین. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*, ۱۴۰۱; ۵۲(۱): ۴۱-۵۰. doi: 10.22034/jmeut.2021.12352

[۸] شاکرمی, نگار, افشاری, ابراهیم, بنی اسدی, احسان, اصغری, سعید, اطیابی, سید علی. مدل‌سازی عددی لوله گرمایی به منظور استفاده در خنک‌کاری پیل سوختی غشاء پلیمری. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*, ۱۴۰۰; ۵۱(۴): ۴۴۳-۴۵۲. doi: 10.22034/jmeut.2022.11538

[۹] کاظمی نسب, باقر, روشن ضمیر, سوسن, قدمیان, حسین. مقایسه دقت معادلات تجربی، نیمه-تجربی و تحلیلی برازش منحنی پلاریزاسیون پیل سوختی غشا تبادل پروتون. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*, ۱۳۹۶; ۴۷(۳): ۲۰۷-۲۱۴.

[10] Pashaee Golmarz, T., Rezazadeh, S., Yaldagard, M., Bagherzadeh, N. The Effect of Proton-Exchange Membrane Fuel Cell Configuration Changing from Straight to Cylindrical State on Performance and Mass Transport: Numerical Procedure. Journal of Renewable Energy and Environment, 2021; 8(2): 39-53. doi: 10.30501/jree.2020.253825.1152

[11] Pashaee Golmarz, T., Rezazadeh, S., Bagherzadeh, N. Numerical Study of Curved-Shape Channel Effect on Performance and Distribution of Species in a Proton-Exchange Membrane Fuel Cell: Novel Structure. Journal of Renewable Energy and Environment, 2018; 5(2): 10-21. doi: 10.30501/jree.2018.88506

[۱۲] افشاری الف، ملایی ی، فرزانه ح، پیل سوختی غشا پلیمری. *انتشارات دانشگاه اصفهان*. ۱۳۹۲.

[13] Ju H, and Wang CY. Experimental Validation of a PEM Fuel Cell Model by Current Distribution Data. Journal of The Electrochemical Society. 2004. 151.11. A1954. doi.org/10.1149/1.1805523