



بررسی توزیع دمای تک‌سل پیل سوختی پلیمری H₂/O₂ در شرایط عملیاتی مختلف

سید مجید رهگشای^{*}، علی اکبر رنجبر، عباس رامیار، ابراهیم علیزاده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۴
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۶/۲۳
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۹/۲۰

کلمات کلیدی:

تصویربرداری حرارتی
پیل سوختی غشا پلیمری
توزیع دما
شرایط عملیاتی
حالت انتها بسته

خلاصه: پیل سوختی یک مبدل انرژی الکتروشیمیایی است که به صورت مستقیم انرژی شیمیایی سوخت را به جریان برق مستقیم و حرارت تبدیل می‌نماید. مدیریت حرارتی و مدیریت آب دو چالش اساسی در طراحی و افزایش بازده پیل‌های سوختی پلیمری به شمار می‌آیند، که به‌صورت ذاتی با یکدیگر مرتبط هستند. در مقاله‌ی حاضر، با ساخت پیل سوختی پلیمری و آزمون‌های آزمایشگاهی در شرایط مختلف به تحلیلی درباره نحوه‌ی توزیع دما در پیل پرداخته می‌شود. با بررسی توزیع دما، ضمن دستیابی به ارتباط تولید توان و توزیع حرارت، پارامترهای حرارتی (شامل توزیع دما، محدوده حداکثر و حداقل دما) استخراج می‌شود. جنبه‌ی نوآوری این مقاله دستیابی به درک صحیحی از توزیع دما در پیل سوختی غشا پلیمری در شرایط عملیاتی مختلف است. همچنین توزیع دما در حالت‌های عملیاتی انتها باز و انتها بسته در فشار و استوکیومتری‌های مختلف بررسی شده است. بررسی نتایج دوربین حرارتی در سطح کاتد سل شفاف نشان می‌دهد که با تغییر شرایط بهره‌برداری پیل سوختی، تمرکز حرارت در سطح آن نیز تغییر می‌کند. وقتی بهره‌برداری پیل سوختی از حالت انتها باز به حالت انتها بسته تغییر کند بیشینه دمای سطح از بخش خروجی به بخش ورودی جابجا می‌شود. و با افزایش فشار، اهمیت کنترل بدتوزیعی و طراحی سیستم خنک‌کاری مناسب، بیشتر می‌شود.

۱- مقدمه

دو مشکل کلیدی در ادامه استفاده از سوخت‌های فسیلی وجود دارد، که در حال حاضر ۸۲٪ انرژی مصرفی از طریق آن تأمین می‌شود [۱]. مشکل اول محدود بودن ذخایر آن‌ها و مشکل بعدی آن ایجاد مسئله اساسی زیست‌محیطی مانند گرم شدن کره زمین، تغییرات آب و هوا، باران اسیدی، آلودگی، پاره شدن لایه اوزون و ... می‌باشد. جهان به منع توانی نیاز دارد که انتشار آلاینده‌ای کم، انرژی با راندمان بالا، و ذخایر نامحدود برای جمعیت رو به رشد جهان داشته باشد. پیل‌های سوختی به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین فن‌آوری‌ها برای تحقق این اهداف شناخته شده‌اند [۲].

پیل سوختی یک مبدل انرژی الکتروشیمیایی است که به صورت مستقیم انرژی شیمیایی سوخت را به جریان الکتریکی تبدیل می‌کند. تمام فرآیندهای گذار و تولید برق در پیل سوختی بدون دخالت هرگونه جزء متحرک و تنها در یک مرحله انجام می‌شود. این سادگی و افزایش راندمان باعث جلب گرایش

به سوی پیل سوختی در سال‌های اخیر گردیده است.

ولی چالش‌های فنی مهمی در فناوری پیل سوختی با غشا پلیمری قبل از این که بتوان آن را به مرحله‌ی تجاری وارد کرد وجود دارد که در میان آن‌ها مدیریت حرارتی^۱ مناسب به عنوان یکی از ابزارهای فنی اساسی، شناخته شده است [۳-۵]. پیل سوختی مشابهی توان الکتریکی خروجی خود، حرارت اتلافی نیز تولید می‌کند بدین جهت راندمان انرژی آن در حدود ۵۰ درصد است [۶]. بدین معنا که برای اتومبیلی با موتور پیل سوختی ۱۰۰ کیلووات نرخ اتلاف حرارت نیز ۱۰۰ کیلووات خواهد بود. در نتیجه این حرارت اتلافی در پیل سوختی رابطه‌ی مستقیم با توان خروجی پیل سوختی دارد. استنباطی صحیح از حرارت تولید شده در پیل سوختی و اثرات آن، در بهینه‌سازی کارایی و طول عمر^۲ پیل سوختی مبادله‌گر پروتون بسیار حائز اهمیت است.

پیل سوختی بصورت کلی در دو حالت انتها باز و انتها بسته می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد. به حالتی که هیدروژن و اکسیژن دقیقاً به اندازه مصرف

1 Heat Management

2 Life Time

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.rahgoshay@stu.nit.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



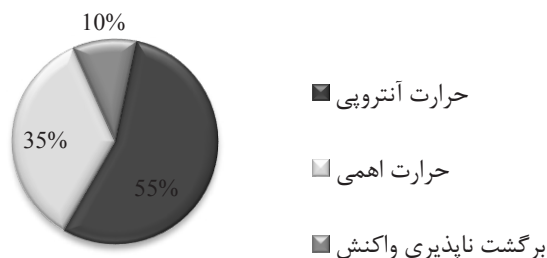
۱-۱-۱- حرارت تولیدی

حرارت تولیدی در پیل سوختی شامل حرارت آنتروپی واکنش، برگشت‌ناپذیری حاصل از واکنش‌های الکتروشیمیایی و مقاومت اهمی و همچنین چگالش آب است [۷ و ۸]. گرمای آنتروپی معرف تغییرات آنتروپی در واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌باشد که باید حتماً از الکتروود دفع شود تا بتوان دما را در هنگام جاری بودن جریان ثابت نگهداشت. برگشت‌ناپذیری واکنش‌های الکتروشیمیایی در پیل سوختی یعنی، اضافه ولتاژ در کاتد و آند در تولید حرارت مهم است. با جدا کردن واکنش‌های پیل سوختی به دو بخش کاتد و آند کاملاً مشخص است که حرارت در هر دو الکتروود کاتد و آند تولید می‌شود. ولی عدم تقارن در تغییرات آنتروپی و اضافه ولتاژ روی دو الکتروود منجر به حرارت تولیدی بیشتری در سمت کاتد می‌شود [۷ و ۹-۱۱]، و در نتیجه‌ی آن ثابت نگه‌داشتن توزیع دما در سطح غشا دچار چالش می‌شود. حرارت اهمی در نتیجه هر دو جریان پروتون و الکترون می‌باشد. هدایت بیشتر همواره سبب کاهش افت اهمی می‌شود که مطلوب است.

مجموع حرارت آنتروپی واکنش، برگشت‌ناپذیری واکنش و حرارت اهمی به‌صورت درصدی از توان خروجی پیل سوختی تقریباً قابل مقایسه‌اند. درصد حرارت‌های تولید شده در برابر حرارت خروجی کل در شکل ۱ نشان داده شده است [۶].

۱-۱-۲- موازنه انتقال حرارت اجزا پیل سوختی

حرارت تولیدی در پیل سوختی به‌طور معمول به کمک یک سیستم خنک‌کاری و یا با انتقال حرارت جابجایی و هدایتی از صفحات استک دفع می‌شود. نرخ گرمای دفع شده به خواص حرارتی اجزای مختلف بکار رفته در پیل سوختی یعنی الکتروولت پلیمری، لایه کاتالیست، لایه نفوذ گاز و صفحات دوقطبی وابسته است. هدایت حرارتی این مواد به‌صورت آزمایشگاهی توسط



شکل ۱: درصد حرارت تولیدی در پیل سوختی پلیمری در مقایسه با حرارت کل خروجی

Fig. 1. The percentage of heat produced in the Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) compared to the total heat output

وارد پیل سوختی گردند، حالت انتهایی^۱ می‌گویند. اگر گازهای واکنش‌دهنده در فشار بیشتری همانند مخزن فشار بالا در دسترس باشند، حالت انتهایی به هیچ‌کنترلی نیاز نداشته و مقدار تامین و مصرف برابر خواهند بود. در صورت اتلاف هیدروژن و اکسیژن به دلیل نفوذ و یا جریان‌های داخلی، دبی جرمی ورودی به اندازه کمی بیش از مصرف خواهد بود. حتی در حالت انتهایی، هیدروژن و اکسیژن می‌بایست به دلیل انباشته‌شدن گاز بی‌اثر و آب به صورت تناوبی تخلیه گردند. در حالت دیگر، ممکن است، هیدروژن و اکسیژن به مقدار بیشتر از مقدار مصرف وارد پیل سوختی گردند که به آن حالت انتهایی^۲ می‌گویند. استوکیومتری گازهای واکنشگر برای حالت انتهایی بالاتر از یک است.

۱-۱-۱- تولید و تعادل حرارتی

برای اطلاعات کلی در مورد تولید گرما و خنک‌کننده مورد نیاز در سری پیل سوختی پلیمری، نرخ حرارت کلی تولیدی (q'' با واحد W/cm^2) در یک سلول می‌تواند به آسانی با استفاده از معادله زیر محاسبه شود:

$$q'' = (E_{in} - E_{cell}) \times i \quad (1)$$

E_{in} به عنوان ولتاژ ترمونوترال و یا ولتاژ حرارتی که نشان‌دهنده حداکثر ولتاژ ایده‌آل مورد انتظار از یک پیل سوختی با فرض تبدیل تمامی آنتالپی واکنش به انرژی الکتریکی شناخته شده است. E_{cell} و i ولتاژ و چگالی جریان عملیاتی می‌باشد. توجه داشته باشید E_{in} را می‌توان بر اساس ارزش حرارتی بالا^۳ با فرض آب محصول در فاز مایع، و یا بر اساس ارزش حرارتی پایین^۴ با فرض آب محصول در فاز گازی محاسبه کرد. ارزش حرارتی مربوطه در حدود $1/48 V$ بر اساس ارزش حرارتی بالا و $1/25 V$ بر اساس ارزش حرارتی پایین در شرایط استاندارد ($25^\circ C$ و 1 اتمسفر) است [۲]. همانطور که از رابطه (۱) مشخص است نرخ حرارت تولیدی با افزایش چگالی جریان و کاهش ولتاژ عملیاتی افزایش می‌یابد. همین‌طور می‌دانیم که ولتاژ سل با افزایش چگالی جریان کاهش می‌یابد، در نتیجه حرارت تولیدی در چگالی جریان بالا از توان پیل پیشی می‌گیرد. این چالش مهمی در پیل سوختی بخصوص در کاربرد حمل و نقل که به چگالی جریان بالا نیازمند است می‌باشد.

- 1 Dead-end mode
- 2 Flow-through mode
- 3 Higher Heating Value (HHV)
- 4 Lower Heating Value (LHV)

Table 1. Thermal conductivity of various components of the fuel cell and their chemical compounds

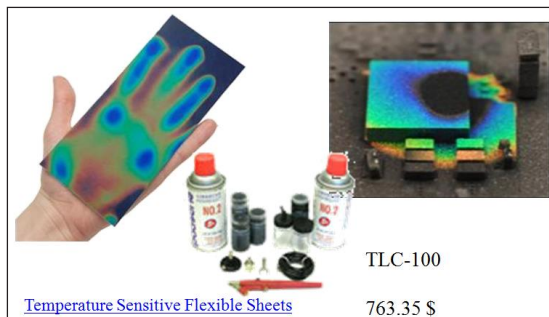
جدول ۱: هدایت حرارتی اجزای مختلف پیل سوختی و ترکیبات شیمیایی آن‌ها

مرجع	هدایت حرارتی (W/m.K)	ترکیبات شیمیایی	اجزا
[۸ و ۱۲]	نفیون ۰/۲۷: ۰/۱۶ و نفیون خشک: ۰/۱۶	پرفلوروسولفونیت اسید	غشا
[۸]	۰/۲۷	مخلوطی از نانوذرات پلاتینیم، کربن و مواد انتقال دهنده یون	لایه کاتالیستی
[۸]	۰/۲۲	ترکیب لایه متخلخل میکرو و زیر لایه فیبر کربن	لایه نفوذ گاز
	۳۰	ترکیبات گرافیت	صفحه دوقطبی



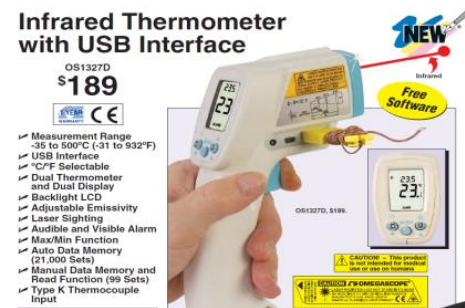
شکل ۲: تصویر دوربین حرارتی شرکت NEC مدل ۵۱۰۲TH استفاده شده توسط وانگ و همکاران [۱۳]

Fig. 2. NEC 5102TH thermal camera image used by Wang et al. [13]



شکل ۴: کریستال مایع ترموکروم حساس به دما [۴]

Fig. 4. Liquid crystal thermocouple sensitive to temperature [4]



شکل ۳: دماسنج مادون قرمز دستی، با ارتباط یو.اس.بی. [۱۴]

Fig. 3. Manual infrared thermometer, with USB connection [14]

لایه نفوذ گاز حائز اهمیت می‌باشد.

۱-۲- توزیع دمای پیل سوختی پلیمری

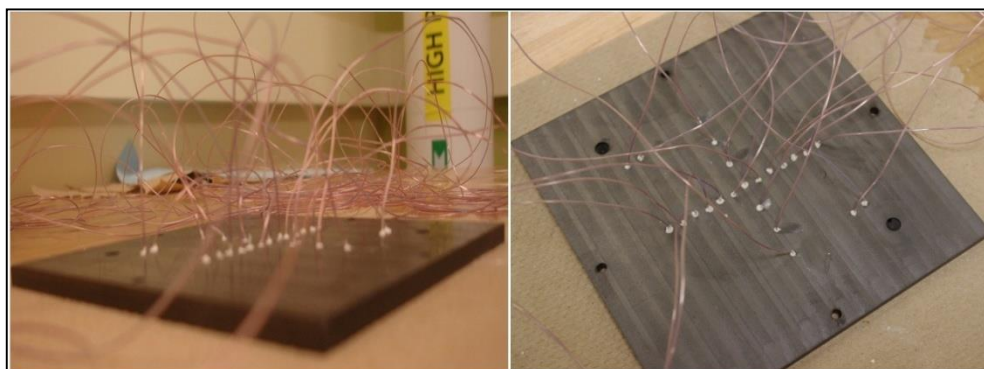
پژوهش‌هایی سعی در یافتن نحوه توزیع حرارت و تحلیل آن در پیل نموده‌اند، ابزارهای مورد استفاده آن‌ها مانند دوربین حرارتی، دماسنج مادون قرمز دستی، کریستال مایع ترموکروم حساس به دما و دماسنج‌های و سنسورهای مقیاس کوچک می‌باشد. ابزارهای مورد استفاده آن‌ها در

مایس و لیونز [۱۲] و اندروس و همکاران [۸] اندازه‌گیری شده و در جدول ۱ بطور خلاصه آمده است. اگرچه همه این اندازه‌گیری‌ها در شرایط درجا در حال بهره‌برداری انجام شده‌اند اما نیازمند سنجش دقیق‌تر در زمان واقعی برای تایید می‌باشند.

مکانیزم‌های انتقال حرارت متفاوتی در اجزای مختلف پیل سوختی مشاهده شده‌اند. انتقال حرارت در لایه الکترولیت پلیمری اغلب به حالت هدایت می‌باشد، ولی هر دو حالت هدایت و جابجایی در لایه کاتالیست و



(الف)



(ب)

شکل ۵: دماسنج، الف) ترموکوپل در مقیاس کوچک، ب) ترموکوپل جاگذاری شده در پشت میدان جریان [۱۸]

Fig. 5. Thermometer, a) small scale thermocouple, b) thermocouple inserted behind the flow field [18]

حرارت در کاتد، تعیین مکان نقاط داغ^۲ نیز بود.

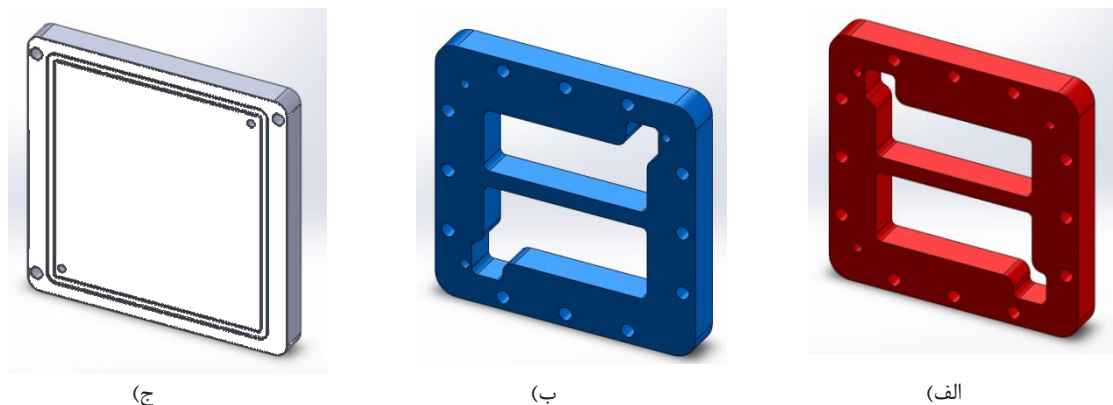
با کمک ابزارها و فن‌های جدید مانند دوربین‌های حرارتی^۳ می‌توان توزیع دما در پیل را بدست آورد. وانگ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۶ به بررسی نحوه توزیع دما در سطح غشا با میدان شارش ماریپیج ساده پرداختند. آن‌ها با کمک دوربین حرارتی شکل ۲ توزیع دمای سمت آند را با ورودی گاز خشک در چگالی جریان‌های مختلف یافتند، نتایج آزمایشگاهی نشان داد، نقاط پایین دست گرمتر از نقاط بالادست کانال می‌باشند. و نقطه داغ به‌راحتی از این طریق بدست می‌آید که می‌تواند در طراحی مناسب مفید باشد. شیومی و همکاران [۵] روش ترموگرافی را برای تحلیل عملیاتی سل در حال آزمایش به شیوه‌ای مشابه به آنچه توسط وانگ [۱۳] توضیح داده شد بکار بردند. آن‌ها در آزمایش خود، میدان دمایی دو بعدی غشاء را در یک پیل سوختی غشاء پلیمری تحت شرایط عملیاتی مختلف مشاهده کردند. بخشی از سل برای اندازه‌گیری ترموگرافی با پنجره‌های شفاف جایگزین شد. فابین و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۰۷ از میکرو سنسور برای اندازه‌گیری توزیع دما استفاده کردند. اندازه‌گیری فشار جزئی اکسیژن و رطوبت نسبی در لایه انتقال جرم بلافاصله در بالای سطح کاتد پیل سوختی غشاء پلیمری

شکل‌های ۱ تا ۴ به نمایش در آمده است. بخشی از این پژوهش‌ها را مرور می‌کنیم.

ویه و جل‌استراب [۱۵] در سال ۲۰۰۴ جز اولین گروه‌هایی بودند که پروفیل دمای عبوری در نزدیک به الکتروود و عمود بر سطح غشا را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که دما در رابط بین هر مجموعه‌ای از دو لایه، مانند غشاء و لایه‌های نفوذ گاز، به اندازه کافی بالاست تا در نظر گرفته شود. منچ و همکاران [۱۶] تلاش‌هایی برای اندازه‌گیری توزیع دما در موقعیت‌های مختلف در یک یا چند لایه غشاء با تعبیه هشت میکرو ترموکوپل انجام دادند. این نوع آزمایش با توجه به پیکربندی، مونتاژ پیل سوختی غشاء پلیمری^۱ کمی پیچیده است. همچنین دشواری نیز برای جلوگیری از تخریب ترموکوپل هنگامی که سل سوختی تحت نیروی مهار قرار می‌گیرد وجود داشت. بنابراین، تنها سه ترموکوپل مقادیر دمای قابل اعتماد را فراهم آوردند. آدزیک و همکاران [۱۷] طراحی را برای ساخت یک میکرو ترموکوپل نازک تخت برای اندازه‌گیری دما در سمت کاتد پیل سوختی جامد مسطح توسعه دادند. حسن اصلی این کار تجربی علاوه بر نقشه‌برداری (نگاشت) درجه

2 Hot Spot
3 Thermal Imaging

1 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)



شکل ۶: صفحات انتهایی مهار پیل سوختی (الف) صفحه انتهایی سمت هیدروژن (ب) صفحه انتهایی سمت اکسیژن (ج) صفحه شفاف پلکسی

Fig. 6. The end plates of the fuel cell clamping system, a) The end plate of the hydrogen side, b) The end plate of the oxygen side, c) The transparent plexiglass plate

آزمایشگاهی مرکز تحقیقاتی استفاده از دوربین حرارتی برای این بررسی انتخاب شد. چون دلیل عدم تماس فیزیکی مشکلات نويز الكتريكي پیل سوختی (مانند تاثیر منفی بر ترموکوپل) روی آن اثر نمی گذارد و می توان نتایج دینامیکی تغییرات دما را با دقت مناسبی مشاهده کرد.

در مورد تحقیقاتی که در ارتباط با طراحی، ساخت و تست پیل سوختی های انتها بسته انجام شده است باید گفت که اکثر تحقیقات فقط به انتها بسته بودن سمت آند پرداخته و سمت کاتد مورد توجه آن ها قرار نگرفته است. با بررسی توزیع دما در شرایط عملیاتی مختلف مانند حالت انتها بسته و انتها باز، با توجه به ارتباط تنگاتنگ توزیع جریان و حرارت تولیدی می توان به تحلیل خوبی از پیل دست یافت. نمایش این تحلیل از نقاط برجسته این مقاله است.

۲- ستاپ تست تجربی

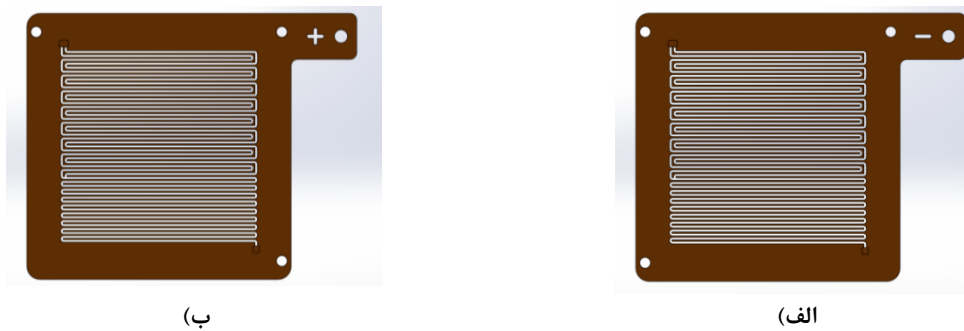
۲-۱- پیل سوختی شفاف

برای ارزیابی حرارتی پیل سوختی پلیمری نیاز به ساخت تک سل با صفحات انتهایی شفاف می باشد تا دوربین مادون قرمز، مستقیماً بتواند توزیع دمای روی سطح کانال و لایه نفوذ گاز را اندازه گیری کند. برای این آزمون از تک سل شفاف ساخته شده توسط رحیمی و همکاران [۲۲] استفاده شد. مشخصات فنی این تک سل و اجزای آن در شکل زیر و ادامه بخش ارائه شده است.

در این مقاله با توجه به شفاف بودن تک سل از صفحات پلکسی گلس با ضریب عبوردهی ۰/۹۹ نور به عنوان صفحات انتهایی نگه دارنده استفاده شد که با ۱۲ عدد پیچ ۱۰M با گشتاور ۱۴ نیوتن متر مهار شده است. با توجه

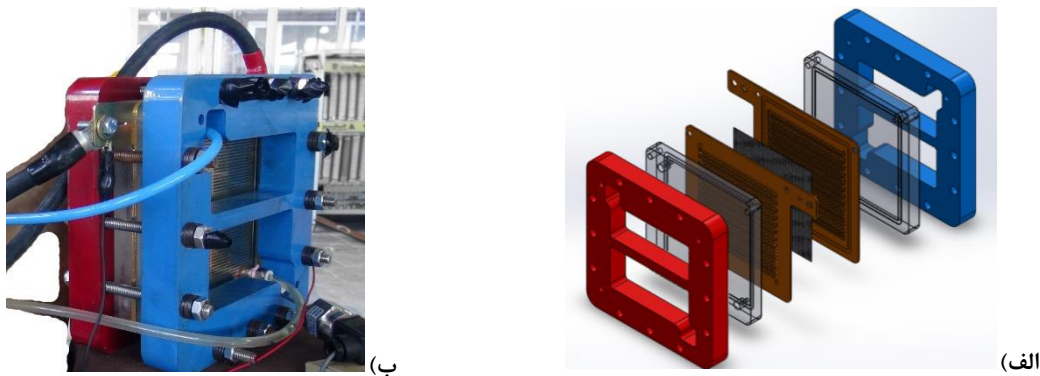
در حالت افقی که توسط همرفت طبیعی تبادل می شد، انجام گرفت. این کار نشان داد که تغییرات اساسی در غلظت گونه های واکنشگر و توزیع دما، با افزایش چگالی جریان بوجود می آید. لی و همکاران [۲۰] اندازه گیری در محل، برای توزیع درجه حرارت در سراسر پیل سوختی انجام دادند و متوجه شدند که بیشینه درجه حرارت در لایه کاتالیستی کاتد رخ می دهد. الا فور [۱۸] در سال ۲۰۱۲ با کار آزمایشگاهی به بررسی توزیع دما و چگالی جریان در پیل سوختی پرداخت. نحوه اندازه گیری دما در شکل ۵ به نمایش در آمده است. توزیع غیریکنواخت درجه حرارت و جریان بر روی سطح ام ای ای می تواند در نتیجه عملکرد ضعیف استفاده از کاتالیست واکنش دهنده و به همان اندازه موثر در تخریب کلی پیل باشد. آن ها دریافتند توزیع دما و جریان به شدت به آرایش جریان کاتد و آند وابسته است، و اندازه گیری دمای غیر مخرب در پیل بسیار به چگالی جریان وابسته است. در تصویربرداری حرارتی مقاله مارتین و همکاران [۲۱]، برای شبیه سازی حرارت از هیتر صفحه ای به جای غشای پلیمری استفاده شد و بجای شرایط واقعی پیل سوختی، بیشتر مبحث انتقال حرارت اجزا پیل را مورد بررسی قرار داده شد و همچنین در این مقاله توزیع حرارت روی سطح خارجی (نمای بالای پیل سوختی) نمایش داده شد در صورتی که مقاله حاضر از پیل سوختی با صفحات شفاف در شرایط واقعی استفاده شده و دمای سطح کانال و لایه نفوذ گاز را برای نمایش توزیع حرارت نشان می دهد.

در بررسی های پژوهش های پیشین درباره بررسی توزیع دمای در پیل سوختی با توجه به مزایا و معایب ابزار اندازه گیری توزیع دما و امکانات



شکل ۷: صفحات جمع‌کننده‌ی جریان (الف) سمت هیدروژن و (ب) سمت اکسیژن

Fig. 7. The current collector plates, a) the hydrogen side and b) the oxygen side



شکل ۸: نمای کلی از تک سل پیل سوختی طراحی شده (الف) کل تک سل طراحی شده (ب) نمونه ساخته شده

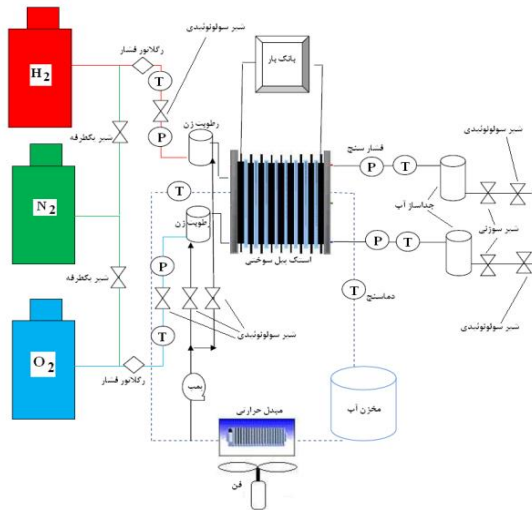
Fig. 8. Overview of single-cell fuel cell designed, a) Total single-cell designed, b) Sample built

کاناله بر این صفحات ماشین‌کاری شد و در یک سوم پایانی تعداد کانال‌های موازی مارپیچ از ۲ عدد به یک عدد کاهش یافت. با این کار سرعت در این ناحیه که محل تجمع آب است افزایش یافته و مومنتم لازم برای دفع آب ایجاد می‌شود.

مجموعه غشاء و الکتروود به صورت یک واحد یکپارچه از سوی شرکت‌ها عرضه می‌شود. این مجموعه شامل سه جزء غشاء، لایه کاتالیست و لایه نفوذ گاز است. الکتروولیت مورد استفاده در پیل سوختی پلیمری از جنس پلیمر با قابلیت هدایت پروتون است و پلیمر تجاری که بیشترین کاربرد را در این زمینه دارد، نفیون می‌باشد. به چند لایه‌ی غشاء که بین دو لایه نفوذ گاز قرار گرفته است (همانند یک ساندویچ) مجموعه‌ی غشاء- الکتروود گفته می‌شود. در این مقاله از غشاء ساخت شرکت پکسی تک با ابعاد 15×15 سانتی‌متر مربع برای مونتاژ تک سل استفاده شده است. لایه نفوذ گاز^۱ بین

1 Gas Diffusion Layer (GDL)

به صلبیت کم صفحات پلکسی صفحات آهنی به ضخامت ۴ سانتیمتر به صورت نواری و کمربندی بر روی صفحات پلکسی قرار گرفته است تا بتوان از تماس مناسب بین اجزاء مطمئن شد. صفحات پلکسی و آهنی برای مهار تک سل در پشت صفحات سوخت و اکسیدان در شکل ۵ نشان داده شده است. جای پین‌های راهنمای مونتاژ، پیچ‌های مهار و محل عبور منی‌فولد گاز در روی صفحات تعبیه شده است. شیار آب‌بندی به ضخامت ۱ میلی‌متر برای آب‌بندی در سمت تماس پلکسی با صفحات جمع‌کننده‌ی جریان قرار دارد. صفحات جمع‌کننده جریان (شکل ۶) از مواد با قابلیت هدایت الکتریکی بالا مس با پوشش طلا انتخاب شدند، وظیفه جمع‌آوری جریان تولیدی و شارش آن در مدار خارجی را بر عهده دارند. محل قرارگیری این صفحات بعد از لایه عایقی است که کنار صفحات انتهایی قرار می‌گیرد. پوشش طلا صفحات جمع‌کننده بجهت کاهش مقاومت تماسی و حذف خوردگی مس در هنگام واکنش الکتروشیمیایی انجام شد. میدان شارش مارپیچ موازی دو



شکل ۹: نمایی از سیستم تست استک و تک سل پیل سوختی پلیمری

Fig. 9. A view of the stack and single-cell test system for polymer electrolyte membrane fuel cell

مطلوب برای تست تکسل، قابلیت اتصال و کنترل بانک بار جهت کنترل میزان جریان الکتریکی مورد نیاز، ارتباط آسان کاربر با واسط کاربری سیستم کنترلی و سیستم تشخیص میزان نشت محیطی هیدروژن و کنترل نیمه خودکار سیستم تهویه و خطوط انتقال واکنشگر در حالت هشدار داشته باشد. در شکل زیر تصویر دستگاه تست با قابلیت‌های گفته شده که توسط آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری پیل سوختی به بهره‌برداری رسیده است، قابل مشاهده است.

۲-۳- تجهیزات تحلیل حرارتی

با توجه به مزایای ذکر شده استفاده از دوربین حرارتی برای تحلیل دمایی پیل سوختی انتخاب شد. برای آنکه مطمئن باشیم بهترین گزینه را با توجه به مقدار هزینه پرداختی برای آن بدست می‌آوریم باید به مجموعه‌ای از پارامترها جهت انتخاب دوربین برای کاربری در پیل سوختی دقت کنیم [۲۳]. پارامترهایی مانند کیفیت و دقت مناسب، با دوام همراه با نرم‌افزارهای کاربردی، با پشتیبانی و تضمین مناسب مد نظر ما خواهد بود. همچنین گزینه‌های زیر حائز اهمیت است:

- بالا بودن رزولوشن دتکتور در محدوده 480×640 باشد.
- سنسور به تغییرات دمای کم حساس باشد.
- نتایج اندازه‌گیری دقیق بوده و قابلیت تکرار پذیری داشته باشد دقت

الکتروود و صفحات توزیع‌کننده واکنش‌دهنده‌ها قرار می‌گیرد و ضخامت آن بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر است. این لایه علاوه بر نگاه‌داشتن الکتروود، نقش رساندن گازهای واکنش‌دهنده را از کانال‌های جریان گاز به سطح الکتروود بر عهده دارد. لایه کاتالیستی کاتالیست پلاتینیومی از بسته‌های بسیار ریز پلاتینیوم تشکیل شده که بر روی بستری از پودر کربن تثبیت می‌گردند. حین انجام واکنش الکتروشیمیایی الکترون‌ها از طریق ساختار الکتروود، پروتون‌ها از طریق یونومر (الکترولیت) و گازهای واکنش‌دهنده و محصولات واکنش نیز فقط از فضاهای خالی محل واکنش (یا حداکثر به صورت محلول از میان یک لایه‌ی نازک از الکترولیت که سطح کاتالیست را پوشانده است) می‌توانند عبور کنند.

و در انتها با استفاده از آب‌بندهای نواری و صفحه‌ای که وظیفه جلوگیری از نشت گاز چه به سمت خارج و چه به سمت دیگر غشاء را به عهده دارند تک سل مونتاژ می‌شود.

۲-۲- دستگاه تست پیل سوختی

برای انجام مرحله فعال‌سازی، راه‌اندازی و تست‌های عملکردی دستگاه تست باید قابلیت تنظیم و کنترل همزمان محتوای رطوبت واکنشگرها، فشار و سطح یون چرخه‌ی سیال خنک‌کننده، توانایی کارکرد در حالت‌های انتها باز و انتها بسته، کنترل خودکار دبی گازهای واکنشگر هر مسیر در دقت



شکل ۱۰: نمایی از سیستم تست پیل سوختی به همراه دوربین حرارتی و نرم افزار کنترل تست

Fig. 10. Fuel cell testing system along with the thermal camera and test control software

می‌دهیم. با توجه به نو بودن غشای تازه مونتاژ شده مطابق با دستورالعمل شرکت سازنده، غشاء فعالسازی می‌شود. مراحل فعالسازی شامل دو بخش آفلاین (بدون کشیدن بار الکتریکی) و آنلاین (همزمان با کشیدن بار) می‌باشد. برای فعالسازی آفلاین تمامی میدان‌های گاز را با آب پر کرده و به مدت ۱۰۰ ساعت پیل سوختی را در این شرایط نگه داشته می‌شود. به این صورت که آب را از خروجی گازها تزریق کرده و زمانی که آب از ورودی خارج شد، ورودی را مسدود کرده و با شیلنگ پنوماتیک ستونی به ارتفاع ۱/۵ متر از آب را ایجاد کرده و تغییرات ستون آب را در مدت ۱۰۰ ساعت ثبت شده است. مشاهدات نشان داده که تقریباً ۱۰ سانتیمتر آب موجود در شیلنگ پنوماتیک ۱۰ در طی این مدت مصرف و جذب غشاء شد. نتایج نشان

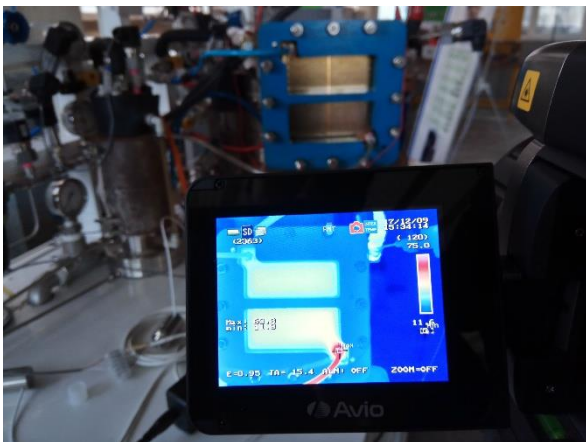
اندازه‌گیری دوربین حرارتی $\pm 1^\circ\text{C}$ می‌باشد.

- رزولوشن فضایی پایین داشته باشد، یعنی در فاصله یک متری توانایی تشخیص حداقل سطحی به ابعاد ۱ میلی‌متر مربع (1 mrad) رادار باشد. این دوربین رزولوشن فضایی 0.087 mrad را دارا می‌باشد.
- قابلیت تصویر در تصویر برای نمایش همزمان عکس حرارتی و عکس معمولی را دارا باشد.
- قابلیت بخش‌بندی ناحیه اندازه‌گیری و مشخص کردن حداکثر، حداقل و متوسط دمای هر قسمت را داشته باشد.

با توجه به قابلیت‌های فوق دوربین حرارتی از شرکت NEC برای این آزمون انتخاب شد. و ستاپ تست آنالیز حرارتی با استفاده از دوربین حرارتی آماده‌سازی شد (شکل ۱۰). در شکل ۱۰ علاوه بر ستاپ تست، نمایی از نرم‌افزار کنترلی دستگاه تست به همراه نرم‌افزار کنترل آنلاین دوربین حرارتی نمایش داده شده است. ورودی‌های دستگاه تست مانند پارامترهای فشار، استوکیومتری، دما، رطوبت، به کمک نرم‌افزار طراحی شده برپایه لیبویو^۱ کنترل می‌شود. و تعیین رنج دمایی تست، فوکوس دوربین حرارتی میانگین‌گیری و بخش‌بندی تصویر به بخش‌های مختلف و نمایش حداکثر و حداقل دما از طریق نرم‌افزار دوربین حرارتی انجام می‌شود.

۳- تست تجربی

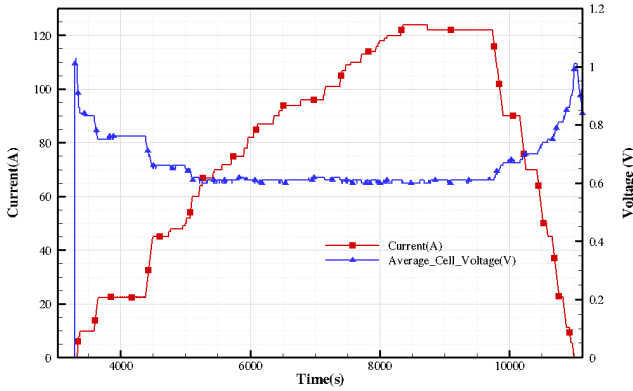
بعد از مونتاژ تک سل پیل سوختی و انجام تست‌های نشتی داخلی و خارجی و اطمینان از عدم نشتی سیستم تست فعالسازی غشا را انجام



شکل ۱۱: نمایی از تصویر حرارتی به همراه تک سل پیل سوختی

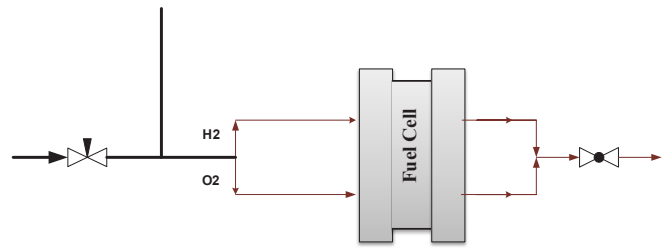
Fig. 11. A view of the thermal image along with the single cell

1 Lab View



شکل ۱۳: نمودار جریان الکتریکی و ولتاژ بر حسب زمان در تست فعالسازی

Fig. 13. Graph of electric current and voltage versus time test activation



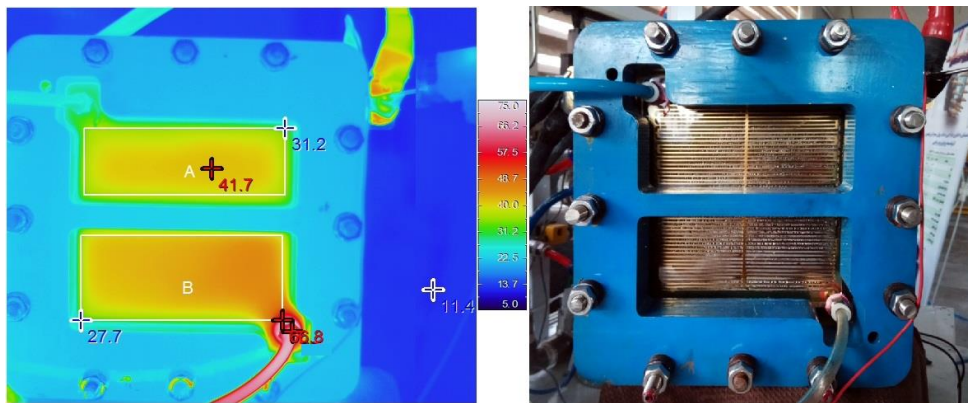
شکل ۱۲: شماتیک فعالسازی آفلاین پیل سوختی با آب دیونیزه

Fig. 12. Schematic of offline activation of fuel cell with deionized water

۴- تحلیل نتایج

در این بخش به ارائه نتایج توزیع دما در شرایط عملکردی مختلف که در جدول ۲ ارائه شده است می‌پردازیم. در ابتدا تصویر حرارتی تک سل شفاف را در انتهای فرآیند فعال سازی نمایش داده می‌شود. استوکیومتری جریان گاز در این حالت برابر ۲ و جریان برابر ۱۲۲ آمپر در ولتاژ ۰/۶ ولت می‌باشد. با توجه به فشار و استوکیومتری بالای واکنشگرها واکنش در کل سطح صورت گرفته و گازها با عبور از میدان شارش رفته رفته گرم شده و دمای خروجی در محدوده ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. به همین دلیل زمان توقف در ولتاژ ثابت ۰/۶ ولت بعد از ۲/۵ ساعت متوقف شد و با کاهش جریان، دمای سطح کاتد کاهش یافت تا از خشکی بیش از حد غشا جلوگیری شود و به آن آسیبی نرسد. خطای داده‌های آزمایشگاهی دما در همه شکل‌های نمایش داده شده در این بخش با توجه به خطای دستگاه اندازه‌گیری دما در شرایط

داده است این عمل زمان فعالسازی را کاهش داده است. شکل ۱۲ نمایی از فرایند به آب بستن سل را نشان می‌دهد. فعالسازی آنلاین مطابق با پیشنهاد شرکت سازنده غشاء در ولتاژ ۰/۶ ولت انجام می‌شود فشاری گازهای واکنشگر در این حالت ۲ بار نسبی بوده و استوکیومتری آن‌ها برابر ۲ می‌باشد. تا زمانی که تغییرات جریان به صفر برسد فعالسازی ادامه دارد. تغییرات جریان الکتریکی و ولتاژ در هنگام فعالسازی در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. بعد از گذشت تقریباً ۲/۵ ساعت در ولتاژ ثابت ۰/۶ ولت، جریان از مقدار ۷۰ آمپر به ۱۲۲ آمپر افزایش پیدا کرد و ثابت ماند. دمای محیط آزمایشگاه در این شرایط 12°C می‌باشد. حالت‌های مختلف عملیاتی برای تحلیل حرارتی تک سل شفاف در جدول ۲ لیست شده است.



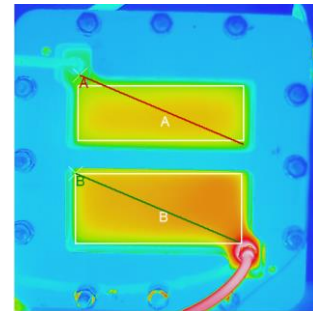
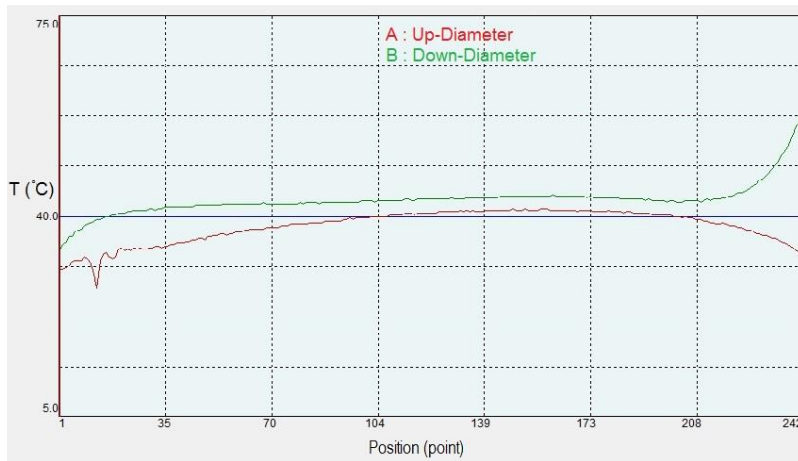
شکل ۱۴: توزیع دمای تک سل پیل سوختی در انتهای فعال سازی در چگالی جریان 0.54 A/cm^2

Fig. 14. Temperature distribution of single-cell in the end of activation at current density of 0.54 A/cm^2

Table 2. Thermal conductivity of various components of the fuel cell and their chemical compounds

جدول ۲: هدایت حرارتی اجزای مختلف پیل سوختی و ترکیبات شیمیایی آن‌ها

تعداد حالت	چگالی جریان الکتریکی i (mA/cm ²)	استوکیومتری St (-)	فشار P (bar)	تست
۱۲	۲۵۰، ۳۷۵، ۵۰۰	۱/۳، ۲، ۲/۵، ۴	۱	شماره (۱) حالت انتها باز
۳	۲۵۰، ۳۷۵، ۵۰۰	-	۱	شماره (۲) حالت انتها بسته
۶	۲۵۰، ۳۷۵، ۵۰۰	۲	۰/۵، ۱/۰	شماره (۳) حالت انتها باز
۲۱				تعداد کل حالات



شکل ۱۵: پروفیل دما در حالت فعال‌سازی در قطر پنجره بالا و پایین (خط A و B)

Fig. 15. Temperature profiles in activation mode in the top and bottom window diameter (lines A and B)

شارش که تصویربرداری حرارتی از سطح لایه نفوذ گاز از این طریق انجام شده است در شکل ۱۵ رسم شد. که نحوه افزایش دما در این خطوط از ورود به خروج نشان می‌دهد.

در شکل ۱۶ حالت گذرای تغییرات دما در حالت انتها بسته از شروع تا حالت پایدار نمایش داده شده است چگالی جریان در این شرایط برابر A/cm^2 ۰/۲۵ و ولتاژ تک سل در محدوده ۰/۷۴ الی ۰/۷۶ ولت در فشار نسبی ۱ بار می‌باشد. بعد گذشت ۵۰ دقیقه با توجه به دمای $12^\circ C$ محیط آزمایشگاه توزیع دما در سطح کاتد پایدار می‌شود (جدول ۳).

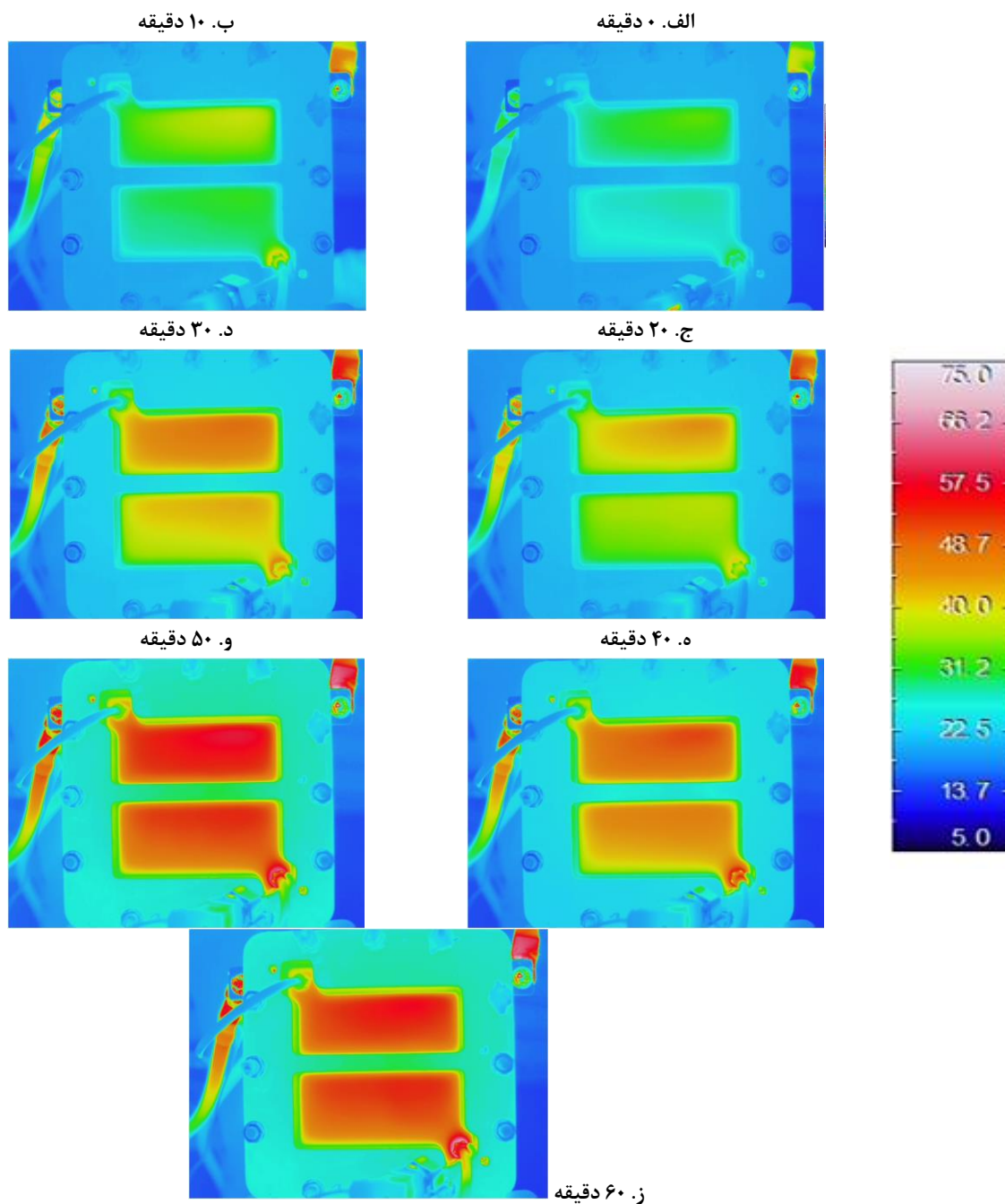
در کانتورهای دمای حالت انتها بسته، گرم‌تر بودن پنجره بالایی نسبت به پنجره خروجی (پایینی) مشهود است (شکل ۱۶). این امر به دلیل دبی پایین گاز واکنشگر و غلظت بالای آن در ورودی و کاهش غلظت گاز اکسیژن در

محیطی تست $\pm 1^\circ C$ است.

برای مقایسه یکنواختی دمای سطح در نقاط تست مختلف از رابطه شاخص یکنواختی دمای سطح استفاده شده تا بتوان نتایج را بصورت کمی با یکدیگر مقایسه کرد [۱۳]. با تعریف شاخص یکنواختی دمای سطح تاثیر پارامترهای مورد بررسی بر توزیع دمای سطح را مشخص می‌شود بدین معنا که هرچه این ضریب کمتر باشد دمای سطح یکنواخت‌تر است.

$$IUT = \frac{\int (T - T_{avg}) dA}{\int dA}, \quad T_{avg} = \frac{\int T dA}{\int dA} \quad (2)$$

پروفایل توزیع دما از ورودی تا خروجی در دو پنجره نمایش میدان



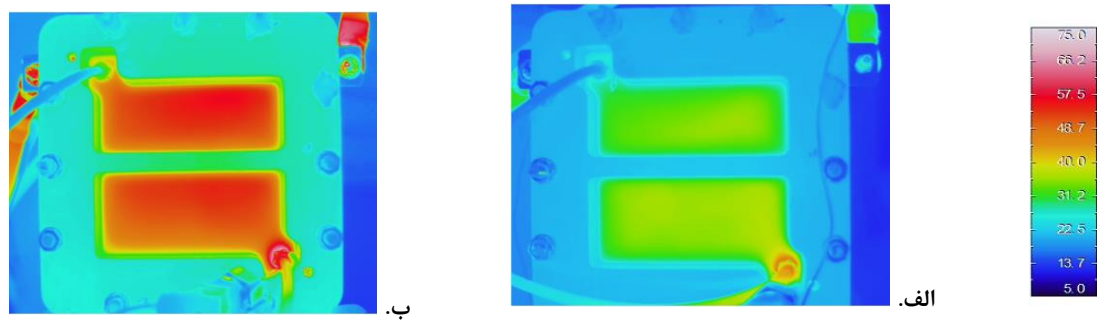
شکل ۱۶: تصویربرداری حرارتی از سطح کاتد با گذشت زمان در حالت انتها بسته در چگالی جریان 0.25 A/cm^2 در زمان‌های الف: ۰، ب: ۱۰، ج: ۲۰، د: ۳۰، ه: ۴۰، و: ۵۰، ز: ۶۰ دقیقه ($P=1/\text{barg}$ ، $\text{StH}_2=\text{StO}_2=2$) در

Fig. 16. Thermal imaging of the cathodic surface over time in dead end mode at a current density of 0.25 A/cm^2 , in the times a: 0, b: 10, c: 20, d: 30, e: 40, f: 50, g: 60 minutes ($P=1\text{barg}$, $\text{StH}_2=\text{StO}_2=2$)

Table 3. The temperature stability over time

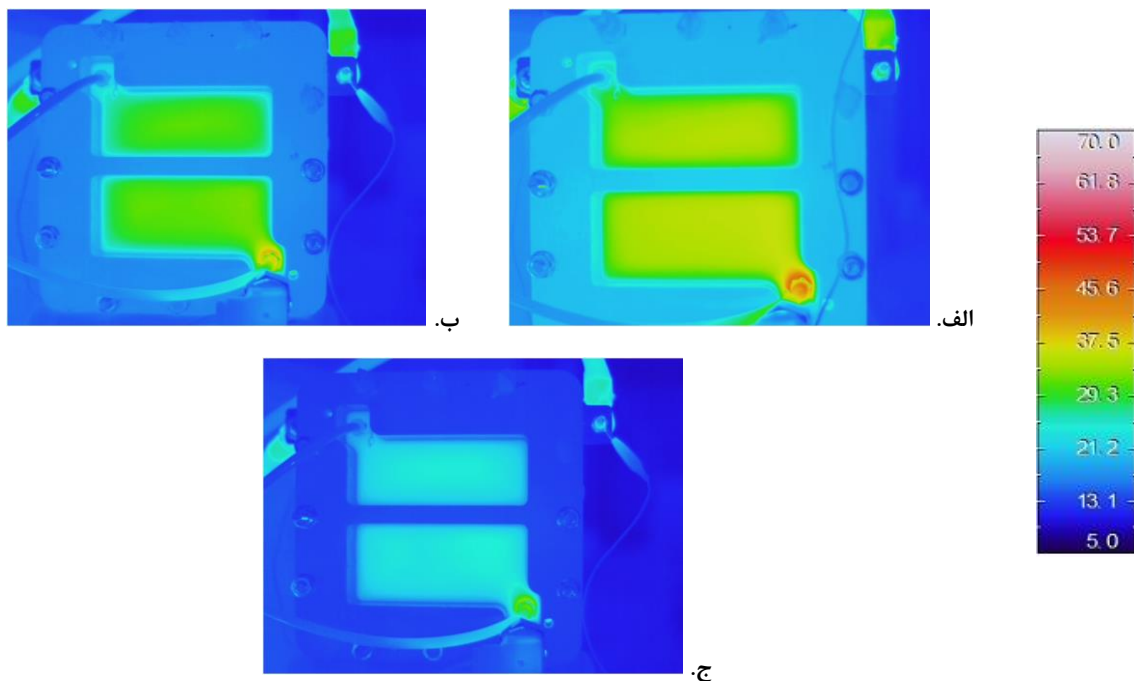
جدول ۳: روند پایداری دما در طول زمان

زمان تست (دقیقه)	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
دمای متوسط (سانتی‌گراد)	۲۶/۹	۲۸/۴	۳۴/۷	۳۸/۷	۴۲/۰	۴۴/۰	۴۵/۰
دمای ماکزیمم (سانتی‌گراد)	۳۳/۵	۳۷/۵	۴۴/۶	۴۹/۱	۵۴/۶	۵۸/۳	۶۰/۱



شکل ۱۷: تصویربرداری حرارتی از سطح کاتد در چگالی جریان 0.25 A/cm^2 و $P=1 \text{ barg}$ در الف) حالت انتها باز و استوکیومتری هیدروژن و اکسیژن برابر $St=4$ و ب) حالت انتها بسته

Fig. 17. Thermal imaging of the cathode surface at a current density of 0.25 A/cm^2 and $P=1 \text{ barg}$ in a) open end mode and Stoichiometry of hydrogen and oxygen equal to $St=4$ and b) dead end mode



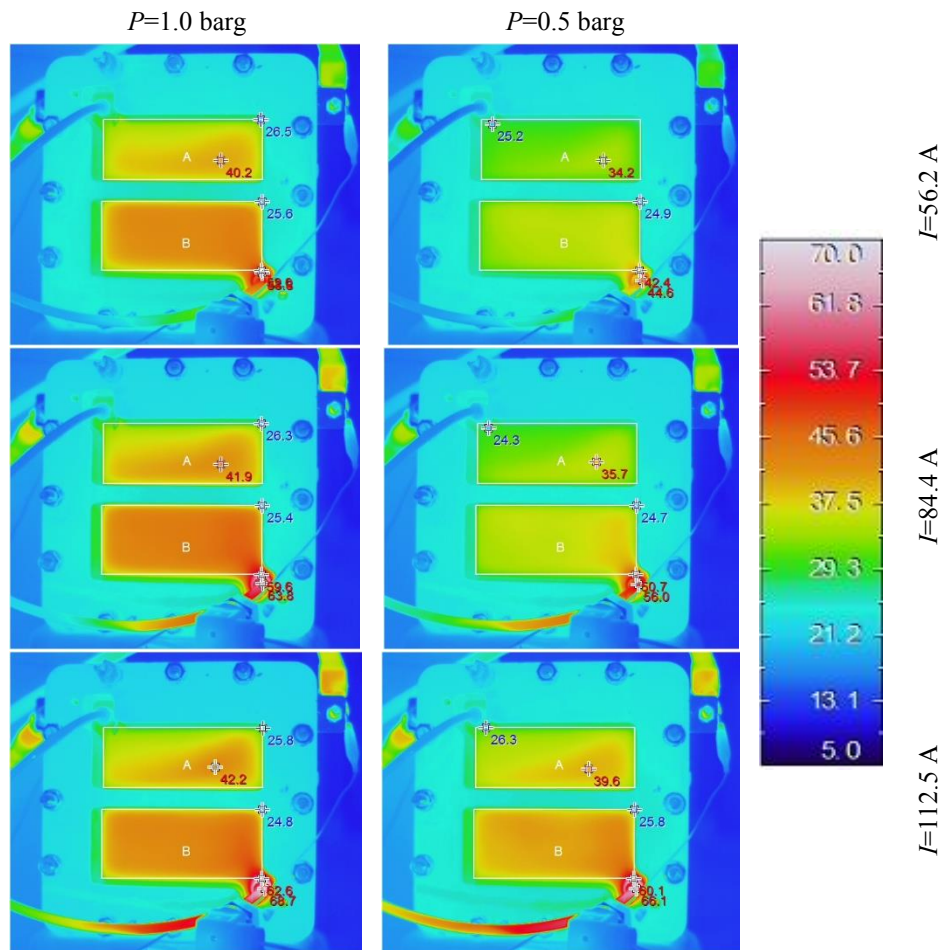
شکل ۱۸: تصویربرداری حرارتی از سطح کاتد حالت انتها باز در چگالی جریان 0.25 A/cm^2 در استوکیومتری‌های مختلف، الف) $St=1.3$ ، ب) $St=2$ ، ج) $St=2.5$.

Fig. 18. Thermal imaging of the cathode surface of the open end mode at a current density of 0.25 A/cm^2 , In different Stoichiometries, a) $St=1.3$, b) $St=2$, c) $St=2.5$

کاتد در حالت انتها باز بدلیل انتقال حرارت همرفت به کمک دبی بالای گاز واکنشگر با استوکیومتری ۴ دارای توزیع دمایی یکنواخت‌تری می‌باشد. این تصویر اهمیت مدیریت حرارت در حالت انتها بسته به دقت نشان می‌دهد. برای تشخیص بهتر تاثیر استوکیومتری و افزایش دبی گاز واکنشگر، استوکیومتری سمت کاتد و آند از $1/3$ و 2 تا $2/5$ افزایش داده شد در حالی که چگالی جریان ثابت بود. با افزایش دبی گازهای واکنشگر انتقال حرارت

خروجی می‌باشد. زیرا به همراه تولید آب در سطح غشا و حرکت آن به‌همراه سیال و انباشتگی آب در بخش پایینی، نفوذ واکنشگر به سطح غشا کمتر شده و نرخ واکنش در نتیجه آن تولید حرارت کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۷ دو کانتور دما در دو حالت انتها بسته و انتها باز در چگالی جریان یکسان با هم مقایسه شده‌اند. متوسط دمایی حالت انتها بسته در محدوده ۵۱ درجه و حالت انتها باز ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. و سطح



شکل ۱۹: تصویربرداری حرارتی از سطح کاتد حالت انتها باز با $St_{O_2}=St_{H_2}=2/0$ ، در دو ستون فشار عملیاتی $P=1/0$ و $P=0/5$ و سه سطر جریان $I=112.5A (i=0.5A/cm^2)$ ، $I=84.4A (i=0.375A/cm^2)$ ، $I=56.2A (i=0.25A/cm^2)$

Fig. 19. Thermal imaging of the cathode surface of the open end mode at a current density of 0.25 A/cm², In different Stoichiometries, a) St=1.3, b) St=2, c) St=2.5

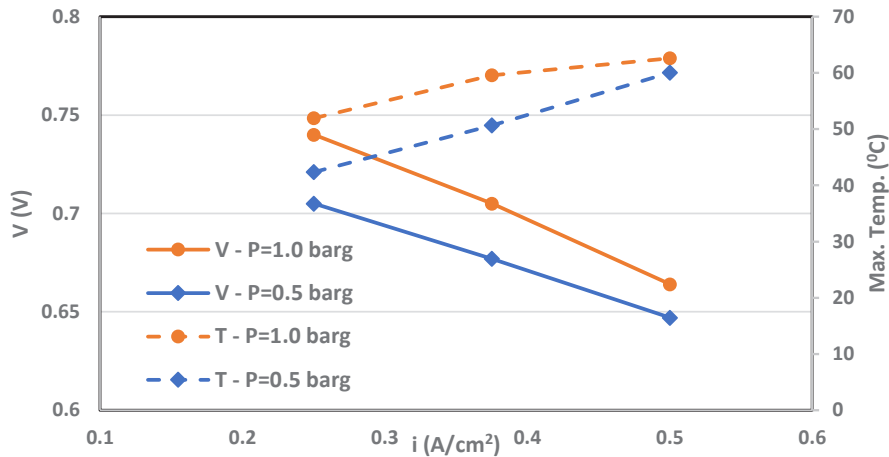
مشخص شد بیشینه دمای همواره در بخش پایینی در نزدیکی خروجی رخ می‌دهد و دلیل این امر ذیل شکل ۱۶ توضیح داده شد. بدلیل افزایش دمای سطح همزمان با افزایش فشار تاثیر بهبود کارایی در این سل شفاف بیشتر دیده شد و بصورت متوسط ولتاژ سل به مقدار ۴٪ مطابق شکل ۲۰ افزایش پیدا کرد.

نتایج حاصل برای ۲۱ نقطه تست اشاره شده در جدول ۲ در نمودار میله‌ای شکل‌های ۲۱ و ۲۲ به صورت کمی به نمایش در آمد. در این دو شکل مقادیر دمای کمینه، متوسط و بیشینه و مقدار شاخص یکنواختی دمای سطح^۱ (با استفاده از رابطه (۲)) در نقاط تست اشاره شده مطابق با جدول ۲ به نمایش در آمد. در شکل ۲۱ نقاط تست مربوط به تغییرات استوکیومتری در حالت انتها باز به نمایش در آمد که در تایید نتایج بدست آمده از کانتور توزیع

همرفت بیشتر شده و حرارت بیشتری از خروجی دفع گردید. که این امر باعث توزیع بهتر دما و همچنین کاهش کلی دمای سطح شد. بترتیب با افزایش استوکیومتری دمای متوسط سطح از ۳۷ به ۲۸ و سپس به ۲۲/۸ درجه سانتی‌گراد در استوکیومتری ۲/۵ کاهش یافت.

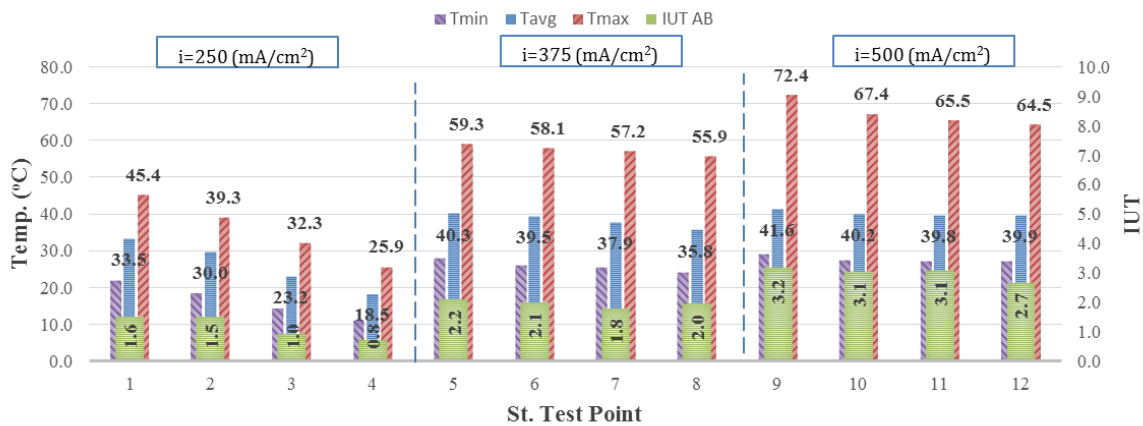
در شکل ۱۹ توزیع دمای دو فشار عملکردی ۰/۵ و ۱/۰ بار نسبی در سه چگالی جریان ۰/۲۵، ۰/۳۷۵ و ۰/۵ امپر بر سانتی‌متر مربع در استوکیومتری ثابت ۲/۰ برای آند و کاتد نمایش داده شد. با افزایش فشار مطابق شکل ۲۰ مقدار ولتاژ خروجی در چگالی جریان ثابت به دلیل افزایش نفوذ گازهای واکنشگر افزایش یافت، در نتیجه آن، توان الکتریکی و حرارتی تولید زیاد شد. در نتیجه متوسط و بیشینه دمای سطح زیاد گشت. با توجه به نمایش کمینه و بیشینه دما در دو بخش بالایی و پایینی سل شفاف در سمت کاتد،

1 Index of Uniformity Temperature (IUT)



شکل ۲۰: نمودار ولتاژ و بیشینه دمای سطح بر حسب تغییرات چگالی جریان در $P=1/0$ ، $StO_2=StH_2=2/0$

Fig. 20. Diagram of voltage and maximum surface temperature in terms of variation of current density at $P=1$ barg, $StH_2=StO_2=2$



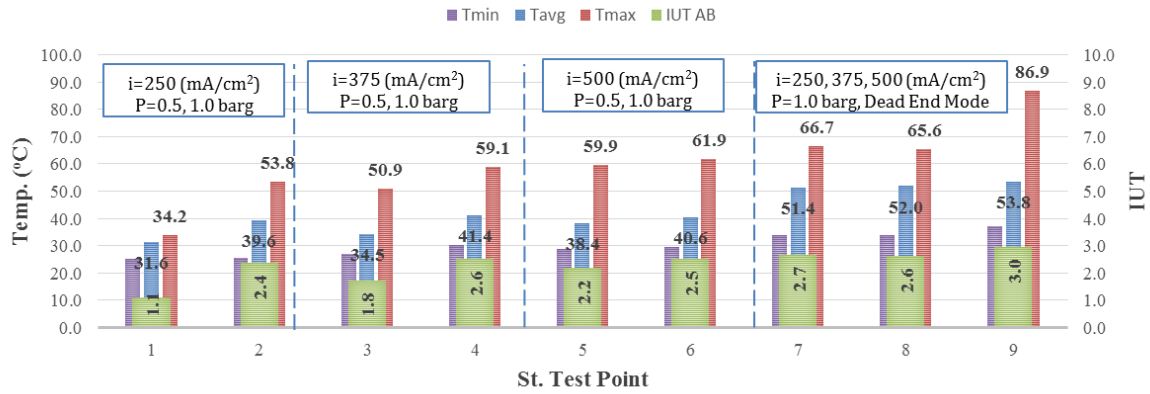
شکل ۲۱: نمودار میله‌ای مقادیر دمای کمینه، متوسط و بیشینه و مقدار شاخص یکنواختی سطح برای نقاط تست در چهار استوکیومتری ۱/۳، ۲، ۲/۵، ۴ و سه چگالی جریان $I=112.5A$ ($i=0.5A/cm^2$), $I=84.4A$ ($i=0.375A/cm^2$), $I=56.2A$ ($i=0.25A/cm^2$)

Fig. 21. Bar chart of the minimum, average, and maximum temperature and Index of Uniformity Temperature (IUT) values for the test points in the four Stoichiometries 1.3, 2, 2.5, 4 and three current densities $I=56.2$ ($i=0.25$ A/cm²), $I=84.4$ ($i=0.375$ A/cm²), $I=112.5$ ($i=0.5$ A/cm²)

دمای شکل ۱۸ بود. زیرا همانطور که اشاره شد با افزایش استوکیومتری و دبی گازهای واکنشگر، انتقال حرارت همرفت بیشتر شده و حرارت بیشتری از خروجی دفع گردید. که این امر باعث توزیع بهتر دما (کاهش شاخص یکنواختی دما) و کاهش دمای ماکزیمم سطح شد. و همچون بار افزایش چگالی جریان بدتوزیعی دما بدتر شده با اینکه دمای متوسط سطح در حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود ولی دمای ماکزیمم سطح تا ۷۲ درجه سانتی‌گراد بالا رفت.

در شکل ۲۲ شش نقطه تست مربوط به تغییرات فشار و سه نقطه

تست حالت انتها بسته به نمایش درآمد. همانطور که اشاره شد با افزایش فشار عملکرد سل بهتر شده و دمای سطح بیشتر گردید. ولی با افزایش چگالی جریان تاثیر فشار بر افزایش بدتوزیعی مقدار شاخص یکنواختی سطح کاهش یافت یعنی در چگالی جریان 500 mA/cm^2 با تغییرات فشار مقدار شاخص یکنواختی تقریباً ۳/۰ بیشتر شد. اما نکته مهم در این شکل نقاط تست ۷ تا ۹ می‌باشد که با تغییر شرایط به حالت انتها بسته به دلیل تخلیه بسیار کم گازهای واکنشگر کاتد و آند در زمانبندی مشخص، اثر انتقال حرارت جابجایی کاهش یافته و دمای سطح به بیشتر مقدار خود یعنی ۸۶/۹ درجه



شکل ۲۲: نمودار میله‌ای مقادیر دمای کمینه، متوسط و بیشینه و مقدار شاخص یکنواختی سطح برای ۶ نقطه تست فشار ۰/۵ و ۱/۰ بار نسبی و ۳ نقطه تست حالت انتها بسته در سه چگالی جریان $0.25, 0.375, 0.5 \text{ A/cm}^2$

Fig. 22. . Bar chart of the minimum, average, and maximum temperature and Index of Uniformity Temperature (IUT) values for the 6 pressure test points in $P=0.5, 1.0 \text{ barg}$ and three dead end test point at current densities $i=0.25, 0.375, 0.5 \text{ A/cm}^2$

۴) افزایش استوکیومتری واکنشگرها در حالت انتها باز، موجب افزایش

سانتی‌گراد رسیده است.

نرخ انتقال حرارت همرفت و کاهش متوسط دمای سطح می‌شود و بدتوزیعی دما را در چگالی جریان ثابت کاهش می‌دهد.

۵) با افزایش فشار، کارایی سل بهبود یافته در نتیجه حرارت تولیدی بیشتر شده و دمای سطح زیاد می‌شود و اهمیت کنترل بدتوزیعی دما در این حالت بیشتر خود را نشان می‌دهد. ولی با افزایش چگالی جریان تاثیر فشار بر بدتوزیعی دما کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

با پیل سوختی غشاء پلیمری طراحی شده و تکنولوژی دوربین حرارتی توزیع دمای سطح کاتد پیل سوختی در حالت انتها بسته و باز در شرایط عملیاتی مختلف بصورت تجربی بررسی شد. نتایج حاصل، دانش ما را نسبت به توزیع دما و انتقال حرارت در داخل پیل سوختی توسعه داد. دانستن این اطلاعات برای ارتقا طراحی و شرایط عملکردی سل در مدیریت آب و حرارت می‌تواند مفید باشد. نتایج زیر را از این مقاله می‌توان استخراج نمود:

۱) توزیع دما در بر روی سمت کاتد غشا در حالت انتها باز بررسی شد. دمای پایین دست جریان نسبت به بالا دست بیشتر بود زیرا هیدراته شده غشا در طول مسیر کامل‌تر شده و واکنش در پایین دست بهتر شکل می‌گرفت.

۲) با افزایش جریان، نرخ واکنش بیشتر شده و دما متوسط سطح غشا و سل با هم افزایش می‌یابند.

۳) توزیع دما در بر روی سمت کاتد غشا در حالت انتها بسته بررسی شد. دمای پایین دست جریان در این حالت رفته‌رفته کاهش یافت، با توجه به مشاهدات بصری این امر بدلیل آبرگفتگی غشا و کاهش نرخ نفوذ گازهای واکنشگر به داخل غشا می‌باشد در نتیجه آن نرخ واکنش و تولید حرارت کاهش می‌یابد که موجب دمای کمتر در سطح خروجی شد.

۶- فهرست علائم

مساحت، m^2	A
ولتاژ، V	E
ارزش حرارتی بالا	HHV
چگالی جریان A/cm^2	i
ارزش حرارتی پایین	LHV
فشار، bar	P
نرخ حرارتی تولیدی	q''
زیرنویس	
سل	$cell$
سیال	f
ترومونوترال	tn

- fuel cells I. Experimental validation, *Journal of The Electrochemical Society*, 152(8) (2005) A1645-A1653.
- [11] C.-Y. Wang, Fundamental models for fuel cell engineering, *Chemical Reviews*, 104(10) (2004) 4727-4766.
- [12] S. Lievens, J.-P. Maes, Methods for fuel cell coolant systems, in, *Google Patents*, 2007.
- [13] M. Wang, H. Guo, C. Ma, Temperature distribution on the MEA surface of a PEMFC with serpentine channel flow bed, *Journal of Power Sources*, 157(1) (2006) 181-187.
- [14] Infrared Thermal Imaging Camera in, *Avio*.
- [15] P.J. Vie, S. Kjelstrup, Thermal conductivities from temperature profiles in the polymer electrolyte fuel cell, *Electrochimica Acta*, 49(7) (2004) 1069-1077.
- [16] B.D. Mench M, Davis T, Proceeding of ASME, in: *Internal Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Washington, DC, 2003, pp. 415-428.
- [17] M. Adžić, M. Heitor, D. Santos, Design of dedicated instrumentation for temperature distribution measurements in solid oxide fuel cells, *Journal of applied electrochemistry*, 27(12) (1997) 1355-1361.
- [18] I. Alaefour, *Current and Temperature Distributions in Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, University of Waterloo, 2012.
- [19] T. Fabian, R. O'Hayre, F.B. Prinz, J.G. Santiago, Measurement of temperature and reaction species in the cathode diffusion layer of a free-convection fuel cell, *Journal of The Electrochemical Society*, 154(9) (2007) B910-B918.
- [20] S.-K. Lee, K. Ito, T. Ohshima, S. Noda, K. Sasaki, In situ measurement of temperature distribution across a proton exchange membrane fuel cell, *Electrochemical*
- [1] World energy consumption, in, *International Energy Agency*, 2011.
- [2] F. Barbir, *PEM fuel cells: theory and practice*, Academic Press, 2013.
- [3] S.G. Kandlikar, Z. Lu, Thermal management issues in a PEMFC stack—A brief review of current status, *Applied Thermal Engineering*, 29(7) (2009) 1276-1280.
- [4] G. Zhang, S.G. Kandlikar, A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(3) (2012) 2412-2429.
- [5] R. Shimoi, M. Masuda, K. Fushinobu, Y. Kozawa, K. Okazaki, Visualization of the membrane temperature field of a polymer electrolyte fuel cell, *Journal of energy resources technology*, 126(4) (2004) 258-261.
- [6] S.G. Goebel, Evaporative cooled fuel cell, in, *Google Patents*, 2005.
- [7] S. Tsushima, K. Teranishi, S. Hirai, Magnetic resonance imaging of the water distribution within a polymer electrolyte membrane in fuel cells, *Electrochemical and Solid-State Letters*, 7(9) (2004) A269-A272.
- [8] B. Andreaus, A. McEvoy, G. Scherer, Analysis of performance losses in polymer electrolyte fuel cells at high current densities by impedance spectroscopy, *Electrochimica acta*, 47(13) (2002) 2223-2229.
- [9] W.-M. Yan, F. Chen, H.-Y. Wu, C.-Y. Soong, H.-S. Chu, Analysis of thermal and water management with temperature-dependent diffusion effects in membrane of proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 129(2) (2004) 127-137.
- [10] H. Ju, C.-Y. Wang, S. Cleghorn, U. Beuscher, Nonisothermal modeling of polymer electrolyte

- PEM Fuel cell for Investigation of Water Management at Dead-End mode, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2017).
- [23] OMEGA, Twelve Things to Consider Before Buying an Infrared Camera A Guide for Investing in Infrared, https://www.omega.com/manuals/manualpdf/Flir12_Booklet.pdf, (2015) 1-16.
- and Solid-State Letters, 12(9) (2009) B126-B130.
- [21] M. Matian, A.J. Marquis, N.P. Brandon, Application of thermal imaging to validate a heat transfer model for polymer electrolyte fuel cells, International Journal of Hydrogen Energy, 35(22) (2010) 12308-12316.
- [22] M. Rahimi, A. Ramiar, A. A. Ranjbar, E. Alizadeh, Design, Manufacturing and Testing of a Transparent

