بررسی عددی عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری با میدان جریان لانهزنبوری

ابراهیم افشاری^{(*}، سید علی اطیابی⁽، محمدحسین خیام^۲ و محمود عدمی^۲ ۱. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان ۲. مجتمع مکانیک و هوافضا،دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهینشهر اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۷/۱۰ – دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۱/۳۰)

چکیده – عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری به شدت وابسته به طراحی صفحات قطبی و میدان جریان ایجاد شده در ایـن صـفحات اسـت و طراحی مناسب آنها منجر به توزیع مناسب گازهای واکنش گر و دانسیته جریان، مدیریت مناسب آب و حرارت و بهبـود عملکـرد پیـل سـوختی می شود. بدین منظور در این مقاله، استفاده از یک میدان جریان جدید به صورت میدان جریان لانهزنبوری با پینهای شش وجهی بهجای کانالهای متداول، پیشنهاد شده است. با ارائه یک مدل سه بعدی، معادلات پیوستگی، مومنتم، بقا اجزا انرژی و بار الکتریکی بـه همـراه روابـط سـینتیک الکتروشیمیایی در نواحی مختلف پیل سوختی به صورت هم بسته، با یک مدل تک ناحیهای و به روش عددی حل شدهاند و تـأثیر میـدان جریان لانهزنبوری بر انتقال و توزیع اکسیژن، انتقال آب، توزیع دانسیته جریان، افت فشار و عملکرد پیل سـوختی بررسـی شـده اسـت. مـلاک طـرح ارائه شده، توزیع یکنواخت گازهای و اکنش گر و دانسیته جریان دو لایه پخش گاز و لایه کاتالیست کاتد و همچنین ولتاژ و دانسـیته تـوان بـالاتر ارائه شده، توزیع یکنواخت گازهای و کنش گر و دانسیته جریان در لایه پخش گاز و لایه کاتالیست کاتد و همچنین ولتاژ و دانسـیته تـوان بـالاتر همراه با یک افت فشار نه چندان زیاد (۲۵ کیلو پاسکال) است. نتایج نشان میدهند که در پیل با میدان جریان لانهزنبـوری، سـرعت در یانه بایت می دهند که در پیل با میدان جریان لانهزنبـوری، سـرعت در ناحیـه پینها تا ده برابر افزایش یافته است که باعث انتقال بیشتر اکسیژن به لایه کاتالیست شده و به دلیل توزیـع و شکل مناسـب پـینهـا، توزیـع پینها تا ده برابر افزایش یافته است که باعث انتقال بیشتر اکسیژن به لایه کاتالیست شده و به دلیل توزیـع و شکل مناسـب پـینهـا، توزیـع پینها تا ده برابر افزایش یافته است که باعث انتقال بیشتر اکسیژن به لایه کاتالیست شده و به دلیـل و زه حل مناسـب پـینهـا، توزیـع

واژگان كليدى: پيل سوختى غشاء پليمرى، ميدان جريان لانهزنبورى، پينهاى شش گوش، انتقال اكسيژن، توزيع يكنواخت اكسيژن.

Numerical Investigation on the Performance of a PEM Fuel Fell with Honeycomb Flow Field

E. Afshari^{1*}, S. A. Atyabi¹, M. H. Khayyam² and M. Adami²

Department of Mechanical & Aerospace, Malek Ashtar University, Shahin Shahr - Isfahan
 Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Isfahan University

Abstract: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell performance is directly related to the bipolar plates design and their flow field. The bipolar plate design plays a significant role in the reactant and current density distributions, and water and heat, management in a PEM fuel cell, thereby improving the cell performance. In this study, a novel configuration of flow field in the bipolar plate, a honeycomb flow field, is proposed, where the flow-field network is formed by many hexagonal pins arranged in a

^{*:} مسئول مكاتبات، پست الكترونيكي:e.afshari@eng.ui.ac.ir

regular pattern. A set of governing equations, conservation of mass, momentum, species, energy and charge, as well as electrochemical kinetic for all regions of fuel cell are considered and developed numerically while the model is treated as a singledomain by presenting a three-dimensional model. Through this model, the effects of honeycomb flow field on the oxygen transport, oxygen and current density distributions, water transport, pressure drop across the channel and PEM fuel cell performance are investigated. The main design criteria in this research are based on more oxygen and current density distribution uniformity, higher voltage, power density output, and low pressure drop. The results reveal that in the PEM fuel cell with honeycomb flow field, an enhancement in the oxygen transport, uniform oxygen and current density distribution, higher voltage and power density output at the catalyst surface, especially at the positions right beneath the locations of pins occurrs although the pressure drop across the channel increases.

Keywords: PEM fuel cell, honeycombflow field, hexagonal pins, oxygen transport, uniform oxygen distribution.

-	,			
	C^i	غلظت جزء <i>i</i> (mol/m ³)	U	سرعت (m/s)
	D_k	ضریب پخش جزء k (m ² /s)	علائم يو 8	انی ضریب تخلخل
	F	ثابت فارادی (C/mol)	μ	لزجت سيال (kg/m.s)
	Ι	چگالی جریان الکتریکی (A/m ²)	η	اضافه ولتاژ (V)
	Κ	نفوذپذیری (m ²)	ρ	چگالی (kg/m ³)
	Р	فشار (Pa)	φ	پتانسیل الکتریکی (V)
	R	ثابت عمومی گازها (8.314J/kg mol K)	λ	ثابت فعالیت در غشاء
	S	جمله چشمه در معادلات انتقال	κ	هدایت یونی (S/m)
	Т	دما (K)	ς	ضريب استوكيومتري جريان

فهرست علائم

۱- مقدمه

پیلهای سوختی غشاء پلیمری دستگاههایی الکتروشیمیایی هستند که مستقیماً انرژی شیمیایی حاصل از واکنش یک سوخت و اکسید کننده (معمولاً هیدروژن و اکسیژن) را به الکتریسیته و گرما تبدیل میکنند. پیل سوختی غشاء پلیمری بهدلیل بهرهوری انرژی بالا، درجه حرارت عملیاتی پایین (معمولاً ۸۰ درجه سلسیوس) و سر و صدای اندک منبع انرژی امیدوار کنندهای به ویژه برای استفاده در وسایل قابل حمل الکترونیکی است. این نوع پیلها، جذاب ترین مولدهای تبدیل انرژی هستند و میتوانند با راندمان بالا و برای مدت طولانی کار کنند؛ زیرا بازده آنها محدود به چرخه کارنو¹ نیست. این مزایا، پیل سوختی غشاء پلیمری را به یک گزینه مناسب برای مولدهای انرژی قابل حمل، وسایل حمل و نقل و برای ایجاد ایستگاههای توزیع انرژی الکتریکی، تبدیل

میکند [۱ و ۲].

در پیلهای سوختی غشاء پلیمری، شکل و هندسه میدان جریان تأثیر مستقیمی بر توزیع یکنواخت گازهای واکنش گر و مدیریت مناسب آب و حرارت تولیدی و خارج ساختن آنها از کانال میدان جریان دارد. طرحهای مختلفی برای میدان جریان پیل سوختی غشاء پلیمری توسعه داده شده و استفاده شده است که هر کدام از طرحها، مشخصات و نتایجی دارند. میزان و توزیع غلظت واکنش گرها و به تبع آن نرخ واکنشهای الکتروشیمیایی در سطح کاتالیست و همچنین توزیع دما داخل الکترودها وابسته به نوع کانالها است. طراحی میدان جریان یک موازنهی پیچیده بین قیدهای روی عملکرد پیل سوختی خواهند داشت و این مطلب ارزیابی این متغیرها را با اهمیت میکند. قیدهای طراحی شامل: افت فشار، انتقال الکترونها، انتقال حرارت و مدیریت

آب است. یک میدان جریان ایـدهآل در پیـل سـوختی، دارای ویژگیهای اساسی زیر است:

- ۱) انتقال جرم مناسب واکنشگرها به لایه کاتالیست طوری که اولاً واکنشگرها به میزان مورد نیاز در لایه کاتالیست فراهم شوند و ثانیاً گازها به طور یکنواخت در لایه کاتالیست در دسترس باشند.
- ۲) خروج محصولات واکنش و بخشی از حـرارت تولیـدی در پیل از کانال و هدایت آنها به خارج از پیل سوختی.

۳) مبادلهی الکترونی مناسب با لایههای کاتالیست.

۴) افت فشار حداقلی که بین ورودی و خروجی پیل وجود دارد، آب جمع شده در کانال کاتد را به بیرون هدایت میکند.

طراحی کانالها در پیل سوختی غشاء پلیمری از اهمیت زیادی برخوردار است و طرحی که ویژگیهای آن به چهار ویژگی فوق نزدیک باشد ما را به پیلی با عملکرد مناسب رهنمون میسازد.

استفاده از برنامه های کامپیوتری تجاری دینامیک سیالات محاسباتی نیز اجازه تحقیقات روی تأثیر کانال های جریان به شکل غیرمرسوم بدون نیاز به ساخت آزمایشگاهی یک مدل فیزیکی و با حذف هزینه های تولید و ماشین کاری را می دهد. در واقع مدل های ریاضی، مجموعه ای از اطلاعات دقیق درباره سازو کارهای مختلف انتقال در داخل پیل با طرح های مختلف کانال جریان را توسعه داده اند [۳ و ۴].

در سالهای گذشته در زمینه طراحی و انتخاب کانالهای جریان پیل سوختی غشاء پلیمری کوششهای زیادی انجام شده است. برخی نمونه طرحهای ارائهشده، شامل کانالهای موازی، مش، مارپیچی تک، مارپیچی چندتایی، جفت شده، کانالهای مسدود شده، کانالهای پینی و کانالهای با شکلهای خاص است [۵ و ۶]. طرحهای مارپیچی بهدلیا عملکرد بالای خود بهعنوان استاندارد صنعتی به کار می روند و اکثراً به عنوان طرح مرجع در ارزیابی طرحهای جدید به کار می روند [۷].

طرحهای مارپیچی از یک یا چندمسیر طولانی و پیچ در پیچ از سمت ورودی به سمت خروجی و طرحهای موازی چندین مسیر مستقیم از ورودی به خروجی را تشکیل میدهند. مشکل اصلی این نوع طراحی، اصطکاک ایجادشده توسط تنها یک

کانال باریک طولانی و فشار زیاد مورد نیاز برای رانـدن گـاز از ورودی به خروجی است. این مشـکل بـا اسـتفاده از پیـلهـای اندازه کوچکتر و یا اضافه کـردن کانـالهـای اضـافی و ایجـاد هیبریدهای موازی مارپیچ تا حدودی کاهش مییابد.

استفاده از آرایش مارپیچ منفرد که باعث افزایش طول کانال همراه است، علاوه بر افت فشار زیاد، باعث ایجاد گرادیان غلظت بالای گازهای واکنش گر از مقطع ورودی تا خروجی می شود. به علاوه، استفاده از یک کانال برای جمع آوری آب حاصل از واکنش (به خصوص در چگالی جریانهای بالا) احتمال شناوری لایه های متخلخل پیل را افزایش می دهد؛ بنابراین برای چگالی جریانهای بالا و به خصوص هنگامی که از هوا به عنوان اکسیدکننده استفاده می شود و یا هنگامی که از صفحات دوقطبی سطح بزرگی دارند، باید از چندین کانال موازی مارپیچ استفاده شود. این طرح باعث می شود تا افت فشار محدود شده و در نتیجه توان تلف شده برای پمپ هوا به داخل پیل کاهش یابد. علاوه بر این، کانالهای موازی مارپیچی دفع مؤثر آب را تسهیل نموده و از وقوع نواحی سکون ناشی از تجمع آب در سطح کاتد جلوگیری می کنند.

در طرحهای موازی نیز مسیرهای موازی متعدد از سمت ورودی به سمت خروجی باعث کاهش فشار مورد نیاز گاز از طریق سیستم می شوند. به طور کلی طرحهای موازی افت فشار بسیار کمی دارند و نیازی به استفاده بالا از توان پمپ بیرون از سیستم ندارند [۸ و ۹]. تغییرات فشار ورودی و خروجی کم این سیستم باعث تجمع قطرات آب تشکیل شده در کانالهای جریان می شود. این قطرات رشد می کنند و درنهایت با مسدود کردن راههای نفوذ گاز به لایه پخش گاز، منجر به توزیع غیریکنواخت گاز می شوند.

طرحهای مش، حالت خاصی از طرحهای موازی هستند که در آنها، مسیرهایی بین مسیرهای موازی ایجاد و تشکیل یک طرح شبکه مانند میدهند. در واقع، طرحهای مش طرحی با پین تعبیه شده در کانال جریان برای تسهیل توزیع چگالی جریان هستند و این طرح دارای افت فشار بسیار کمی است. همچنین، در این سیستمها از برخی شبکههای فلزی یا فوم استفاده کردهاند [۱۰ و این شبکهها هدایت الکتریکی بسیار بالایی دارند؛ ولی

متأسفانه، فوم فلزی و شبکههای زیـاد مسـتعد خـوردگی هسـتند و میتواند منجر به از کار افتادن سریع پیل سوختی شوند.

طرح جفت شده یک مسیر پیوسته از سمت ورودی به سمت خروجی ندارد؛ اما در این طرح گازهای واکنش گر مجبور به عبور از زیر شانه کانال و از طریق الکترودها هستند. در این طرح، جریان گاز از طریق روزنههای نفوذ به اجبار عبور میکند. مطالعات عملکردی نشان دادهاند که طراحی جفت شده بهطور کلی بهتر از طرحهای موازی بوده؛ اما عملکرد ضعیف تری نسبت به طرحهای مارپیچی دارند. به نظر میرسد در این طرح مدیریت آب بهتری نسبت به طرحهای موازی و بدون فشار بیش از حد بالا

در مورد طرحهای کانال با شکلهای خاص، آثار پژوهشی متعددي وجود دارد كه بهمنظور بررسي اثرات الگوهاي مختلف صفحه دو قطبی بر عملکرد پیلهای سوختی، انجام شده است. کومار و ردی [۱۳] مقاطع کانال بهصورت نیمدایره، مثلث و مستطیلی را از نظر تئوری بررسی کرده و به این نتیجه رسـیدند که مقطع نیمدایره بیشترین افت فشار را دارد و پس از آن به ترتیب مقاطع مثلثی و مستطیلی بیشترین افت فشار را دارنـد. همچنین درصد مصرف هیدروژن در سه سطح مقطع مقایسه شده است که درصد مصرف هیدروژن در سطح مقطع نیم دایرهای بیشینه و پس از آن مقاطع مثلثی و مستطیلی بیشترین مصرف هیـدروژن را دارنـد. کـو و چـن [۱۴] یـک مطالعـه مقایسهای بین یک کانال جریان گاز مستقیم معمولی و یک میدان با کانال جریان گازموجی شکل انجام دادهاند. نتایج آنها نشان میدهد که اثرات جابهجایی در کانال موجی شکل در مقایسه با یک کانال جریان معمولی مستقیم بیشتر است و کانال موجی شکل عملکرد بهتری در انتقال جرم و جابهجایی اجباری واکنشدهندهها، سرعت جریان گاز بالاتر و توزیع یکنواختتـر دما را فراهم میکند. روشندل و همکاران [۱۵] مطالعه مقایسهای روى طرح يک صفحه دو قطبي با الهام از الگوهاي زيستي موجود با جریان سیال موازی - مارپیچی انجام دادهاند. نتایج آنها نشان داده که در این طرح جدید، توزیع فشار در سطح لایه

کاتالیست یکنواخت تر است و چگالی توان به دست آمده از کانالهای مارپیچی و موازی جریان بالاتر بوده است. خزاعی و همکارانش [۱۶]، عملکرد پیل سوختی با سطح مقطع حلقوی را بررسی کردهاند. نتایج آنها نشان می داد که افزایش سطح تماس بین لایه پخش گاز و صفحات دو قطبی باعث افزایش عملکرد پیل سوختی می شود. یانگ و همکارانش [۱۷] اثر نیروهای شناوری در یک کانال جریان موجی شکل روی سرعت، دما و توزیع غلظت گاز در داخل کانال و برروی بازده واکنش را بررسی کردهاند. به طور کلی، نتایج آنها نشان می دهد که کانال جریان موجی شکل، چگالی توان حداکثر را در حدود ۴۰ درصد بیش از یک کانال جریان گاز معمولی بهبود می بخشد. در می رود و به همین دلیل، به منظور بهینه سازی عملکرد پیل یک نقطه تعادلی باید معین شود.

در این مطالعه، با ارائه یک مدل جدید برای میدان جریان گاز در پیل سوختی غشاء پلیمری، شبیهسازی عددی بهمنظ ور بررسی این طراحی خاص و به وسیله یک مدل سه بعدی شامل همه نواحی پیل (از جمله لایه کاتالیست) انجام شده و بسیاری از اثرات سه بعدی که در مدل یک یا دو بعدی لحاظ نمی شود، ارزیابی شدهاند. هدف اصلی این مطالعه، بررسی میدان جریان لانه زنبوری در سمت کاتد پیل که در دسته میدانهای جریان پینی طبقه بندی می شود، است. انتظار می رود که نتایج، اطلاعات یو دقیقی در مورد پدیده های انتقال در داخل پیل سوختی غشاء پلیمری با این میدان جریان ارائه کند و درکی بهتر از انتقال و توزیع واکنش دهنده ها در داخل پیل سوختی ارائه نماید.

۲ – مدل ریاضی
۲ – ۱ – توصیف مدل پیل سوختی غشاء پلیمری
در شکل (۱) شماتیکی دو بعدی از پیل سوختی غشاء پلیمری
با اجزای مختلف آن نشان داده شده است.
پینهای شش وجهی داخل کانال کاتد، هندسه میدان جریان



لانهزنبوری را تشکیل میدهند. پیل شامل کانال گاز آند، لایـه يخش گاز آند، لايه كاتاليست آند، لايه غشاء، لايه كاتاليست کاتد، لایه پخش گاز کاتد، کانال گاز کاتد همراه با پین های شش وجهی و صفحات قطبی است. در واقع کانالهای جریان، در داخل صفحات قطبي ايجاد مي شوند و ميدان جريان لانهزنبوري در داخل این کانالها قرار دارد. هوای خشک وارد کانال کاتد و گاز هیدروژن با رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد وارد کانال آنـد مـیشـود. هیدروژن از میان لایه پخش آند بهطرف کاتالیست انتقال می یابد و به دو يون هيـدروژن (پروتـون) و دو الكتـرون تبـديل مـيشـود. پروتون ها از میان غشاء به طرف لایه کاتالیست کاتد حرکت میکنند؛ اما غشاء رسانای الکترون نیست و با عبور الکترون از یک مدار خارجی، یک جریان الکتریکی خارجی به وجود می آید که باعث توليد كار الكتريكي مي شود. در كاتد، اكسيژن از ميان لايه پخش گاز حرکت میکند و در سطح لایه کاتالیست با پروتونها و الكترونها واكنش داده و تشكيل آب مىدهد. واكنش أنـدى كمـي گرماگیر و واکنش کاتـدی بـه شـدت گرمـازا اسـت؛ بنـابراین در مجموع علاوه بر تولید آب، در پیل گرما تولید می شود.

در طراحیهای میدان جریان پینی که فقط تعدادی پین در میدان جریان تعبیه شده اشکالاتی وجود دارد. در این طرحها، نرخ واکنش پیل سوختی معمولاً در نواحی سکون داخل میدان جریان کندتر است؛ زمانی که واکنش دهنده ها به شکل مایع باشند، شکل گیری و وجود نواحی سکون منجر به به کارگیری نا مؤثر کاتالیست می شود؛ مسیرهای طولانی جریان باعث تولید گرادیان های غلظتی از ورودی به خروجی پیل سوختی می شود و

منجر به غیریکنواختی توزیع جریان الکتریکی در سراسر پیل سوختی می شود. این مشکلات در طراحی های میدان جریان با آرایش لانهزنبوری تا حدودی بهبود مییابد. طرح تشکیل شده خطوط جریان در این میدان جریان شبیه به میدان جریان مارپیچی است. در این طرح جدید، واکنش دهنده های سمت کاتد از میان شیارهای فاصلهدار که در صفحه دو قطبی کاتد شکل گرفتهاند، شیارهای فاصلهدار که در صفحه دو قطبی کاتد شکل گرفتهاند، عبور میکنند. اگر واکنش دهنده ها از میدان های جریان عبور کنند تلاش میکنند تا مسیری با حداقل مقاومت را بپیمایند که ممکن آرایش لانهزنبوری باعث پیشروی جریان به صورت مارپیچ در طول کانال و توزیع یکنواخت گازهای واکنش گر در لایه پخش گاز و لایه کاتالیست می شود. میدان جریان لانهزنبوری خواستههای زیر را تأمین میکند [۱۸]:

- ۱) افت فشار یکنواخت و بهینه در داخل پیل ۲) کمترین نواحی سکون در میدان جریان پیل سوختی
 - ۳) افزایش انتقال واکنش گرها به لایه کاتالیست ۴) افزایش برداشت محصولات جانبی
- ۵) بهبود عملکرد پیل سوختی در مقایسه با میدان های معمولی جریان

با توجه به موارد بالا، میدان جریان لانهزنبوری در پیل سوختی غشاء پلیمری میدان جریان مناسبی است و نیاز به بررسی کامل دارد. مدلهای سه بعدی برای بررسی اثر هندسه، خصوصاً با میدانهای جریان لانهزنبوری و پینهای شش گوش کاربرد ویژهای دارند. باید توجه داشت که به علت پخش بالای هیدروژن نیازی به استفاده از میدان جریان لانهزنبوری در کانال آند نیست.

۲-۲- معادلات حاکم

در توسعه مدل پیل سوختی، بهمنظور ساده کردن روند حل معادلات حاکم، فرضیاتی در مدل اعمال می گردد: ۱) مخلوطهای گاز ایدهآل هستند. ۲) الکترودها، لایههای پخش گاز، لایههای کاتالیست و غشاء همسان گرد و همگن هستند.

			•••	
عبارتهای چشمه و یا چاه*		فرم رياضي معادله	معادله	معادله
	0	$\nabla .(\rho \vec{\mathbf{u}}) = 0$	جرم	(1)
$S_u = \frac{\mu}{k} \vec{u}$	در لایههای پخش گاز و کاتالیست:	$\frac{1}{\varepsilon}\nabla .(\rho \vec{\mathbf{u}}\vec{\mathbf{u}}) = -\nabla P + \nabla .\tau + S_{u}$	مومنتم	(7)
$S_{k} = -\frac{s_{k}j}{nF}$ $S_{k} = -\nabla \cdot (\frac{n_{d}}{F}I) - \frac{s_{k}j}{nF}$	واکنشگرها در لایههای کاتالیست: آب در لایههای کاتالیست:	$\nabla . (\vec{\mathbf{u}}C_k) = \nabla . (D_k^{\text{eff}} \nabla C_k) + S_k$	گونەھاي جرمي	(٣)
$S_{\phi} = j$	در لایههای کاتالیست:	$\nabla . (\kappa^{\rm eff} \nabla \phi_e) + S_{\phi} = 0$	پتانسيل الكتريكي	(۴)
$S_{T} = j(\eta + T\frac{dU_{0}}{dT}) + \frac{I^{2}}{\kappa^{eff}}$	در لایههای کاتالیست:	$\nabla (\alpha \vec{v} T) - \nabla d\vec{v}^{\text{eff}} \nabla T + S$	c* 1	
$S_T = \frac{I^2}{\kappa^{eff}}$	در غشاء:	v.(pc _p u1)=v.(K v1)+3 _T	الررى	(U)

جدول ۱- معادلات اساسی جریان سیال و معادلات الکتروشیمیایی به همراه عبارتهای چشمه و چاه

. در ستون چهارم این جدول، در هر ناحیهای که اشارهای به عبارت چشمه و یا چاه نشده است، این عبارت برابر صفر است.

- ۳) جریان سیال بهدلیل گرادیانهای فشار و سـرعت کوچـک، آرام و غیرقابل تراکم است.
- ۴) افتهای ناشی از مقاومت تماسی در الکترودها و لایههای کاتالیست به علت هدایت پذیری الکتریکی خیلی بالای آنها قابل صرفنظر کردن است.
 - ۵) فرض تک فاز برای انتقال آب درنظر گرفته شده است.
- ۶) وجود آب مایع در کسر حجمی کوچک و بهصورت قطرات ریز پخش شده است (جریان مرطوب)؛ بهطوریکه اثری روی انتقال جریان گاز و فرآیندهای الکتروشیمیایی ندارد.

فرض ۴ منجر به صرفنظر کردن از گرمای ایجادشده در جمع کننده جریان الکتریکی، لایه پخش گاز و لایههای کاتالیست بهعلت هدایت الکتریکی بالای آنها میشود. فرض ۵ باعث میشود که آب، فوق اشباع و در فاز گاز درنظر گرفته شود؛ یعنی فعالیت آب بالاتر از یک است [۱۹]. از اینرو، در این مقاله فعالیت آب ۲ درنظر گرفته شده است. صرفنظر از گرمای ایجاد و جذب شده ناشی از تغییر فاز آب نیز شامل فرض ۵ میشود.

با بهکارگیری فرضیات مطرحشده، معادلات بقای جرم، مومنتم،

گونههای شیمیایی، بار الکتریکی و انرژی ساده شده و تمام معادلات حاکم بهطور همزمان در کل ۹ ناحیه پیل (جمع كننده هاى جريان، كانال ها، لايه هاى يخش گاز، لايه هاى كاتاليست و غشاء) با درنظر گرفتن یک مدل تک ناحیهای و به روش حجم كنترل محدود حل شده است. مزيت مدل تک ناحيهاي عدم نياز به مشخص کردن شرایط مرزی در فصل مشترک بین نواحی مختلف پیل است و شرایط مرزی فقط در مرزهای بیرونی مدل مورد نیاز است. عدم اعمال این شرایط مرزی بهدقت مسأله افزوده و حل معادلات را آسان می کند. علت آسان شدن حل معادلات این است که در تمام شبکه محاسباتی داخلی، فقط یک سری معادلات حل می شود و نیاز نیست که این معادلات در هـر ناحیـه ودر مرزهـای داخلی با تبدیل کردن آنها به شرایط مرزی (شرایط مرزی عموماً نیومن بوده و در واقع یک معادله جدید در مرزهای داخلی هستند) معادلات و نوع حل عددی تغییر کند. هر چند با اعمال روش تک ناحیهای زمان محاسبات کامپیوتری طولانی می شود. معادلات حاکم همراه با عبارتهای چشمه حجمی مشخص برای نواحی مختلف پیل سوختی غشاء پلیمری در جدول ۱ خلاصه شده است. واكنش هاى الكتروشيميايي در حالت كلي براي محاسبه

$$\eta = \phi_{\rm S} - \phi_{\rm e} - U_0 \tag{11}$$

$$U_0 = 1.23 - 9.0 \times 10^{-4} (T - 298.15)$$
 کاتد (۱۳)

حاصل ضرب دانسیته جریان تبادل در مساحت فعال پیل، در سمت آند ثابت بوده؛ ولی در سمت کاتد تابع دما است [۱۹]: $ai_{0,c}^{ref}(T) = ai_{0,c}^{ref}(353K) \times exp -16456 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{353.15}\right)$

عبارتهای چشمه در معادلات بقا گونههای جرمی بیانگر تولید و یا مصرف گونههای k ام در واکنشهای الکتروشیمیایی و درگ الکترو – اسمزیک^۵ آب از آند به کاتد است. ضریب پخش جرمی جز k ام یعنی D_k در کانالهای گاز آند و کاتد براساس تابعی از دما و فشار محاسبه می شود [۲۰]:

$$D_{k} = D_{0} \left(\frac{T}{T_{0}}\right)^{3/2} \left(\frac{P_{0}}{P}\right)$$
(1 Δ)

برای نواحی متخلخل پیل سوختی غشاء پلیمری مانند لایه های پخش گاز و لایه کاتالیست، عبارت پخش پذیری مؤثر اجزاء Deff اصلاح می شود [۱۹ و ۲۰]:

$$D_{k}^{eff} = \varepsilon_{i}^{1.5} D_{k}$$
(19)

سه عبارت چشمه حرارتی در معادله انرژی نیز قابل توجه است. آنها نشاندهنده گرمای غیر قابل برگشت حاصل از واکنش الکتروشیمیایی، گرمای آنتروپی برگشتپذیر و حرارت ناشی از مقاومت اهمی هستند که در جدول ۱ به آن اشاره شده است. علاوه بر این، ظرفیت حرارتی مؤثر در مواد متخلخل است. علاوه بر این، ظرفیت حرارتی مؤثر در مواد متخلخل متشکل از فاز جامد و مایع با رابطه زیر قابل بیان است [۲۱]: $\rho C_{\rm P} = \epsilon (\rho C_{\rm P})_{\rm f} + (1-\epsilon) (\rho C_{\rm P})_{\rm s}$ (۱۷) $\rho C_{\rm P} = \epsilon (\rho C_{\rm P})_{\rm f} + (1-\epsilon) (\rho C_{\rm P})_{\rm s}$ در رابطه بالا، ظرفیت های گرمایی $\rho C_{\rm P}$ با زیرنویس f و بهترتیب مربوط به سیال و جامد است. رسانایی پروتونی غشای نافیون، Kmem و ضریب درگ الکترو – اسمزیک آب n_d ، تابعی از رطوبت نسبی غشاء بوده $\kappa_{\rm mem} = (0.5139 - 0.326) \exp \left[1268 (\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right]$ عبارتهای چشمه ارائه شده در جدول ۱، بـهصـورت زیـر نوشـته می شوند:

$$\sum s_k M_k = n e^- \tag{9}$$

که M_k فرمول شیمیایی جزء k ام، S_k ضریب استوکیومتری^۲ و n تعداد الکترونهای منتقل شده است. واکنش کلی (۶) برای اکسایش در سمت آند و کاهش اکسیژن در کاتد به صورت زیر نوشته می شوند:

$$\mathrm{H}_{2} - 2\mathrm{H}^{+} \rightarrow 2\mathrm{e}^{-} \tag{V}$$

$$2H_2 0 - 0_2 - 4H^+ \rightarrow 4e^-$$
 (A)

عبارتهای چشمه در معادلات مومنتم برای بازیابی معادله دارسی ^۳ در شرایط حدی (نفوذپذیری کوچک و سرعت پایین) در نظر گرفته شده است. عبارت چشمه در معادله پتانسیل الکتریکی برای توصیف جریان الکتریکی عبوری بین فاز جامد و فاز الکترولیت در هر یک از لایههای کاتالیست آند و کاتد به کار می رود. برای محاسبه این عبارتها، چگالی جریان الکتریکی عبوری باید محاسبه شود. بدین منظور از معادله باتلر – ولمر^⁴ برای واکنش های اکسایش هیدروژن و کاهش اکسیژن استفاده می شود:

$$a = a j_{0,a}^{\text{ref}} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2,\text{ref}}}\right)^{1/2} \left(\frac{\alpha_a + \alpha_c}{RT} F \eta\right)$$
(4)

$$j_c = -a \; j_{0,c}^{\text{ref}} \left(\frac{C_{0_2}}{C_{0_2,\text{ref}}} \right)^{1/2} \; \exp(\frac{-\alpha_c}{\text{RT}} F \; \eta)$$
 (10)

 $C_{H_2,ref}$ ، C_{O_2} ، C_{H_2} ، $j_{0,c}^{ref}$ ، $j_{0,a}^{ref}$ ، عسطح فعال، η ، F، α_a ، α_c ، $C_{O_2,ref}$ ، η ، F، α_a ، α_c ، $c_{O_2,ref}$ ، كاتد، غلظت هیدروژن، غلظت اكسیژن، غلظت هیدروژن مرجع، غلظت اكسیژن مرجع، ضریب انتقال كاتد، ضریب انتقال آن.د، ثابت فارادی و اضافه ولتاژ است.

مقدار $\alpha_a + \alpha_c$ در واکنش اکسایش هیدروژن برابر ۲ بوده؛ درحالی که $1 = \alpha_c$ است. با فرض اینکه ولتاژ مدار باز مرجع آند، صفر فرض شود و در سمت کاتد تابعی از دما باشد، عبارت اضافه ولتاژ برای طرف آند و کاتد را میتوان به صورت زیر تعریف کرد [۱۷]:



$$n_d = \frac{2.5\lambda}{22} \tag{19}$$

$$a = \frac{C_W^g R T}{P^{sat}}$$
(Y •)

$$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36.0a^3 & 0 < a \le 1 \\ 14 + 1.4(a - 1) & 1 < a \le 3 \end{cases}$$
(71)

نفوذپذیری آب در غشاء براساس رابطه تجربی، توسط موتاپالی 💿 سرعت ورودی آند و کاتد را نیـز مـیتـوان بـا نسـبت جريـان

و همکاران بهدست آمده است [۲۲]: $D_{w,mem} = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-7} \lambda (e^{0.28\lambda} - 1) e^{(-2346/T)} & 0 \le \lambda \le 3 \\ 4.17 + 4.18 e^{-2\lambda} + 4.18 e^{-2\lambda} + 4.18 e^{-2\lambda} & (\Upsilon\Upsilon) \end{cases}$ $4.17 \times 10^{-8} \lambda (1 + 161 e^{-\lambda}) e^{(-2346/T)}$ $3 < \lambda$ در این مطالعه، غشاء از نوع نافیون ۱۱۲ است که هدایت پروتونی و نفوذپذیری آب در غشاء از روابط (۲۳) و (۲۴) بەدست مى آيند [١٩]:

$$\kappa_{\rm mem}^{\rm eff} = \frac{1}{2} \kappa_{\rm mem} \tag{(YY)}$$

$$D_{w,mwm}^{\text{eff}} = \frac{1}{2} D_{w,mem}$$
(Y*)

هدایت مؤثر پروتونی لایههای کاتالیست آنـد و کاتـد از طریـق رابطه بریگمن بهدست می آید [۱۹]: $\kappa_{cat}^{eff} = \epsilon_{mc}^{1.5} \kappa_{mem}$ (10)

در رابطه بالا، ٤_{mc} کسر حجمی یونی در لایه کاتالیست آنـد و کاتد است. با مشخص شدن پتانسیل الکترولیت، pe و هـدایت پروتونی غشاء к mem ، چگالی جریان موضعی را می توان محاسبه کرد:

$$I = -\kappa_{mem}^{eff} \nabla \phi_e \tag{19}$$

چگالی جریان متوسط را م*ی*توان با درنظر گرفتن سطح متوسط چگالی جریان موضعی روی کل غشاء بهدست آورد:
$$I_{avg} = \frac{1}{A_{mem}} \int IdA$$
 (۲۷)

از

استوکیومتری مربوط بهسمت آند، چو سمت کاتد، چو محاسبه نمود. نسبت استوکیومتری به صورت نسبت مقدار واکنش دهنده ورودی به مقدار واکنش دهنده مورد نیاز واکنش الکتروشیمیایی برای تولید مشخص چگالی جریان مرجع، Iref تعریف می شود. برای شرط مرزی حرارتی ورودی های گاز آند و کات. شرط مرزی درجه حرارت ثابت به کار برده می شود.

برای خروجی کانالهای آند و کاتد، شرط مرزی فشار خروجی استفاده میشود. در شرط مرزی فشار خروجی، فشار استاتیک بهصورت نسبی در مرز خروجی وارد میشود. جریان در مرزهای خروجی بهصورت توسعه یافته یا شار صفر درنظر گرفته میشود:

 $\frac{\partial \vec{u}}{\partial n} = 0 \quad , \quad \frac{\partial C^{i}}{\partial n} = 0 \quad , \quad \frac{\partial \phi_{e}}{\partial n} = 0 \quad , \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \qquad (\mbox{in})$

برای دیواره های کانال و دیواره پین های موجود در کانال کاتد، شرط عدم لغزش برای سرعت و شرط شار صفر برای دیگر متغیرها، به استثناء شرط دمایی در مرز کانال ها، به کار می رود. دمای دیواره های کانال ها برابر دمای عملکرد پیل فرض می شود:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad , \quad \frac{\partial C^{i}}{\partial n} = 0 \quad , \quad \frac{\partial \phi_{e}}{\partial n} = 0 \tag{79}$$

در ناحیه مرز جامد، شرایط مرزی آدیاباتیک در تمام مرزهای دامنه به کار می رود که به معنی این است که انتقال انرژی تنها در فاز گاز رخ می دهد. در دیواره ناحیه جمع کننده جریان الکتریکی آند، ولتاژ صفر و برای قسمت کاتد ولتاژی نزدیکی به ولتاژ مدار باز نرنست⁶ اختصاص می یابد.

۲-۴- روش حل عددی و شبکهبندی مدل

همان طور که در نمودار شکل (۲) برای آشنایی با گامهای حل مسأله نمایش داده شده است، یک روند تکراری برای حل دستگاه معادلات همبسته در کل دامنه با استفاده از الگوریتم SIMPLE، انتخاب شده است. مجموعهی معادلات حاکم که در قسمت قبل اشاره شد به صورت عددی با استفاده از نرم افزار تجاری FLUENT نسخه ۱۴ حل شده

است. برای حل معادله پتانسیل الکتریکی و همچنین محاسبات الكتروشيميايي داخل پيل، از ماژول^v پيل سوختي که بهصورت یک برنامه الحاقی به این نرم افزار اضافه شده است، استفاده شده است. این نرمافـزار بـا اسـتفاده از روش حل عددی حجم محدود، مدل ریاضی را حل مینماید. برای سرعت بخشیدن به همگرایی، یک روش جبری چند شبکه استفاده می شود. سپس راه حل در بیش از یک سطح شبکه برای از بین بردن خطاهای فرکانسی بالا و پایین محاسبه می شود. برای تدوین روش چند شبکه، چرخه F با روش تثبیت گرادیان دو مزدوج^ استفاده شده است. طرح چرخه F، تکرار شامل تمام سطوح شبکه است، در این طرح تكرار سطح شبكه به بيش از دو سطح شبكه درشت می رساند و در ادامه به سطح شبکه خوب و بالاتر ارتقاء مىدهد تا اينكه أن را به بهترين شبكه برساند، اساساً يك چرخـه چنـد شـبکه F ترکیبـی از چرخـه V و W اسـت و حداکثر تعداد چرخـهها ۶۰ تعیین میشود. فاکتورهای مناسب زیر تخفیف نیز برای هر متغیربه کار رفته است. متغیرهای بکار رفته در مدلسازی نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

برای بهبود نتیجه حل معادلات، کاهش خطای برشی و کاهش هزینه محاسباتی، با درنظر گرفتن یک مدل سه بعدی از مسأله، در نواحی ورودی و خروجی لایه پخش گاز، لایه کاتالیست ابتدا و انتهای کانال و نواحی نزدیک به پین های شش گوش تا جایی که ممکن بوده شبکه ریز تر شده است. مطالعه استقلال از شبکه مدل با افزایش چگالی مش انجام شده است و نتایج بهدست آمده برای چگالی مش انجاه مقایسه شده است. استقلال از شبکه برای چگالی جریان میانگین میانگین در شکل (۳) نشان داده شده است. در نهایت تعداد شبکه، ۱۵۲۴۶۰۰ برای شبکهبندی انتخاب شده است. نفیکیک هر ناحیه نشان داده شده است.این شبکهبندی در تفکیک هر ناحیه نشان داده شده است.این شبکهبندی در شکل (۴) نمایش داده شده است.

مقدار	واحد	نماد	متغيرها
١/۵	mm	Н	ارتفاع كانال ورودى
۶.	mm	L	طول کانال ورودی
١٨	mm	W	عرض کانال ورودی
١	mm	t_{cl}	ضخامت لايه جمع كننده جريان
۲۶.	μm	t_{gdl}	ضخامت لایه پخش گاز
١.	μm	t_{cai}	ضخامت لايه كاتاليست
۲۳۰	μm	t _{mem}	ضخامت غشاء (نافيون ١١٢)
١/۵	mm	L	اندازه پین،های شش ضلعی منتظم
١/۵	mm	W	فاصله طولى بين پينها
١/٣	mm	Н	فاصله عرضي بين پينها
٨/٣١۴	J/mol.K	R	ثابت جهانی گازها
98411	C/mol	F	ثابت فارادی
۲/۸ / ۳/۰	-	ξ_{H_2} / ξ_{O_2}	نرخ استوكيومتري جريان هيدروژن اكسيژن
$(\Delta \times 1 \circ^{\wedge})/(1 \times 1 \circ^{7})$	A/m ³	$aj_{0,a}^{ref}$ / $aj_{0,c}^{ref}$	مساحت فعال × چگالی جریان مرجع آند/کاتد
307°	K	Т	دماي عملكرد پيل سوختي
$\mathcal{F}\mathcal{F}/\Lambda$ \V / \V/•A	mol/m ³	c_a^{tot} / c_c^{tot}	غلظت کلی آند/کاتد
۱.۰۴	A/m ²	I _{ref}	جريان الكتريكي مرجع
$(\Upsilon \times 1 \circ \circ)/(\Delta \times 1 \circ \circ)$	Ра	P_{H_2} / P_{O_2}	فشار ورودی آند/کاتد
١٩١		Re	عدد رينولدز
•/ \ ¥¥1/•/19	-	$\rm X_{\rm H_2}/\rm X_{\rm O_2}$	کسر مولی هیدروژن /کسیژن ورودی
۰/۱۵۵۹	-	X_{H_2O}	کسر مولی بخار آب ورودی در آند و کاتد
۰/۲۸	-	ε _m	تخلخل غشاء
۰/۲۸	-	ε _{cat}	تخلخل لايه كاتاليست
۰/٣/۰/۴/۰/۵	-	ε _{gdl}	تخلخل لايه پخش گاز
•/•\/•/•\	m/s	u_{H_2} / u_{O_2}	سرعت ورودي كانال أند/كاتد
1/1	-	α_a / α_c	ضريب انتقال أند/كاتد
•/۵۵/•/•Y	-	$X_{H_2,ref}$ / $X_{O_2,ref}$	کسر مولی مرجع هیدروژن/کسیژن
$(4/1\Delta \times 1 \circ^{-9})/(7/7 \times 1 \circ^{-9})$	m ² /s	$\mathrm{D_{H_2}}/\mathrm{D_{O_2}}$	ضریب پخش هیدروژن/اکسیژن در کانال
$(\mathbf{T} \times 1 \circ^{-\Delta})$	m^2/s		ضریب پخش بخار آب در کانال
(۲×۱° ^۵)	atm/cm ³		ثابت هنری برای اکسیژن در غشاء
۰/٣۴	W/m.K		ضريب هدايت حرارتي موثر غشاء
0/Y040/0/0799	W/m.K		ضريب هدايت حرارتي هيدروژن /اكسيژن
170	W/m.K		ضريب هدايت حرارتي مؤثر جمع كننده جريان

جدول۲– متغیرهای شبیهسازی پیل سوختی

المانها	نودها	دامنه محاسباتي
۲۱۷۸۰۰	240410	لايه كاتاليست أند
۲۱۷۸۰۰	240410	لايه كاتاليست كاتد
118180	129190	کانال آند
$\forall \forall \forall \mathscr{P} \circ$	4 9.77V	کانال کاتد
101840	179010	جمع کننده جریان آند
140040	107797	جمع كننده جريان كاتد
۲۱۷۸۰۰	240410	لايه پخش گاز آند
۲۱۷۸۰۰	240410	لایه پخش گاز کاتد
۲۱۷۸۰۰	240410	غشاء پليمري
1074900	1727444	کل دامنه محاسباتی

جدول ۳- خصوصیات شبکهبندی حل

مدل حاضر با نتایج تجربی برای کانال ساده در دانسیته جریانهای پایین و متوسط توافق بسیار خوبی دارد؛ ولی در چگالیهای جریان بالا، مدل تک فاز حاضر با نتایج تجربی اختلاف دارد. عمده اختلاف در دانسیته جریانهای بالا که افتهای غلظتی در پیل اهمیت مییابند، مربوط به میزان آب مایع بوده که باعث شناوری لایه پخش گاز شده و انتقال گازهای واکنش گر به لایه کاتالیست را مختل میکند. باید توجه داشت که به علت پیچیدگی زیاد بحث تغییر فاز آب در پیل سوختی، در این مقاله فرض شد که آب تغییر فاز نداده و به صورت بخار باقی می ماند که البته با توجه به شرایط عملکردی پیل فرض معقولی است.

همچنین، به منظور صحه گذاری نتایج با میدان پینی، منحنی قطبش مدل حاضر با منحنی قطبش مدل لیو و همکاران [۲۴] در شرایط مشابه مقایسه شده است. مدل عددی لیو و همکاران میدان جریانی شامل سه مانع مستطیلی شکل (به مانند سه پین پشت سر هم) در کانال کاتد است. مدل ساخته شده به منظور صحه گذاری نیز شامل میدان جریان با سه پین شش گوش بوده که پشت سر هم قرار می گیرند.

لیو و همکاران به شبیهسازی پیل در دو حالـت حضـور آب مایع و عدم حضور آب مایع در پیـل پرداختهانـد و نتایـج را بـا



۳- نتايج

۳-۱- صحه گذاری نتایج

بهمنظور صحهگذاری بر نتایج (بهخصوص مدل الکتروشیمیایی پیل و پدیدههای انتقال در نواحی مختلف پیل)، منحنی قطبش پیل برای کانال ساده با نتایج تجربی تیکنالی [۲۳] که آن هم با کانال ساده است، مقایسه شـده است.

منحنی های قطبش بهدست آمده از شبیه سازی عددی و تجربی در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. نتایج عددی



شکل ۴– الف) شبکهبندی سه بعدی مدل پیل سوختی غشاء پلیمری، ب) شبکهبندی نما از جلو (صفحه xy) ج) شبکهبندی آرایش لانهزنبوری داخل کانال کاتد

یکدیگر مقایسه کردهاند. در این مقاله نیز بهدلیل انجام مدلسازی بهصورت تک فاز، مقایسه نتایج برای وضعیتی که آب مایع در مدل لیو و همکاران درنظر گرفته نشده است، صورت گرفته است. منحنیهای قطبش در شکل (۵- ب) نشان داده شده است. نتایج، توافق بسیار خوبی با هم دارند. علت اختلاف در دانسیته جریانهای بالا است؛ زیرا در این ناحیه عمده افتها ناشی از مقاومت انتقال جرم (افتهای غلظتی) بوده و همچنین باید توجه شود که شکل پینها در دو مدل متفاوت است. نکته قابل توجه، بهبود منحنی عملکرد پیل در دانسیته جریانهای بالا با پینهای شش گوش نسبت به پینهای چهارگوش است.



جریان مسدود شده و حل عددی مدل حاضر [۲۴]

باید توجه داشت، علت تفاوت در منحنی های قطبش حاصل از نتایج مدل حاضر در شکل های (۵- الف) و (۵- ب)، شبیه سازی مدل حاضر به صورت مشابه با هر کدام از مدل های تجربی و عددی (به صورت مجزا با هر کدام از مدل ها) و در شرایط عملکردی مشابه با هر کدام از آنها است.

۳–۲– توزیع سرعت و افت فشار طرح لانهزنبوری در کانال کاتد، به منظور افزایش سرعت سیالدر کانال جریان بدون استفاده از منبع انرژی خارجی است. افزایش سرعت کانال منجر به توزیع بهتر واکنشدهندهها و



شکل ۸– توزیع دو بعدی سرعت در کانال کاتد

شکل (۱۰) مورد بررسی قرار گرفته است که در آن افت فشار در کانال سمت کاتد گزارش شده است. به علت مصرف گاز اکسیژن در طول کانال کاتد و اصطکاک بین اکسیژن و بدنه کانال، فشار گاز کانال کاتد افت میکند. همچنین وجود موانع شش گوش در مسیر جریان نیز باعث افت فشار می شود و در نهایت افت فشار کل، توان اتلافی یا به عبارتی توان پارازیتی سیستم را بالا می برد. شکل نوسانی تغییرات فشار نیز ناشی از وجود همین پینها است. در مجموع بایستی بین متغیر افت فشار و عملکرد پیل سوختی یک تعادل برقرار شود تا بازده کلی سیستم پیل سوختی افزایش یابد.



شکل ۶- توزیع سرعت در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست کاتد

در نتیجه انتقال بهتر آنها به لایـه پخـش گـاز و افـزایش عمـده غلظت اكسيژن در لايه كاتاليست كاتد خواهد شد. شكل (۶) توزيع سرعت را در فصل مشترك لايه پخش گاز / لايه كاتاليست نشان مىدهد. نزديك به ورودى، جريان توسعهيافتـه نیست، در ادامه در نواحی ورودی نزدیک پینها سرعت افزایش مییابد. وجود پین، اباعث میشود در نواحی با پین، سرعت جریان گاز افزایش یابد. شکل (۷) نمایی دقیقتر از قبل، بعد و در حضور یک پین را ارائه میدهد. قبل از پین بهعلت وجود گردابه پشت پین، سرعت کمی کاهش مییابد و بعد از پین نیز بهعلت وجود گردابه سرعت دوباره شروع به کاهش میکند. در شکل (۸) توزیع دوبعدی سرعت در کانال کاتد مشاهده می شود. در نواحی گلوگاهی بین دو پین سرعت افزایش مییابد. اصولاً در این نوع میدانهای جریان سرعت نفوذ اهمیت خاصبی دارد. در شکل (۹) خطوط جریان به صورت دو و سه بعدی در اطراف پینها مشاهده میشود. مطلب قابل توجه در این توزیعها وجود دو گردابه در پشت پینها است که علت آن به وجود ناحیـه کـم فشار پشت مربوط است و باید در طراحیها تا حد ممکن این گردابهها با ایجاد پین و افزایش فشار از بین بروند.

درنظر گرفتن متغیر افت فشار در سمت کاتد عاملی کلیدی در رابطه با بازده کلی سیستم پیل سوختی است. ایـن عامـل در



شکل ۹- خطوط جریان سه و دو بعدی جریان در کانال کاتد



شکل ۱۰ فشارمحلی در طول کانال جریان کاتد



شکل ۱۱– غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست برای ولتاژ ۴۳/۰ ولت



شکل ۱۲– غلظت اکسیژن در داخل کانال، اطراف یکی از پینها برای ولتاژ ۴۳/۰ ولت

۳-۳- توزیع واکنش دهنده ها و دما

توزیع اکسیژن در لایه پخش گاز و لایه کاتالیست کاتد به منظور درک مناسب طراحی کانالهای جریان برای حد توزیع واکنشگرها (به خصوص اکسیژن) متغیری مهم است. در شکل (۱۱) منحنی غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست کاتد برای میدان جریان لانه زنبوری نشان داده شده است. آرایش پینها در کانال کاتد باعث موجی شکل شدن نمودار غلظت اکسیژن در طول کانال می شود. هرچه نقاط قله غلظت اکسیژن پیل سوختی عملکرد بهتری دارد. غلظت اکسیژن قبل از پین با افزایش سرعت در جهت نفوذ به لایه پخش گاز با افزایش نفوذ بیشتر گاز افزایش و سپس بعد از پین به علت تشکیل گردابه و ناحیه کم فشار پشت پین به مقدار اندکی کاهش مییابد؛ ولی در طول کانال به طور متوسط غلظت

در شکل (۱۲) منحنی غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست کاتد در اطراف یکی از پین ها برای ولتاژ پایین نشان داده شده است. غلظت اکسیژن قبل از پین بهعلت نفوذ بیشتر گاز به لایه پخش گاز اندکی افزایش و سپس بهطور ملایم زیر پین کاهش مییابد و ثابت می شود. به عبارت دیگر، قبل از پین بهعلت برخورد جریان گاز به یک مانع که در واقع همان پین است، سرعت عمود بر جریان که بهسمت لایه



شکل ۱۳– توزیع غلظت اکسیژن در ناحیهMEA در طول کانال کاتد برای ولتاژ ۴۳/۰ ولت

پخش گاز کاتد است، افزایش یافته و بنابراین سرعت نفوذ به لایه پخش گاز افزایش مییابد. اما در پشت مانع به علت تشکیل یک ناحیه کم فشار، گردابه و جریان برگشتی تشکیل می شود و با کاهش سرعت عمودی در ناحیه ای کوچک، نفوذ به لایه پخش گاز نیز در این ناحیه کم می شود.

اثر طراحی کانال جریان بر توزیع اکسیژن نیز که در شکل (۱۳) در ناحیه مجموعه الکترود – غشاء^۹ برای مقاطع مختلف غلظت اکسیژن نشان داده شده است، بهوضوح قابل بررسی است. برای این طراحی، توزیع یکنواخت تر اکسیژن در طول کانال کاتد نسبت به کانالهای ساده مشاهده می شود. توزیع یکنواخت تر اکسیژن منجر به توزیع یکنواخت تر واکنشهای الکتروشیمیایی در داخل پیل می شود. همچنین در شکل (۱۴) توزیع غلظت اکسیژن در صفحهای از کانال کاتد نشان داده شده است. برای این طراحی، مشاهده می شود که توزیع اکسیژن در فضای بین پینها به طور یکنواخت صورت گرفته است و اکسیژن به طور مناسب به لایه پخش گاز و سپس به لایه

طبق رابطه (۱۰)، غلظت اکسیژن بر دانسیته جریان تأثیر دارد و توزیع یکنواخت اکسیژن منجر به توزیع یکنواخت دانسیته جریان میشود. شکل (۱۵) توزیع چگالی جریان الکتریکی را در دو نمای طول کانال و سطح مقطع عرضی از پیل نشان میدهد. به تبع توزیع یکنواخت اکسیژن، می توان در این تصویر توزیع نسبتاً یکنواختی را مشاهده نمود. یکنواختی تولید چگالی جریان به شرایط پایداری

روش های عددی در مهندسی، سال ۳۳، شمارهٔ ۲، زمستان ۱۳۹۳



شکل ۱۴– توزیع غلظت اکسیژن در صفحهای در طول کانال کاتد برای ولتاژ ۴۳/۰ ولت



پیل کمک زیادی می کند. شکل (۱۶) منحنی غلظت بخار آب تولیدی در سمت کاتد در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست طول کانال برای ولتاژ پایین نشان داده شده است. غلظت بخار آب به طور پیوسته در طول کانال افزایش مییابد و علت آن به وضوح به دسترسی لایه کاتالیست به غلظت اکسیژن است که باعث افزایش واکنش ها و در نهایت افزایش محصول بخار آب تولیدی می شود.



شکل ۱۶– غلظت بخار آب در فصل مشترک لایه پخش گاز / لایه کاتالیست کاتد برای ولتاژ ۴۳/۰ ولت



شکل ۱۷– توزیع دمایی در صفحهای در طول کانال کاتد برای ولتاژ ۴۳/۰ ولت



شکل ۱۸– منحنی قطبش و چگالی توان

شکل (۱۷) توزیع دما را در صفحهای از کانال کاتـد، بـرای این طراحی نشان میدهد، اختلاف دمای بیشینه و کمینه حـدود ۵ درجه کلوین است. مشخص است که در پشت پین.ها بهدلیـل

اصطکاک بیشتر و تولید گرما، دمای بیشتری نمایان میشود. نباید فراموش کرد که نقاط داغ موضعی تا حدودی عملکرد پیل را کاهش میدهد و باید کنترل شود تا موجب خشکی کامل غشاء و از کار افتادن پیل نشود. هرچه یکنواختی توزیع دمایی بیشتر باشد عملکرد پیل بهتر خواهد شد.

۳–۴– عملکرد پیل سوختی

به منظور بررسی عملکرد این طرح، منحنی قطبش و چگالی توان گزارش شده است. منحنی قطبش اطلاعاتی در مورد تلفات ولتاژ بهعنوان تابعی از چگالی جریان ارائه میکند. بـرای چگالی های جریان پایین تلفات عمدتاً ناشی از تلفات فعالسازی است؛ درحالی که برای مقادیر چگالی جریان بالاتر محدودیت انتقال جرم عامل اصلی اتلاف است. در شکل (۱۸) منحنی قطبش و منحنی چگالی توان نشان داده شده است. در چگالی های جریان بالا، محدودیت های انتقال جرم به لایه كاتاليست تأثير زيادي بر توليد چگالي جريان مي گذارد. پين هاي موجود در کانال سرعت سیال را افزایش میدهد و نیروهای فشاری وارد به گاز برای نفوذ به لایـههـای پخـش گـاز بیشـتر می شود. آن گونه که از منحنی مشخص است حداکثر تولید توان، برای چگالی جریان بالاتر نیست؛ بلکه منحنی نشان می دهد که نقطه حداکثر برای یک مقدار متوسط ولتاژ در حدود ۴۳/۰ ولت است؛ بنابراین لازم نیست ارزیابی ها برای ولتاژ پايين تر صورت گيرد زيرا تنها عملكرد تواني كل پيل اهميت دارد.

۴- نتیجه گیری

عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری به شدت وابسته به طراحی میدان جریان در صفحات قطبی است و ارائه طرحی مناسب و بررسی آن لازم و ضروری است. در این مطالعه، یک مدل عددی سه بعدی، حالت دائم و تک دامنهای به منظور بررسی میدان جریان لانهزنبوری در کانال کاتد مورد استفاده قرار گرفته است. مدل اجازه بررسی جریان، توزیع سرعت، فشار، انتقال و

طراحی مشاهده می شود که توزیع اکسیژن در فضای بین پین ها به طور یکنواخت صورت گرفته است و اکسیژن به طور مناسب به لایه پخش گاز و سپس به لایه کاتالیست می رسد. توزیع یکنواخت تر اکسیژن منجر به توزیع یکنواخت تر واکنش های الکتروشیمیایی و در نتیجه دانسیته جریان در داخل پیل می شود. همچنین، وجود پین ها باعث افزایش دانسیته جریان پیل شده، اما حداکثر تولید توان برای چگالی جریان بالاتر نیست؛ بلکه نقطه حداکثر برای یک مقدار متوسط ولتاژ در حدود ۲۴/۰ ولت اتفاق می افتد؛ بنابراین لازم نیست ارزیابی ها برای ولتاژ پایین تر صورت گیرد، زیرا تنها عملکرد توانی کل پیل اهمیت دارد.

۵– تشکر و قدردانی نویسندگان از کمکها و حمایتهای سازمان انرژیهای نو ایران تشکر و قدردانی میکنند. توزیع اکسیژن، چگالی جریان و عملکرد پیل را میدهد. نتایج نشان میدهند قبل از پین به علت وجود گردابه پشت پین کمی سرعت کاهش مییابد؛ اما با حضور پین سرعت شروع به افزایش میکند و بعد از پین نیز به علت وجود گردابه سرعت دوباره شروع به کاهش میکند. وجود گردابههای پشت پینها بهعلت وجود ناحیه کم فشار پشت پینها باید در طراحیها مورد توجه قرار گیرد و تا حد ممکن این گردابهها با ایجاد پین و افزایش فشار از بین بروند. همچنین آرایش پینها در کانال کاتد باعث موجی شکل شدن نمودار غلظت اکسیژن در طول کانال می شود وبا نزدیک شدن نقاط قله به هم در نمودار غلظت بهتری دارد. غلظت اکسیژن پیل سوختی عملکرد لایه پخش گاز افزایش مییابد و سپس بعد از پین به علت تشکیل گردابه و ناحیه کم فشار پشت پین به مقدار اندکی

واژەنامە

مراجع

- 1. Carnot cycle
- 2. Stoichiometry
- 3. Darcy
- 4. Butler-Volmer equation
- 5. Electroosmotic Drag
- 6. Nernst
- 7. module

8. BCGSTAB9. Membarne Electrode Assembly (MEA)

- Corbo, P., Migliardini, G., and Veneri, O., "Experimental Analysis of a 20 k We PEM Fuel Cell System in Dynamic Conditions Representative of Automotive Applications", *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, pp. 2477-2491, 2008.
- Ramirez, D., Beites, L. F., Blazquez, F., and Ballesteros, J. C., "Distributed Generation System with PEM Fuel Cell for Electrical Power Quality Improvement", *Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 4433–4444, 2008.
- 3. Wang, Y., "Fundamental Models for Fuel Cell Engineering", *Chemical Reviews*, Vol. 4, pp. 4727– 4766, 2004.
- 4. Yuan, W., Tang, Y., Pan, M., Li, Z., and Tang, B., "Model Prediction of Effects of Operating Parameters on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance", *Journal of Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 656–666, 2010.
- 5. Sun, L., Ooshuizen, P. H., and Mc Auley, K. B.,"A

Numerical Study of Channel-to-Channel Flow Cross-Over Through the Gas Diffusion Layer in a PEM-Fuel-Cell Flow System using a Serpentine Channel with a Trapezoidal Cross-Sectionalshape", *International Journal of Thermal Science*, Vol. 45, pp. 1021-1026, 2006.

- Jeon, D. H., Greenway, S., Shimpalee, S., and Van Zee, J. W., "The Effect of Serpentine Flow-Field Designs on PEM Fuel Cell Performance", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 1052-1066, 2008.
- Zhang, G., Guo, L., Ma, B., and Liu, H., "Comparison of Current Distributions in Proton Exchange Membrane Fuel Cells with Interdigitated and Serpentine Flow Fields", *Journal of Power Sources*, Vol. 188, pp. 213-219, 2009.
- 8. Hontanon, E., Escudero, M. J., Bautista, C., Garcia-Ybarra, P. L., and Daza, L., "Optimisation of Flowfield in polymer electrolyte membrane fuel cellsusing

٨۵

Computational Fluid Dynamics techniques", *Journal* of Power Sources, Vol. 86, 363-368, 2000.

- Lobato, J., Canizares, P., Rodrigo, M. A., Pinar, F. J., Mena, E., and Ubeda, D., "Three-Dimensional Model of a 50cm² High Temperature PEM Fuel Cell, Study of the Flow Channel Geometry Influence", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35(11), pp. 5510-5520, 2010.
- Kumar, A., and Reddy, R. G., "Modeling of Polymer Electrolyte membrane Fuel Cell with Metal Foam in the Flow-Field of The bipolar/end Plates", *Journal of Power Sources*, Vol. 114(1), pp. 54-62, 2003.
- Tang, Y., Yuan, W., Pan, M., and Wan, S., "Feasibility Study of Porous copper Fiber Sintered Felt: A Novel Porous Flow Field in Proton exchange Membrane Fuel Cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35(18), 9661-9677, 2010.
- 12. Spernjak, D., Prasad, A. K., and Advani, S. G., "In Situ Comparison of Water Content and Dynamics in Parallel, Single serpentine and Interdigitated Flow Fields of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 195, pp. 3553-3568, 2010.
- Kumar, A., and Reddy, G., "Effect of Gas Flow-Field Design in the Bipolar/End Plates on the Steady and Transient State Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 155, pp. 264-271, 2006.
- 14. Kuo, J. K., and Chen, C. K., "The Effects of Buoyancy on the Performance of a PEM Fuel Cell with a Wave-Like Gas Flow Channel Design by Numerical Investigation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 4166–4179, 2007.
- Roshandel, R., Arbabi, F., and Karimi Moghaddam, G., "Simulation of an Innovative Fow-Feld Design Based on a Bio Inspired Pattern for PEM Fuel Cells", *Renewable Energy*, Vol. 41, pp. 86-95, 2012.
- 16. Khazaee, I., Ghazikhani, M., and Nasr Esfahani, M.,

"Effect of Gas Diffusion Layer and Membrane Properties in an Annular Proton Exchange Membrane Fuel Fell", *Applied Surface Science*, Vol. 258, pp. 2141-2148, 2012.

- 17. Yang, Y. T., Tsai, K. T., and Chen, C. K., "The Effects of the PEM Fuel Cell Performance with the Waved Flow Channels", *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 2013, pp. 1-14, 2013.
- Abdou, M., Andrin, P., Mukesh, K., and Bisaria, "Flow Field Designs", Us Patent Application, pp. 429, 2002.
- Afshari, E., and Jazayeri, S. A., "Analyses of Heat and Water Transport Interactions in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell", *Journal of Power Sources*, Vol. 194, pp. 423–432, 2009.
- 20. Afshari, E., and Jazayeri, S. A., "Effects of the Cell Thermal Behavior and Water Phase Change on a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, pp. 655–662, 2010.
- 21. Meredith, R. E. and Tobias, C. W., "Conduction in Heterogeneous Systems", Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering, Vol. 2, pp. 15-47, 1962
- 22. Motupally, S., Becker, A. J., and Weidner, J. W., "Diffusion of Water in Nafion 115 Membranes", *Journal of the Electrochmical Society*, Vol. 147, pp. 3171–3177, 2000.
- Ticianelli, E. A., Derouin, C. R., Redondo, A., and Srinivasan, S., "Methods to Advance Technology of Proton Exchange Membrane Fuel Cells", *Journal of the Electro Chmical Society*, Vol. 135, pp. 2209– 2214, 1988.
- 24. Liu, H. C, Yan, W. M., Soong, C. Y., and Chen, F., "Effects of Baffle-Blocked Flow Channel on Reactant Transport and Cell Performance of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell", *Journal of Power Sources*, Vol. 142, pp. 125–133, 2005.