

# طراحی و تحلیل سیستم خنک کاری و مدیریت حرارت سامانه تولید توان یک پهپاد سبک مجهز به پیل سوختی

جاماسب پیرکنده<sup>۱</sup>، یوسف عباسی<sup>۲</sup>، سعید بالافکنده<sup>۳</sup>

۱ دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، j\_pirkandi@dena.kntu.ac.ir

۲ استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳ کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۴

## چکیده

مسأله مدیریت حرارتی درون پیل‌های سوختی پلیمری<sup>۱</sup> از مسائل بسیار مهم و حائز اهمیت می‌باشد. حرارت تولیدی پیل سوختی یک چالش اساسی بوده که مدیریت درست آن نقش بسزایی در بهینه‌سازی عملکرد و طول عمر آن دارد. در این مقاله سیستم خنک کاری یک پیل سوختی پلیمری یک کیلوواتی با کاربرد در پهپادها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در ابتدا با استفاده از یک مدل ریاضی عملکرد پیل تحت شرایط کارکرد متفاوت بررسی شده و دبی هوای مورد نیاز جهت خنک کاری آن محاسبه شده است. در ادامه هفت نمونه هندسه پیشنهادی (شیاردار و با سوراخ) جهت خروج هوای گرمی که از طریق فن‌های پیل سوختی خارج می‌شود، ارائه شده و تأثیر این دریچه‌های خروجی بر انتقال حرارت در داخل بدنه پهپاد بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برای تمامی هندسه‌های پیشنهادی برای دریچه خروجی، میانگین دمای سطح خارجی پیل سوختی پایین‌تر از  $45^{\circ}\text{C}$  می‌باشد، که این شرایط به خوبی محدودیت دمایی اعلام شده از سوی شرکت سازنده را تأمین می‌کند.

## واژگان کلیدی

پهپاد، پیل سوختی پلیمری، خنک کاری، مدیریت حرارت.

## ۱. مقدمه

برای رفع مشکلات کمبود انرژی و مسائل زیست محیطی باشند. ویژگی‌هایی از قبیل راندمان بالا، آلودگی کم، قابلیت استفاده از سوخت‌های مختلف و نداشتن سروصدا باعث شده است که پیل‌های سوختی گزینه‌ی مناسبی جهت کاربردهای ثابت و متحرک در آینده باشند [۱]. در سال‌های اخیر استفاده از پیل‌های سوختی در سیستم پیشران‌های پهپادها به شدت مورد توجه محققین

در سال‌های اخیر با توجه به محدودیت منابع انرژی و مشکلات زیست محیطی ناشی از آلاینده‌ها، لزوم استفاده از روش‌های تبدیل انرژی با راندمان بالاتر مورد توجه قرار گرفته است. پیل‌های سوختی به‌عنوان وسایل تبدیل کننده مستقیم انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی می‌توانند یک راه‌حل قابل اطمینان

و شرکت‌های سازنده پهناد قرار گرفته است. ترکیب پیل سوختی و باتری سیستم هیبریدی جدیدی است که سبب تولید مداوم انرژی الکتریکی شده و این انرژی در یک موتور الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مداومت پروازی بالا، آلاینده‌ی پایین، سروصدای کم و ... از مزایای کاربرد این نوع سیستم‌های هیبریدی جدید می‌باشد. با وجود چنین مزیت‌هایی توجه به پیل‌های سوختی در سال‌های اخیر افزایش چشم‌گیری داشته است ولی همچنان چالش‌هایی جهت بهبود عملکرد و افزایش بهره‌وری آنها وجود دارد. یکی از این چالش‌های مهم و پر اهمیت مدیریت حرارت پیل‌های سوختی می‌باشد. هدف اصلی مدیریت حرارت در یک پیل سوختی، اطمینان از عملکرد پیل در یک محدوده‌ی دمایی قابل اطمینان و یک توزیع دمایی یکنواخت در تمام سطح پیل می‌باشد. در یک پیل سوختی در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد انرژی تولیدی به صورت گرما آزاد می‌شود. از طرفی بررسی‌ها نشان می‌دهد که یک سیستم خنک‌کاری کارآمد باید به صورتی طراحی شود که تمام این گرمای تولیدی را از داخل پیل سوختی خارج کند. در زمینه مدل‌سازی و آزمایش سیستم‌های خنک‌کاری، مقالات و گزارشات مختلفی منتشر شده است.

وانگ و همکاران [۲] در یک کار آزمایشگاهی به مطالعه پارامتریک عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری پرداختند. تأثیر پارامترهای مختلف در عملکرد پیل سوختی با استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت در آند و هوا در کاتد به صورت عملی بررسی شده است. آنها آزمایش‌ها را در دماها و فشارهای مختلف کارکرد پیل سوختی انجام دادند و نتایج را بصورت منحنی‌های قطبیت<sup>۲</sup> در شرایط مختلف ارائه دادند. صالح و همکاران [۳] یک مدل عددی برای یک پیل سوختی غشاء پلیمری یک کیلوواتی ارائه دادند. آنها در ارائه این مدل پارامترهای اصلی الکتریکی و ترمودینامیکی که در عملکرد پیل سوختی مؤثر هستند را در نظر گرفتند و به بررسی تأثیر هر کدام از این پارامترها پرداختند. مدل آنها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده و در نهایت برای استفاده در ولتاژهای بالاتر نیز ارائه شد. ژانگ و کاندلیکار [۴] یک مرور کلی بر روش‌های خنک‌کاری پیل‌های سوختی غشاء پلیمری انجام دادند. آنها در ابتدا مشخصه‌های تولید حرارت و الزامات خنک‌کاری در یک پیل سوختی غشاء پلیمری را تشریح کردند. سپس ویژگی‌های مثبت، چالش‌های پیشرو و روش کار هر یک از روش‌های خنک‌کاری را مرور کردند. ساسمیتو و همکاران

[۵] با استفاده از یک مدل عددی دو بعدی به مطالعه انتقال حرارت جابجایی اجباری در یک پیل سوختی غشاء پلیمری کوچک با سیستم خنک‌کاری هوا پرداختند و تأثیر توان فن و افت فشار در کارکرد کلی پیل را بررسی کردند. باروسو و همکاران [۶] در یک کار آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت برای یک طراحی بهینه سیستم خنک‌کاری پیل سوختی غشاء پلیمری که درون بدنه یک پهناد قرار داشت را محاسبه کردند. آنها آزمایش‌ها را در دو تونل باد با هندسه متفاوت انجام دادند و پارامترهایی همچون نرخ جریان هوای ورودی، دمای هوای ورودی و خروجی و دمای صفحات دو قطبی پیل سوختی را اندازه گرفتند. ضریب انتقال حرارت محاسبه شده برای جریان هوای خنک‌کاری بین ۸ تا  $44 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  تغییر می‌کند. شهسواری و همکاران [۷] با استفاده از یک مدل سه بعدی آنالیز حرارتی یک پیل سوختی غشاء پلیمری را انجام دادند. آنها با شبیه‌سازی یک کانال کاتد پیل سوختی انتقال حرارت و توزیع دما در پیل سوختی را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که سرعت هوا و رسانایی حرارتی صفحات نقش بسزایی در عملکرد حرارتی پیل سوختی دارد.

در این مقاله با استفاده از یک مدل عددی عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری با کاربرد در یک پهناد سبک مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. برای اعتبارسنجی مدل عددی انجام شده، نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی یک پیل سوختی غشاء پلیمری یک کیلوواتی مقایسه شده و سپس مقدار هوای مورد نیاز جهت خنک‌کاری پیل سوختی محاسبه شده است. در ادامه یک سری هندسه پیشنهادی جهت خروج هوای گرمی که از طریق فن‌های پیل سوختی خارج می‌شود، ارائه شده و تأثیر این دریچه‌های خروجی بر انتقال حرارت در داخل بدنه پهناد بررسی شده است.

## ۲. توصیف مساله

در پروژه حاضر از یک پیل سوختی غشاء پلیمری یک کیلوواتی در سیستم پیشرانش یک هواپیمای بدون سرنشین استفاده شده است. در این نوع از پیل‌های سوختی خنک‌کاری پیل به وسیله هوای اضافی که از طریق کانال‌های کاتد وارد پیل سوختی می‌شود، انجام می‌گیرد. در طراحی این نوع از پیل‌های سوختی مقدار هوای مورد نیاز برای خنک‌کاری پیل سوختی علاوه بر هوای درگیر در واکنش‌های شیمیایی در نظر گرفته می‌شود. همانطور که در

### ۳. فرضیات و معادلات حاکم

#### ۳-۱. مدل الکتروشیمیایی

حل کلی معادله‌ی بقای جرم و انرژی در پیل سوختی نیاز به ارزیابی ولتاژ و جریان تولید شده توسط آن دارد. جهت محاسبه ولتاژ واقعی پیل باید افت ولتاژهای مربوط به پیل که شامل افت ولتاژ فعال سازی<sup>۳</sup> ( $V_{act}$ )، افت ولتاژ اهمیک<sup>۴</sup> ( $V_{ohm}$ ) و افت ولتاژ غلظت<sup>۵</sup> ( $V_{con}$ ) می‌باشند، محاسبه شده و در نهایت از رابطه (۱) مقدار ولتاژ واقعی پیل بدست آید [۸]:

$$V_{fc} = n(E_{oc} + V_{act} + V_{ohm} + V_{con}) \quad (1)$$

در این رابطه  $n$  برابر با تعداد سلول‌های پیل سوختی و  $E_{oc}$  برابر با ولتاژ مدار باز پیل سوختی غشای پلیمری می‌باشد که طبق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{oc} = 1.228 - [0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15)] + \left[ 4.3086 \times 10^{-5} T \ln \left( P_{H_2} (P_{O_2})^{\frac{1}{2}} \right) \right] \quad (2)$$

مقدار افت مربوط به فعال‌سازی شامل افت‌های مربوط به راه‌اندازی پیل و همچنین غلبه بر کلیه واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌باشد. پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی افت ولتاژ فعال‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است.

$$V_{act} = \zeta_1 + \zeta_2 T + \zeta_3 T \ln(C_{O_2}) + \zeta_4 T \ln(I) \quad (3)$$

در رابطه (۳)  $T$  دمای پیل سوختی در واحد کلوین،  $I$  جریان کلی تولید شده توسط پیل سوختی،  $C_{O_2}$  غلظت اکسیژن در سطح کاتالیزور و  $\zeta_n$  ضرایب تجربی هستند که از طریق داده‌های آزمایشگاهی بدست می‌آیند. این ضرایب به پارامترهای هندسی پیل سوختی و جنس مواد بکار رفته در ساخت آن مرتبط می‌باشند [۳].

جدول ۱. پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی افت ولتاژ فعال‌سازی

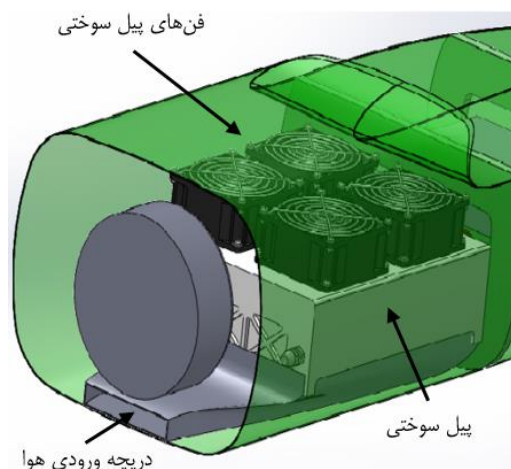
ضریب تجربی	مقدار
$\zeta_1$	-0.944 V
$\zeta_2$	$3.54 \times 10^{-3}$ V/K
$\zeta_3$	$80 \times 10^{-5}$ V/K
$\zeta_4$	$-1.96 \times 10^{-4}$ V/K

مقدار  $C_{O_2}$  در رابطه (۳) با استفاده از قانون هانری<sup>۶</sup> مطابق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.8 \times 10^6 \exp\left(\frac{-498}{T}\right)} \quad (4)$$

که در این رابطه  $P_{O_2}$  فشار اکسیژن در سمت کاتد می‌باشد.

قسمت مقدمه نیز اشاره شد، حرارت تولیدی پیل سوختی یک چالش جدی می‌باشد که مدیریت درست آن نقش بسزایی در عملکرد و طول عمر پیل‌های سوختی پلیمری دارد. با در نظر گرفتن این مسأله که پیل درون بدنه هواپیمای بدون سرنشین یا به عبارت دیگر یک محفظه‌ی بسته قرار خواهد گرفت (شکل ۱) چند مشکل وجود خواهد داشت:



شکل ۱. نحوه قرارگیری پیل سوختی در داخل بدنه پهپاد

۱- تأمین هوای مصرفی پیل سوختی: با توجه به اینکه پیل در یک محفظه بسته قرار دارد باید یک سیستم برای تأمین هوای مورد نیاز جهت انجام واکنش‌های درون پیل و همچنین خنک‌کاری پیل طراحی شود. برای این منظور در ابتدا با استفاده از یک مدل الکتروشیمیایی رفتار پیل در شرایط مختلف شبیه‌سازی شده است و مقدار هوای مورد نیاز جهت انجام واکنش‌های شیمیایی محاسبه شده است. در ادامه با استفاده از یک مدل حرارتی مقدار هوای مورد نیاز برای خنک‌کاری پیل سوختی بدست آمده است. سیستمی که برای تأمین هوای مصرفی در نظر گرفته می‌شود باید قادر باشد تا مقدار هوای مصرفی را هم در حالت ایستای پهپاد و همچنین در حالت پرواز تأمین کند.

۲- کنترل دمای بدنه پیل سوختی: سیستم خنک‌کاری پیل سوختی مورد مطالعه به گونه‌ای است که هوای خنک‌کاری از یک طرف وارد پیل شده و پس از خنک‌کاری پیل، هوای گرم از طریق فن‌ها خارج می‌شود و چون پیل در یک محفظه بسته قرار دارد، هوای خروجی گرم می‌تواند باعث افزایش دمای پیل و اختلال در عملکرد پیل شود. به همین منظور راهکاری باید برای خروج این هوای گرم در نظر گرفته شود.

افت ولتاژ در اثر مقاومت اهمی نیز از طریق روابط (۵) تا (۷) محاسبه می‌شود:

$$V_{ohm} = -IR_{ions} \quad (۵)$$

$$R_{ions} = \frac{R_m L}{A_{fc}} \quad (۶)$$

$$R_m = \frac{181.6[1+0.03\left(\frac{i}{A_{fc}}\right)+0.062\left(\frac{T}{303}\right)^2\left(\frac{i}{A_{fc}}\right)^{2.5}]}{\left[\lambda-0.634-3\left(\frac{i}{A_{fc}}\right)\right]\exp\left[4.18\left(\frac{T-303}{T}\right)\right]} \quad (۷)$$

وقتی که شدت جریان بالایی از پیل گرفته می‌شود، فشار جزئی هیدروژن و هوا کاهش پیدا می‌کند. به بیان دیگر در این حالت نرخ تولید جریان با تقاضا تطابق نداشته و این مساله باعث افت ولتاژ در پیل می‌گردد. افت مربوط به غلظت در چگالی جریان‌های بالا اهمیت پیدا می‌کند. مقدار این افت با استفاده از رابطه (۸) بدست خواهد آمد:

$$V_{con} = \frac{3RT}{4F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_m}\right) - 1.5607 \frac{RT}{4F} \quad (۸)$$

که در این رابطه R ثابت جهانی گازها و F ثابت فارادی می‌باشد.

### ۳-۱-۱. بالانس جرمی

در یک پیل سوختی نرخ مصرف هیدروژن، نرخ مصرف اکسیژن و نرخ تولید آب با استفاده از جریان استک<sup>۷</sup> و تعداد سلول‌ها محاسبه می‌شود [۸]. در روابط (۹) تا (۱۱) نحوه محاسبه این پارامترها ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این سه پارامتر به شدت تابع تعداد سل‌ها، جریان عبوری از پیل سوختی و عدد فارادی می‌باشد.

$$\dot{n}_{H_2,cons} = N_{cell} \frac{i}{2F} \quad (۹)$$

$$\dot{n}_{O_2,cons} = N_{cell} \frac{i}{4F} \quad (۱۰)$$

$$\dot{n}_{H_2O, gene} = N_{cell} \frac{i}{2F} \quad (۱۱)$$

اما نرخ جریان واکنش‌دهنده‌ها در ورودی پیل سوختی باید برابر یا بیشتر از نرخ مصرف آنها باشد تا از تخریب غشاً پلیمری جلوگیری شود. با استفاده از نرخ استوکیومتری این مشکل حل می‌شود، بنابراین نرخ واکنش‌دهنده‌ها در ورودی پیل سوختی با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{n}_{H_2} = \lambda_{H_2} \dot{n}_{H_2,cons} = \lambda_{H_2} N_{cell} \frac{i}{2F} \quad (۱۲)$$

$$\dot{n}_{O_2} = \lambda_{O_2} \dot{n}_{O_2,cons} = \lambda_{O_2} N_{cell} \frac{i}{4F} \quad (۱۳)$$

### ۳-۲. مدل حرارتی

معادله بالانس انرژی برای کل پیل سوختی به صورت معادله (۱۴) نوشته می‌شود. در این رابطه  $\dot{Q}_{i,in}$  برابر انرژی گازهای واکنش‌دهنده،  $\dot{Q}_{i,out}$  انرژی گازهای خروجی و آنتالپی آب تشکیل شده در خروجی،  $W_{el}$  الکتریسیته تولید شده،  $\dot{Q}_{dis}$  گرمای منتقل شده به محیط اطراف به وسیله جابجایی طبیعی و  $\dot{Q}_i$  گرمای جابجا شده توسط سیستم خنک‌کاری می‌باشد [۹]:

$$\sum_i \dot{Q}_{in} = \sum_i \dot{Q}_{out} + W_{el} + \dot{Q}_{dis} + \dot{Q}_i \quad (۱۴)$$

که در این رابطه:

$$\dot{Q}_{dis} = \frac{T_w - T_0}{R_{th}} \quad (۱۵)$$

در رابطه (۱۵) که برای محاسبه گرمای منتقل شده به محیط اطراف به وسیله جابجایی طبیعی می‌باشد  $T_0$  برابر دمای محیط و  $R_{th}$  برابر با مقاومت حرارتی می‌باشد که می‌توان آن را با استفاده از مقاومت حرارت جابجایی ( $R_C$ ) و مقاومت حرارت تشعشع ( $R_R$ ) از طریق معادله زیر بدست آورد:

$$R_{th} = \frac{1}{\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_R}} \quad (۱۶)$$

$$R_C = \frac{1}{h_{conv} A_C} \quad (۱۷)$$

$$R_R = \frac{1}{\sigma F_{shape} A_S (T_w - T_0) (T_w^2 + T_0^2)} \quad (۱۸)$$

$$h_{conv} = \frac{k_{air}}{L_{Car}} Nu \quad (۱۹)$$

$$Nu = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.5}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}}\right]^2 \quad (۲۰)$$

$$Pr = \frac{\nu_{air}}{\alpha_{th,air}} \quad (۲۱)$$

$$Ra = \frac{g \beta (T_w - T_0) L_{Car}^3}{\nu_{air} \alpha_{th,air}} \quad (۲۲)$$

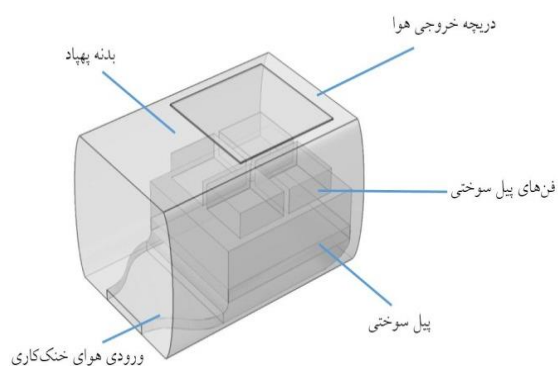
$$\beta = \frac{1}{T_w} \quad (۲۳)$$

در روابط بالا  $F_{shape}$  ضریب شکل برابر با ۱،  $h_{conv}$  ضریب انتقال حرارت جابجایی، Nu برابر با عدد نوسلت<sup>۸</sup>،  $L_{Car}$  برابر با طول مشخصه مسیر سیال در لایه مرزی سطح جسم،  $A_S$  مساحت سطح،  $k_{air}$  ضریب هدایت حرارتی هوا، Pr عدد پرانتل<sup>۹</sup>، Ra عدد رایلی<sup>۱۰</sup>،  $\sigma$  ضریب استفان بولتزمن<sup>۱۱</sup> و  $\beta$  ضریب انبساط حرارتی می‌باشد.

در پیل‌های سوختی کاتد باز، هوایی که وارد یکی از کانال‌های کاتد می‌شود، در داخل کاتد از یک سمت با  $GDL$ <sup>۱۲</sup> غشاً در تماس است و از سه سطح دیگر با صفحات دوقطبی در تماس است. در شکل ۲ نمایی از هندسه کانال کاتد پیل سوختی ارائه شده و محل هوای ورودی به کاتد، صفحات دو قطبی و غشاً در آن نشان داده شده است.

### ۳-۳. مدل سازی انتقال حرارت در داخل بدنه پهپاد

همانطور که در قسمت‌های قبلی نیز اشاره شد، سیستم خنک‌کاری پیل سوختی مورد مطالعه به گونه‌ای است که هوای خنک‌کاری از یک طرف وارد پیل شده و پس از خنک‌کاری پیل، هوای گرم از طریق فن‌ها خارج می‌شود و چون پیل در یک محفظه بسته قرار دارد، هوای خروجی گرم می‌تواند باعث افزایش دمای پیل و اختلال در عملکرد پیل شود. به همین منظور راهکاری برای خروج این هوای گرم باید در نظر گرفته شود. سیستم هوارسانی که برای پیل سوختی طراحی شده است مطابق شکل ۳ می‌باشد.



شکل ۳. نحوه قرارگیری پیل سوختی در داخل بدنه پهپاد و ورودی و خروجی هوا

برای جلوگیری از افزایش دمای بدنه پیل سوختی در پیچه‌های در بدنه پهپاد جهت خروج هوای گرم شده خنک‌کاری در نظر گرفته شده است و تأثیر اندازه این دریچه در ادامه بررسی شده است. با در دست داشتن دمای خروجی هوای خنک‌کاری و همچنین میزان گرمای تلف شده از طریق دیواره‌های بدنه پیل سوختی این شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شده است و تغییرات دمای بدنه پیل سوختی بر اساس اندازه دریچه خروجی بدست آمده است.

### ۴. نتایج

#### ۴-۱. اعتبارسنجی

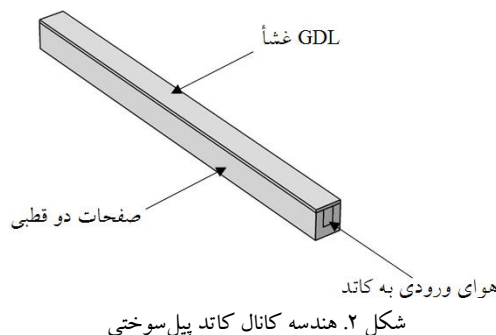
برای اعتبارسنجی مدل عددی الکتروشیمیای نتایج حاصل با نتایج تست آزمایشگاهی پیل سوختی یک کیلوواتی ساخت شرکت [۱۰] هوریزون<sup>۱۳</sup> مقایسه شده است. براساس جدول ۲ نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و این صحت مدل‌سازی انجام شده را نشان می‌دهد.

با توجه به موارد فوق انتقال حرارت جابجایی اجباری در داخل پیل سوختی مطابق روابط ذیل محاسبه می‌شود.

$$\dot{Q}_{HT} = \dot{Q}_{MEA-air} + \dot{Q}_{plate-air} \quad (24)$$

$$\dot{Q}_{MEA-air} = h_{MEA-air} A_{MEA-air} \Delta T_{log} \quad (25)$$

$$\dot{Q}_{plate-air} = h_{plate-air} A_{plate-air} \Delta T_{log} \quad (26)$$



شکل ۲. هندسه کانال کاتد پیل سوختی

در روابط بالا  $\Delta T_{log}$  بصورت معادله تعریف می‌شود:

$$\Delta T_{log} = \frac{\Delta T_{in} - \Delta T_{out}}{\log\left(\frac{\Delta T_{in}}{\Delta T_{out}}\right)} \quad (27)$$

$$\Delta T_{in} = T_w - T_{cathode,in} \quad (28)$$

$$\Delta T_{out} = T_w - T_{cathode,out} \quad (29)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h_{plate-air} = \frac{1}{\frac{1}{h_{Conv}} + \frac{\delta_{GDL}}{k_{GDL}} + \frac{\delta_{plate}}{k_{plate}}} \quad (30)$$

$$h_{MEA-air} = \frac{1}{\frac{1}{h_{Conv}} + \frac{\delta_{GDL}}{k_{GDL}}} \quad (31)$$

که در این روابط  $\delta_i$  ضخامت هر قسمت می‌باشد و ضریب

انتقال حرارت  $h_{Conv}$  بصورت معادله (۳۲) تعریف می‌شود:

$$h_{Conv} = Nu \frac{k_{air}}{D_h} \quad (32)$$

$$Nu = 1.4 \left( Re \frac{D_h}{L_{ch}} \right)^{0.4} Pr^{0.33} \quad (33)$$

در نهایت مقدار گرمای انتقال یافته از تمامی کانال‌های کاتد باید

با تغییرات آنتالپی هوا برابر باشد. با در نظر گرفتن این شرایط

بالانس حرارتی پیل سوختی با مینیمم کردن مقدار خطای تعریف

شده در معادله (۳۵) کامل می‌شود:

$$\dot{Q}_{coolant} = \dot{m}_{air,out} C_{p,air} (T_{cathode,out} - T_{cathode,in}) \quad (34)$$

$$Error = 100 \left| \frac{\dot{Q}_{HT} N_{ch} N_{cell} - \dot{Q}_{coolant}}{\dot{Q}_{coolant}} \right| \quad (35)$$

برای انجام مدل‌سازی عددی معادلات با استفاده از نرم‌افزار

Engineering Equation Solver (EES) حل شدند.

جدول ۲. اعتبارسنجی نتایج

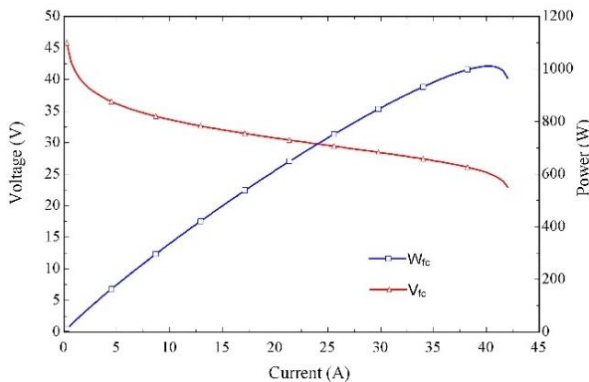
توان (W)	ولتاژ (V)	نرخ مصرف هیدروژن (lit/min)	مدل عددی حاضر
۹۶۷/۳	۲۷/۶۴	۱۳/۳	نتایج آزمایشگاهی
۱۰۰۰	۲۸/۸	۱۳	درصد خطا
% ۳/۲۷	% ۴/۰۳	% ۲/۳۱	

در شکل می‌شود، سه ناحیه افت ولتاژ وجود دارد. در بخش اول مقدار افت ولتاژ ناچیز بوده به گونه‌ای که مقدار ولتاژ در حالت مدار باز تقریباً برابر با مقدار تئوریک آن می‌شود. در بخش دوم نیز شاهد یک افت ولتاژ خطی با سرعت کم می‌باشیم. با افزایش ولتاژ در بخش سوم ولتاژ به شدت افت می‌کند.

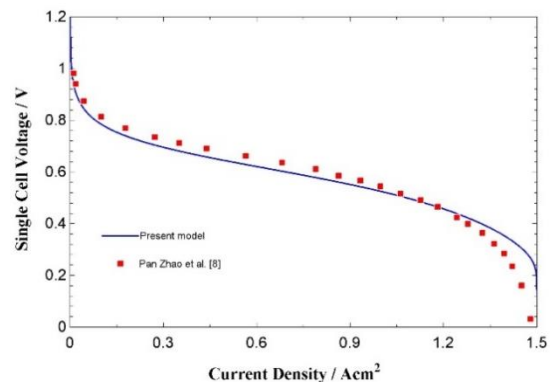
با حل معادلات الکتروشیمیایی پیل سوختی مورد مطالعه نرخ مصرف هیدروژن بر اساس جریان مطابق شکل ۶ بدست می‌آید. در این نمودار همچنین میزان هوای مورد نیاز برای انجام واکنش‌های شیمیایی و خنک‌کاری پیل سوختی نیز بر اساس جریان نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان توان خروجی از پیل مصرف هوا و سوخت افزایش خواهد یافت. در جدول ۳ شرایط شبیه‌سازی مدل الکتروشیمیایی پیل سوختی ارائه شده است.

همچنین نتایج مدل حاضر با نتایج حاصل از کار پان ژاو و همکاران [۸] مقایسه شد. نتیجه این مقایسه که به صورت نمودار شکل ۴ نمایش داده شده است حاکی از همخوانی خوب نتایج است.

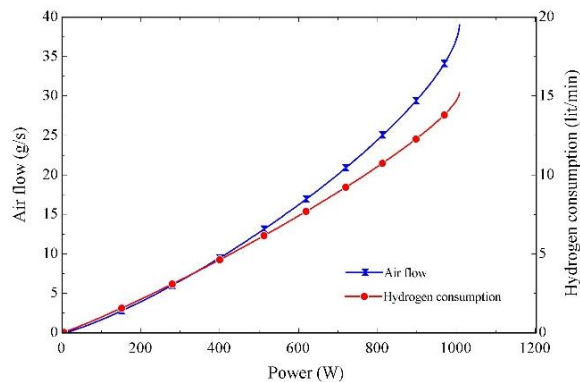
با حل معادلات مربوط به افت ولتاژ برای پیل مورد مطالعه، نمودار ولتاژ و توان تولیدی پیل بر اساس جریان آن مطابق شکل ۵ بدست می‌آید. منحنی قطبیت پیل سوختی بیان‌کننده ولتاژ پیل سوختی بر اساس جریان گرفته شده از آن می‌باشد. همانطور که



شکل ۵. تغییرات ولتاژ و توان بر اساس جریان



شکل ۴. اعتبارسنجی مدل حاضر با استفاده از نتایج پان ژاو و همکاران [۸]

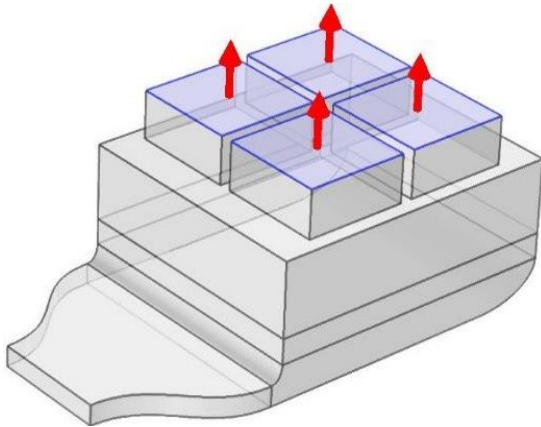


شکل ۶. نرخ مصرف هیدروژن و هوا بر اساس توان مصرفی

۳،  $۱۰۵ \times ۶/۲$  و  $۱۰۶ \times ۱/۹$  جزء در نظر گرفته شد و دمای متوسط سطح پیل سوختی برای این ۳ حالت حل شد. نتایج نشان داد که حالت تعداد شبکه‌بندی  $۱۰۵ \times ۶/۲$  تنها به اندازه ۱٪

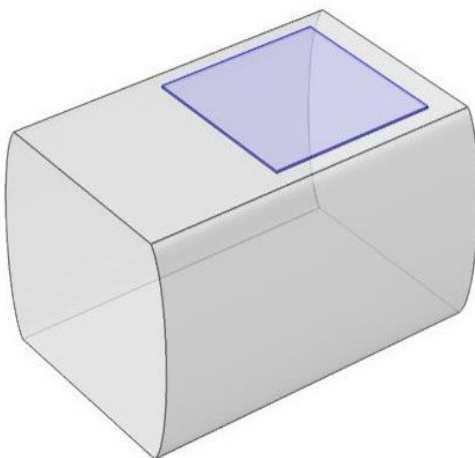
#### ۴-۲. بررسی استقلال از شبکه‌بندی

برای اطمینان از درستی حل ابتدا باید استقلال از شبکه بررسی شود. برای این منظور ۳ حالت اندازه شبکه‌بندی شامل  $۱۰۵ \times$



شکل ۸. مدل پیل سوختی و سیستم هوارسانی

در ابتدا یک دریچه مربعی شکل (مطابق شکل ۹) روی سطح بدنه پهپاد و دقیقاً بالای فن‌ها به اندازه  $۱۹۵ \times ۱۹۵$  میلی‌متر در نظر گرفته شد. اندازه این دریچه دقیقاً برابر با سطح اشغال شده توسط فن‌ها می‌باشد. مسلماً نمی‌توان از همچنین هندسه‌ای بر روی بدنه پهپاد برای خروج هوا استفاده کرد و این هندسه فقط برای مقایسه سایر هندسه‌ها با یک حالت مرجع در نظر گرفته شده است. در جدول ۴ پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی انتقال حرارت نشان داده شده است.



شکل ۹. محل قرارگیری پیل سوختی و دریچه خروجی هوا

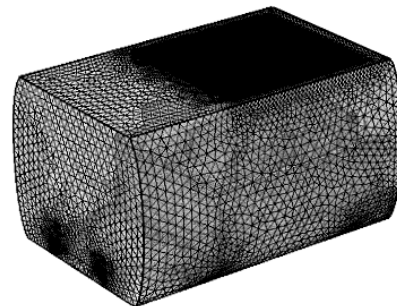
جدول ۴. پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی انتقال حرارت

پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی انتقال حرارت	
توان کاری پیل	۹۸۰ (W)
گرمای اتلاف شده از سطوح جانبی پیل سوختی	۱۶/۲۳ (W)
دبی هوای خروجی فن‌ها	۳۵ (g/s)
دمای هوای خروجی فن‌ها	۵۰ (°C)
اندازه محفظه قرارگیری پیل سوختی	۳۹۷×۳۰۰×۲۲۰

از حالت تعداد شبکه‌بندی  $۱۰۶ \times ۱/۹$  انحراف داشت، به همین دلیل تعداد شبکه‌بندی  $۱۰۵ \times ۶/۲$  برای حل عددی انتخاب شد. در شکل ۷ شبکه مورد استفاده برای حل عددی سیستم تحلیل شده در این مقاله نشان داده شده است. در شبکه بندی از شبکه بی سازمان استفاده شده است.

جدول ۳. شرایط شبیه‌سازی مدل الکتروشیمیایی پیل سوختی

نماد	پارامتر	مقدار
$N_{cell}$	تعداد سلول‌ها	۴۸
F	ثابت فارادی	$96485 \text{ Cmol}^{-1}$
R	ثابت جهانی گازها	$8/314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$
$i_m$	چگالی جریان حدی	$0/54 \text{ Acm}^2$
L	ضخامت غشاء	$0/00254 \text{ cm}^2$
$A_{fc}$	مساحت سطح سلول	$778/4 \text{ cm}^2$
$\lambda_{H_2}$	نرخ استوکیومتری هیدروژن	۱/۲
$\lambda_{O_2}$	نرخ استوکیومتری اکسیژن	۲



شکل ۷. شبکه مورد استفاده برای حل عددی

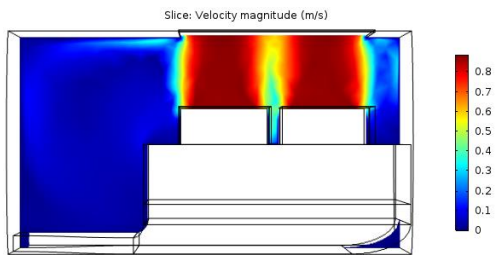
### ۳-۴. نتایج مدل‌سازی انتقال حرارت پیل سوختی در داخل

#### بدنه پهپاد

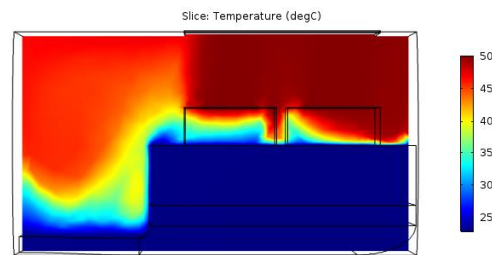
برای بررسی انتقال حرارت هوای خروجی از طریق فن‌های پیل سوختی و تاثیر آن بر دمای بدنه پیل سوختی مدلی مطابق شکل‌های ۸ و ۹ در نظر گرفته شد. شکل ۸ مدل پیل سوختی به همراه سیستم هوارسانی و همچنین شکل ۹ مدل بدنه پهپاد یعنی قسمتی که پیل در آن قرار می‌گیرد را نشان می‌دهد. برای این که دمای بدنه پیل سوختی در محدوده دمایی اعلام شده از سوی سازنده قرار گیرد و از افزایش بیش از حد آن جلوگیری شود، در نظر گرفتن یک دریچه خروجی هوا در بدنه پهپاد الزامی می‌باشد. برای بررسی این موضوع چند دریچه خروجی با هندسه متفاوت در نظر گرفته شد و تأثیر هندسه دریچه خروجی بر دمای سطح پیل سوختی مورد مطالعه قرار گرفت.

بالارفتن دمای پیل سبب کاهش توان خروجی و افت عملکرد آن می‌گردد. هدف عمده این بخش استخراج نمودارهای مربوط به توزیع دما و سرعت در محل نصب پیل و اطراف آن می‌باشد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ توزیع دما در سطح پیل سوختی و داخل بدنه پهپاد و همچنین توزیع سرعت هوای خروجی از فن‌های پیل سوختی نشان داده شده است. در این تحلیل ابعاد دریچه هوای خروجی بالای پیل  $195 \times 195$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در ادامه مقاله یک سری دریچه با هندسه‌های متفاوت برای خروج هوا در نظر گرفته شده است. در این هندسه‌ها دریچه خروجی بصورت یک مربع  $195 \times 195$  mm که شیارهایی به عرض ۵ mm روی آن قرار دارد، در نظر گرفته شده است (شکل ۱۲). با تغییر تعداد این شیارهای خروجی هوا، تأثیر آنها بر دمای سطح خارجی پیل بررسی شده است.

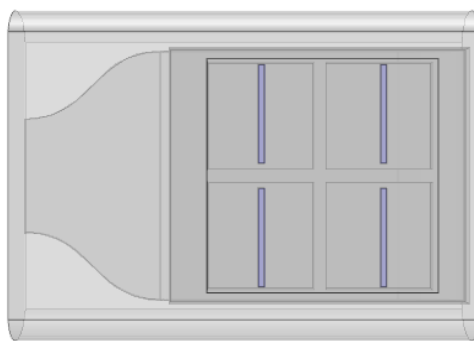
برای چند حالت مختلف با تعداد شیارهای خروجی متفاوت نتایج مقاله بصورت کانتورهای دما و سرعت آورده شده است (شکل‌های ۱۳ و ۱۴). همانطور که انتظار می‌رود با کاهش تعداد این شیارهای خروجی مساحت کلی دریچه خروجی هوا کاهش پیدا می‌کند. این مساله در ادامه باعث کندی خروج هوای گرم از داخل بدنه پهپاد به سمت فضای بیرونی و سپس باعث بالا رفتن دمای سطح پیل خواهد شد. بالا رفتن دمای سطح پیل از حد مجاز سبب کاهش کارایی آن خواهد شد. بررسی عملکرد پیل سوختی نشان می‌دهد که افزایش مساحت شیارها از سوی دیگر سبب کاهش دمای سطح پیل خواهد شد که این مساله نیز سبب کاهش کارایی آن می‌گردد. تعداد شیارها باید طوری انتخاب شود که دمای سطح پیل در حد مناسب بوده و توان تولیدی آن حداکثر باشد.



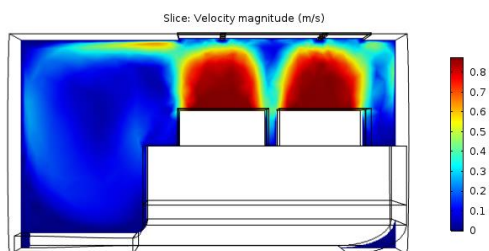
شکل ۱۱. توزیع سرعت در داخل بدنه پهپاد برای حالت دریچه باز  $195 \times 195$  mm



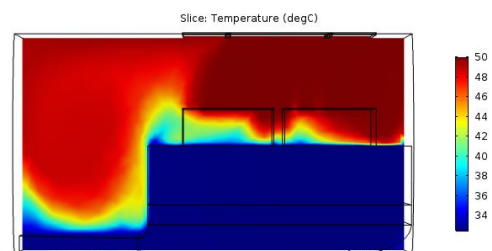
شکل ۱۰. توزیع دما در سطح پیل سوختی و داخل بدنه پهپاد برای حالت دریچه باز  $195 \times 195$  mm



شکل ۱۲. هندسه دریچه خروجی هوا با ۴ عدد شیار خروجی هوا



شکل ۱۴. توزیع سرعت در داخل بدنه پهپاد برای دریچه با ۴ شیار ۵ mm

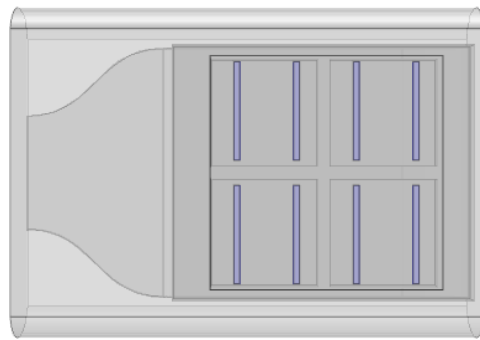


شکل ۱۳. توزیع دما در سطح پیل سوختی و داخل بدنه پهپاد برای دریچه با ۴ شیار ۵ mm

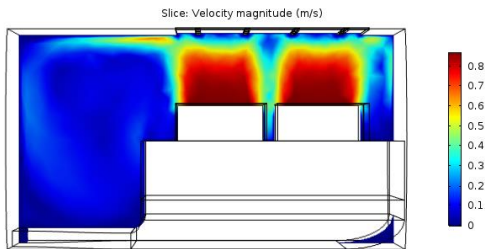


پیل سبب افت عملکرد آن خواهد شد. در این ادامه این مقاله شش حالت مختلف مرد بررسی قرار گرفته و شیارهایی با تعداد ۸، ۱۲ و ۱۶ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. هندسه و نتایج مربوط به این سه حالت در شکل‌های ۱۵ تا ۲۳ ارائه شده است. در جدول ۵ میانگین دمای سطح خارجی پیل سوختی برای هندسه‌های با شیارهای مختلف آورده شده است. همانطور که پیش‌بینی می‌شد با افزایش تعداد شیارهای خروجی هوا، انتقال هوای گرم به فضای بیرونی بهتر صورت گرفته و این امر سبب کاهش دمای سطح پیل می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود در تعداد شیار ۱۲ و ۱۶ کاهش دمای سطح خارجی پیل مقدار ثابتی به خود گرفته است.

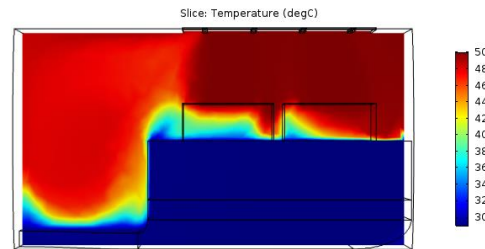
با مقایسه نتایج دو حالت قبل مشاهده می‌شود که با قرار دادن ۴ شیار ۵ میلی‌متری روی سطح بالای پیل، هوای اطراف پیل به راحتی خارج نشده و این مساله سبب بالارفتن دمای کاری پیل خواهد شد. بالا رفتن دمای کاری پیل مشکل بزرگی است که با قرار گرفتن پیل در یک محیط بسته برای آن شکل خواهد گرفت. در ادامه با افزایش تعداد شیارهای خروجی هوا توزیع دما و سرعت برای حالت‌های مختلف آورده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تعداد شیارهای خروجی هوا، جریان هوای خروجی از شیارها بیشتر شده و متعاقباً دمای سطح پیل سوختی نیز نسبت به حالت با شیار کمتر کاهش پیدا خواهد کرد. همانطور که در بخش قبل به آن اشاره شد، کاهش بیش از حد دمای کاری



شکل ۱۵. هندسه دریچه خروجی هوا با ۸ عدد شیار خروجی هوا

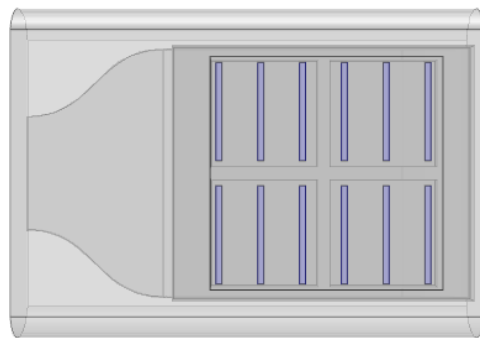


شکل ۱۷. توزیع سرعت در داخل بدنه پهپاد برای دریچه با ۸ شیار ۵ mm

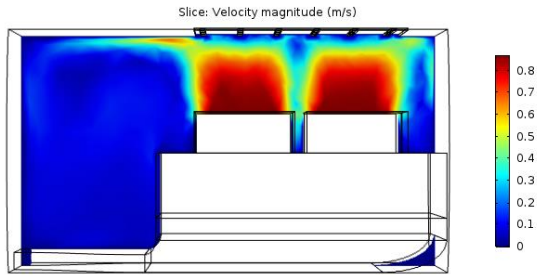


شکل ۱۶. توزیع دما در سطح پیل سوختی و داخل بدنه پهپاد برای دریچه با ۸ شیار ۵ mm

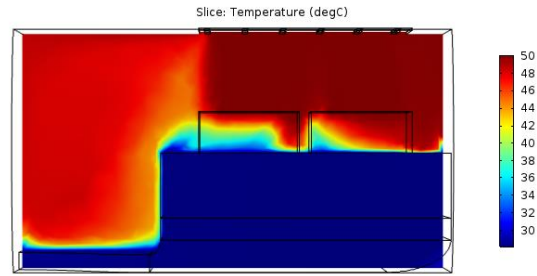
۵ mm



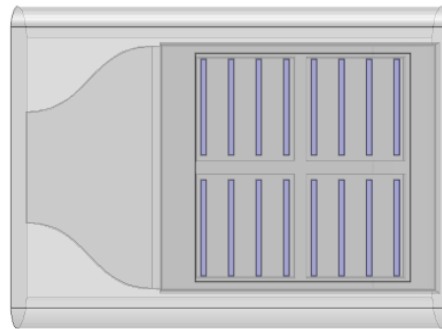
شکل ۱۸. هندسه دریچه خروجی هوا با ۱۲ عدد شیار خروجی هوا



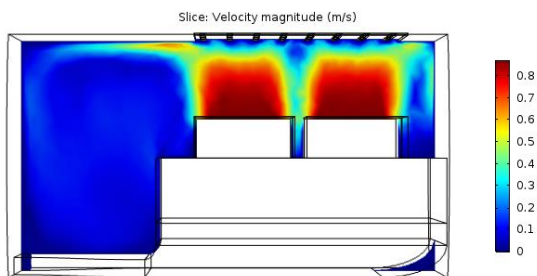
شکل ۲۰. توزیع سرعت در داخل بدنه پهپاد برای دریچه با ۱۲ شیار ۵ mm



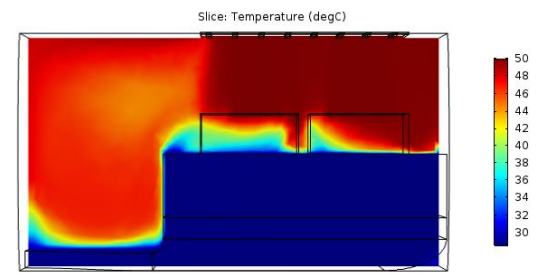
شکل ۱۹. توزیع دما در سطح پیل سوختی و داخل بدنه پهپاد برای دریچه با ۱۲ شیار ۵ mm



شکل ۲۱. هندسه دریچه خروجی هوا با ۱۶ عدد شیار خروجی هوا



شکل ۲۳. توزیع سرعت در داخل بدنه پهپاد برای دریچه با ۱۶ شیار ۵ mm



شکل ۲۲. توزیع دما در سطح پیل سوختی و داخل بدنه پهپاد برای دریچه با ۱۶ شیار ۵ mm

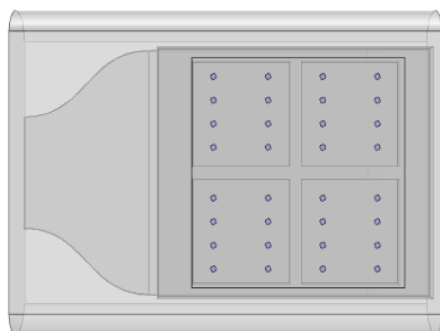
۲۴ تا ۳۲ هندسه‌ها و نتایج مربوط به خروجی‌های جدید ارائه شده است.

جدول ۵. میانگین دمای سطح خارجی پیل سوختی برای هندسه‌های مختلف دریچه خروجی

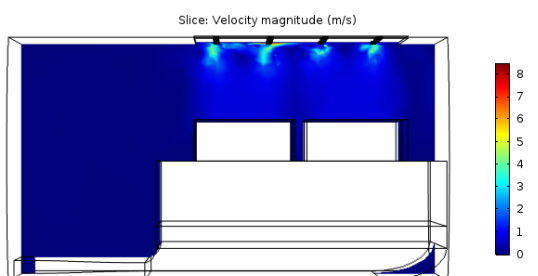
میانگین دمای سطح خارجی پیل سوختی	هندسه دریچه خروجی
۳۳ °C	دریچه باز ۱۹۵ × ۱۹۵ mm
۳۲/۶۱ °C	دریچه با ۴ شیار ۵ mm
۲۹/۰۳ °C	دریچه با ۸ شیار ۵ mm
۲۸/۶۱ °C	دریچه با ۱۲ شیار ۵ mm
۲۸/۲۷ °C	دریچه با ۱۶ شیار ۵ mm

با توجه به اینکه در فرآیند ساخت دریچه خروجی هوا بر روی بدنه پهپاد چالش‌هایی از قبیل در نظر گرفتن تعادل آیرودینامیکی و همچنین استحکام ساختار بدنه آن وجود دارد، یک سری هندسه دیگر برای خروجی هوا در نظر گرفته شده است. خروجی‌های جدید طوری لحاظ شده است که با وجود مساحت کم، کارکرد مناسبی برای خروج هوای گرم داشته باشند. این دریچه‌ها به صورت سوراخ‌هایی به شکل دایره و به قطر ۵ میلی‌متر و با تعداد متفاوت در نظر گرفته شده است.

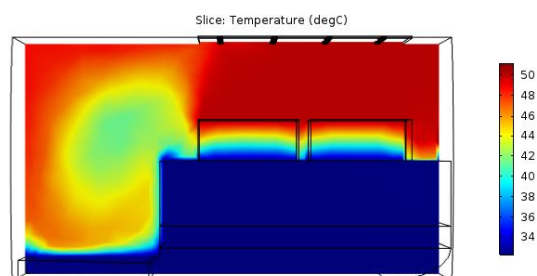
در ادامه یک سری از این هندسه‌های خروجی به همراه کانتورهای توزیع دما و سرعت آن آورده شده است. در شکل‌های



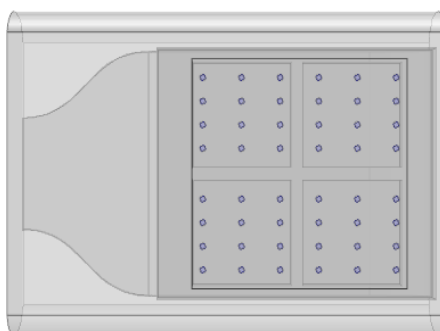
شکل ۲۴. هندسه دریچه خروجی هوا با ۳۲ عدد سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۵ mm



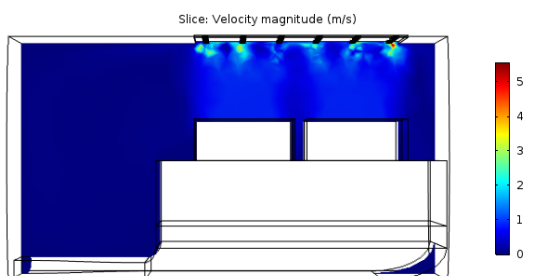
شکل ۲۶. توزیع سرعت در سطح پیل سوختی و داخل بدنه پهپاد برای حالت دریچه با ۳۲ عدد سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۵ mm



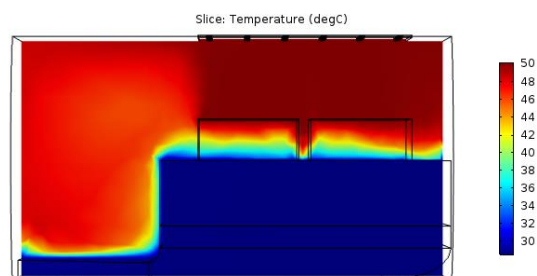
شکل ۲۵. توزیع دما در سطح پیل سوختی و داخل بدنه پهپاد برای حالت دریچه با ۳۲ عدد سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۵ mm



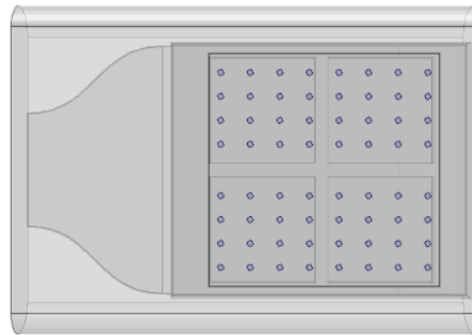
شکل ۲۷. هندسه دریچه خروجی هوا با ۴۸ عدد سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۵ mm



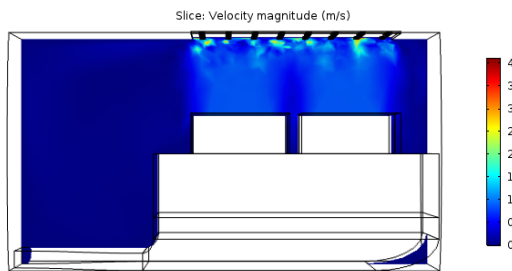
شکل ۲۹. توزیع سرعت در سطح پیل سوختی و داخل بدنه پهپاد برای حالت دریچه با ۴۸ عدد سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۵ mm



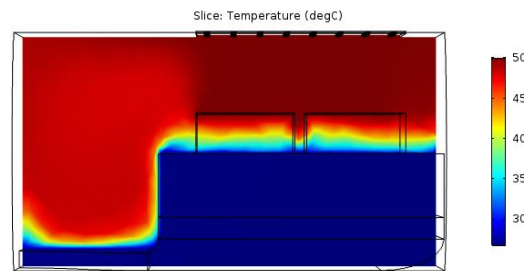
شکل ۲۸. توزیع دما در سطح پیل سوختی و داخل بدنه پهپاد برای حالت دریچه با ۴۸ عدد سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۵ mm



شکل ۳۰. هندسه دریچه خروجی هوا با ۶۴ عدد سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۵ mm



شکل ۳۲. توزیع سرعت در سطح پیل سوختی و داخل بدنه پهپاد برای حالت دریچه با ۶۴ عدد سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۵ mm



شکل ۳۱. توزیع دما در سطح پیل سوختی و داخل بدنه پهپاد برای حالت دریچه با ۶۴ عدد سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۵ mm

بررسی شده و سپس با استفاده از بالانس جرمی و حرارتی مقدار دبی هوای مصرفی پیل سوختی جهت انجام واکنش‌های شیمیایی و خنک‌کاری آن محاسبه گردید. در ادامه برای خروج هوای گرم از محفظه نصب پیل یک سری تغییرات در بدنه پهپاد پیشنهاد شد. برای هر یک از هندسه‌های پیشنهادی توزیع دما و توزیع سرعت در داخل بدنه پهپاد بدست آمد.

با توجه به محدودیت‌های دمایی اعلام شده توسط شرکت سازنده پیل سوختی و با در نظر گرفتن امکان ساخت هندسه دریچه مورد نظر و تأثیرات آن بر سایر اجزاء بدنه پهپاد، هندسه مناسبی برای آن انتخاب شد. طبق اعلام شرکت سازنده در صورتی که دمای اطراف پیل بالاتر از  $45^{\circ}\text{C}$  باشد، جهت جلوگیری از آسیب‌های احتمالی پیل به صورت خودکار خاموش خواهد شد. با در نظر گرفتن این مسأله تمامی هندسه‌های پیشنهادی در این کار به علت پایین بودن دمای سطح خارجی پیل از  $45^{\circ}\text{C}$  قابلیت استفاده در پهپاد را دارند. البته موارد دیگری مانند محدودیت‌های ساخت دریچه مورد نظر، استحکام بدنه پهپاد مورد نظر و همچنین تأثیر افزایش دمای محفظه قرارگیری پیل بر سایر اجزاء در انتخاب هندسه بهینه دخیل هستند. با توجه به شرایط کارکرد سیستم می‌توان هندسه مورد نظر را انتخاب کرد.

در جدول ۶ میانگین دمای سطح خارجی پیل سوختی برای هندسه‌های با تعداد سوراخ‌های مختلف آورده شده است. همانطور که پیش‌بینی می‌شد با افزایش تعداد سوراخ‌های خروجی هوا، انتقال هوای گرم به فضای بیرونی بهتر صورت گرفته و این امر سبب کاهش دمای سطح پیل می‌شود.

جدول ۶. میانگین دمای سطح خارجی پیل سوختی برای هندسه‌های مختلف دریچه خروجی

میانگین دمای سطح خارجی پیل سوختی	هندسه دریچه خروجی
$22^{\circ}\text{C}$	دریچه باز $195 \times 195 \text{ mm}$
$32/36^{\circ}\text{C}$	دریچه با ۳۲ عدد سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۵ mm
$28/64^{\circ}\text{C}$	دریچه با ۴۸ عدد سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۵ mm
$26/85^{\circ}\text{C}$	دریچه با ۶۴ عدد سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۵ mm

## ۵. جمع بندی

مطالعه حاضر با هدف طراحی یک سیستم بهینه خنک‌سازی پیل سوختی غشاء پلیمری جهت کاربرد در سیستم پیشران‌ش یک پهپاد سبک انجام گردید. ابتدا با استفاده از یک مدل الکتروشیمیایی عملکرد پیل سوختی در شرایط مختلف کاری

- [1] C. K. Dyer., Fuel cells for portable applications, Journal of Power Sources, Vol. 106 (1), pp.31-34, 2002.
- [2] L. Wang., A. Husar., T. Zhou. and H. Liu., A parametric study of PEM fuel cell performances, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28 (11), pp. 1263-1272, 2003.
- [3] S. Ibrahim., A. Rashid. and Z. Hongwei., Simplified mathematical model of proton exchange membrane fuel cell based on horizon fuel cell stack, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 4 (4), pp. 668-679, 2016.
- [4] G. Zhang. and S.G. Kandlikar., A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, pp. 2412-2429. 2012.
- [5] A.P. Sasmito., K.W. Lum., E. Birgersson. and A.S. Mujumdar., Computational study of forced air-convection in open-cathode polymer electrolyte fuel cell stacks, Journal of Power Sources, Vol. 195 (17), pp. 5550-5563, 2010.
- [6] J. Barroso., J. Renau., A. Lozano., J. Miralles., J. Martin., F. Sanchez. and F. Barreras., Experimental determination of the heat transfer coefficient for the optimal design of the cooling system of a PEM fuel cell placed inside the fuselage of an UAV, Journal of Applied Thermal Engineering, Vol. 89, pp. 1-10, 2015.
- [7] S. Shahsavari., A. Desouza., M. Bahrami. and E. Kjeang., Thermal analysis of air-cooled PEM fuel cells, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37 (23), pp. 18261-18271, 2012.
- [8] P. Zhao., J. Wang., L. Gao. and Y. Dai., Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle to recover waste heat from proton exchange membrane fuel cell, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37 (4), pp. 3382-3391, 2012.
- [9] F. Barreras., A. Lozano., J. Barroso., V. Roda. and M. Maza., Theoretical model for the optimal design of air cooling systems of Polymer Electrolyte Fuel Cells. application to a high Temperature PEMFC, Journal of Fuel Cells, Vol. 13 (2), pp. 227-237, 2013.
- [10] H-1000 fuel cell stack-user manual. Horizon Educational, 2013 n.d, see: <https://www.fuelcellstore.com/manuals/horizon-pem-fuel-cell-h-1000-manual.pdf>.

---

<sup>1</sup>. Proton Exchange Membrane Fuel Cell  
<sup>2</sup>. Polarization Curve  
<sup>3</sup>. Activation Overvoltage  
<sup>4</sup>. Ohmic Overvoltage  
<sup>5</sup>. Concentration Overvoltage  
<sup>6</sup>. Henry's law  
<sup>7</sup>. Stack  
<sup>8</sup>. Nusselt Number  
<sup>9</sup>. Prandtl Number  
<sup>10</sup>. Rayleigh Number  
<sup>11</sup>. Stefan Boltzmann Constant  
<sup>12</sup>. Gas Diffusion Layer  
<sup>13</sup>. Horizon