نشریه علمی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال دوازدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰؛ ص ۱۳۶- ۱۲۵

علمی- پژوهشی

مروری بر فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی دارای کاربرد در پهپادها و زیردریایی‌ها

سیدمحمد صادق‌زاده[1*]، سعید زمانیان[2]

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شاهد، ۲- پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۷ ، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۳)

چکیده

یکی از عوامل اصلی در طراحی پهپادها و زیردریایی‌ها، انتخاب مناسب وسیله ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی به‌عنوان منبع انرژی سامانه‌های پیشرانآن‌ها است. این مقاله مروری به فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، اعم از باتری یا پیل سوختی که در صنایع پهپادی و زیردریایی قابل استفاده هستند، می‌پردازد. باتری‌ها به دلیل وزن و فضای اشغال کمتر کاربرد بیشتری در پهپادها دارند و می‌توانند به‌عنوان منبع تغذیه اصلی یا ثانویه عمل کنند. در میان ترکیبات شیمیایی مختلف، باتری‌های لیتیوم یون و پلیمر، به‌عنوان رایج‌ترین فناوری‌های باتری شناخته می‌شوند که چگالی انرژی بالاتری دارند. هر چند چگالی انرژی پیل‌های سوختی در مقایسه با باتری‌ها بسیار بیشتر بوده و مداومت و ارتفاع پروازی را افزایش می‌دهد ولی به علت قیمت و حجم زیاد، هنوز در صنعت پهپادی متداول نشده‌اند. همین ویژگی پیل‌های سوختی باعث شده است تا ازآن‌ها به‌عنوان منبع انرژی در فناوری پیشرانه مستقل از هوای زیردریایی‌ها استفاده شود. همچنین در خصوص پهپادها، تغییرات شدید دمایی می‌تواند موجب کاهش بازده عملکردی و طول عمر باتری و حتی پیل سوختی شود. برای افت دما که ناشی از افزایش ارتفاع پروازی است، عایق‌بندی باتری و برای افزایش دما که ناشی از جریان کشی بالا می‌باشد، سامانه‌های مدیریت حرارت ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: پهپاد، زیردریایی، باتری، پیل سوختی، پیشرانه مستقل از هوا

Review of Energy Storage Technologies Applicable in Drones and Submarines

M. Sadeghzadeh[*], S. Zamanian

Shahed University

(Received:27/01/2022, Accepted:25/08/2022)

Abstract

One of the main factors in designing drones and submarines is the appropriate choice of an electrical energy storage device as the energy source of their propulsion systems. This review paper addresses the energy storage technologies, whether battery or fuel cell, applicable in drone and submarine industries. Batteries are widely used in drones due to their lower weight and occupation space and can act as a primary or secondary power supply. Among various chemical compounds, lithium-ion and lithium polymer batteries are the most common battery technologies with a higher energy density. Although the energy density of fuel cells is much higher than that of batteries and increases flight endurance and altitude, they are not yet common in the drone industry due to the high price and volume. This feature of fuel cells has led to their usage as an energy source in the air-independent propulsion technology of submarines. Also, extreme temperature variations for drones can reduce the efficiency and lifetime of batteries and even fuel cells. Battery insulation is provided for temperature drop due to an increase in altitude, and heat management systems are provided for temperature increase due to high current flow.

Keywords: Drone, Submarine, Battery, Fuel Cell, Air-Independent Propulsion

*Corresponding Author E-mail: sadeghzadeh@shahed.ac.ir

۱. مقدمه

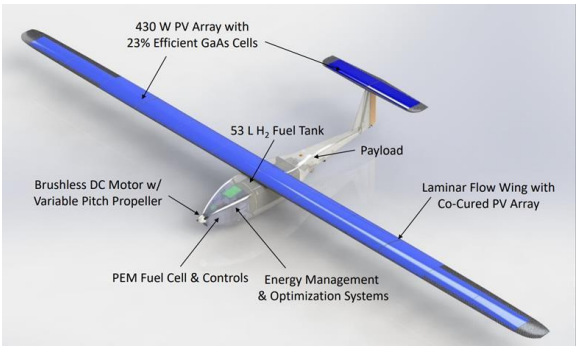
قابلیت اطمینان تأمین انرژی یکی از عوامل مهمی است که تأثیر زیادی در عملیات‌های نظامی دارد. در طول تاریخ، ارتش‌ها به سوخت‌های فسیلی در شرایطی نظیر مأموریت‌های برون مرزی، قطع شبکه، زمین‌های نامناسب یا حملات سایبری که می‌تواند بر سامانه شبکه برق تأثیر بگذارد، متکی بودند. این وابستگی با معرفی منابع تجدیدپذیر مانند باد و خورشید و فناوری‌های جدید برای ذخیره انرژی در اشکال مختلف تغییر کرده است. به این ترتیب قابلیت اطمینان و وابستگی متقابل سامانه‌های نظامی در رابطه با شبکه برق و مصرف سوخت‌های فسیلی افزایش می‌یابد. این سامانه‌های جدید را می‌توان در مناطق دورافتاده یا در سرزمین‌های متخاصم مورد استفاده قرار داد که نیاز حمل و نقل سوخت برای حفظ پایگاه نظامی و در نتیجه، وابستگی به سوخت‌های فسیلی و سامانه توزیع محلی را کاهش می‌دهد [۱]. فناوری‌های ذخیره‌سازی جدید می‌توانند بخش نظامی را تغییر داده، جایگزین فناوری‌های قدیمی آلاینده و قدیمی شوند و تولید انرژی را انعطاف‌پذیرتر و پایدارتر کنند. باتری‌های شارژ مجدد[1] و پیل‌های سوختی[2]، ادوات ذخیره‌سازی هستند که در زمینه‌های مختلف نظامی کاربرد دارند.

باتری‌های قابل شارژ که الکترولیت‌های محلول نمک و قلیایی را در خود جای می‌دهند، با فناوری بالا در حال توسعه هستند. این باتری‌ها برای کاربردهای مختلف نظامی مناسب هستند که با حداقل وزن، اندازه و هزینه و همچنین قابلیت اطمینان بالا از اهمیت حیاتی برخوردار هستند. باتری‌های قابل شارژ مستقر شده توسط سامانه‌های نظامی حیاتی که در محیط‌های حرارتی و مکانیکی خشن مانند تانک‌های میدان نبرد، وسایل نقلیه زیردریایی بدون سرنشین[3]، پرنده‌های بدون سرنشین[4] ویژه مأموریت‌های نظارت و شناسایی، پهپادهای مجهز به حسگرهای الکترواپتیک و سایر سامانه‌های نظامی کار می‌کنند، باید الزامات قابلیت اطمینان، ایمنی و طول عمر دقیق را برآورده کنند. در رابطه با پرنده‌های بدون سرنشین که یکی از مباحث اصلی این مقاله است و در ایران با عنوان پهپاد نیز شناخته می‌شود، باتری‌های قابل شارژ باید سخت‌گیرانه‌ترین الزامات طراحی را در محیط‌های شدید آیرودینامیک، یعنی بسته‌بندی فشرده، حداقل وزن، قابلیت اطمینان فوق‌العاده بالا و ایمنی برآورده کنند [۲].

انواع مختلفی از باتری‌های قابل شارژ در پهپادها استفاده می‌شود که هر کدام مزایا و معایب مربوط به خود را دارند. این باتری‌ها عبارتند از: اسید سرب، نیکل کادمیوم (Ni-Cd)، قلیایی، لیتیوم پلیمر، لیتیوم یون، نیکل هیدرید فلز (NiMH)، اکسید روی (Zn-O_2) لیتیوم-هوا، لیتیوم-تیونیل-کلرید (Li-$SOCl_2$) [۳ و ۴]، آلومینیوم-هوا [۵]، باتری روی-هوا [۶] و باتری روی-نقره [۷ و ۸]. هر چند در ادامه این مقاله و در بخش بعد، به ترکیبات بهبود یافته‌تری از این باتری‌ها نیز اشاره خواهد شد.

پهپادها می‌توانند برای مداومت پروازی بالا و تأمین انرژی قابل اطمینان از سامانه ترکیبی بنزین-برق استفاده کنند [۹ و ۱۰]. در فناوری‌های پهپادی و به ویژه در سال‌های اخیر، سامانه‌های ذخیره‌ساز بخشی از توان پیشران را تأمین می‌کنند و بخش دیگر سعی می‌شود تا توسط منابع دیگر نظیر انرژی خورشیدی تأمین شود [۱۴-۱۱]. شکل (۱) یک نمونه پهپاد Tiger را نشان می‌دهد که بال‌های آن مجهز به سلول‌های خورشیدی است [۱۴].

پیل‌های سوختی[5] به‌عنوان منبع انرژی الکتریکی پیشران پهپادها به دلیل چگالی انرژی بالا که بیش از ۸۰۰ Wh/kg در مقایسه با ۱۵۰ Wh/kg برای باتری‌های پیشرفته است، کاربردهای رو به رشدی را نشان می‌دهند. از این رو، وزن سامانه پیل سوختی در حدود ۳/۵ برابر کمتر از یک باتری لیتیوم یون با پارامترهای مشابه، ۸ برابر کمتر از یک باتری NiMH و حتی ۱۶ برابر کمتر از یک بسته باتری سرب اسید است [۱۵-۱۸].

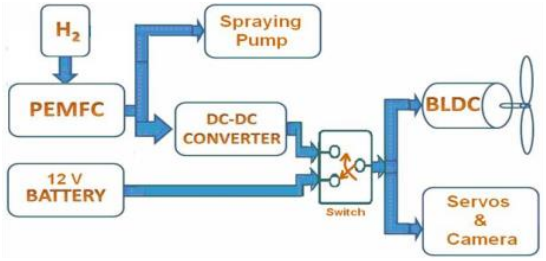


شکل ۱. پهپاد Tiger با بال‌های مجهز به سلول خورشیدی [۱۴]

پیل‌های سوختی را می‌توان به دسته‌های مختلفی تقسیم کرد که یکی از انواع معروف آن پیل سوختی با غشای تبادل پروتون[6] (PEMFC) (به‌عنوان پیل سوختی الکترولیت پلیمری نیز شناخته می‌شود) [۲۱-۱۹ و ۳]. معمولاً برای افزایش مداومت پروازی، سامانه انرژی پیشران پهپادها ترکیبی از پیل سوختی و باتری است [۲۷-۲۲]. یک مرور جامع در خصوص پیل‌های سوختی از سه نوع PEMFC، DMFC و SOFC و کاربردآن‌ها در صنعت پهپادی ارائه داده شد[۲۸]. همچنین انواع سامانه‌های پیشران ترکیبی کار شده نظیر پیل سوختی-باتری و یا پیل سوختی-باتری-فتوولتائیک برای پهپادها در این مقاله مورد بحث قرار گرفتند. شکل (۲)، سامانه انرژی ترکیبی پیل سوختی-باتری برای پیشران یک پهپاد را نشان می‌دهد [۲۹]. سیلندر ذخیره‌سازی هیدروژن سبک برای

[1] Rechargeable Batteries
[2] Fuel Cell
[3] Unmanned Underwater Vehicles
[4] Unmanned Air Vehicles
[5] Fuel Cell
[6] Proton-Exchange Membrane Fuel Cell

سامانه‌های محرکه پیل سوختی برای استفاده در پهپادها بحث شده است[۳۰].



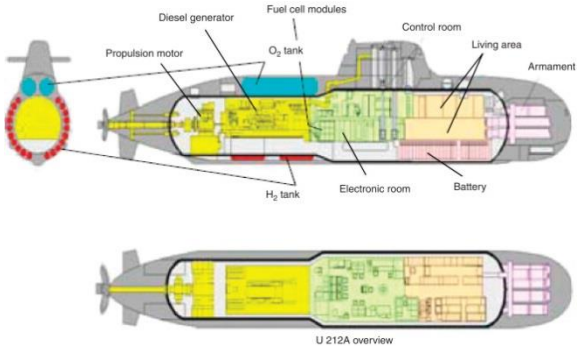
شکل ۲. سامانه پیشران پهپادی ترکیبی پیل سوختی-باتری [۲۹]

علاوه بر شرکت‌های آمریکایی [۳۱ و ۳۲]، شرکت‌های کره‌ای مانند کمپانی DMI [۳۳ و ۳۴]، یکی از شرکت مطرح و پیشرو در زمینه پهپادهای پیل سوختی است و حتی در بخش نظامی نیز وارد شده است. کشور چین در ساخت این نوع از پهپادها فعالیت دارد [۳۵] و کشورهای اروپایی نیز در این زمینه همکاری مناسبی دارند [۳۶ و ۳۷]. پایگاه انرژی هوشمند مستقر در بریتانیا گزارش می‌دهد که شرکت Zepher، پهپاد PEMFC با توان ۸۰۰ W خود را خریداری کرده است که در یک پهپاد الکتریکی عمود پرواز طراحی شده برای ارتش ایالات متحده ادغام می‌شود [۳۸].

اما سوای مقدمه‌ای که برای پهپادها و پرنده‌های بدون سرنشین در بالا بحث شد، زیردریایی‌ها نیز به باتری‌های قابل شارژ نیاز دارند و این علاوه بر تأمین انرژی برق خود زیردریایی (چه بزرگ و چه کوچک)، شامل پیشرانه اژدرهای آن نیز می‌شود. در حقیقت، شناورهای زیردریایی غیر اتمی می‌توانند به جای استفاده از سوخت‌های فسیلی نظیر بنزین از انرژی برق استفاده کنند که متکی بر فناوری پیشرانه غیر وابسته به هوا[1] (AIP) بوده و باتری‌های قابل شارژ و پیل سوختی یکی از موارد این فناوری است [۳۹ و ۴۱]. باتری‌ها برای کاربردهای زیر آب باید سایر الزامات عملکرد سخت‌گیرانه را مانند قابلیت اطمینان فوق‌العاده بالا و تأمین توان الکتریکی مشخص در مدت طولانی مورد نیاز برای تکمیل موفقیت‌آمیز مأموریت‌ها نیز برآورده کنند [۲].

شرکت‌های مطرحی مانند SubCTech، SunLight، KSB، Kokam و Epsilor در زمینه ساخت باتری‌های مربوط به زیردریایی فعالیت دارند [۴۲-۴۶]. باتری‌های قابل شارژی که در انواع شناورهای زیردریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل لیتیوم یون [۴۷-۵۱]، اسید سرب [۴۷ و ۵۲-۵۷]، نمک مذاب (ZEBRA) [۴۷ و ۵۸]، سدیم نیکل کلرید ($Na–NiCl_2$) [۵۹-۶۲]، Ni-Cd [۶۳]، روی-نقره [۶۳-۶۶]، Zn-ion [۶۷] و $Li-SO_2Cl_2$ [۲] می‌شوند. در خصوص باتری‌های اسید سرب، فناوری‌های جدید به‌کار رفته و نیز موارد استفاده در زیردریایی‌های کشورهای مختلف توسط کارهای [۴۳ و ۶۸] در اختیار قرار داده شده‌اند. همچنین در رابطه با اژدرهای زیردریایی، باتری‌هایی نظیر روی-نقره به دلیل بازده و چگالی بالا بسیار پرکاربرد هستند [۴۳]. باتری‌های لیتیوم یون نیز با توان بالا جایگزین مناسبی برای روی-نقره هستند که قدرت پرتاب را همراه با سلول‌های لیتیومی اولیه که در نرخ‌های دشارژ پایین عالی هستند تقویت می‌کنند و سلول‌های قابل شارژ را در حالت شارژ کافی برای ۵ تا ۱۵ سال نگه می‌دارند [۴۶].

زیردریایی‌های معمولی مجهز به پیشرانه دیزل-الکتریکی هستند. به عبارت دیگر، AIP معمولاً به‌عنوان منبع کمکی با پیشرانه‌های سنتی موتور دیزل اجرا می‌شود. برای عملیات غوطه‌وری و بار کابین (هتل)، انرژی توسط دشارژ باتری تأمین می‌شود. AIP معمولاً توانی را برای جایگزینی پیشرانه وابسته به اتمسفر فراهم نمی‌کند، اما امکان غوطه‌وری طولانی‌تری را نسبت به یک زیردریایی پیشران معمولی فراهم می‌کند. فناوری‌های AIP شامل موتورهای استرلینگ، سامانه‌های پیل سوختی، سامانه‌های توربین بخار و سامانه‌های دیزل سیکل بسته می‌شوند [۶۹]. ادغام سامانه محرکه پیل سوختی شامل ۹ عدد PEMFC ۵۰-۳۰ kW در یک زیردریایی کلاس 212A در شکل (۳) نشان داده شده است [۷۰]. انتخاب سامانه AIP به قدرت و استقامت، یعنی اندازه و مشخصات مأموریت زیردریایی بستگی دارد و یکی از گزینه‌های مناسب، پیل‌های سوختی است [۷۱-۷۸]. پیل سوختی مورد استفاده بیشتر شامل PEMFC [۷۹-۸۲]، AFC[2] [۸۳] و PEFC[3] [۸۴ و ۸۵] می‌شود.



شکل ۳. ادغام سامانه پیل سوختی در زیردریایی کلاس 212A [۷۰]

این مقاله به‌طور کلی در چهار بخش تنظیم شده است. در بخش دوم، عملکرد ذخیره‌سازهای انرژی در رابطه پهپادها و زیردریایی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و در بخش سوم، تحقیقات صورت گرفته در مورد تأثیرات عوامل محیطی بر عملکردآن‌ها ارائه

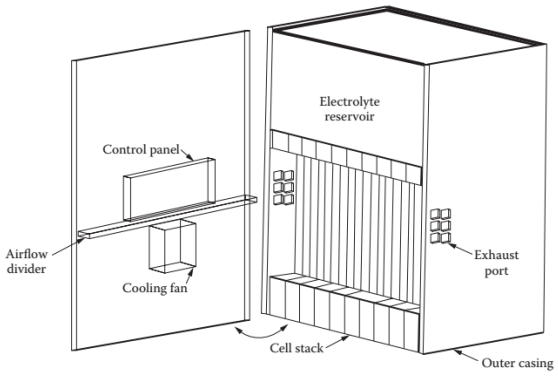
[1] Air-independent Propulsion

[2] Alkaline Fuel Cell
[3] Polymer Electrolyte Fuel Cell

می‌شود. درنهایت در بخش چهارم، نکات و مطالب مهم مقالات مرور شده به‌عنوان جمع‌بندی نهایی ارائه خواهد شد.

۲. تشریح موارد کاربردی و مقایسه ذخیره‌سازها

در این بخش، توضیح کامل‌تری در رابطه با انواع باتری‌های مورد استفاده در صنایع پهبادی و زیردریایی ارائه می‌شود و در مورد مزیت‌هایآن‌ها بحث خواهد شد. باتری‌های آلومینیوم-هوا یکی از انواع باتری‌های شارژ مجدد است که در پهبادهای با مداومت پروازی کوتاه و ریزپرنده‌ها کاربرد زیادی دارند [۵، ۸۶ و ۸۷]. این باتری‌های قابل شارژ نسبت به باتری‌های لیتیومی و دیگر باتری-های قابل شارژ یک مزیت عمده دارند و آن، چگالی انرژی بسیار بالا (۵۵۰Wh/kg) است. باتری‌های آلومینیوم-هوا، جمع شونده و بسیار قابل حمل هستند و به همین دلیل می‌توانآن‌ها را با حداقل هزینه حمل کرد. این باتری‌ها به دلیل قابلیت اطمینان بهبود یافته، قابلیت حمل بالا و عملکرد ایمن، برای پهپاد و ریزپرنده‌ها جذابیت بیشتری دارند. باتری‌های قلیایی آلومینیوم-هوای خوددار و قابل حمل توسط انسان به‌طور گسترده در کاربردهای میدان جنگ و عملیات‌های نظامی راه دور استفاده می‌شوند. این باتری‌ها می‌توانند به‌عنوان منبع تغذیه برای پرنده‌های بدون سرنشین عمل کنند. جزئیات خاص در مورد اجزای مورد استفاده در باتری آلومینیوم-هوای خوددار و قابل حمل توسط انسان در شکل (۴) نشان داده شده است [۲].



شکل ۴. چیدمان باتری آلومینیوم-هوای خوددار [۲]

چنین باتری حدود ۱۵ سال پیش برای پهبادها و شناورهای بدون سرنشین زیردریایی طراحی و ساخته شد و قادر به ارائه توان اسمی ۱/۶ kW و حداکثر توان ۴ kW است. اما انتظار می‌رود که نسل بعدی چنین باتری با آلیاژی با کیفیت، حداکثر قدرتی بیش از ۵ kW داشته باشد [۲]. یکی از بهترین راه حل‌ها برای تأمین توان پهبادها استفاده از فناوری لیتیوم قابل شارژ با انرژی و چگالی بالا است. باتری‌های لیتیوم یون، طراحی انعطاف پذیر و فرم فاکتوری را ارائه می‌دهند که از هندسه‌های پیچیده پشتیبانی می-کنند [۴۶ و ۹۰-۸۸]. باتری‌های لیتیوم یون در حال حاضر بازار خودرو را متحول کرده‌اند و انتظار می‌رود که تکامل مشابهی در بازار پهپادها رخ دهد. این باتری‌ها در پهبادهایی نظیر RQ4، گلوبال هاک، پهبادهای عمود پرواز بال ثابت [۹۱] از جمله Aurora Excalibur و اخیراً UCAS استفاده شده است [۹۲]. باتری‌های لیتیوم یون، چرخه عمر طولانی را ارائه می‌کنند و صدها مأموریت را با یک باتری پشتیبانی می‌کنند و می‌توانند در شرایط محیطی شدید کار کنند [۴۶]. باتری‌های لیتیوم پلیمر قابل شارژ که اساساً همان سلول‌های قابل شارژ لیتیوم یون هستند، به‌طور سنتی پهپادهای مینیاتوری را با سرعت شارژ کم و دشارژ بالا نیرو می‌دهند [۹۳-۹۶].

یکی از مهم‌ترین متغیرها در عملکرد پهبادها، جرم پهباد است و باتری‌های لیتیومی، چگالی انرژی به اندازه کافی را برای اکثر برنامه‌های کاربردی پرواز پهبادهای کوچک ارائه می‌دهند. حداکثر مداومت پروازی زمانی حاصل می‌شود که جرم باتری‌ها دو سوم جرم کل پهپاد را تشکیل دهد. با این حال، این پهبادها دارای محموله محدود و استقامت و برد کمتری نسبت به پهبادهای معمولی با سوخت فسیلی هستند. برای بهبود این معیارهای کلیدی، یک باتری لیتیوم یون استوانه‌ای توسط مرجع [۹۷] توسعه داده شد که از سلول‌های باتری موجود تجاری به‌عنوان عناصر منبع انرژی (که قابلیت حمل بار را به پهباد می‌دهند) برای کاربردهایی با اهمیت وزن استفاده می‌کند.

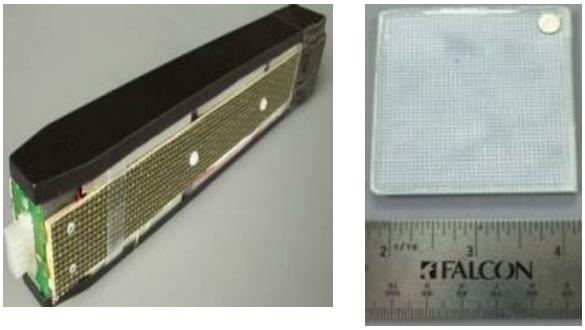
پهپادهای بزرگ معمولاً از موتورهای بنزینی استفاده می‌کنند و باتری‌های لیتیومی برای کاهش اندازه و وزن در هنگام تأمین انرژی حسگرهای خاص یا برای نیازهای برق پشتیبان اضطراری به کار می‌روند. عملکرد باتری‌های لیتیوم یون معمولی با آند گرافیتی به دلیل ظرفیت نامی پایین $372\ mAh{\cdot}g^{-1}$ محدود می‌شوند. چرخه عمر طولانی، ظرفیت‌های بالا و چگالی انرژی بالا نشان می دهد که این باتری‌ها ذخیره‌سازهای انرژی امیدوار کننده و قابل اعتمادی هستند. با این حال، پهبادهای مدرن نیاز به باتری‌هایی با سرعت عملکرد و چگالی توان بسیار بالاتر دارند [۹۷]. به علاوه اینکه این نوع از باتری‌ها تمایل خطرناکی برای آتش گرفتن دارند که منجر به صدمات، فراخوان محصولات و ممنوعیت پرواز می-شود. محققان، باتری‌های لیتیومی حالت جامد را به‌عنوان جایگزین ایمن‌تر معرفی کرده‌اند [۹۸]. همچنین، چندین اکسید فلزی از جمله TiO2، MnO، SnO، ZnO، FE_2O_3. کامپوزیت‌های اکسیدهای بیمتالآن‌ها و کاربیدها به‌عنوان مواد آندی برای برآوردن نیازهای انرژی بالاتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، FE_2O_3 به دلیل هزینه کم، سازگاری با محیط زیست و ظرفیت اسمی بالا ($1007\ mAh{\cdot}g^{-1}$) یک ماده آند لیتیوم یون مورد ترجیح است. با این حال، علاوه بر اشکالی که در رسانایی کم دارد، FE_2O_3 افزایش حجم تقریباً ۲۰۰٪ پس از لیتیاسیون را که منجر به پودر

شدن در طی فرآیند تبدیل و بازیابی الکتروشیمیایی می‌شود، تجربه می‌کند [۹۹].

در صنعت پهپاد، اکسید لیتیوم کبالت یا $LiCoO_2$ ترکیبی رایج است زیرا دارای بالاترین پتانسیل ولتاژ و کمترین وزن در بین تمام مواد شیمیایی است و همچنین امکان ساخت به‌عنوان سلول کیسه‌ای را فراهم می‌کند که به قرارگیری کمک می‌کند. به تازگی، ترکیب $LiNiCoAlO_2$ بر طراحی $LiCoO_2$ رایج شده است، زیرا نیکل و آلومینیوم اضافه شده به تثبیت سلول کمک می‌کنند و متعاقباً به یک باتری ایمن‌تر با توانایی چرخه‌ای بیشتر و در ولتاژ اسمی قابل مقایسه ارتقاء می‌دهد [۱۰۰ و ۱۰۱]. دیگر مواد محبوب برای استفاده در کاتود باتری لیتیومی عبارتند از: اکسید لیتیوم وانادیم ($Li_4V_2O_5$) و اکسید لیتیوم منگنز ($LiMnO_2$) به دلیل حداکثر مقادیر نرخ ظرفیت ویژه باتری ۰/۵۰۵ Ah/kg و ۰/۲۸۲ Ah/kg [۲]. پهپادهای نسل بعدی ممکن است از باتری‌های لیتیوم یون با استفاده از فناوری نانولوله کربنی (CNT[1]) استفاده کنند. فعالیت‌های تحقیق و توسعه انجام شده توسط دانشمندان MIT نشان می‌دهد که کاتدهای مبتنی بر CNT در باتری‌های لیتیوم یون، توان خروجی معادل ۱۰ برابر باتری‌های لیتیوم یون معمولی تولید می‌کنند، زیرا واکنش ذخیره‌سازی لیتیوم در سطح CNT بسیار سریع‌تر از واکنش‌های متداول میان‌افزایی لیتیوم است. الکترودهای CNT آزمایش شده در آزمایشگاه MIT پایداری قابل توجهی را در طول زمان نشان داده اند، زیرا هیچ تغییر قابل تشخیصی در مواد CNT پس از ۱۰۰۰ چرخه شارژ و دشارژ مشاهده نشد [۲، ۱۰۲ و ۱۰۳].

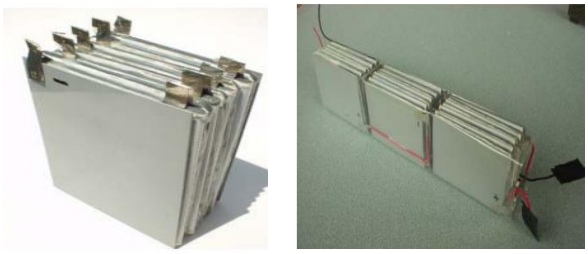
باتری لیتیوم سولفور به‌طور کلی به‌عنوان یک فناوری امیدوار کننده درنظر گرفته می‌شود که در آن چگالی انرژی بالا در کاربردهای مختلف مورد نیاز است. شناخته شده‌ترین کاربردها با چنین الزاماتی، پهپادهای با مداومت پروازی در ارتفاع بالا هستند.آن‌ها در استراتوسفر پرواز می‌کنند و از پنل‌های خورشیدی برای تأمین انرژی سامانه‌های پیشران خود، محموله‌ها و شارژ باتری‌های خود در طول روز استفاده می‌کنند. سپسآن‌ها از باتری‌ها برای تغذیه سامانه‌ها در شب استفاده می‌کنند و به پهپادها اجازه می‌دهند تا روزها، هفته‌ها یا ماه‌ها در هوا بمانند [۱۰۷-۱۰۴]. مشابه لیتیوم سولفور، باتری لیتیوم هوا نیز به دلیل داشتن چگالی انرژی بالاتر نسبت به لیتیوم یون و نیز بازده تبدیل انرژی مناسب، کاربرد زیادی در پهپادهای توان بالا دارد [۱۱۱-۱۰۸]. با نگاهی به آینده فناوری باتری‌های لیتیومی متوجه می‌شوید که باتری‌های لیتیوم هوا ممکن است چگالی انرژی مشابه سوخت‌های هوایی معمولی و جت را فراهم کنند. این به‌طور بالقوه می‌تواند انقلابی در نیرورسانی پهپادها ایجاد کند و احتمالاً موتورهای احتراقی و سلول‌های سوختی را کم اهمیت کند [۱۸].

باتری‌های نسل چهارم روی-هوا که توسعه آن در سال ۲۰۰۲ آغاز شد، از کاتد هوا به‌عنوان محفظه سلول استفاده می‌کنند که در اطراف الکترود روی از وسط تا شده و لبه‌های آن برای یکپارچگی نشتی، مهر و موم شده است (شکل ۵-الف). نسل چهارم سلول الکتروشیمیایی روی-هوا برای اولین بار برای پهپاد Dragon Eye که به‌طور گسترده توسط نیروی تفنگداران دریایی ایالات متحده استفاده می‌شد، توسعه یافت (شکل ۵-ب) [۱۱۲]. با توجه به طول بال‌های in ۴۸، یک باتری از ۸ سلول دی اکسید سولفور لیتیوم D که در بدنه قرار دارد، انرژی پهباد را تأمین می‌کند. اوج توان پهباد بیش از W ۲۰۰ است و توان کروز در پروازهای سطحی بین W ۱۱۰-۱۳۰ است. این شاید سخت‌ترین کاربرد برای توسعه نسل چهار روی-هوا با درنظر گرفتن قدرت، انرژی، وزن، حجم و هزینه باشد. باتری لیتیومی با وزن کمی بیش از g ۷۰۰، قادر است W ۲۰۰ توان بالارفتن را ارائه دهد و تا یک ساعت کل زمان پرواز را فراهم می‌کند. شکل (۵) نمونه اولیه باتری پرواز نسل چهار را نشان می‌دهد که برای Dragon Eye ساخته شده است. این شامل سه پشته از هفت سلول به‌صورت سری بود (شکل ۶).



الف ب

شکل ۵. الف) سلول روی-هوا و ب) باتری روی-هوا نسل چهارم [۱۱۲]



الف ب

شکل ۶. باتری Dragon Eye: الف) چینش پشته‌های سلول‌ها و ب) پشته سلول [۱۱۲]

رایج‌ترین باتری‌ها برای پهپادها لیتیوم یون و لیتیوم پلیمر هستند. باتری‌های $Li\text{-}SOC1_2$ دو برابر چگالی انرژی در هر کیلوگرم در مقایسه با موارد فوق‌الذکر دارند و باتری‌های لیتیوم

[1] Carbon Nanotube

هوا می‌توانند تا هفت برابر بیشتر باشند، با این حال، متأسفانه در دسترس نیستند و بسیار گران‌تر از لیتیوم یون و لیتیوم پلیمر هستند. نوع دیگری از باتری‌های لیتیوم یون، لیتیوم سولفور است که چگالی انرژی بالاتری را در مقایسه با لیتیوم یون با هزینه کمتر ارائه می‌دهد وآن‌ها را به گزینه‌ای بدیهی برای جایگزینی باتری‌های لیتیوم یون در آینده نزدیک تبدیل می‌کند. مناسب‌ترین نوع باتری با مقایسه معیارهای مختلف چگالی توان، چگالی انرژی، وزن، حجم، عمر چرخه، هزینه، ایمنی و نگهداری تعیین می‌شود. هر یک از معیارها بر جنبه‌های مختلف پهپاد تأثیر می‌گذارد، چگالی توان بر قابلیت‌های شتاب تأثیر می‌گذارد، چگالی انرژی محدوده را تعیین می‌کند، عمر چرخه تعیین می‌کند که باتری هر چند وقت یک بار نیاز به تعویض دارد، وزن و حجم بر برد سامانه تأثیر می‌گذارد و هزینه بر در دسترس بودن تأثیر می‌گذارد [۳].

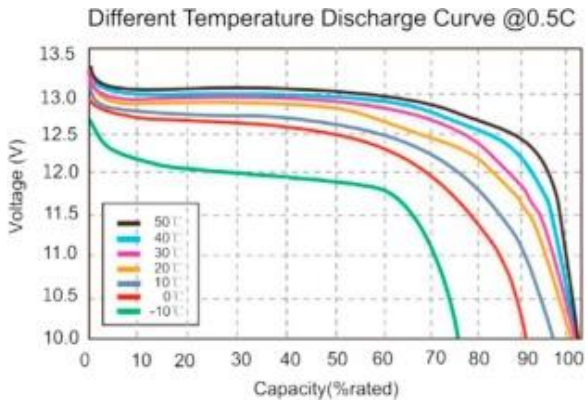
جدای از باتری‌های اشاره شده، پیل‌های سوختی یک مزیت بزرگ نسبت بهآن‌ها دارند و آن چگالی انرژی بسیار بالاتر است که اجازه مأموریت‌های بلند مدت را می‌دهد. چگالی انرژی پیل‌های سوختی تا ۱۵۰ برابر باتری‌های لیتیوم پلیمر است. در پیشرفت-های اخیر، یک پهپاد بال ثابت قابل پرتاب دستی ساخته شده است که می‌تواند ۱۰ ساعت پرواز با مسافت ۵۰۰ km داشته باشد. طرح دیگری از پهپاد از ساختار توخالی بدنه خود برای ذخیره هیدروژن به جای هوا استفاده می‌کند که اجازه می‌دهد وزن ناشی از ذخیره‌سازی معمول هیدروژن از بین برود. چگالی انرژی بر زمان پرواز به‌دست آمده با یک مخزن پر از سوخت تأثیر می‌گذارد، در حالی که چگالی توان بر ویژگی‌هایی مانند حداکثر سرعت، ظرفیت بار و ارتفاع پروازی که می‌توان به‌دست آورد تأثیر می‌گذارد [۳، ۲۳ و ۱۱۳]. این موضوع در رابطه با شناورهای زیردریایی نیز صدق می‌کند. استفاده از پیشرانه سنتی دیزل برقی می‌تواند زیردریایی را در معرض خطر تشخیص صوتی و بصری قرار دهد. به همین منظور استفاده از سامانه پیشرانه AIP تا حد بسیار زیادی این مشکل را برطرف می‌کند و از میان فناوری‌های معرفی شده، سامانه AIP مبتنی بر پیل‌های سوختی بالاترین عملکرد را به‌طور کلی ارائه می‌دهند.

۳. تأثیر عوامل محیطی بر عملکرد ذخیره‌سازها

در این بخش، مطالعات صورت گرفته در رابطه با تأثیر عوامل محیطی مانند دما، رطوبت، ارتفاع پروازی و فشار بر عملکرد باتری‌ها و پیل‌های سوختی مورد بحث قرار می‌گیرد. در مورد پهپادها و به خصوص انواع بال چرخنده، دماهای پایین (سرد) موجب کاهش عملکرد باتری و متعاقب آن کاهش زمان پرواز پهپاد می‌شود. ضمن اینکه پهپادها ممکن است در حین کار، دماهای زیر ۶۰ $^{\circ}C$ را تجربه کنند. بنابراین برنامه‌ریزی پرواز پهپاد متناسب با دمای محیطی بسیار مهم است [۱۱۶-۱۱۴]. افزایش ارتفاع پروازی موجب کاهش دما می‌شود. این کاهش دما در ارتفاعات پروازی بالاتر و با توجه به شرایط اقلیمی یا آب و هوایی می‌تواند افت شدیدی داشته باشد. چالش فنی اصلی مرتبط با دماهای سرد، عملکرد ضعیف باتری‌های لیتیومی است. در حالی که تجهیزات الکترونیکی و مکانیکی پهپادها تا ۴۰- $^{\circ}C$ نیز کار می‌کنند، کارایی باتری‌ها و طول عمرآن‌ها به شدت در دماهای زیر ۲۰- $^{\circ}C$ کاهش می‌یابد که بر مدت زمان پرواز تأثیر می‌گذارد. در حالی که باتری‌های پهپاد در طول پرواز گرمای داخلی تولید می‌کنند، این موضوع نمی‌تواند باتری‌ها را در محدوده دمای عملیاتی بهینه در دمای هوای محیط زیر ۲۰- $^{\circ}C$ نگه دارد. برای حل این مشکل، ورق‌های عایقی بر روی باتری کشیده می‌شود تا دمای عملیاتی را حفظ کند [۱۱۷].

به‌طور خاص در مورد باتری‌های لیتیوم یون (که در صنعت پهپادی پرکاربرد هستند)، گرم شدن بیش از حد می‌تواند باعث کاهش ظرفیت، کاهش طول عمر، قابلیت و حتی خطر ایمنی شود. این گرم شدن که ناشی از جریان‌کشی بالا است، می‌تواند باعث انحرافات زیادی از جمله تولید و رشد لایه رابط الکترولیت جامد، مقاومت بیش از حد آند، تضعیف مواد فعال، مقاومت داخلی بیش از حد، و کاهش ظرفیت انرژی و توان باتری شود. محدوده دمایی بین ۱۰-۵۰ $^{\circ}C$ به‌عنوان محدوده عملیات قابل تحمل پیشنهاد شده است و محدوده باریک‌تری بین ۲۰-۴۰ $^{\circ}C$ برای عملکرد بهتر باتری گزارش شده است [۱۱۷]. شکل (۷)، تغییرات انرژی تحویلی (بر حسب درصدی از ظرفیت نامی) باتری لیتیوم یون را بر حسب تغییرات دمای محیطی نشان می‌دهد.

در مقایسه با خودروهای الکتریکی، پهپادهای کوچک جمع و جورتر هستند و نسبت به افزایش وزن حساسیت بیشتری دارند. علاوه بر این، نسبت دشارژ باتری لیتیومی در شرایط عملیاتی مانند فرود، برخاستن، شتاب و کاهش سرعت بسیار زیاد است و دما می‌تواند فوراً به ۵۰ درجه سلسیوس برسد، بنابراین سامانه مدیریت حرارت دیگر نباید نیروی باتری تحت فشار را مصرف کند.



شکل ۷. منحنی دشارژ باتری لیتیوم یون در دماهای مختلف [۱۱۴]

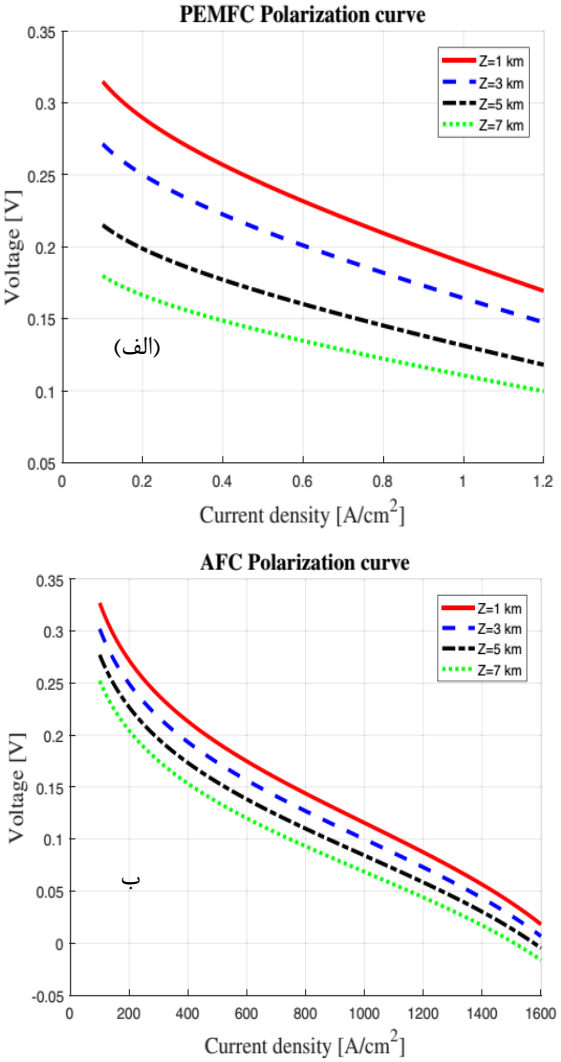
همین مشکل گرم شدن بیش از حد در باتری‌های لیتیوم یون مورد استفاده در زیردریایی‌ها وجود دارد و به همین دلیل، یک سامانه جانبی خنک کننده مورد نیاز است که سبک، کارآمد و غیر فعال باشد. با این حال، مطالعات کمی در مورد مدیریت حرارتی باتری برق پهپاد وجود دارد [۱۱۸ و ۱۱۹]. رفتار حرارتی باتری‌های لیتیوم پلیمر نیز مشابه باتری لیتیوم یون است با این تفاوت که باتری لیتیوم پلیمر بیشتر در معرض خطر دماهای پایین و کاهش طول عمر است [۱۲۰]. پیل‌های سوختی در دماهای مختلف می‌توانند کار کنند. به‌عنوان مثال، پیل‌های سوختی PEMFC دارای زمان راه اندازی کم، دمای عملیاتی پایین و نویز کم هستند. یک SOFC در مقایسه با PEMFC به سامانه مدیریت آب نیاز ندارد، زیرا آب محصول به‌صورت بخار از سامانه خارج می‌شود. دمای بالای کارکرد SOFC امکان استفاده از انواع سوخت‌ها را بدون نیاز به ریفورماتور خارجی فراهم می‌کند. با این حال، دمای بالا، محدودیت‌هایی را در انتخاب مواد پیل سوختی ایجاد می‌کند [۱۲۱]. در حین تولید برق برای پهپادهای مجهز به پیل سوختی، اکثر ادوات PEMFC به ناچار مقدار مشخصی گرما را به‌صورت غیر یکنواخت یا ناپایدار ساطع می‌کنند. مدیریت حرارتی ادوات PEMFC یک مسئله اصلی برای عملکرد کارآمد و جلوگیری از آسیب قطعات است. بنابراین، موضوع سرمایش PEMFC ممکن است حیاتی باشد، به خصوص در کاربردهای خاص [۱۲۲].

پهپادها بر خلاف سامانه‌های رایج، فضایی برای لوازم جانبی مختلف ندارند و PEMFC باید فشرده باشد و بدون رطوبت‌ساز به درستی کار کند. هنگامی که رطوبت کم است، عملکرد ادوات PEMFC معمولاً بسیار پایین‌تر است [۱۲۳]. بیشتر پشته‌های پیل سوختی بزرگ از یک کمپرسور برای کار در فشارهای حدود ۲ تا ۳ بار استفاده می‌کنند، زیرا فشار بالاتر منجر به بهبود راندمان می‌شود و به رطوبت کمک می‌کند. برای پشته‌های کوچک (کمتر از ۱ kW)، وزن و توان مصرفی کمپرسور معمولاً ممنوع است و کارکرد محیط با استفاده از فن یا دمنده ترجیح داده می‌شود. در نتیجه تأثیر فشار عملیاتی برای پیل‌های سوختی کوچک شدیدتر خواهد بود و تحقیقات عمیق در مورد تأثیر فشارهای عملیاتی پایین مورد نیاز است. در حالی که مشخص است که کاهش فشار عملیاتی می‌تواند عملکرد پیل سوختی را به شدت کاهش دهد، تنها داده‌های محدودی در مورد اثرات فشار کاری پایین منتشر شده است و در مورد علت کاهش عملکرد اختلاف نظر وجود دارد. کاهش قدرت در محدوده ٪۱۵-۳۵ در ارتفاع ۱۵۰۰ m (۸۴/۵ kPa) گزارش شده است، در حالی که کاهش قدرت بیش از ٪۶۰ در ارتفاع ۱۰/۳ km (۲۵/۳ kPa) مشاهده می‌شود [۱۲۴]. جدول (۱)، محدوده دمایی مناسب برای عملکرد درست سه نوع پیل سوختی در پهپادها را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه محدوده دمایی مورد نیاز برای عملکرد انواع پیل‌های سوختی [۱۲۴]

نوع پیل سوختی	سوخت	بازده (٪)	دما (□)
PEMFC	هیدروژن	۶۰-۴۰	۱۰۰-۳۰
DMFC	متانول	۳۰-۲۰	۹۰-۲۰
SOFC	هیدروکربن	۵۰-۳۰	۱۰۰۰-۵۰

همچنین، تأثیر ارتفاع پروازی بر عملکرد پیل‌های سوختی مورد استفاده در پهپادها از زاویه دیگری مطالعه شده است [۱۲۵]. شکل (۸)، منحنی‌های پلاریزاسیون PEMFC و AFC را بر حسب چگالی جریان‌آن‌ها و برای ارتفاع‌های پروازی km ۱، ۳، ۵ و ۷ نشان می‌دهند. این نتایج بیان می‌کنند که افزایش ارتفاع پروازی تأثیر منفی بر عملکرد پیل‌های سوختی می‌گذارند.



شکل ۸. تغییرات پلاریزاسیون: الف) PEMFC و ب) AFC بر حسب چگالی جریان و برای چهار ارتفاع پروازی مختلف [۱۲۵]

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مروری جامع در رابطه با انواع ذخیره‌سازهای به‌کار رفته در صنایع پهبادی و زیردریایی ارائه گردید. در صنعت پهبادی، فناوری‌های مختلف باتری‌های قابل شارژ استفاده می‌شود. باتری‌های قابل شارژ متداول و رایج مورد استفاده در پهبادها، لیتیوم یون و لیتیوم پلیمر هستند که چگالی انرژی قابل قبولی نسبت به وزن و اندازه داشته و طول عمر مناسبی دارند. باتری‌های لیتیومی دیگر مانند لیتیوم هوا و لیتیوم سولفور اگر چه چگالی انرژی بالاتری نسبت به باتری‌های لیتیوم یون و لیتیوم پلیمر دارند ولی متأسفانه فعلاً به‌طور گسترده در دسترس نیستند. باتری‌های آلومینیوم-هوا نیز کاربرد بالایی در ریزپرنده‌ها دارند. در صنعت زیردریایی، سامانه AIP به‌عنوان تأمین کننده انرژی پیشرانه و بار هتل جایگزین سامانه‌های سنتی شده است تا مدت زمان عملیات غوطه‌وری را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد و شناسایی زیردریایی را دشوار کند. باتری‌های اسید سرب، لیتیوم یون و روی-نقره از باتری‌های شیمیایی پرکاربرد در AIP هستند. اما به دلیل دارا بودن چگالی انرژی بسیار بالاتر نسبت به باتری‌ها (لیتیوم یون)، فناوری پیل سوختی یکی از گزینه‌های مناسب تأمین انرژی پهبادها و زیردریایی‌ها است. پیل‌های سوختی نظیر PEMFC، ارتفاع و مداومت پروازی بالایی را برای پهبادها فراهم می‌کنند. وزن یکی دیگر از عوامل مهم در پهبادها است که با به‌کارگیری پیل سوختی به جای باتری و یا استفاده ترکیبی کاهش می‌یابد. نکته دیگر اینکه پیل‌های سوختی با بالا بردن قدرت AIP، کاربرد بسیاری در زیردریایی‌ها دارند. با این وجود از معایب مهم پیل‌های سوختی، بالا بودن هزینه، مشکلات مربوط به ذخیره هیدروژن و خاصیت انفجاری است. همچنین در این مقاله، تحقیقات صورت گرفته در خصوص تأثیر عوامل محیطی نظیر دما و ارتفاع پروازی بر روی باتری‌ها و پیل‌های سوختی ارائه شد و مشخص گردید که دماهای بسیار پایین در شرایط اقلیمی سردسیر که زیر ۲۰- ℃ هستند، منجر به کاهش بازده و طول عمر باتری پهباد می‌شود. هر چند که کاهش دما باعث مثبت شدن عملکرد فیزیکی و ادوات الکترونیکی پهباد می‌شود. حتی گرم کننده‌های باتری نیز در بهبود بازده عملکردی در این شرایط خیلی مؤثر نیستند. محفظه‌ها و لایه‌های عایقی راهکار پیشنهادی است که می‌تواند دمای عملکردی باتری قابل شارژ را در محدوده استاندارد خود نگه دارد. زمان پرواز پرنده‌های بدون سرنشین به دلیل جریان بالای مورد نیاز برای پرواز همچنان کوتاه است. تخلیه جریان زیاد از باتری می‌تواند دمای آن را افزایش دهد و افزایش دما می‌تواند منجر به کاهش عمر باتری شود. حتی افزایش دمای بیش از حد، احتمال آتش گرفتن و منفجر شدن باتری را بالا می‌برد. سامانه‌های حرارتی و خنک کننده‌ها راهکار مناسب برای پایین آوردن دما در این حالت است.

۵. مراجع

[1] Lucchese, F. C.; Canha, L. N.; Brignol, W. S.; Ragnel, C. A. "A Review on Energy Storage Systems and Military Applications"; Fifty fifth Int. Universities Power Eng. Conf. 2020, 1-5.

[2] Jha, A. R. "Next-Generation Batteries and Fuel Cells for Commercial, Military, and Space Applications"; Boca Raton, CRC Press 2012.

[3] Townsend, A.; Jiya, I. N.; Martinson, C. "A Comprehensive Review of Energy Sources for Unmanned Aerial Vehicles, their Shortfalls and Opportunities for Improvements"; Heliyon, 2020, 6, 1-9.

[4] Leuchter, J.; Zobaa, A. F. "Batteries Investigations of Small Unmanned Aircraft Vehicles"; 8th IET Int. Conf. Power Electron., Machines and Drives 2016, 1-6.

[5] Kindler, A.; Matthies, L. "High Specific Energy and Specific Power Aluminum/Air Battery for Micro Air Vehicles"; Int. Soc. Opt. Photonics 2014, 9083, 1-11.

[6] Naimer, N.; Koretz, B.; Putt, R. "Zinc-Air Batteries for UAVs and MAVs"; Electr. Fuel Corporation 2002, 1-4.

[7] Kainthla, R.; Coffey, B. "Long Life, High Energy Silver/Zinc Batteries"; NASA Aerospace Workshop, 2003.

[8] Burke, E. D. "Li-ion Intelli-Pack Battery: Smart, High Energy and Safe Battery for Mission and Safety Critical Aerospace Platforms"; AIAA Propulsion and Energy 2019, 4145.

[9] Nguyen, H. V.; Maurice, M. K. "PSCR 2020_Innovating on Drone Technology to Support First Responder Missions"; PSCR Stakeholder Meeting, 2020, 1-50.

[10] Gwon, H. R.; Kim, W. B.; Lee, K. W.; Kim, D.W. "Development of Hybrid Gasoline-Battery Propulsion System for Multi-Copter Platform"; Proc. 31st Congress of the Int. Council of the Aeronautical Sci. 2018, 1-4.

[11] Reinhardt, K. C.; Lamp, T. R.; Geis, J. W. "Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicles"; Proc. 31st Intersociety Energy Conversion Eng. Conf. 1996, 41-46.

[12] Romeo, G.; Frulla, G; Cestino, E. "Design of a High-Altitude Long-Endurance Solar-Powered Unmanned Air Vehicle for Multi-Payload and Operations"; J. Aerospace Eng. 2001, 221, 199-216.

[13] Jung, S.; Jo, Y.; Kim, Y. J. "Aerial Surveillance with Low-Altitude Long-Endurance Tethered Multirotor UAVs Using Photovoltaic Power Management System"; Energies, 2019, 12, 1323.

[14] "Tactical drone, powered by solar panels and hydrogen fuel cell, flies 24h"; https://www.flightglobal.com/military-uavs/tactical-drone-powered-by-solar-panels-and-hydrogen-fuel-cell-flies-24h/143358.article.

[15] Dudek, M.; Tomczyk, P.; Wygonik, P. "Hybrid Fuel Cell – Battery System as a Main Power Unit for Small Unmanned Aerial Vehicles (UAV)"; Int. J. Electrochem. Sci. 2013, 8, 8442-8463.

[16] Stroman, R. O.; Kellogg, J. C.; Swider-Lyons, K. E., "Testing of a PEM Fuel Cell System for Small UAV Propulsion"; Power 2000, 60, 1-4.

[17] Bradley, T.; Moffitt, B.; Fuller, T. "Design Studies for Hydrogen Fuel Cell Powered Unmanned Aerial Vehicles"; 26th AIAA Appl. Aerodynamics Conf. 2008, 5413.

[18] Bradley, T. H.; Moffitt, B. A.; Fuller, T. F. "Comparison of Design Methods for Fuel-Cell-Powered Unmanned Aerial Vehicles"; J. Aircraft 2009, 46, 1945-1956.

[19] Dudek, M.; Lis, B.; Raźniak, A.; Krauz, M. "Selected Aspects of Designing Modular PEMFC Stacks as Power Sources for Unmanned Aerial Vehicles"; Appl. Sci. 2021, 11, 675.

[20] Baik, K. D.; Yang, S. H. "Improving Open-Cathode Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Performance Using Multi-Hole Separators"; Int. J. Hydrogen Rnergy 2020, 45, 9004-9009.

[21] Rodríguez-Castellanos, A.; Díaz-Bernabé, J. L. "Development and Applications of Portable Systems Based on Conventional PEM Fuel Cells"; Portable Hydrogen Energy Systems 2018, 91-106.

[22] Yamate, S.; Fujiwara, Y.; Tadokoro, H. "System Analysis of the Drone with FC Battery Fueled by Bio-hydrogen"; J. Japan Inst. Energy 2018, 97, 336-341.

[23] Arat, H. T.; Sürer, M. G. "Experimental Investigation of Fuel Cell Usage on An Air Vehicle's Hybrid Propulsion System"; Int. J. Hydrogen Energy 2020, 45, 26370-26378.

[24] Lee, B.; Park, P.; Kim, K.; Kwon, S. "The Flight Test and Power Simulations of An UAV Powered by Solar Cells, A Fuel Cell and Batteries"; J. Mechanical Sci. Tech. 2014, 28, 399-405.

[25] Karunarathne, L.; Economou, J. T.; Knowles, K. "Model-based Power and Energy Management System for PEM Fuel Cell/Li-Ion Battery Driven Propulsion System"; 5th IET Int. Conf. Power Electron. Machines and Drives, 2010, 1-6.

[26] Zhang, X.; Liu, L., Dai, Y.; Lu, T. "Experimental Investigation on the Online Fuzzy Energy Management of Hybrid Fuel Cell/Battery Power System for UAVs"; Int. J. Hydrogen Energy 2018, 43, 10094-10103.

[27] Yang, C.; Moon, S.; Kim, Y. "A Fuel Cell/Battery Hybrid Power System for an Unmanned Aerial Vehicle"; J. Mechanical Sci. Tech. 2016, 30, 2379-2385.

[28] Wang, B.; Zhao, D.; Li, W.; Wang, Z. "Current Technologies and Challenges of Applying Fuel Cell Hybrid Propulsion Systems in Unmanned Aerial Vehicles"; Prog. Aerospace Sci. 2020, 116, 100620.

[29] Mobariz, K. N.; Youssef, A. M.; Abdel-Rahman, M. "Long Endurance Hybrid Fuel Cell-Battery Powered UAV"; World J. Model. Simul. 2015, 11, 69-80.

[30] Cho, S. M.; Kim, C.; Kim, K. S.; Kim, D. K. "Lightweight hydrogen storage cylinder for fuel cell propulsion systems to be applied in drones"; Int. J. Pressure Vessels and Piping, 2021, 194, 104428.

[31] "Honeywell Unveils Fuel Cell Tech for Drones"; https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00494-6.

[32] "Northwest UAV, NRL Testing Hydrogen Drone Propulsion System"; https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21) 00191-7.

[33] "DMI Hydrogen Drones for Korean Military"; https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00313-8.

[34] "Korean Military to Trial Fuel Cell Vehicles And Drones, Set Up Station"; https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30272-8.

[35] "SAT Long Endurance Hybrid Fuel Cell-Battery Powered UAV"; https://www.satuav.com/about-us.

[36] "Euro, Chinese Firms Link on Fuel Cell Drones"; https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00075-4.

[37] "Spanish Partnership Developing Fuel Cell for Longer Drone Flights"; https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30338 -2.

[38] "Intelligent Energy Fuel Cells Power Endurance Drone for US Army"; https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30336-9.

[39] Tupper, E. C.; Rawson, K. J. "Basic Ship Theory"; Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2001.

[40] Donaldson, A. J. "Submarine Power Sources for the Mission"; Naval Eng. J. 1996, 108, 129-146.

[41] Nichols, R. K.; Sincavage, S.; Mumm, H. C.; Carter, C. "Propulsion and Fuels: Disruptive Technologies for Submersible Craft Including UUVs [Jackson]"; Disruptive Tech. with Appl. Airline & Mar. Defense Ind. 2021.

[42] "SubCTech"; https://subctech.com/contact/.

[43] "Sunlight"https://www.systems-sunlight.com/product/ applications/advanced-technology/submarine-batteries/.

[44] "KSB"; http://www.ksbatteries.com/en/?page_id=33.

[45] "Kokam"; https://kokam.com/.

[46] "Epsilor"; https://www.epsilor.com/products/.

[47] Mohiuddin, H.; Morsalin, S.; Mahmud, K. "Design and Fabrication of a Prototype Submarine Using Archimedes Principle"; Int. Conf. Inf., Electron. Vision 2014, 1-6.

[48] Burch, I.; Ghiji, M.; Gamble, G.; Suendermann, B. "Lithium-Ion Battery Fire Suppression in Submarine Battery Compartments", Proc. PACIFIC, 2019, 1-13.

[49] Eudeline, H. "Lithium Ion Batteries for Naval Applications. Nuclear or Conventional Submarines and Electric Ships"; Aes. 2000 All Electric Ship, Civil or Military, 2000, 1-6.

[50] Kim, B.; Kang, S. "An Experimental Study on the Charging/Discharging Characteristics and Safety of Lithium-Ion Battery System for Submarine Propulsion"; J. Soc. Naval Archit Korea 2021, 58, 225-233.

[51] Warner, J. T. "The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology"; Elsevier, 2015.

[52] James, M.; Grummett, J., Rowan, M.; Newman, J. "Application of Pulse Charging Techniques to Submarine Lead-Acid Batteries"; J. Power Sources 2006, 162, 878-883.

[53] McGuinness, M.; Benjamin, B. "Submarine Lead-Acid Battery Performance"; Australian Submarine Corp, 2003.

[54] Ness, C.C.; Simpson J. R. "A New Submarine Paradigm"; Naval Eng. J. 2000, 112, 143-152.

[55] Piłat, T.; Grzeczka, G.; Polak, A.; Kuryś, P. "Implementation of the Assessment Method of the Lead–Acid Battery Electrical Capacity in Submarines"; J. Mar. Eng.Tech. 2017 16, 326-330.

[56] Szymborski, J. "Lead-Acid Batteries for Use in Submarine Applications"; Proc. 2002 Workshop on Autonomous Under-water Vehicles, 2002, 11-17.

[57] Lakeman, J. B. "Gas Evolution and Performance Assessment of Submarine Lead/Acid Batteries"; J. Power Sources 1995, 53, 99-107.

[58] Mathur, P. B. "Status of Storage Batteries Development and Areas of Their Application"; Bulletin Electrochem. 1985, 1, 7-9.

[59] Kluiters, E. C.; Schmal, D.; ter Veen, W. R.; Posthumus, K. J. "Testing of a Sodium/Nickel Chloride (ZEBRA) Battery for Electric Propulsion of Ships and Vehicles"; J. Power Sources 1999, 80, 261-264.

[60] Sudworth, J. L. "The Sodium/Nickel Chloride (ZEBRA) battery"; J. Power Sources 2001, 100, 149-163.

[61] Manzoni, R.; Metzger, M.; Crugnola, G. "ZEBRA Electric Energy Storage System: From R&D to Market"; Hi. Tech. Expo–Milan 2008, 25, 28.

[83] Behling, N. H. “Fuel Cells”; Elsevier, 2016.

[84] Sattler, G. “PEFCs for Naval Ships and Submarines: Many Tasks, One Solution”; J. Power Sources 1998, 71, 144-149.

[85] Yamamoto, I.; Aoki, T.; Tsukioka, S.; Yoshida, H. “Fuel cell system of AUV "Urashima"”; Oceans' 04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04 (IEEE Cat. No. 04CH37600), 2004, 1732-1737.

[86] Liu, Y.; Sun, Q.; Li, W.; Adair, K. R.; Li, J. “A Comprehensive Review on Recent Progress in Aluminum–Air Batteries”; Green Energy. Environ. 2017, 2, 246-277.

[87] Ding, F.; Wang, J. S.; Zhong, H.; Zhang, Q. “Metal–Air and Metal–Sulfur Batteries: Fundamentals and Applications”; CRC Press, 2016.

[88] Costa, E. F.; Souza, D. A.; Pinto, V. P.; “Prediction of Lithium-ion Battery Capacity in UAVs”; 6th Int. Conf. Control, Decision and Inf. Tech., 2019, 1865-1869.

[89] Muharam, A.; Mostafa, T. M.; Hattori, R. “Design of Power Receiving Side in Wireless Charging System for UAV Application”; Int. Conf. Sustainable Energy Eng. Appl. 2017, 133-139.

[90] Shiau, J. K.; Ma, D. M.; Yang, P. Y.; Wang, G. F. “Design of A Solar Power Management System for An Experimental UAV”; IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2009, 45, 1350-1360.

[91] Dündar, Ö.; Bilici, M.; Ünler, T. “Design and Performance Analyses of a Fixed Wing Battery VTOL UAV”; Eng. Sci. Tech., an Int. J. 2020, 23, 1182-1193.

[92] “Powering Unmanned Aerial Vehicles”; https://www.eaglepicher.com/markets/aviation/unmanned-aerial-vehicles/

[93] Suzuki, K. A.; Kemper F. P.; Morrison, J. R. “Automatic Battery Replacement System for UAVs: Analysis and Design”; J. Intell. Robotic Syst. 2012, 65, 563-586.

[94] Sai, P. G.; Rani, C. S.; Nelakuditi, U. R. “Implementation of Power Optimization Technique for UAVs”; Mater. Today: Proc. 2018, 5, 132-137.

[95] Masood, F.; Pitts Jr, R. A. “Comparing Hybrid Power Systems Using Vertical Take off Landing Vehicle”; IIE Annu. Conf. Proc. 2018, 587-592.

[96] Kardasz, P.; Doskocz, J.; Hejduk, M.; Wiejkut, P. “Drones and Possibilities of Their Using”; J. Civil & Environ. Eng. 2016, 6, 1-7.

[97] Hollinger, A. S.; McAnallen, D. R.; Brockett, M. T.; DeLaney, S. C. “Cylindrical Lithium-ion Structural Batteries for Drones”; Int. J. Energy Res. 2020, 44, 560-566.

[98] Patel, P “New Battery Tech Launches in Drones”; IEEE Spectr. 2018, 55, 7-9.

[99] Park, C.; Samuel, E.; Joshi, B.; Kim, T. “Supersonically Sprayed Fe2O3/C/CNT Composites for Highly Stable Li-ion Battery Anodes”; Chem. Eng. J. 2020, 395, 125018.

[100] Depcik, C.; Cassady, T.; Collicott, B.; Burugupally, S. P. “Comparison of Lithium ion Batteries, Hydrogen Fueled Combustion Engines, and A Hydrogen Fuel Cell in Powering A Small Unmanned Aerial Vehicle”; Energy Convers. Manage. 2020, 207, 112514.

[101] Puglia, F. J.; Cohen, S. H.; Hall, J. C.; Santee, S. G. “Advanced High Energy and High Power Battery Designs and Materials for UAVs, UUVs and UMVs”; SAE Tech. Paper, 2008, 1-7.

[102] Jiao, X.; Liu, Y.; Li, B.; Zhang, W. “Amorphous Phosphorus-Carbon Nanotube Hybrid Anode with Ultralong Cycle Life and High-Rate Capability for Lithium-Ion Batteries”; Carbon 2019, 148, 518-524.

[62] Donaldson, A. J.; Galloway, R. C. “'Zebra' Batteries for Marine Applications”; All Electr. Ship, Civil or Military, 2000, 1-9.

[63] Balakrishnan, P. G.; Mani, N. “Batteries for Marine and Submarine Applications. Bulletin of Electrochemistry”; Bulletin of Electrochem. 1987, 3, 313-319.

[64] Giltner, L. J. “Silver-zinc Batteries in Marine Applications”; Conf. Proc. OCEANS'95 MTS/IEEE, 1995, 803-808.

[65] Imhof, P. “Silver-zinc Batteries for AUV Applications”; Proc. Workshop on Autonomous Underwater Vehicles, 2002, 35-38.

[66] Karpinski, A. P.; Makovetski, B.; Russell, S. J.; Serenyi, J. R. “Silver–Zinc: Status of Technology and Applications”; J. Power Sources 1999, 80, 53-60.

[67] Wang, B.; Li, J.; Hou, C.; Zhang, Q.; Li, Y; “Stable Hydrogel Electrolytes for Flexible and Submarine-Use Zn-Ion Batteries”; ACS Appl. Mater. Interfaces 2020, 12, 46005-46014.

[68] Kamenev, Y.; Lushina, M.; Yakovlev, V. “New Lead-Acid Battery for Submersible Vehicles”; J. Power Sources 2009, 188, 613-616.

[69] Rostami, H.; Zhiani, M.; Zamani, A. R.; Madhkhan, M. “Fuel Cells Application in Subsea Industries”; Proc. 3rd Fuel Cell Seminar of Iran, 2009, 28, 1-5.

[70] “APPLICATIONS – TRANSPORTATION | Ships: Fuel Cells”; Encyclopedia of Electrochem. Power Sources, Elsevier, 2009.

[71] Krummrich, S.; Llabrés, J. “Methanol Reformer – The Next Milestone for Fuel Cell Powered Submarines”; Int. J. Hydrogen Energy 2015, 40, 5482-5486.

[72] Ghosh, P. C.; Vasudeva, U. “Analysis of 3000 T Class Submarines Equipped with Polymer Electrolyte Fuel Cells”; Energy 2011, 36, 3138-3147.

[73] Psoma, A.; Sattler, G. “Fuel Cell Systems for Submarines: From the First Idea to Serial Production”; J. Power Sources 2002, 106, 381-383.

[74] Pein, M. “Fuel Cells Ideal for Demanding Maritime Applications”; Fuel Cells Bulletin 2012, 2012, 14-15.

[75] Das, J. N. “Fuel Cell Technologies for Defence Applications”; Energy Eng. 2017, 9-18.

[76] Brighton, D. R.; Mart, P. L.; Clark, G. A.; Rowan, M. J. M. “The Use of Fuel Cells to Enhance the Underwater Performance of Conventional Diesel Electric Submarines”; J. Power Sources 1994, 51, 375-389.

[77] Rains, D. A.; Mitchell, K. A. “Nuclear vs. Non-Nuclear Attack Submarine Powerplants”; Naval Eng. J. 1993, 105, 224-231.

[78] “Third Fuel Cell Submarine Handed to German Navy”; [Online] https://doi.org/10.1016/S1464-2859(06)71094-X

[79] Nimir, W.; Al-Othman, A.; Tawalbeh, M.; Al Makky, A.; “Approaches Towards the Development of Heteropolyacid-Based High Temperature Membranes for PEM Fuel Cells”; Int. J. Hydrogen Energy 2021.

[80] Leo, T. J.; Durango, J. A.; Navarro, E. “Exergy Analysis of PEM Fuel Cells for Marine Applications”; Energy 2010, 35, 1164-1171.

[81] Han, J.; Charpentier, J. F.; Tang, T. “State of the art of fuel cells for ship applications”; IEEE Int. Symposium. Ind. Electron. 2012, 1456-1461.

[82] de-Troya, J. J.; Alvarez, C.; Fernández-Garrido, C.; Carral, L. “Analysing the Possibilities of Using Fuel Cells in Ships”; Int. J. Hydrogen Energy 2016, 41, 2853-2866.

[103] Gohardani, O.; Elola, M. C.; Elizetxea, C. "Potential and Prospective Implementation of Carbon Nanotubes on Next Generation Aircraft and Space Vehicles: A Review of Current and Expected Applications in Aerospace Sciences"; Progress in Aerosp. Sci. 2014, 70, 42-68.

[104] Fotouhi, A.; Auger, D. J.; O'Neill, L.; Cleaver, T. "Lithium-Sulfur Battery Technology Readiness and Applications—A Review"; Energies 2017, 10, 1937.

[105] Zhang, H.; Li, X.; Zhang, H. "Li-S and Li-O_2 Batteries with High Specific Energy: Research and Development"; Switzerland, Springer, 2016.

[106] Mark, Gregory J. O. "Lithium-Sulfur Batteries"; John Wiley & Sons Ltd. 2019.

[107] , X.; Zhao, X.; Ma, C.; Yang, Z. "Electrospun Carbon Nanofibers with MnS Sulfiphilic Sites as Efficient Polysulfide Barriers for High-performance Wide-Temperature-Range Li–S Batteries"; J. Mater. Chem. A, 2020, 8, 1212-1220.

[108] Reid, C.; Dobley, A.; Seymour, F. W. "Lithium-Air Battery Cell Development"; Twelfth Int. Energy Convers. Eng. Conf., 2014, 3552.

[109] Goh, S. T.; Zekavat, S. R. "All Electric Aircraft Mid-Air Recharging via Wireless Power Transfer: Battery Requirement Study"; Sixth IEEE Int. Conf. Wireless. Space. Extreme Environ., 2018, 212-217.

[110] "Integrated Computational-Experimental Development of Lithium-Air Batteries for Electric Aircraft"; [Online] https://ntrs.nasa.gov/citations/20190000487

[111] Sai, L.; Wei, Z.; Xueren, W. "The Development Status and Key Technologies of Solar Powered Unmanned Air Vehicle"; IOP Conf. series: Mater. Sci. Eng. 2017, 187, 012011.

[112] Putt, R.; Naimer, N.; Atwater, T. "Fourth-Generation Zinc-Air Batteries"; Proc. 41st Power Sources Conf. 2004, 1-4.

[113] Boukoberine, M. N.; Zia, M. F.; Benbouzid, M.; Zhou, Z. "Hybrid Fuel Cell Powered Drones Energy Management Strategy Improvement and Hydrogen Saving Using Real Flight Test Data"; Energy Convers. Manage. 2021, 236, 113987.

[114] Kim, S. J.; Lim, G. J.; Cho, J. "Drone Flight Scheduling Under Uncertainty on Battery Duration and Air Temperature"; Comput. Ind. Eng. 2018, 117, 291-302.

[115] Li, N.; Liu, X.; Yu, B.; Li, L. "Study on the Environmental Adaptability of Lithium-ion Battery Powered UAV Under Extreme Temperature Conditions"; Energy 219, 119481.

[116] Rodrigues, M. T. F.; Babu, G.; Gullapalli, H.; Kalaga, K. "A Materials Perspective on Li-ion Batteries at Extreme Temperatures"; Nat. Energy 2017, 2, 1-14.

[117] Tikhomirov, A. B.; Lesins, G.; Drummond, J. R. "Drone Measurements of Surface-based Winter Temperature Inversions in the High Arctic at Eureka"; Atmospheric Measurement Techniques 2021, 14, 7123-7145.

[118] Ma, Y.; Chiang, S. W.; Chu, X.; Li, J.; "Thermal Design and Optimization of Lithium ion Batteries for Unmanned Aerial Vehicles"; Energy Storage 2019, 1, 1-11.

[119] "Thermal Behaviour of Lithium-ion Batteries and the Implications on Submarine System Design"; [Online] http://resolver.tudelft.nl/uuid:f102aa75-fa6a-48d2-83c9-92c9e632ff6a

[120] Kim, J.; Choi, Y.; Jeon, S.; Kang, J. "Optrone: Maximizing Performance and Energy Resources of Drone Batteries"; IEEE Trans. Computer-Aided Design Integr. Circuits Syst. 2020, 39, 3931-3943.

[121] Wang, J.; Jia, R.; Liang, J.; She, C.; Xu, Y. P. "Evaluation of A Small Drone Performance Using Fuel Cell and Battery; Constraint and Mission Analyzes"; Energy Reports 2021, 7, 9108-9121.

[122] Zakhvatkin, L.; Schechter, A.; Buri, E.; Avrahami, I. "Edge Cooling of a Fuel Cell during Aerial Missions by Ambient Air"; Micromachines 2021, 12, 1432.

[123] Roh, C. W.; Choi, J.; Lee, H. "Hydrophilic-Hydrophobic Dual Catalyst Layers for Proton Exchange Membrane Fuel Cells Under Low Humidity"; Electrochem. Commun. 2018, 97, 105-109.

[124] Gong, A.; Verstraete, D. "Fuel Cell Propulsion in Small Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles: Current Status and Research Needs"; Int. J. Hydrogen Energy 2017, 42, 21311-21333.

[125] Rostami, M.; Dehghan M. M.; Afshari, E. "Performance Evaluation of Two Proton Exchange Membrane and Alkaline Fuel Cells for Use in UAVs by Investigating the Effect of Operating Altitude"; Int. J. Energy Res. 2021, 1-16.