مقاله

معرفی سامانه‌های هیبریدی نوین پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز جهت کاربرد در واحد توان کمکی هواپیماها

محمد امیان*
مجتمع دانشگاهی هوافضا
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
m.ommian@gmail.com

جاماسب پیرکندی
استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
jamasb_p@yahoo.com

مصطفی محمودی
استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
mostafamahmoodi@mut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۰۵

چکیده

مولدهای الکتریکی که توسط موتورهای اصلی هواپیما یا توربین گازی کوچکی تحت عنوان واحد توان کمکی راه‌اندازی می‌شوند، به‌طور سنتی و طی سالیان متمادی تأمین‌کنندهٔ نیازهای الکتریکی هواپیماها بوده‌اند. در این میان، توربین گاز به‌عنوان منبع اصلی تأمین توان، علاوه بر بازده پایین، سروصدای نامطلوب ایجاد و آلاینده‌های زیست محیطی تولید می‌کند. به‌همین دلیل سازندگان هواپیما رقابت چشمگیری را جهت کاهش همزمان مصرف سوخت و آلاینده‌ها آغاز نموده‌اند که یکی از مهم‌ترین آنها توسعهٔ پیل‌های سوختی است. ترکیب پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز، سیستم تولید توان جدیدی است که طی سالیان اخیر به‌شدت مورد توجه شرکت‌های هوایی قرار گرفته است. این سامانهٔ هیبریدی ضمن افزایش بازده و کاهش آلاینده‌های زیست محیطی، کاهش قابل توجه مصرف سوخت را نیز به‌دنبال دارد. هدف اصلی این مقاله بررسی عملکرد سامانهٔ توان جایگزینی است که با ترکیب توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد، قدرت مورد نیاز واحد توان کمکی هواپیما را فراهم می‌کند. بررسی نحوهٔ کارکرد، پارامترهای طراحی و متغیرهای تصمیم‌گیری در این سامانه و بررسی چالش‌های پیش‌رو از دیگر موارد مطالعه‌شده در این پژوهش است. نتایج نشان می‌دهد که سامانهٔ هیبریدی مورد اشاره دارای عملکرد مناسبی است و قابلیت کارکرد با بازده نزدیک به ۷۰ درصد را خواهد داشت که بیش از دو برابر بازده توربین گاز معمولی می‌باشد.

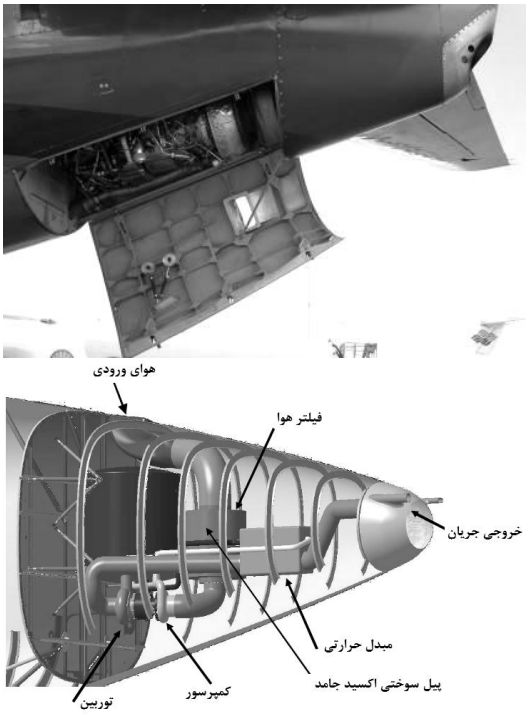
واژگان کلیدی: پیشرانش هوایی، توربین گاز، پیل سوختی اکسید جامد[1]، واحد توان کمکی هواپیما

۱. مقدمه

با توجه به افزایش ترافیک هوایی و تقاضا برای به خدمت گرفتن هواپیماهای پیشرفته، ضروری است در آینده هواپیماها از فیلترهای فنی، عملیاتی و اقتصادی جدیدتر و سختگیرانه‌تری در زمینهٔ تولید توان برای سیستم‌های اصلی و کمکی گذر کنند. مشکلاتی چون کاهش مصرف سوخت، سروصدا و آلاینده‌های خروجی، لزوم استفاده از فناوری‌های

جدیدتر را دوچندان می‌کند که در این بین پیل‌های سوختی به‌دلیل بازدهی بالا و عملکرد زیست محیطی قابل قبول، پتانسیل خوبی برای تحقق این امر خواهند داشت. بدیهی است نظر به محدودیت منابع هیدروکربنی در جهان و نیاز به کاهش آلاینده‌ها، تأمین توان با بازده بالا نیازی اساسی به‌حساب می‌آید. فناوری پیل سوختی که در آن هیدروژن طی یک سری واکنش‌های الکتروشیمیایی با اکسیژن توان الکتریکی و حرارت تولید می‌کند، از بهترین گزینه‌های تولید انرژی محسوب می‌شود. پیل‌های سوختی به‌دلیل بازده بالا، عدم انتشار آلاینده‌های زیست محیطی، توان بالا، نبود قطعات متحرک و عدم ایجاد ارتعاش و صدا، تجهیزات مطلوبی برای تولید انرژی در آینده محسوب می‌شوند. یکی از انواع مهم و پرکاربرد پیل‌های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد است که در میان انواع پیل‌های سوختی، بالاترین بازده بالقوه برای تبدیل سوخت به الکتریسیته را دارد. دمای عملکرد بالای این پیل‌های سوختی سبب شده است تا در آنها بتوان سوخت‌های متنوعی را به‌صورت مستقیم مورد استفاده قرار داد. توانایی این نوع از پیل‌های سوختی در استفاده از سوخت‌های هیدروکربنی یا هیدروژن، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در حل معضل انرژی حال و آیندهٔ جهان داشته باشد. پیش‌بینی می‌شود در آینده، هیدروژن و پیل سوختی بتواند نقشی محوری در کنترل آلایندگی و آلودگی داشته باشد. موتورهای الکتریکی و پیل‌های سوختی جایگزین بسیار مناسبی برای موتورهای احتراقی می‌باشند. در حقیقت اگر هیدروژن از منابع فسیلی تأمین شود، سیستم‌های تولید توان هیبریدی با پیل سوختی می‌توانند انتشار مواد آلاینده در جو را به کمترین حد ممکن برسانند. با این جایگزینی، بازده به‌میزان قابل توجهی افزایش و انتشار مواد آلاینده کاهش می‌یابد. هیدروژن به‌عنوان بهترین گزینه و اقتصادی‌ترین سوخت در درازمدت به‌منظور استفاده در هواپیما و پهپادها[۲] از پتانسیل بسیار مناسبی برخوردار است. در واقع هیدروژن ساده‌ترین سوخت جهت استفاده در واحدهای تولید توان است و موجب افزایش بازده و سادگی در سیستم‌های پیشرانش هواپیما و پهپاد می‌گردد. در صورت به‌کارگیری این سامانه و کاهش مصرف سوخت می‌توان علاوه بر افزایش مداومت پروازی، محمولهٔ بیشتری حمل نمود که این مهم فاکتوری اساسی در طراحی هواپیماها می‌باشد [۱-۲].

ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با توربین گاز، سامانهٔ هیبریدی نوینی است که در آن همانند چرخه‌های تولید توأمان، ضمن استفاده از انرژی اتلاف‌شونده، افزایش زیادی در بازده کلی حاصل می‌شود. در حوزهٔ هوایی به‌کارگیری این سامانهٔ هیبریدی در واحدهای تأمین توان پهپادها جهت ایجاد مداومت پروازی بالا[۳]، همچنین استفاده در سامانهٔ واحد توان کمکی هواپیماها[۴]، از جمله مواردی است که طی سالیان اخیر به‌شدت مورد توجه قرار گرفته و در حال عملیاتی‌شدن است. در شکل ۱ نمونه‌ای از کاربرد این نوع از سیستم‌های هیبریدی در یک واحد توان کمکی هواپیما نمایش داده شده است.



شکل ۱. سامانهٔ واحد توان کمکی هواپیمای بوئینگ ۷۷۷ مجهز به پیل سوختی اکسیدجامد و توربین گاز [۱]

۲. واحد توان کمکی هواپیما

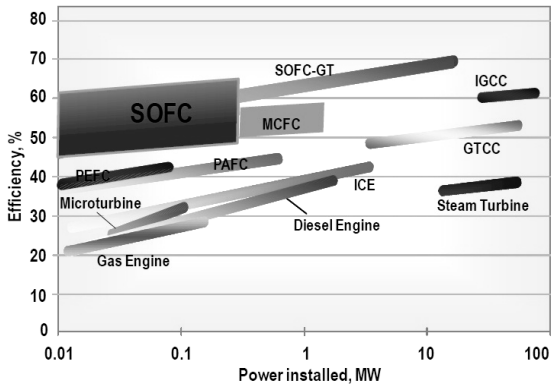
هدف نخستین از به‌کارگیری واحدهای توان کمکی در پیشرانش هوایی تأمین توان الکتریکی لازم برای روشن‌کردن موتور اصلی است. موتورهای توربینی برای فراهم‌کردن تراکم هوای کافی جهت شروع به‌کار باید تا سرعت‌های دورانی بالا شتاب داده شوند. موتورهای جت کوچک اغلب توسط موتورهای الکتریکی روشن می‌شوند، حال آنکه این کار در موتورهای بزرگتر با یک موتور توربینی هوایی انجام می‌گیرد. قبل از روشن‌شدن موتور اصلی، واحد توان کمکی توسط باتری یا یک سامانهٔ هیدرولیکی روشن می‌شود. با شروع به‌کار واحد توان کمکی، توان الکتریکی لازم برای روشن‌شدن موتور اصلی هواپیما و همچنین سایر سیستم‌ها (سیستم‌های هیدرولیکی، پنوماتیکی و جز این‌ها) فراهم می‌گردد. از طرفی، واحدهای توان کمکی در مواقعی که موتور اصلی به هر دلیل خاموش است، برای راه‌اندازی سیستم‌های دیگری همچون سیستم‌های تهویه مطبوع هواپیما مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۲ نمایی از مصرف‌کننده‌های اصلی واحد توان کمکی نمایش داده شده است. از کاربردهای دیگر واحد تولید توان، تأمین توان الکتریکی لازم برای کنترل سیستم‌های گوناگون هواپیما قبل از پرواز می‌باشد. برخی از واحدهای توان کمکی به یک پمپ هیدرولیکی نیز متصل می‌باشند که این مسئله به خدمه اجازه می‌دهد تجهیزات هیدرولیکی همچون کنترل پروازی یا سطوح برازا (فلپ) را قبل از پرواز کنترل کنند. در بعضی از هواپیماها این قابلیت به‌عنوان سیستم جایگزین موتور یا سیستم‌های هیدرولیکی در هنگام خرابی یا نقص موتور اصلی می‌باشد. محل نصب این سامانه معمولاً قسمت عقب و دم هواپیماست. واحد توان کمکی اغلب یک توربین گاز می‌باشد که در زمان خاموشی هواپیما و شرایط اضطراری مثل خرابی و نقص موتور اصلی جزء سامانه‌های حیاتی در مجموعهٔ پیشرانش هوایی بوده و می‌تواند توان مورد نیاز سامانه‌های مورد نظر را تأمین کند [۱].

شکل ۲. مصرف‌کننده‌های اصلی واحد توان کمکی هواپیما

۳. پیل سوختی اکسید جامد

پیل سوختی وسیله‌ای است که طی یک واکنش الکتروشیمیایی، سوخت و اکسایندە را ترکیب و انرژی شیمیایی سوخت را مستقیماً به انرژی الکتریکی و گرمایی مبدل می‌کند. پیل سوختی انواع متنوعی دارد که بسته به

نوع کاربرد از آن استفاده می‌شود. قابلیت بالای پیل‌های سوختی در ترکیب با سایر سیستم‌های تولید توان سبب شده است که طی سال‌های اخیر سیستم‌های هیبریدی مورد توجه جدی قرار بگیرد. در شکل ۳ بازده انواع سیستم‌ها نمایش داده شده و همان‌گونه که مشاهده می‌شود پیل سوختی اکسید جامد در میان انواع پیل‌های سوختی دارای بازده بالایی می‌باشد [۳].



شکل ۳. مقایسه بازده سیستم‌های مختلف تولید انرژی

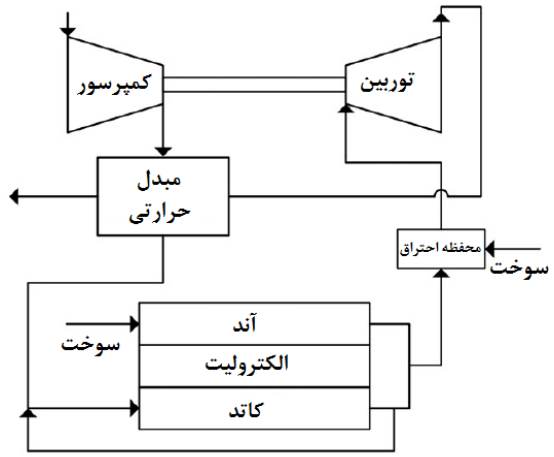
پیل سوختی اکسید جامد به‌دلیل بازدهی بالا در تبدیل انرژی شیمیایی سوخت‌های فسیلی به انرژی الکتریکی و انتشار ناچیز آلاینده‌ها از جمله اولویت‌های تولید توان در آینده به‌حساب می‌آید. توسعهٔ پیل سوختی اکسید جامد از اواخر دههٔ ۱۹۵۰ م آغاز شد و در حال حاضر بالاترین دمای کاری را در میان انواع پیل سوختی دارد. محدودهٔ دمای عملکرد این نوع پیل تقریباً ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد است و به‌همین دلیل از انواع سوخت‌ها در آن می‌توان استفاده نمود. این پیل سوختی دو ساختار صفحه‌ای و لوله‌ای دارد و در آن از الکترولیت جامد سرامیکی نازکی به‌جای الکترولیت مایع استفاده می‌شود [۴].

در پیل سوختی اکسید جامد، یون‌های اکسیژن (با بار منفی) از شبکهٔ کریستالی (عموماً ترکیبی از اکسید زیرکونیم و اکسید کلسیم) عبور می‌کنند و در کاتد ملکول‌های اکسیژن هوا با چهار الکترون ترکیب می‌شوند. وقتی یک سوخت گازی حاوی هیدروژن از آند عبور کند، یک جریان شارژشدهٔ منفی شامل یون‌های اکسیژن از الکترولیت عبور می‌کند تا سوخت را اکسید کنند. الکترون‌های ایجادشده در آند از یک مدار خارجی عبور و به کاتد می‌روند. با این کار مدار الکتریکی کامل و انرژی الکتریکی تولید می‌شود. پیل‌های سوختی اکسید جامد به مبدل خارجی نیاز ندارند و بازده‌ای حدود ۴۵ تا ۶۰ درصد دارند. طول عمر این نوع پیل سوختی بیش از ۴۰۰۰۰ ساعت است [۵].

دمای کارکرد بالای پیل سوختی اکسید جامد و نیاز به مواد گران‌قیمت، تنوع کاربردها را در این پیل سوختی محدود می‌کند. از طرفی، با افزایش دمای کارکرد امکان تبدیل سوخت در داخل پیل سوختی میسر می‌شود و امکان بهره‌برداری مؤثر از انرژی گرمایی تولیدشده در آن به‌وجود می‌آید. لازمهٔ عملکرد مناسب این نوع پیل رساندن آن به دمای کاری بالاست که چالش‌هایی چون تنش‌ها و شوک‌های حرارتی، سازوکارهای مؤثر گرمایش و کندی نرخ گرمایش را به‌همراه دارد [۵].

۴. کارکرد سامانهٔ هیبریدی

ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با توربین گاز، یک سامانهٔ هیبریدی نوین است. با توجه به اینکه بیشترین عامل بازگشت‌ناپذیری و تلفات در یک سیکل توربین گاز در محفظهٔ احتراق صورت می‌گیرد، ترکیب سامانهٔ توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد تا حدود زیادی از این تلفات جلوگیری می‌کند. یک سامانهٔ هیبریدی پیل سوختی و توربین گاز، دارای بازده تبدیل انرژی بالاتر بوده، به‌میزان کمتری محیط زیست را آلوده می‌کند و قابلیت استفاده از منابع تجدیدپذیر را به‌عنوان سوخت دارد. بازده حرارتی براساس ساختار و چیدمان اجزای سیکل و طرح‌های پیشنهادی سامانهٔ هیبریدی روبه پیشرفت است. سامانهٔ هیبرید توربین گاز مجهز به پیل سوختی اکسید جامد متشکل از کمپرسور، مبدل حرارتی، مجموعهٔ پیل سوختی، محفظهٔ احتراق و توربین می‌باشد. شکل ۴ دیاگرام این اجزاء را نشان داده است.



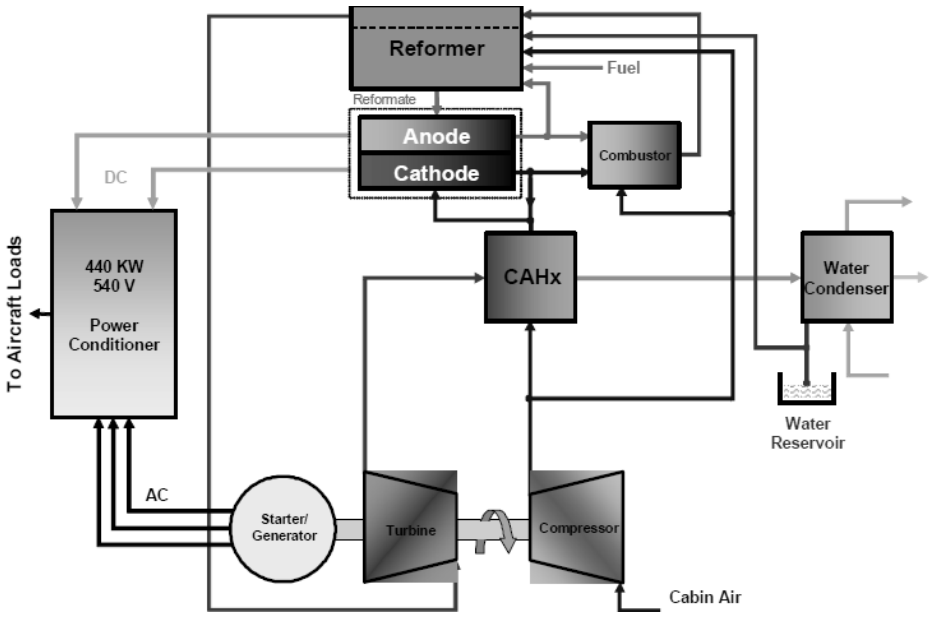
شکل ٤. دیاگرام اجزای پیل سوختی اکسید جامد با توربین گاز

در شکل ۵ نمایی شماتیک از یک سیستم هیبریدی در یک واحد توان کمکی هواپیما نمایش داده شده است. در ابتدا هوا توسط کمپرسور فشرده و وارد مبدل حرارتی می‌شود. این هوا اغلب از طریق جریان هوای تهویه‌شدهٔ خروجی کابین مسافران و یا به‌طور مستقیم از هوای خارج هواپیما تأمین می‌شود. مبدل حرارتی دمای هوای خروجی از کمپرسور را توسط دمای بالای گاز خروجی از توربین افزایش می‌دهد. جریان هوا، به‌سمت بخش کاتد پیل سوختی حرکت می‌کند. در واقع اگر هوای ورودی به پیل سوختی به اندازهٔ کافی گرم نباشد، بازده پیل سوختی کاهش می‌یابد. دمای هوای ورودی در پیل سوختی حدود ۶۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد است که در داخل پیل سوختی و پس از انجام فرایند شیمیایی به ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه می‌رسد. در ادامه سوخت جت وارد واحد بهسازی[5] می‌شود. در این قسمت دمای سوخت توسط مبدل حرارتی افزایش و جریان سوخت بعد از عبور از واحد بهسازی و تبدیل به هیدروژن وارد بخش آند پیل سوختی می‌شود. پس از عبور جریان سوخت و هوا از پیل سوختی، آب و دی اکسید کربن تولید می‌شود. جریان سوخت خروجی آند و جریان هوای خروجی از کاتد در محفظهٔ احتراق با هم ترکیب می‌شوند. دمای ورودی به محفظهٔ احتراق در حدود ۸۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد است که پس از انجام واکنش‌های شیمیایی دمای محصولات احتراق تا حدود ۱۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. از جریان گاز خروجی جهت به حرکت درآوردن توربین گاز استفاده می‌شود. به‌طور کلی سوخت مصرفی در تمام سیستم‌های هیبرید توربین گاز و پیل سوختی در واحدهای تولید توان کمکی کروسین می‌باشد که از سوخت اصلی هواپیما تأمین می‌گردد [۶].

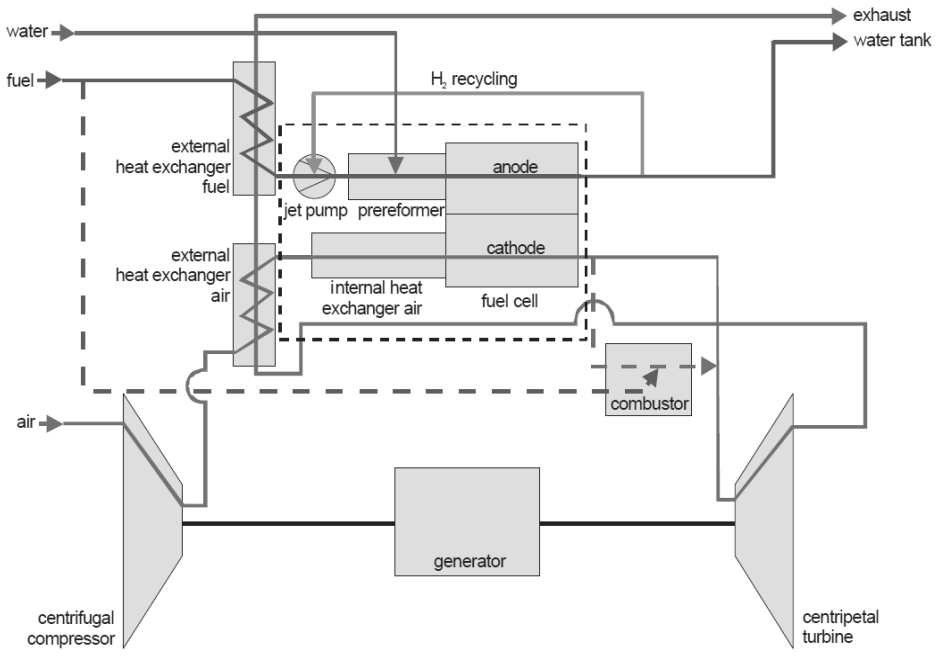
شکل ۶ طرح دیگری از واحد توان کمکی شرکت بوئینگ است؛ در این سیستم نیز سوخت مصرفی کروسین می‌باشد. در این طرح، سوخت پس از عبور از مبدل حرارتی بهسازی و هیدروژن از آن جدا می‌شود. هیدروژن و هوا پس از عبور از بازیاب وارد صفحات پیل سوختی می‌شوند. در این سیستم بخشی از هوای خروجی کمپرسور بعد از عبور از بازیاب وارد محفظهٔ احتراق می‌شود. یکی از مزایای این طرح جلوگیری از تأثیر نوسانات فشار توربین گاز روی فشار پیل سوختی است. متناسب‌نبودن دینامیک پیل سوختی و توربین گاز می‌تواند موجب بروز ناپایداری در توان خروجی کل سیکل ترکیبی شود. در این طرح توان خروجی سیستم در حالت‌های مختلف، نوسان کمتری دارد [۶].

رویای بهره‌مندی از واحد توان کمکی با بازده بالا برای هواپیماهای تجاری، که از سامانهٔ هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز بهره می‌برند، بدون شک رویایی بسیار جذاب است که در آن بازده در سطح دریا حدود ۶۰ درصد و در ارتفاع بالا حدود ۷۰ درصد حاصل می‌گردد [۱]. این امر پیشرفتی بزرگ در فناوری فعلی بوده و نویدبخش صرفه‌جویی بسیاری در مصرف سوخت، هزینه‌های عملیاتی و کاهش آلاینده‌های خروجی می‌باشد. اما تحلیل‌های تکمیلی نشان داده است که برای بهره‌وری در تولید پیل‌های سوختی و کاهش هزینه‌های توسعهٔ آنها، طراحی یک سیستم پیل سوختی ماژولار با اندازه‌ای مشترک مورد استفاده در تمام هواپیماها ضروری است [۷]. هواپیماهای کوچکتر تعداد کمتر و هواپیماهای بزرگتر تعداد بیشتری از این ماژول‌های مشترک را مورد استفاده قرار خواهند داد. انتظار می‌رود که از این ماژول‌ها بتوان در ابعاد وسیعی در

سایر کاربردهای مرتبط نظامی و غیرنظامی از قبیل خودرو، لوکوموتیو، تانک، کشتی و مانند آن استفاده کرد. پیش‌بینی شده است که در گسترهٔ ۱۰۰ کیلووات تا ۱۰مگاوات سامانهٔ هیبریدی مورد اشاره قابلیت رقابت در بازار را داشته باشند.



شکل ۵. نمایی شماتیک از طرح هیبرید توربین گاز در هواپیما [۶]



شکل ۶. طرح سیستم ای. پی. یو.[۶] شرکت بوئینگ [۶]

مطالعات انجام‌شده و روند توسعه در این حوزه نتایج زیر را به‌همراه داشته است [۱-۲]:

۱. طراحی یک سیستم ترکیبی توربین گاز همراه با چند واحد پیل سوختی جهت استفاده از حداکثر

بازده حرارتی جریان گازهای خروجی می‌تواند بسیار مفید باشد.

۲. برای دستیابی به بازده بیشتر و ابعاد کمتر، بهتر است که توده[۷] در دماهای نسبتاً بالا؛ یعنی تقریبا بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد کار کند.

۳. کار توده با بازیافت بسیار زیاد در آند، چندین مزیت را برای سیستم بهمراه داشته که دمای بالای توده را به امری ضروری و بسیار مهم در سیستم مبدل می‌کند.

۴. کارکرد توده در فشارهای بالا (تا ۳ اتمسفر)، بازده و چگالی توان را بهبود خواهد بخشید. اگرچه فشار بالاتر چالش‌های دیگری را مانند الزامات مکانیکی برای محفظهٔ فشار توده به‌وجود خواهد آورد و بازده سیستم به‌دلیل توان مورد نیاز افزایش‌یافته برای راندن کمپرسور کاهش خواهد یافت.

۵. بهره‌وری بیشتر از سوخت منجر به افزایش بازده سیستم می‌شود، اما در عمل محدود به ولتاژ توده و اندازهٔ تبادلگر گرما می‌باشد.

۶. بازیابی آب که محصول فرعی مطلوبی در هواپیماست، عملی می‌باشد. اما نیاز به یافتن روش‌های جدیدتر برای بهبود بازیابی در ارتفاع و به حداقل رساندن آلودگی آب وجود دارد.

۷. با انجام اصلاحات لازم و مناسب در عملکرد توده و واحد بهسازی، امکان بسته‌بندی سیستم در حجم مناسب و وزن معقول وجود دارد.

۵. نتیجه‌گیری

هواپیماهای نسل آینده الکتریکی‌تر خواهند بود؛ بدین معنا که هر روز مصرف‌کننده‌های الکتریکی در آن بیشتر می‌شوند (توان الکتریکی مورد نیاز یک هواپیمای بزرگ مثل ایرباس ۳۸۰ حدود یک مگاوات می‌باشد که نسبت به هواپیماهای موجود مثل ایرباس ۳۲۰ دو برابر شده است). در حال حاضر برای تأمین توان الکتریکی از ژنراتورهای سوار بر موتور استفاده می‌شود که با ازدیاد مصارف، اندازهٔ ژنراتور و به‌تبع آن موتور بزرگتر خواهد شد که با توجه به محدودیت‌های موجود مثل فضای قابل دسترس و وزن، قابلیت اطمینان سیستم نیز کاهش می‌یابد. در واقع برآوردن نیاز مصرف‌کننده‌های جدید با روش‌های موجود امکان‌پذیر نبوده و این مشکل تنها با استفاده از روشی نوین و یکپارچه قابل حل خواهد بود. سامانهٔ هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز ضمن فراهم‌نمودن نیازهای الکتریکی، داشتن بازده کارکردی بالا، صرفه‌جویی در مصرف سوخت و تولید کمتر آلاینده‌های زیست محیطی را به‌دنبال دارد. مقایسهٔ واحد توان کمکی در حالت سنتی و هیبریدی هم از نظر کمی و هم از لحاظ کیفی، نشان از رخداد یک جهش قابل توجه در بازده هنگام تلفیق با هواپیما می‌باشد. این مهم نشان می‌دهد که سامانهٔ هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز دارای پتانسیل بالایی برای جایگزینی سیستم‌های موجود واحد توان کمکی می‌باشد. آنچه قابل دستیابی است، بازده بیش از ۶۰ درصد برای این سامانه بوده که البته در کنار استفاده از انرژی تجدیدپذیر ممکن خواهد بود. اما هنوز سئوال‌های بسیاری در حوزهٔ سامانهٔ هیبریدی فوق بی‌پاسخ مانده است. در حال حاضر رابطهٔ معکوسی بین بازده سامانه و وزن آن قابل مشاهده است و ممکن است در آینده با کاهش وزن، کارکرد در کاربرد هوایی افزایش یابد. در هر حال این سامانه چشم‌اندازی نویدبخش در حوزهٔ استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد.

٦. مآخذ

[1] Rajashekara, K., D. Daggett. "Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid APU System for Aerospace Applications." Industry Applications Conference, 2006, 41st IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2006 IEEE, Vol. 5, 2006.

[2] Daggett, D., et al. "Fuel cell APU for commercial Aircraft", H2Expo, Hamburg, Germany. Sep. 2005.

[3] Bohn, D., "Micro Gas Turbine and Fuel Cell–A Hybrid Energy Conversion System with High Potential", In Microgas Turbines (pp.13-1–13-46), Educational Notes RTO-EN-AVT-131, Paper 13. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. Available, 2005.

[4] Taherian, M., R. Akbari. "Hydrogen and fuel cell." *Journal of Hydrogen and fuelcell*, Vol. 8, No. 79, September 2003.

[5] Larminie, J., A. Dicks. *Fuel Cell Systems Explained*, Second Edition, John Wiley & Sons, 2003.

[6] Eelman, S., I. del Pozo y de Poza, "Fuel cell APU's in commercial aircraft–an assessment of SOFC and PEMFC concepts", 24th international congress of the aeronautical sciences, 2004.

[7] Riensche, E., E. Achenbach, et al. "Clean combined-cycle SOFC power plant-cell modelling and process analysis." *Journal of Power Sources* 86, 2000, pp. 404–410.

پی‌نوشت

1. solid oxide fuel cell
2. unmanned aerial vehicle
3. long endurance
4. auxiliary power unit
5. reformer
6. APU
7. stack