بررسی اثر غلظت محلول متانول و عمق کانال بر روی بازده پیل سوختی متانولی

ابراهیم علیزاده[۱]، کورش صدیقی[۲]، موسی فرهادی[۳] و محسن شاکری[۴]
mfarhadi@nit.ac.ir

دریافت مقاله: ۸۹/۰۴/۱۰ پذیرش مقاله: ۸۹/۰۶/۲۱

چکیده

تاثیر غلظت محلول متانول و عمق کانال صفحات گرافیتی بر عملکرد تک سل پیل سوختی متانولی به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. غشای مورد استفاده از نوع نفیون ۱۱۷و ابعاد تک سل **۱۰cm** × ۱۰ است. از محلول متانول با غلظت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۳ مولار استفاده شده است. عمق کانال به ترتیب ۱، ۱/۵ و ۲ میلی متر انتخاب شده و برای بررسی تاثیر عمق کانال، همزمان عمق کانال آند و کاتد تغییر کرده است. غلظت بهینه متانول برای تک سل فوق حدود ۰/۵ الی ۱/۵ مولار می‌باشد. براساس آزمایشات مختلف هرچه عمق کانال کمتر باشد انتقال جرم بهتر صورت گرفته و خارج کردن دی اکسید کربن راحت تر صورت می‌گیرد. نتایج حاصل عمق بهینه کانال برای عملکرد تک سل فوق را ۱میلی‌متر نشان می‌دهد.

کلید واژه:

بازده پیل‌سوختی متانولی - غلظت متانول - عمق کانال – انتقال جرم

[۱]-دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی بابل، گروه پژوهشی فناوری پیل‌سوختی، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، پژوهشکده‌ی علوم و فناوری دفاعی شمال
[۲]- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، ksedighi@nit.ac.ir
[۳]- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، mfarhadi@nit.ac.ir
۴- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، shakeri@nit.ac.ir

۱- مقدمه

پیل سوختی دستگاهی است الکتروشیمیایی که انرژی حاصل از یک واکنش شیمیایی را به انرژی الکتریکی مفید تبدیل می‌کند. تبدیل انرژی در پیل سوختی تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی است. بدنه اصلی پیل سوختی از الکترولیت، الکترود آند و الکترود کاتد تشکیل شده است. پیل سوختی متانولی گونه‌ای از پیل سوختی است که با استفاده از غشا تبادلگر پروتون کار می‌کند. در یک سلول پیل سوختی متانولی، متانول در آند اکسید شده و اکسیژن در کاتد احیا می‌شود. دی اکسید کربن و آب طبق نیمه واکنش‌های الکتروشیمیایی زیر تولید می‌شوند:

آند: $$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^- \quad (۱)$$

کاتد: $$6H^+ + 6e^- + 3/2O_2 \rightarrow 3H_2O \quad (۲)$$

از مجموع نیمه واکنش‌های بالا واکنش کلی سل بدست می‌آید، که در رابطه‌ی (۳) نشان داده شده است:

$$CH_3OH + 3/2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \quad (۳)$$

سورامپدی و همکاران[۱] تاثیر دما و غلظت محلول متانول را بر روی پیل سوختی متانول مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از مطالعات آنها نشان داده، زمانیکه دانسیته جریان زیاد باشد غلظت بهینه متانول بین۰/۵ تا ۲مولار خواهد بود. جیابین و هانگتن [۲] اثر پارامترهای کارکردی را بر روی پیل سوختی متانولی مورد بررسی قرار داده و دریافته‌اند که بهترین غلظت محلول متانول بین ۱ تا ۲ مولار خواهد بود و با افزایش غلظت، بازده سل کاهش می‌یابد. سانگ و همکاران [۳] اثر عبور موازی متانول را بر روی بازده تک سل پیل سوختی متانولی بررسی نموده‌اند. نتایج مطالعات آنها نشان داده است که با افزایش دما و غلظت محلول متانول، پدیده عبور متانول از طریق غشای نفیونی افزایش می‌یابد. همچنین آنها نشان داده است که افزایش غلظت متانول، بر روی ولتاژ مدار باز و عملکرد سل تاثیر منفی می‌گذارد. عبور موازی متانول از آند به کاتد از طریق غشا، یکی از مشکلات مهم در تجاری ساختن پیل سوختی متانولی است. زیرا این پدیده نه تنها منجر به اتلاف سوخت می‌شود بلکه منجر به کاهش بازده الکترودکاتد نیز می‌گردد [۴]. اکسیژن می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای در میزان متانول مصرف نشده را که وارد کاتد می‌گردد ایفا نماید. اگر به میزان کافی اکسیژن به کاتد برسد متانول نفوذی به کاتد سریعتر اکسید شده و مشکلات مربوط به عبور موازی در غلظت‌های بالای متانول کاهش می‌یابد [۲]. یکی از راه‌های بهبود بازده تک سل، بهینه کردن ابعاد کانال صفحات گرافیتی (دوقطبی) است، که این مساله بر روی انتقال جرم تاثیر مثبتی خواهد داشت. بنابراین لازم است که صفحات دوقطبی نسبت به نوع الگوی جریان، جنس صفحه، اندازه نسبی و سطح مقطع کانال‌ها و ریب‌ها بهینه باشند [۵]. وانگ و همکاران [۶] بر روی ابعاد کانال تحقیقاتی انجام داده‌اند. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که کانال‌ها با عمق کمتر تاثیر مثبتی بر روی عملکرد سل دارند. در کانال‌ها با عمق کم سرعت خطی متانول افزایش یافته، در نتیجه انتقال جرم بهتر صورت می‌گیرد. همچنین آنها نشان داده‌اند که اگر عرض کانال از ۵۸۰ میکرو متر کمتر شود بازده کاهش می‌یابد. افزایش زمان ماند دی اکسید کربن در داخل کانال‌ها موجب مسدود شدن و کاهش سطح فعال غشا شده و متعاقباً عملکرد سل افت می‌نماید.

یانگ و زائو [۷]، وانگ و همکاران [۸] و یانگ و همکاران [۹] بر روی نوع آرایش کانال و عمق کانال آند تحقیقات آزمایشگاهی را انجام داده‌اند. نتایج تحقیقات آنها نشان داده است که الگوی جریان مارپیچ[1] نسبت به الگوی جریان موازی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. علت این امر در انتقال موثر دی اکسید کربن در الگوی مارپیچ است. همچنین آنها بیان نموده‌اند که عمق کانال و عملکرد سل به هم وابسته هستند. نتایج نشان داده که بازده بالاتر در کانال‌هایی با عمق کمتر اتفاق می‌افتد که این موضوع به علت انتقال جرم موثر، بین لایه نفوذ گاز و میدان جریان می‌باشد. با توجه به تحقیقات انجام شده عمق کانال باید بهینه باشد، در غیر این صورت بر روی انتقال دی اکسید کربن تاثیر منفی می‌گذارد. علاوه‌بر عمق کانال آند، عمق کانال کاتد نیز بر روی بازده سل تاثیر می‌گذارد. به منظور کاهش حجم استک ضروری است تا عمق کانال کاتد را در حد نیاز کاهش داد. کانال‌هایی با عمق کم موجب افت فشار بیشتر در داخل سل می‌شوند [۵].

مطالعات نیم سل نشان داده است که سرعت اکسیداسیون متانول با غلظت متانول افزایش می‌یابد. گرچه نسبت استوکیو متری متانول به آب در غلظت خیلی بالا (تقریباً ۱۲ مولار) حاصل می‌شود ولی عملاً ماکزیمم غلظت مجاز در پیل‌های سوختی متانولی به علت عبور موازی متانول تقریباً محدود به ۲-۱ مولار می‌باشد [۱]. داده‌های جریان استفاده از یک غلظت ۰/۵ مولار متانول را نیز چندان دور از ذهن ندانسته و نتایج نشان می‌دهد کارآیی بهینه و مصرف سوخت در این غلظت بوده و سرعت عبور موازی متانول به حداقل خود می‌رسد. غلظت متانول کمتر از ۰/۵ مولار منجر به کاهش ویژه در عملکرد می‌شود. اگر عبور متانول یک عامل منفی در ولتاژ سل باشد انتظار می‌رود که غلظت بالای متانول در ورودی آند، ولتاژ سل را

1 -Serpentine

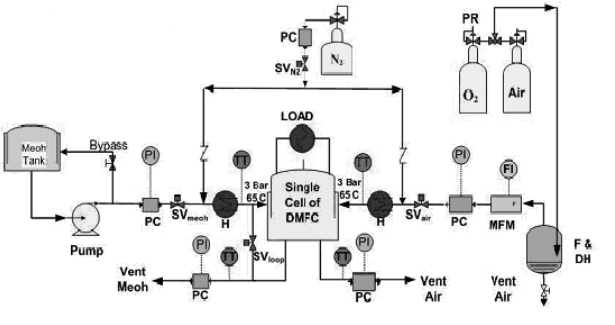
کاهش دهد. این مطلب ناشی از سرعت‌های بالای انتقال از میان غشاء است. همچنین با افزایش غلظت متانول ولتاژ مدار باز کاهش می‌یابد [۱۰]. همچنین مشاهده شده است که با افزایش غلظت محلول متانول، افت منحنی ولتاژ آغاز می‌شود. این کاهش کارآیی سل در غلظت‌های بالای متانول به پدیده عبور عرضی متانول از غشاء ربط داده می‌شود. با افزایش غلظت، به علت پدیده عبور عرضی متانول، کاهش عملکردی سل مشاهده می‌گردد [۱ و ۱۱-۱۴].

نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در غلظت‌های بالای متانول، بازده الکترود کاتد بطور چشمگیری کاهش یافته است [۱۵]. ولیکن در چگالی جریان بالا، افت کارآیی سل در غلظت‌های پایین متانول مشاهده شده است که احتمالاً ناشی از اثرات پلاریزاسیون غلظتی می‌باشد، درنتیجه این نکته مهم می‌باشد که غلظت بهینه تحت شرایط کاری پیل سوختی بدست آید. با افزایش غلظت متانول، عبور متانول از طریق غشای نفیونی افزایش یافته و بر روی ولتاژ مدار باز و بازده، تاثیر منفی می‌گذارد [۳].

۲- بخش تجربی

پیل‌های سوختی اصولا برای کارکرد بهینه و یا حتی عملکرد مناسب نیاز به شرایط ثابت دارند. اما برای تست یک پیل سوختی باید انواع حالات و شرایط مختلف ورودی و خروجی و یا اعمال بار مختلف را بر روی پیل بررسی نمود تا با مطالعه کلیه پارامترها و شرایط کاری بتوان نقطه کارکرد بهینه پیل راپیدا نمود. جهت این امر از دستگاه تست پیل سوختی متانولی استفاده می‌شود.

دستگاه تست طراحی شده از سه قسمت عمده تشکیل شده است که هر قسمت یک وظیفه را انجام می‌دهد (شکل (۱)). قسمت اول وظیفه هدایت وکنترل تغذیه در آند را به عهده دارد. قسمت دوم، وظیفه تامین و کنترل تغذیه در کاتد را فراهم می‌سازد و قسمت سوم وظیفه خشک کردن پیل سوختی، بعد از آزمایش را دارد. کنترل همه قسمت‌ها به صورت نیمه خودکار می‌باشد.



شکل(۱): شماتیک عملکرد دستگاه تست پیل سوختی متانولی

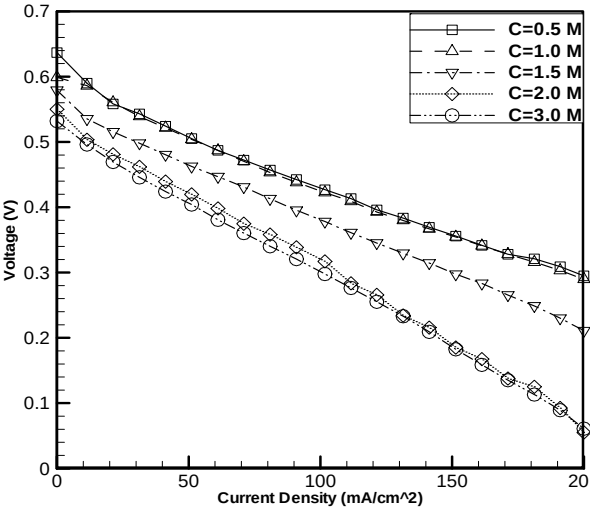
سطح فعال غشای مورد استفاده در این آزمایش برابر $۱۰\times۱۰cm^۲$است. میزان کاتالسیت بکاررفته در قسمت آند برابر ۴ میلی‌گرم بر سانتیمتر مربع پلاتین-روتنیم و در قسمت کاتد به میزان ۴ میلی‌گرم بر سانتیمتر مربع پلاتین می‌باشد. برای بررسی اثر غلظت بر روی بازده پیل سوختی متانولی، از محلول متانول با غلظت‌های ۰/۵، ۱، ۲،۱/۵ و ۳مولار استفاده شده است. در این حالت دما ثابت و برابر ۶۵ درجه سانتی‌گراد، دبی اکسیژن برابر ۲ لیتر بردقیقه، دبی محلول متانول برابر ۱۰میلی‌لیتر بر دقیقه و فشار کاتدی نیز ۰/۵بار بوده است. برای بررسی اثر عمق کانال، از صفحات گرافیتی با عمق کانال ۱، ۵ /۱ و ۲ میلی‌متر استفاده شده است (شکل (۲)). در آزمایش فوق عمق کانال آند و کاتد همزمان تغییر کرده‌اند. نتایج مربوط به آزمایشات فوق توسط نمودارهای پلاریزاسیون نشان داده شده‌اند.

شکل(۲): دستگاه تست پیل سوختی متانولی مورد استفاده

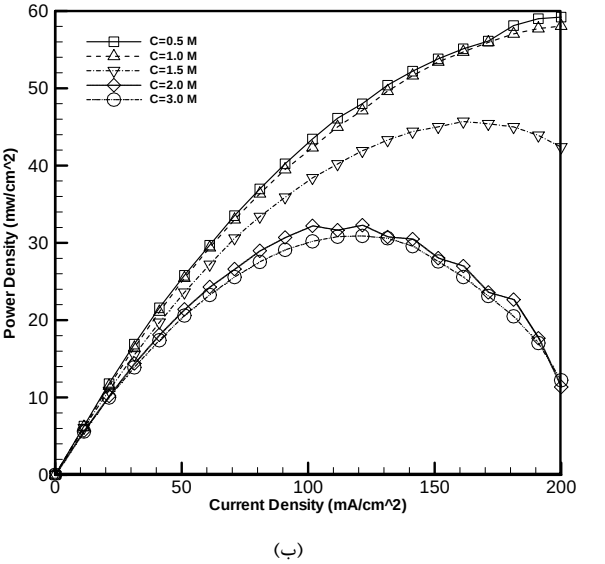
با استفاده از سیستم جمع‌کننده آطلاعات، عمل جمع آوری در ابتدا ۵۰ بار در ثانیه صورت گرفته و سپس با استفاده از متوسط گیری نمونه‌ها، ۲ عدد در هر ثانیه در سیستم ذخیره می‌گردد. پس از تکمیل آزمایش، اطلاعات مورد ارزیابی و ویرایش قرار می‌گیرد. بازه تغییرات دما ۱ ± و فشار ۰/۰۵ ± بار می‌باشد. تغییرات دبی آند در حدود ۵ ± میلی‌لیتر و سنسسور اندازه‌گیر دما، ترموکوپل نوع k با دقت ۰/۵± درجه سانتی‌گراد می‌باشد. دما در ورودی با استفاده از یک سیستم کنترلی و هیتر الکتریکی ثابت نگه داشته می‌گردد. فشار در این تست به‌صورت دستی با استفاده از مقادیر سنسور فشار تنظیم شده است. جهت بدست آوردن منحنی عملکردی، از یک دستگاه مصرف کننده با قابلیت تغییر بار استفاده شده و و کلیه اطلاعات مربوط به جریان و ولتاژ پیل در نرم‌افزار کامپیوتری تهیه شده، ذخیره می‌گردد.

۳- نتایج آزمایش

مشکل اصلی در مورد پیل‌های سوختی متانولی، عبور متانول از غشای پلیمری است که این مساله در مورد غلظت‌های بالای متانول با شدت بیشتری دیده می‌شود. غلظت تغذیه‌ای متانول در کارکرد پیل سوختی متانولی یک نکته مهم می‌باشد. برای بررسی اثر غلظت، دما ثابت و برابر ۶۵ درجه سانتی‌گراد، دبی اکسیژن برابر ۲ لیتر بردقیقه، دبی محلول متانول برابر ۱۰میلی‌لیتر بر دقیقه و فشار کاتدی نیز ۰/۵بار بوده است. نتایج مربوط به آزمایشات فوق توسط نمودارهای پلاریزاسیون نشان داده شده اند (شکل ۳, ۴ و ۵).

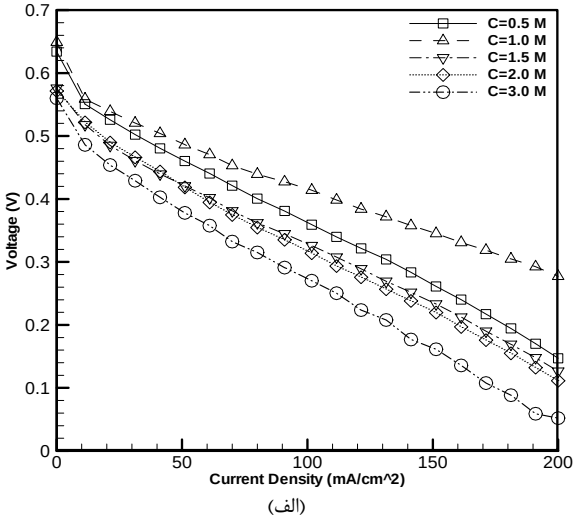


(الف)

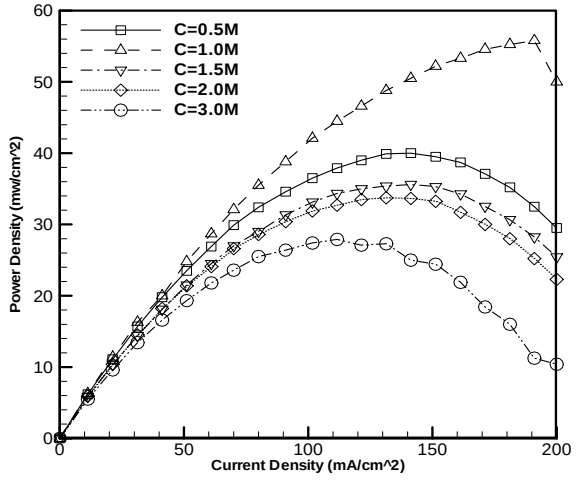


(ب)

شکل(۳): (الف) نمودار تغییرات ولتاژ-دانسیته جریان (ب) نمودار تغییرات دانسیته توان - دانسیته جریان (عمق کانال ۱میلی‌متر)

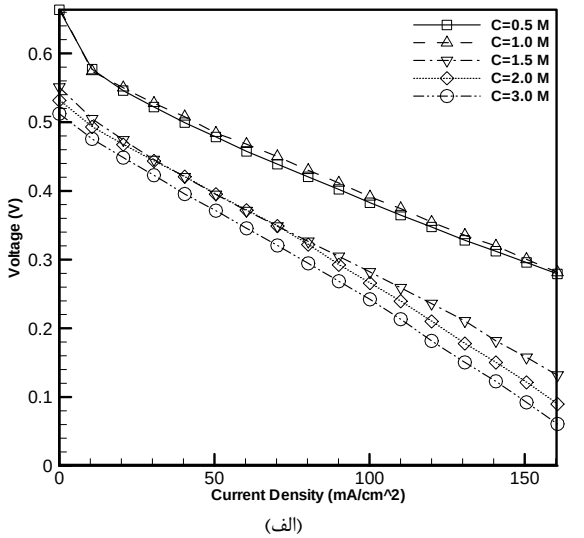


(الف)

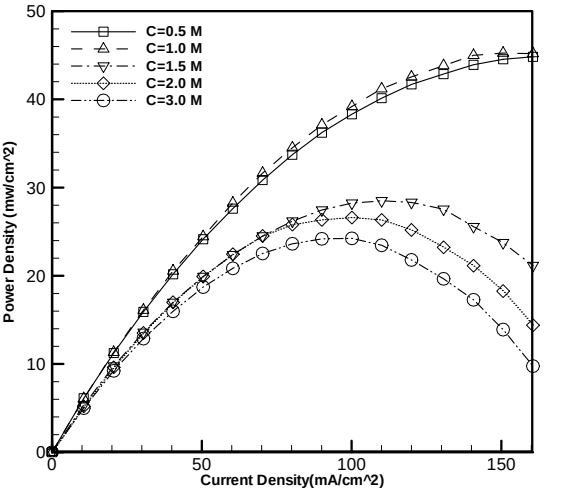


(ب)

شکل(۴): (الف) نمودار تغییرات ولتاژ-دانسیته جریان (ب) نمودار تغییرات دانسیته توان-دانسیته جریان (عمق کانال ۱/۵میلی‌متر)



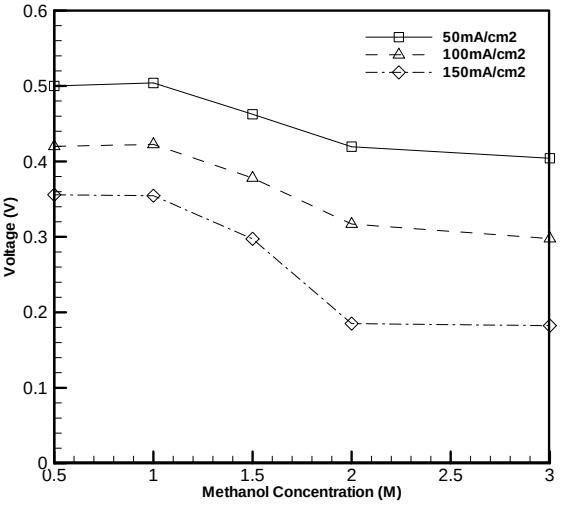
(الف)



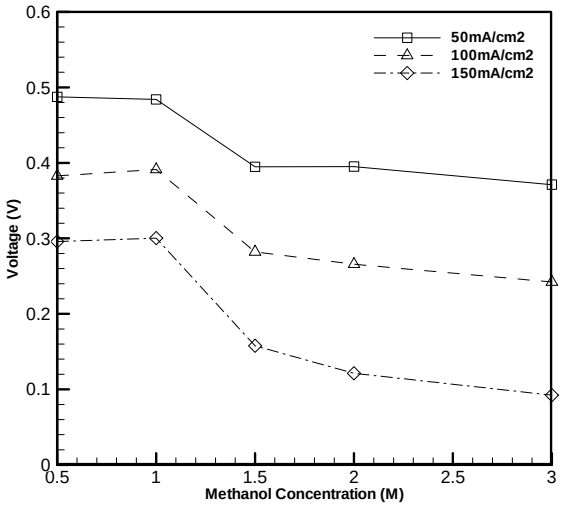
(ب)

شکل(۵):: (الف) نمودار تغییرات ولتاژ-دانسیته جریان (ب) نمودار تغییرات دانسیته توان-دانسیته جریان (عمق کانال۲میلی‌متر)

افزایش غلظت متانول در کانال سبب افزایش اثر عبور عرضی متانول از غشاء شده و این امر افت شدید جریان را به همرا خواهد داشت. نمودار ۶ و ۷ تغییرات ولتاژ سل را در دانسیته جریان‌های معین برای عمق کانال ۱ و ۲ میلی‌متر نشان می‌دهند. با توجه به نتایج بدست آمده در یک دانسیته جریان معین، با افزایش غلظت از ۰/۵ تا ۱ مولار، ولتاژ سل افزایش یافته و بعد ازآن با افزایش غلظت محلول متانول به علت پدیده عبور موازی با کاهش چشمگیری روبرو است. بطوریکه در غلظت ۳ مولار ولتاژ سل به کمترین مقدار خود رسیده است. از این رو نتایج حاصل نشان از محدوده ۰/۵ تا ۱ مولار به عنوان غلظت مناسب برای سل مورد بررسی می‌دهد.

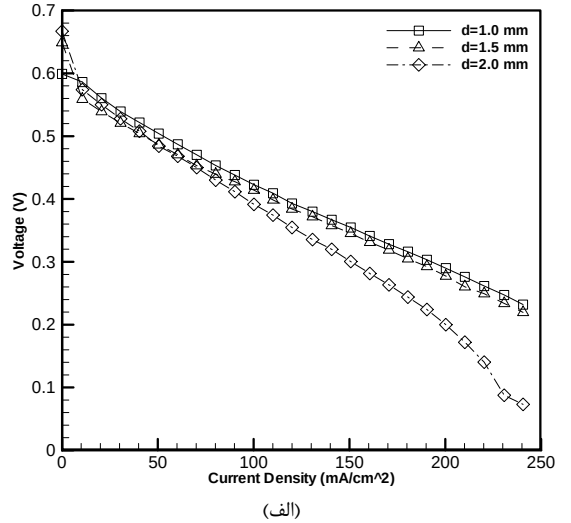


شکل(۶): تغییرات ولتاژ-غلظت متانول برای کانال با عمق۱میلی‌متر

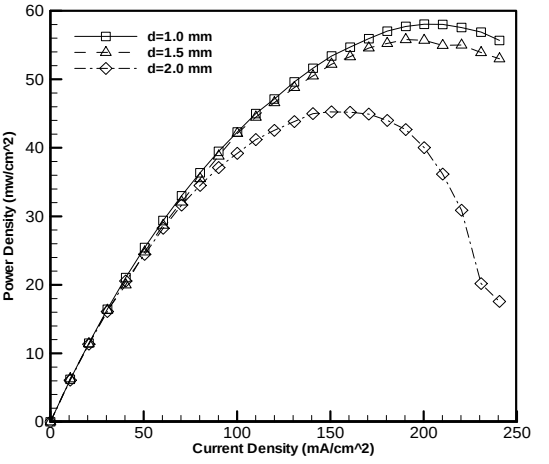


شکل(۷): تغییرات ولتاژ- غلظت متانول برای کانال با عمق۲میلی‌متر

یکی از پارامترهای مهمی که بر روی بازده سل تاثیر می‌گذارد عمق کانال صفحات گرافیتی می‌باشد. تغییر در سطح مقطع کانال منجر به تغییر در روند انتقال جرم و سرعت سیال شده و از این طریق بر روی عملکرد سل تاثیر می‌گذارد. همچنین کانال‌ها با عمق کمتر، در دور کردن دی اکسید کربن و نفوذ متانول به سطح کاتالیست موثر هستند. ذکر این نکته ضروری است که دفع موثر دی اکسید کربن سطح موثر کافی را برای اکسیداسیون متانول فراهم می‌سازد. نتایج این بررسی نیز این واقعیت را تایید نمود. زمانیکه عمق کانال کاهش یابد فشار داخلی و سرعت خطی افزایش می‌یابد. این بدان معنی است که پدیده انتقال جرم در کانال‌ها با عمق کمتر راحت‌تر رخ می‌دهد. برای بررسی اثر عمق کانال، از کانال‌ها با ابعاد ۰/۵ و ۱/۵ و ۲ میلی‌متر استفاده شده است. نتایج آزمایشات فوق در شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.

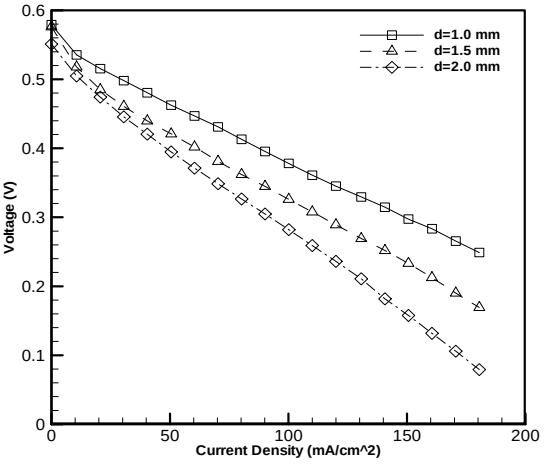


(الف)

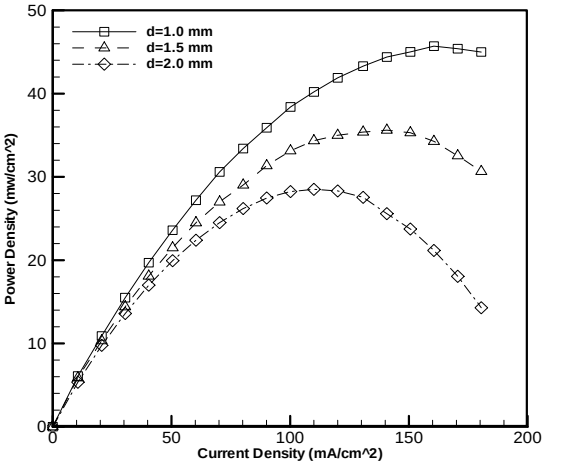


(ب)

شکل(۸): (الف) نمودار تغییرات دانسیته توان-دانسیته جریان (ب) نمودار تغییرات ولتاژ- دانسیته جریان (غلظت محلول متانول۱مولار)



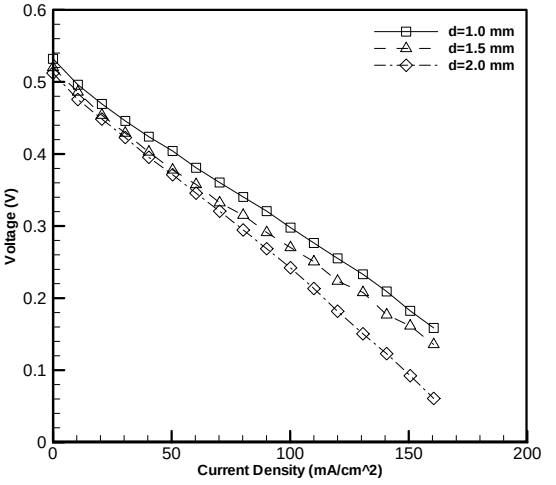
(الف)



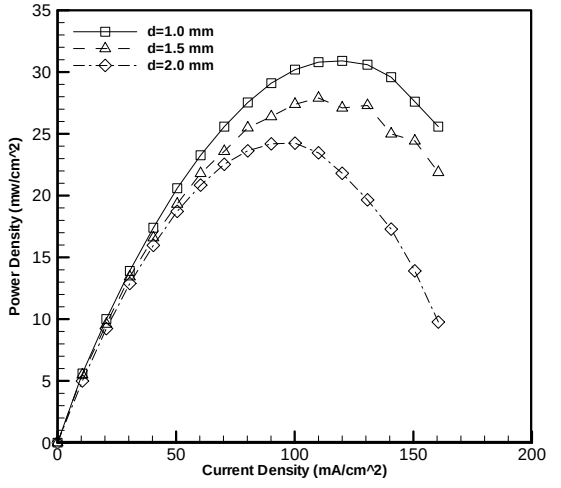
(ب)

شکل(۹): (الف) نمودار تغییرات دانسیته توان-دانسیته جریان (ب) نمودار تغییرات ولتاژ-دانسیته جریان (غلظت محلول متانول۱/۵مولار)

با توجه به نمودارهای فوق در غلظت‌های مختلف از محلول متانول، کانال با عمق ۱ میلی‌متر بازده بهتری نسبت به بقیه کانال‌ها از خود نشان می‌دهد. عوامل موثر در کاهش عملکرد پیل در عمق بیشتر از یک شامل شکل‌گیری حباب‌های بزرگ دی اکسید کربن و پوشانیده شدن سطح کاتالیست که موجب کاهش واکنش می‌شود. از سوی دیگر کاهش فشار ناشی از افزایش عمق، نفوذ متانول به غشا را کاهش داده و میزان تولید الکترون (جریان پیل) روند نزولی به خود خواهد گرفت.



(الف)

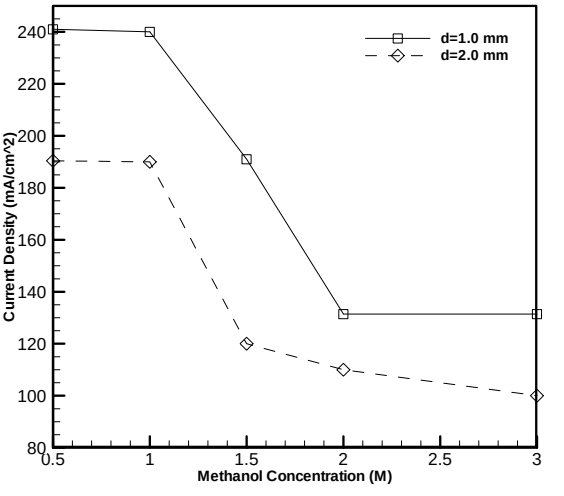


(ب)

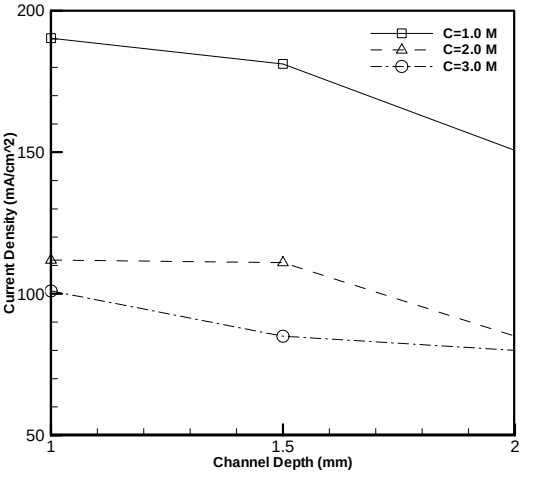
شکل(۱۰): (الف) نمودار تغییرات دانسیته توان-دانسیته جریان (ب) نمودار تغییرات ولتاژ-دانسیته جریان (غلظت محلول متانول۳مولار)

با توجه به شکل (۱۱)، با افزایش غلظت محلول متانول در هردو عمق ۱ و ۲ میلی‌متر دانسیته جریان بطور چشمگیری کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش غلظت متانول پدیده عبور عرضی متانول موجب

کاهش دانسیته جریان می‌شود. کاهش دانسیته جریان در عمق کانال ۲ میلی‌متر مشهودتر است. زیرا با افزایش عمق کانال گرافیت سطح موثر غشا به علت تشکیل حباب‌های دی اکسید کربن مسدود شده و اکسیداسیون متانول بطور موثر صورت نمی‌پذیرد. کاهش اکسیداسیون موجب کاهش الکترون‌های آزاد و متعاقباً کاهش جریان خواهد شد.

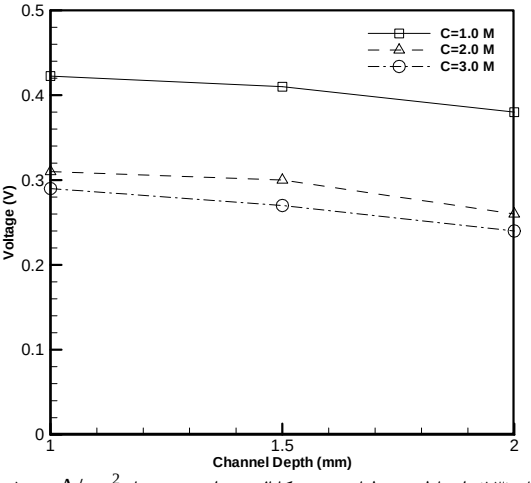


شکل (۱۱): ارتباط بین دانسیته جریان و غلظت متانول در دو عمق مختلف در ولتاژ ثابت ۲۳/ ۰ولت



شکل (۱۲): ارتباط بین دانسیته جریان و عمق کانال در ولتاژ ۰/۳ ولت

شکل (۱۲) اثر عمق کانال و غلظت محلول متانول را بر روی دانسیته جریان پیل سوختی متانولی در ولتاژ معین ۰/۳ ولت نشان می‌دهد. به عنوان مثال در غلظت ۱مولار متانول با افزایش عمق کانال دانسیته جریان کاهش یافته است. زیرا هرچه عمق کانال افزایش یابد انتقال جرم به سختی صورت می‌گیرد در نتیجه بازده سل کاهش می‌یابد. از طرفی در یک عمق معین با افزایش غلظت محلول متانول، به علت پدیده عبور موازی که یک عامل منفی در ولتاژ سل می‌باشد دانسیته جریان کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده غلظت بهینه متانول حدود ۱ مولار می‌باشد. شکل (۱۳) نیز اثر عمق کانال و غلظت محلول متانول را بر روی ولتاژ پیل سوختی متانولی در دانسیته جریان $۱۰۰ mA/cm^2$ نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): ارتباط بین ولتاژ و عمق کانال در دانسیته جریان $۵۰ mA/cm^2$

۴- نتیجه‌گیری

- غلظت تغذیه‌ای متانول در کارکرد پیل سوختی متانولی یک نکته مهم می‌باشد. مطالعات نیم سل نشان داده است سرعت اکسیداسیون متانول با غلظت متانول افزایش می‌یابد. ماکزیمم غلظت مجاز در پیل های سوختی متانولی به سبب عبور موازی متانول تقریباً محدود به ۲-۱ مولار می‌باشد.
- عبور موازی متانول از آند به کاتد از طریق غشای نفیون ۱۱۷ با افزایش غلظت محلول متانول افزایش می‌یابد. عبور موازی متانول بر روی ولتاژ مدارباز و بازده سل تاثیر منفی گذاشته و موجب کاهش بازده می‌شود.
- یکی از پارامترهای مهمی که بر روی بازده سل تاثیر می‌گذارد عمق کانال صفحات گرافیتی می‌باشند زیرا تغییر در سطح مقطع کانال، منجر به تغییر در روند انتقال جرم و سرعت سیال شده و از این طریق بر روی عملکرد سل تاثیر می‌گذارد.
- کانال‌ها با عمق کمتر، در دور کردن دی اکسید کربن و نفوذ متانول به سطح کاتالیست موثر هستند. دفع موثر دی اکسید کربن سطح موثر کافی را برای اکسیداسیون متانول فراهم می‌سازد.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از مرکز پژوهشی پیل سوختی دانشگاه صنعتی بابل به واسطه همکاری صمیمانه در انجام این تحقیق قدردانی و تشکر می‌نماید.

۶- مراجع

[1] Surampudi, S., Narayanan, S. R., Vamos, E., Frank, H., Halpert, G., LaConti, A., Kosek, J., SuryaPrakash, G. K., and Olah, G. A. "Advances in Direct Oxidation Methanol Fuel Cells", J. Power Sources, No. 47, 1994, pp. 377-385.

[2] Jiabin, G., Hongtan, L., "Experimental Studies of a Direct Methanol Fuel Cell", J. Power Sources, No. 142, 2005, pp. 56–69.

[3] Song, S. Q., Zhou,W. J., Li, W. Z., Sun, G., Xin, Q., Kontou, S., Tsiakaras, P., "Direct Methanol Fuel Cells:Methanol Crossover and Its Influence on Single DMFC Performance", Ionics, No. 10, 2004.

[4] Du, C. Y., Zhao, T. S., Yang, W. W., "Effect of Methanol Crossover on the Cathode Behavior of a DMFC: A half-cell Investigation", Electrochimica Acta, No. 52, 2007, pp. 5266–5271.

[5] Hwanga, S. Y., Joha, H. I., Scibioha, M. A., Leea, S. Y., Kima, S. K., Leeb, T. G., Haa, H. Y., "Impact of Cathode Channel Depth on Performance of Direct Methanol Fuel Cells", J. Power Sources, No. 183, 2008, pp. 226–231.

[6] Wong, C. W., Zhao, T. S., Ye, Q., Liu, J. G., "Transient Capillary Blocking in the Flow Field of a Micro-Dmfc and Its Effect on Cell Performance", J. Electrochem. Soc., No. 152, 2005, pp. A1600- A1605.

[7] Yang, H., Zhao, T. S., "Effect of Anode Flow Field Design on The Performance of Liquid Feed Direct Methanol Fuel Cells", Electrochimca Acta, No. 50, 2005, pp. 3243–3252.

[8] Wong, C. W., Zhao, T. S., Ye, Q., Liu, J. G., "Experimental Investigations of The Anode Flow Field of a Micro Direct Methanol Fuel Cell", J. Power Sources, No. 155, 2006, pp. 291–296.

[9] Yang, H., Zhao, T. S., Ye, Q., "Addition of Non-Reacting Gases to the Anode Flow Field of Dmfcs Leading to Improved Performance", Electrochem. Commun., No. 6, 2004, pp. 1098–1103.

[10] Jung, D. H., Lee, C. H., Kim, C. S., Shin, D. R., "Performance of a Direct Methanol Polymer Electrolyte Fuel Cell" J. Power sources, 71, 1998, pp. 169- 173.

[11] Narayanan, S. R., Kindler, A., Nakamura, B. J., Chun, W., Frank, H., Smart, M., Veldez, T. I., Surampudi, S., Halpert, G., Annu. Battery Conf. Appl.Adv., No. 11, 1996, pp.113.

[12] Cruickshank, Scott, J. K. "The degree and Effect of Methanol Crossover in the Direct Methanol Fuel Cell", J. Power Sources, 70, 1998, pp. 40-47.

[13] Kuver, A., Vielstich, W., "Investigation of Methanol Crossover and Single Electrode Performance During Pemdmfc Operation: a Study Using a Solid Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell System", J. Power sources, 74, 1998, pp. 211-218.

[14] Scott, K., Taama, W., Cruickshank, J., "Performance of a Direct Methanol Fuel Cell", J. Appl. Electrochem., No. 28, 1998, pp. 289-297.

[15] Ravikumar, M. K., Shukla, A. K., "Effect of Methanol Crossover in a Liquid-Feed Polymer-Electrolyte Direct Methanol Fuel Cell", J. Electrochem. Soc., Vol. 143, No. 8, 1996, pp. 2601-2606.

[16] Chen, C. Y., Shiu, J. Y., Lee, Y. S., "Development of a Small DMFC Bipolar Plate Stack for Portable Applications", J. Power Sources, No. 159, pp. 1042–1047, 2006.

[17] Mench, M. M., Wang, C. Y., et al., 2001, An Introduction to Fuel Cells and Related Transport Phenomena, International Journal of Transport Phenomena, Vol. 3, No. 3, 2001, pp. 151-176.