فناوری‌های پیشرانش هیبرید احتراقی- الکتریکی؛ مدل‌های مفهومی و معماری سامانه‌های پیشرانش هیبریدی

علیرضا غفاری[۱*]، علی میرمحمدی[۲]

[۱*] دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی Udebozorg73@gmail.com
[۲] عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی a.mirmohammadi@sru.ac.ir

چکیده

هوانوردی در سطوح مختلف همواره مورد توجه تصمیم‌گیران کشورها بوده است و پیشرفت در این رسته می‌تواند آینده‌ی یک ملت را دگرگون کند. مهمترین چالش‌های موجود بر سر راه گسترش پایدار صنعت هوانوردی را می‌توان در بهره‌وری انرژی، ایمنی و مسائل زیست محیطی دانست. این در حالی است که تمامی چالش‌های فوق به نوعی به سامانه‌ی پیشرانش مربوط است. لذا سرمایه‌گذاری در زمینه‌ی فناوری‌های جدید پیشرانش، الزام‌آور است. از طرف دیگر همانند تمامی تحولات فنی و فناوری، جایگزینی سوخت‌های رایج با انرژی پاک الکتریکی؛ نیازمند گذراندن یک دوره‌ی گذار است. در این مقاله ابتدا مفاهیم پیشرانش هیبریدی معرفی می‌شود و سپس بروزترین پروژه‌های مرتبط با این فناوری و ساختارها و چینش‌های مختلف سامانه‌های هیبریدی بررسی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: هوانوردی، سامانه‌های پیشرانش هیبریدی، پیکربندی و ساختار.

Internal combustion-electric hybrid propulsion technology: Conceptual designs and configuration of propulsion systems

Alireza Ghaffari[1*], Ali mirmohammadi[2]

[1*]MSc Student, Mechanical Engineering Department, Rajai Teacher Traning University Udebozorg73@gmail.com
[2']Faculty of Mechanical Engineering Department, Rajai Teacher Traning University a.mirmohammadi@sru.ac.ir

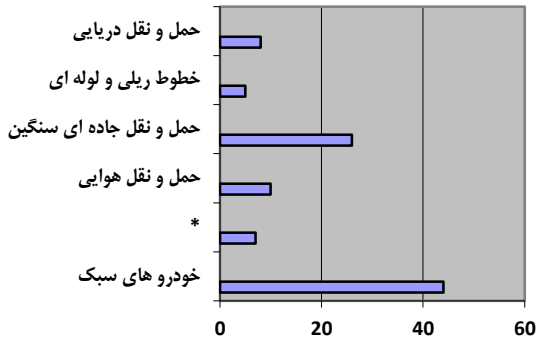
Abstract

Aviation (at different levels) has always been the focus of countries' decision makers and progress in this area can change the future of a nation. The most important challenges to the sustainable development of the aviation industry can be considered in energy efficiency, safety and environmental issues. However, all of the above challenges are somehow related to propulsion system. Therefore, investing in new propulsion technologies is mandatory. On the other hand, as with all technical and technological developments, the replacement of conventional fuels with clean electrical energy; requires a transition period. In this article, first hybrid propulsion concepts are introduced; the latest projects related to this technology and the various structures and layouts of hybrid systems are then reviewed.

Keywords: Aviation, Propulsion systems, Hybrid propulsion, Configuration and structure.

مقدمه

هوانوردی در سطوح مختلف (تجاری و عمومی) از پایه‌های اصلی جوامع مدرن امروزی است و حلقه اتصال مردم با بازارهای مختلف محسوب می‌شود. این نوع از حمل و نقل در دهه‌ی گذشته رشد سالانه ۳ تا ۵ درصدی را تجربه کرده است [۱]. با بررسی منابع آماری، شکل۱ نشان می‌دهد که وسایل نقلیه‌ی پرنده ۱۰ درصد از سهم مصرف انرژی حوزه حمل و نقل را به خود اختصاص داده‌اند [۲]. این حجم از مصرف انرژی توسط صنعت هوانوردی سبب می‌شود که این صنعت تاثیر زیادی بر اقتصاد کشورها داشته باشد.



شکل۱. سهم تقاضای انرژی حوزه های مختلف حمل و نقلی در سال ۲۰۱۸ [۲]

چالش‌های موجود بر سر راه گسترش پایدار صنعت هوانوردی فقط در زمینه مفاهیم اقتصادی خلاصه نمی‌شود و آینده‌ی هوانوردی همانند آنچه در شکل۱ مشاهده می شود ؛ در گروه فائق آمدن بر چالش‌های زیست محیطی و بهره‌وری انرژی و مباحث ایمنی است.

شکل۲. چلش های گسترش صنعت هوا نوردی[۱]

در همین راستا کمیته مشورتی تحقیق در زمینه هوانوردی اروپا (ACARE)[2] کاهش ۷۵ درصدی در زمینه انتشار دی اکسید کربن و کاهش ۶۵ درصدی آلاینده‌های صوتی را تا میانه قرن بیست و یکم متصور شده است [۱]. رسیدن به این اعداد و ارقام نیازمند یک پیشرفت همه جانبه در زمینه مباحث تخصصی آیرودینامیک، منابع انرژی جایگزین و سیستم‌های نوین کنترل ترافیک هوایی است. این درحالیست که تمامی موارد فوق بدون سرمایه‌گذاری و پیشرفت در حوزه‌ی سامانه‌های پیشرانشی، امکان‌پذیر نیست. سامانه‌ی پیشرانش همانند قلب یک مجموعه‌ی پرنده است و همسو با علوم آیردینامیکی توجهات زیادی را در سال‌های اخیر از سوی محققان به خود جلب کرده و تغییرات زیادی را به خود دیده است. شکل۳ دسته‌بندی سامانه‌های پیشرانش را که می‌توان به دو دسته‌ی سامانه‌های مرسوم و آینده نگرانه تقسیم کرد، نشان می‌دهد.

شکل .۳ سامانه‌های مرسوم و آینده نگر[۳]

یکی از آینده‌نگرانه‌ترین ایده‌ها در زمینه پیشرانش هوایی، حرکت به سمت سامانه‌های الکتریکی ا ست [۴]. این امکان با تعویض و کوپلینگ موتورهای درونسوز با نمونه‌های الکتریکی امکان‌پذیر است. سامانه‌های پیشرانش الکتریکی به خودی خود آلایندگی ندارند و در برخی از پارامترها (با لحاظ کردن الایندگی صفر آن‌ها) عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های احتراقی دارند. اما این سامانه‌ها در مقایسه با شعاع حرکتی سامانه‌های احتراقی چندان موفق نیستند. این بدان معنا ست که در این مقطع زمانی، سامانه‌های الکتریکی در زمینه‌ی محدوده و زمان پرواز نمی‌توانند مانند سامانه‌های احتراقی عمل کنند [۵و۶].

از طرف دیگر مانند تمام تحولات فنی در صنایع مختلف که یک دوره گذار دارند، سامانه‌های پیشرانش ترکیبی (هیبریدی) نیز از طرف محققان برای دوره گذار معرفی شده‌اند. این سامانه‌های پیشرانش با ترکیب عملکرد پاک

2- The Advisory Council for Aeronautics Research in Europe

* حمل و نقل عمومی

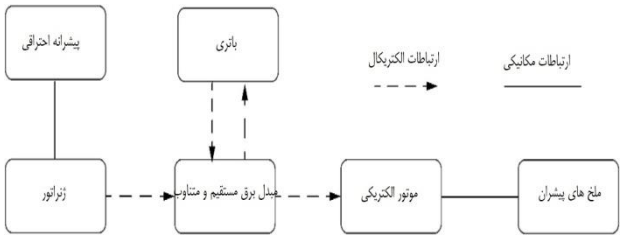
موتورهای الکتریکی و امکان ذخیره‌ی بالای انرژی در موتورهای درونسوز توجه بسیاری از سازمان‌های تحقیقات صنایع هوایی را نیز به خود جلب کرده‌اند. هرچند که مزایای فوق به قیمت پیچیدگی فناوری، بالاخص در حوزه طراحی و مباحث مربوط به مدیریت پیشرانه بدست می‌آید. با وجود این اشتیاق در زمینه پرنده‌های دورگه[1] تاکنون تحقیقات زیادی در کشور ما در حوزه‌ی پیشرانش هوایی انجام نشده‌است. لذا در این مقاله ابتدا مفاهیم پیشرانش هوایی دورگه بررسی می‌شود و سپس با یک مرور به روز در زمینه‌ی وسایل نقلیه‌ی هوایی هیبریدی؛ مباحث و ساختارها و چینش‌های متنوع مربوط به سامانه‌های پیشرانش هیبریدی بررسی خواهد شد.

۱- مبانی سامانه‌های هیبریدی

در یک مجموعه پیشرانش هیبریدی، دو یا چند منبع انرژی با هم ترکیب شده و بازده کلی سیستم را افزایش می‌دهند. در این مقاله دو منبع الکتریکی و سوخت‌های فسیلی در نظر است. همانند سناریوهای مرسوم در خودروهای زمینی، در پیشرانه‌های هوایی نیز ساختارهای سری و موازی و سری – موازی مطرح است.

۱.۱-ساختار سری

در ساختار هیبرید سری، عامل اصلی محرک ملخ‌های پیشران ؛ موتور الکتریکی است (شکل۴).



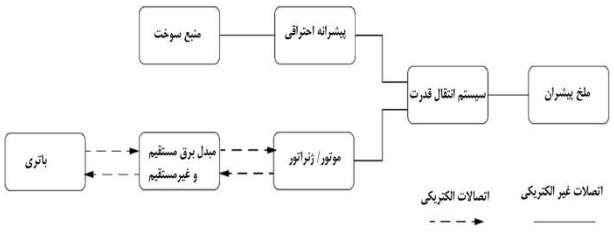
شکل۴. ساختار سری

توان پیشرانه احتراقی به واسطه‌ی یک ژنراتور صرف تامین نیاز الکتروموتورها می شود. این ساختار انتقال قدرت، به راحتی امکان گسسته سازی سامانه پیشرانش[2]را فراهم می‌سازد و می‌تواند در هواپیماهای بزرگ و چند موتوره اجرا شود [۷]. مزیت ساختار سری در عدم کوپلینگ سامانه‌های احتراقی و الکتریکی است. لذا توان کلی سامانه پیشرانش به دور موتور سیستم احتراقی مربوط نیست و موتور درونسوز در همه‌ی شرایط پروازی می‌تواند تا در دور بهینه خود انجام وظیفه کند و بهترین کارایی را با کمترین مصرف سوخت داشته باشد. اتلاف زیاد انرژی حین عملیات تبدیل انرژی احتراقی به الکتریکی از مهمترین نقاط ضعف این سامانه است. همچنین ساختارهای سری برای انجام کار نیازمند سه بخش موتور درونسوز، ژنراتور و موتور الکتریکی است ؛ که هرکدام باید جانمایی و از لحاظ توان مقیاس‌بندی شوند. در این شرایط است که یک مجموعه هیبرید سری می‌تواند در سناریوهای مختلف عملیاتی به ایفای نقش بپردازد [۶]. همچنین با توجه به عدم اتصال مکانیکی سامانه‌های احتراقی و الکتریکی، امکان استفاده از پتانسیل پیشرانشی موتور درونسوز وجود ندارد.

۲.۱-ساختار موازی

در ساختار هیبرید موازی، موتور درونسوز و الکتروموتور هردو به نحوی به ملخ‌های پیشران متصل‌اند. بنابراین می‌توانند در پیشرانش وسیله نقلیه هوایی چه به صورت باهم و چه به صورت تکی ایفای نقش کنند [۸]. همچنین در این نوع ساختار، موتور درونسوز می‌تواند همزمان نقش پیشران و ژنراتور را بر عهده داشته باشد. بدین ترتیب انتخاب سامانه‌های الکتریکی و احتراقی با بهره‌وری کمتر نیز امکان‌پذیر است. چرا که فعالیت هم زمان آن‌ها وجود دارد. این سامانه‌ها به دلیل اینکه تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی در سناریوهای عملیاتی انجام نمی شود، بازده بالاتری دارند. اما سرعت دورانی ملخ پیشران همواره با دور بهینه در موتور درونسوز یکسو نیست و کارکرد موتور درونسوز در شرایط بهینه تضمین نمی‌شود. به طور کلی دو رویکرد در مواجه با این مسئله وجود دارد. اولین راه، استفاده از سیستم‌های انتقال قدرت ضریب متغیر (CVT[3]) است که امکان کارکرد مستقل ملخ پیشران و موتور را از نظر سرعت دورانی ممکن می‌سازد. دومین راه حل که به مراتب اقتصادی‌تر نیز هست، استفاده از استراتژی‌های مدیریت انرژی است [۷]. رویکردهای مدیریت انرژی می‌تواند با مدیریت سهم قدرت هر کدام از واحدهای الکتریکی و احتراقی، هردو منبع قدرت را در دور بهینه نگه دارد.

ساختارهای موازی از منظر جانمایی موتور و ژنراتور در زنجیره انتقال قدرت نیز دسته‌بندی می شوند. ساختارهای تک محور و دو محور مرسوم‌ترین نوع جانمایی در ساختارهای هیبرید موازی در سامانه‌های هوایی است [۹]. اگر پیشرانه و موتور ژنراتور همانند (شکل ۵) روی دو شفت جداگانه سوار شوند، این ساختار، دو محور نامیده می‌شود. در این ساختار با استفاده از یک سیستم انتقال قدرت ضریب متغیر[4]امکان مستقل شدن دور موتور پیشرانه و ملخ‌های پیشران ایجاد می‌شود.



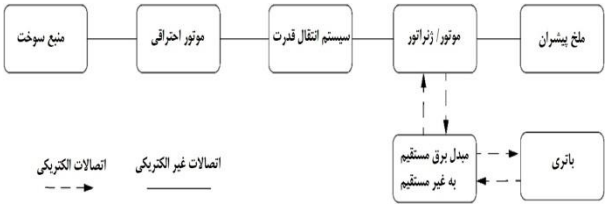
شکل ۵. ساختار موازی دو محور

---

hybrid
distributed propulsion

continuously variable transmission
cvt

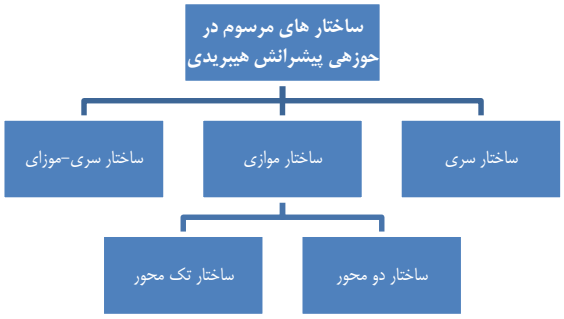
اگر موتور به طور مستقیم مستقیم به ژنراتور متصل باشد و به ملخ‌های پیشران متصل نباشد، ساختار تک محور تشکیل می‌شود. دراین ساختار سیستم انتقال قدرت دارای یک محور ورودی است(شکل ۶) و موتور الکتریکی بدون واسطه به ملخ پیشران متصل است. در این ساختار موتور درونسوز و الکتروموتور توسط کلاچ‌های منفصل کننده و تعدادی چرخ دنده بهم متصل‌اند. در ساختار تک محور سرعت موتور ژنراتور با ملخ پیشران همواره یکسان است. این ساختار با توجه به پیچیدگی کمتر در هواپیماهای مقیاس متوسط کاربرد دارد و می‌تواند در کاهش وزن و افزایش امنیت آن‌ها موثر باشد.



شکل ۶ ساختار موازی تک محور

۲.۱-ساختار سری-موازی

ساختار سری-موازی که به عنوان ساختار جدایش[۱]توان شناخته می شود ؛ ترکیبی از دو ساختار مطرح شده‌ی قبلی است. در این ساختار، ملخ پیشران و موتور درونسوز و الکتریکی و ژنراتور به یک مجموعه چرخ دنده سیاره‌ای متصل هستند. این ساختار علاوه بر اینکه توزیع توان را با انعطاف بیشتری انجام می‌دهد؛ می‌تواند موتور درونسوز و الکتریکی را در دور بهینه حفظ کند. ساختار سری موازی، پیشرفته‌ترین نوع سامانه‌های هیبرید است و پیچیدگی‌های فنی بیشتری، در زمینه کنترل جریان قدرت دارد.

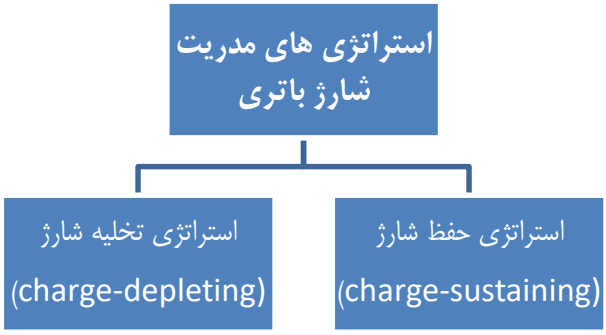


شکل ۷.اینفوگرافی ساختارهای مرسوم هیبریدی

درمیان ساختارهای مرسوم هیبریدی، ساختار سری شرایطی را ایجاد می‌کند که موتور درونسوز در سرعت دورانی بهینه خود کار کند. اما بازده کلی سیستم‌های سری به جهت تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی در سطح پایینی قرار می‌گیرد. ساختار سری-موازی بهینه‌ترین ساختار از بین موارد فوق است. اما به دلیل پیچیدگی زیاد چندان پرکاربرد نیست.

۲-استراتژی‌های شارژ

علاوه بر سناریوهای انتقال قدرت، سیستم‌های پیشرانش هیبرید-الکتریک از لحاظ مدیریت شارژ باتری نیز به دو دسته تقسیم می‌شوند(شکل ۸).



شکل۸. استراتژی های مدیریت شارژ باتری

استراتژی حفظ شارژ، بر نگهداری شارژ باطری در یک سطح مشخص تاکید دارد. این رویکرد با شارژ پیوسته باتری‌ها همراه است و سبب می‌شود همواره یک میزان شارژ ذخیره برای شرایط بحرانی آماده استفاده باشد. این مسئله سبب می‌شود که انرژی الکتریکی، بیشتر صرف شارژ باتری شود، تا اینکه در پیشرانه عملیات پیشرانش مورد استفاده قرار گیرد.

در استراتژی تخلیه شارژ [برخلاف رویکرد حفظ شارژ] عملیات پر شدن باتری‌ها عملا در اولویت نیست و میزان شارژ تا حداقل میزان ممکن کاهش می‌یابد. بنابراین باتری‌ها باید ظرفیت کافی جهت شرایط اضطرار را داشته باشند که این موضوع مستلزم تجهیز سامانه‌ی پیشرانش به باتری‌های بزرگتر و پرظرفیت‌تر است [۷].

۳- مهم‌ترین تحقیقات در طراحی مفهومی هواپیماهای هیبرید الکتریک

تحقیقات گسترده‌ی صنایع خودروسازی در حوزه‌ی پیشرانش هیبریدی، قابل انتقال به حوزه وسایل نقلیه پرنده نیز می‌باشد. سیستم‌های هیبریدی در خودروها منافعی از جمله افزایش شعاع حرکتی، کاهش سر و صدای اضافی و بهبود بهره‌وری انرژی را درپی دارد که در پیشرانه‌های درونسوز عادی، کمتر در دسترس است. با توجه به این مزایا، توجه بسیاری از محققان حوزه‌ی هوانوردی جهت استفاده از سامانه‌های پیشرانش در وسایل نقلیه هوایی جلب شد. البته که هرکدام از کلاس‌های مختلف وسایل نقلیه پرنده (کوچک مقیاس، مقیاس متوسط و بزرگ مقیاس) ساختارها و چینش پیشرانش متفاوتی را طلب می‌کنند.

Power split configuration

۱-۳.هواپیماهای هیبریدی کوچک مقیاس

در ابتدا محققان دانشگاهی جهت اعتبارسنجی عملکرد سامانه‌های پیشرانش هیبریدی بر هواپیماهای کوچک و بدون سرنشین متمرکز شدند [۱۰و۱۱]. در سال ۲۰۰۵ هارمن ای تی[1] یک طرح مفهومی پرنده هیبریدی، مناسب اهداف جاسوسی، امداد و نجات و شناسایی ارائه کرد. جهت کنترل فرآیند توزیع توان و نیرو، یک شبکه کنترلی عصبی طراحی شد. داده‌های برگرفته از شبیه‌سازی‌های مختلف تا ۵۴ درصد کاهش مصرف سوخت را نشان می‌دادند. هارمن تحقیقات خود را در انستیتو فناوری نیروی هوایی[2] ادامه داد. مقایسه بین ساختارهای مختلف هیبریدی و استراتژی‌های شارژ باتری توسط او و هیزروت[3] انجام شد و مشخص گردید که برای هواپیماهای کوچک مقیاس، ساختار هیبرید موازی به همراه استراتژی حفظ شارژ باتری؛ مناسب‌ترین گزینه است و می‌تواند کمترین وزن خالص را به همراه داشته باشد [۱۲]. ادامه‌ی این تحقیقات توسط آوسر[4] و مولسوورث[5] منجر به ساخت یک پرنده‌ی بدون سرنشین با قوای پیشران هیبریدی شد. سامانه‌ی پیشرانش این پرنده ترکیبی از یک موتور درونسوز جی- ایکس ۳۵ با توان ۹۶۹ وات و یک موتور الکتریکی فوجی[7] با توان ۱,۲ کیلو وات بود که بر مبنای مقیاس‌سنجی هیزروت و انجام بهینه‌سازی‌های لازم بر روی مجموعه بال و بدنه سوار شد.

گروه تحقیقاتی از دانشگاه کوئینزلند[8] یک روند آزمایشی جهت سنجش توانایی‌های یک پرنده هیبریدی با قوای محرکه‌ی متشکل از یک موتور درونسوز ۱۰ سی سی و یک موتور الکتریکی براش لس[9] طراحی کردند. با اعمال عوامل کنترلی بهینه توسط هانگ[10] مصرف سوخت ۶ در صد کاهش یافت و این درحالی است که میزان افزایش وزن فقط ۵ درصد گزارش شده است [۱۳].

شومان[11] از دانشگاه فنی مونیخ مدل‌های مرسوم هواپیماهای هیبریدی در مقیاس کوچک را بررسی کرد. ادامه‌ی این روند طراحی منجر به پیدایش یک روند طراحی پایه‌ای جهت مقیاس سنجی سیستم‌های بدون سرنشین شد. روش شومان دارای سه مزیت دقت بالا، عمومیت و هزینه محاسباتی پایین است. این روش نتایج بسیار خوبی را در پی داشت به شکلی که هواپیماهای مبتنی بر آن با وزن ۳۵ گرم قادر به حمل ۱۶ کیلوبار اضافی بودند.

تعدادی از طرح‌های مفهومی پرنده‌های بدون سرنشین با پیشرانش هیبریدی در جدول۱ طبقه‌بندی شده‌اند. در این جدول نوع پیکربندی هیبریدی، وزن و حداکثر زمان پرواز تحت بار بررسی شده است.

۲-۳. هواپیماهای مقیاس متوسط با پیشرانش هیبریدی

اولین هواپیمای سرنشین‌دار هیبریدی-الکتریکی با ساختار سری - موازی با نام دی. ای ۳۶. ای. استار[12] توسط شرکت تابعه هوافضای اروپا[13] دیاموند ایرکرفت[14] و زیمنس[15] معرفی شد. این هواپیمای سبک با دو صندلی، پرواز خود را در ژوئن ۲۰۱۱ آغاز کرد، و مجهز به یک موتور ۷۰ کیلوواتی ساخته شده توسط زیمنس و یک موتور شعاعی ۳۰ کیلووات ساخته شده توسط آسترو انجین[16] بود. نسخه پیشرفته‌تر، دی. ای ۳۶. ای. استار دو، مجهز به پیشرانه الکتریکی بهینه شده گردید و تقریباً ۱۰۰ کیلوگرم سبک‌تر از مدل قبلی بود که با توجه[6] به بهینه‌سازی‌های فوق افزایش شعاع پروازی قابل پیش‌بینی بود. سه کمپانی عظیم شریک در این طرح ادعا کردند که سری پیشرفته این پرنده هیبریدی، آینده‌ای برای حمل و نقل هوایی تجاری است و داده‌های آنالیز مقیاسی آن برای هواپیمای بزرگتر تا ۱۰۰ مسافر نیز قابل استناد است. دانشگاه ماریبور[17] و کمپانی هواپیما سازی پیپیستر[18] از سال ۲۰۱۳ پروژه‌ای با نام هایپ استیر[19] را با هدف توسعه و اعتبارسنجی سیستم‌های پیشرانش هیبریدی متناسب یک هواپیمای سبک آغاز کردند. پس از یک مطالعه چهار ساله، از نمونه اولیه قدرتمندترین پیشرانش هیبریدی سری دنیا (۲۰۰ کیلووات) برای هوانوردی عمومی رونمایی شد. پس از آن پیپیستر قصد داشت این سامانه پیشرانشی را در سری پرنده پنترا[20] چهار صندلی بنزینی خود استفاده کند و انتظار می‌رفت آزمایش‌های پرواز در سال ۲۰۲۰ انجام شود. اگرچه پرنده هیبریدی هایپ استیر مانند دی. ای ۳۶. ای. استار، برای هواپیمای سبک ساخته شده بود اما داده‌های آنالیز مقیاسی آن می‌توانست برای تأمین انرژی هواپیمای ۷۰ نفره به کار رود [۱۷]. در ژوئن ۲۰۱۹، کمپانی آمپیر[21] یک هواپیمای هیبریدی با نام آمپیر .ای .ای. ال . ۳۳۷ را به پرواز درآورد. آمپیر .ای .ای. ال بر اساس ۳۷۷

DA36 E-Star
EADS (Airbus)
Diamond Aircraft
Siemens
Austro Engine
Maribor

HYPSTAIR
Panthera

Harmon et
Air Force Institute of Technology (AFIT)
Hiserote
Ausserer
Molesworth
Honda GX35
Fuji
Queensland
Brush less
Hung
Scho¨mann

Aerospace Propulsion

سسنا[1]شکل گرفت و موتور درونسوز پیستونی با نام Continental (IO-360)، با یک موتور الکتریکی ۱۸۰ کیلوواتی جایگزین شد. این سیستم پیشرانشی با راندن دو پروانه مستقل می‌تواند پیشرانش هواپیما را به صورت هماهنگ تأمین کند. آمپیر از این ترکیب پیشرانشی به عنوان یک "معماری هیبرید موازی" نام می‌برد. با این وجود شاخه‌های خروجی موتور درونسوز و الکتروموتور کاملاً منفصل شده‌اند و عملا موتور درونسوز نمی‌تواند باتری را در پرواز شارژ کند.

بسیاری فعالان بزرگ صنعت حمل و نقل همانند (بل[2]هانی ول [3]اوبر[4] و غیره) بر این باورند که سفر هوایی درون شهری و بین‌شهری بخشی مهم در آینده حمل و نقل خواهد بود زیرا سفر سریع، کارآمد و بدون ازدحام را فراهم می‌کند. اولین هواپیمای پرنده عمود پرواز هیبریدی جهان، شرفلای، توسط گروه ورک هورز , رونمایی شد. اولین پرواز آزاد آن در آوریل ۲۰۱۸ اتفاق افتاد و حدود ۱۰ ثانیه طول کشید. شرفلای توسط هشت موتور رانده می‌شد که هر دو موتور آنها بر روی چهار بازو نصب شده بود. این هشت موتور توسط یک موتور درونسوز پیستونی ۱۵۰ کیلوواتی و ژنراتورهای دوگانه تأمین می‌شدند. موتور درونسوز ۱۵۰ کیلوواتی در نهایت با موتور درونسوز ۲۲۳ کیلوواتی توربینی جایگزین خواهد شد، بنابراین حداکثر وزن برخواست از ۶۸۰ کیلوگرم به ۱ تن افزایش می‌یابد. با این حال، هواپیماهای مجهز به موتور فن دارای نقص‌های ذاتی راندمان پایین و سرعت کم هستند. بنابراین، هواپیماهایی با پیشرانش جهت‌دار محبوبیت بیشتری پیدا می‌کند. شرکت هوافضای هانی ول معتقد است که آینده حمل و نقل شهری در گرو پیشرفت پرنده های عمود پرواز با قابلیت تعویض زاویه پیشرانش است. در نمایشگاه (CES نیز کمپانی بل تاکسی هوایی مفهومی خود، نکسوس، یک هواپیمای هیبریدی الکتریکی- پرنده عمود پرواز (پرنده عمود پرواز الکتریکی) را با استفاده از داکت فن زاویه‌دار و یک ژنراتور توربینی نمایش داد. در جدول۲ تعدادی از مهم‌ترین پروژه‌های هواپیماهای هیبریدی مقیاس متوسط جمع‌آوری شده است.

۳-۳. هواپیماهای بزرگ مقیاس با پیشرانش هیبریدی

دانشگاه صنعتی دلف یک سری مطالعات درباره کاربرد هواپیما با پیشرانش هیبریدی بر روی هواپیماهای مسافربری انجام داد. بوگارت[5]کاهش احتمالی مصرف سوخت و کاهش انتشار گازهای آلاینده را (درصورت استفاده از سامانه‌های پیشرانش هیبریدی) ارزیابی کرد. ووسکوجیل[6] بوگارت و همکاران یک معادله‌ی تحلیلی جدید برای شبیه سازی هواپیماهای هیبریدی بدست آوردند. نتایج نشان داد که طراحی موازی هیبریدی – الکتریکی می‌تواند باعث کاهش ۲۸٪ میزان سوخت شود و در عین حال ۱۴٪ حداکثر وزن برخواست را افزایش دهد. که این نتیجه‌گیری با پیشرفت انواع فناوری‌های الکتریکی و هوافضا بدست آمده است.

زامبونی و همکاران مصرف سوخت در سه پیکربندی هیبریدی را تحت فرضیات مختلف سطح فناوری مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان داد که معماری هیبرید موازی با توجه به فناوری روز دنیا یک گزینه محافظه کارانه است، در حالی که این مجموعه می‌تواند در حالت سری عملکرد بهتری داشته باشد.

ریس و هوگریف[7] و همکاران مزایای پیشرانش هوایی هیبریدی را مطالعه کرده‌اند. نتایج ایشان نشان داد سیستم‌های هیبریدی در مقابل افزایش وزنی که ایجاد می‌کنند، مزایای چندانی ندارند. از آنجا که نیاز اصلی هواپیماهای م سافربری به حداقل ر ساندن مخارج عملیاتی ا ست، محققین متغیری را به نام هزینه محدوده هوایی اختصاصی معرفی کرده‌اند. همچنین نتایج آنها نشان داد که مزایای هواپیماهای پیشرانش هیبریدی با کاهش وزن سیستم الکتریکی کاهش می‌یابد. به همین ترتیب، یکی دیگر از مطالعات آنها نشان داد که ا ستفاده از سی ستم‌های الکتریکی هیبریدی فقط برای مأموریت‌های برد کوتاه و متو سط حتی با ا ستفاده از باتری ۱,۵ کیلووات بر کیلوگرم عملی و ممکن است. برای مثال، هواپیماهای هیبریدی بهینه‌سازی شده در یک ماموریت خارج از شرایط طراحی شده‌ی ۹۰۰ مایلی به کاهش سوخت ۱۶٪ ر سید اما نتوانست به برد طولانی هواپیمای ا صلی (۳۳۰۰ مایلی) بر سد مگر اینکه با مساحت بال بزرگتر مقیاس‌بندی شود.

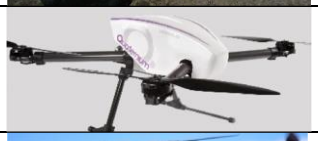
بزرگترین کمپانی هوافضای جهان، پتانسیل فناوری الکتریکی – هیبریدی را برای حمل و نقل در مقیاس بزرگ – یعنی برای خطوط هوایی منطقه‌ای یا بین قاره‌ای – بررسی کرده است. ایرباس به عنوان اولین قدم جهت رسیدن به اهداف طولانی مدت پیشرفت خطوط هوایی منطقه‌ای الکتریکی – هیبریدی، از رولز رویس و زیمنس به عنوان شرکای سوم جهت حمایت از برنامه‌ی X Fan – E در سال ۲۰۱۷ دعوت کرده است. چنین پیش‌بینی شده است که برنامه‌ی X Fan – E با استفاده از ۱۴۶ BAe (که مورد تست قرار گرفته است) اولین پرواز خود را در سال ۲۰۲۱ انجام می‌دهد. ۱۴۶ BAe یکی از چهار موتور جت توربینی را که توسط الکتروموتور ۲ MW جایگزین شده است خواهد داشت، در حالی که انرژی ۲ مگاواتی الکتروموتور توسط هر دو ژنراتور ۲,۵ مگاواتی و باتری ۲ تنی تامین خواهد شد. بوئینگ که راه را برای هواپیماهای کوتاه برد الکتریکی هموار می‌کند، بودجه استارت آپ Zunum را برای توسعه‌ی هواپیمای تجاری الکتریکی هیبریدی تامین کرده بود. چنین پیش‌بینی می‌شود که Zunum اولین هواپیمای هیبریدی– الکتریکی خود به نام ۱۰ ZA را در سال ۲۰۲۲ ارائه خواهد داد. جدول ۳ داده‌های طراحی چندین هواپیمای بزرگ تجاری که در بالا ذکر شد را نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به کلاس‌بندی و توان سامانه‌های پیشرانش،

Cessna
Bell
HONEY WELL
UBER

Bogaert et al
Voskuijl
Vries and Hoogreef

جمع‌آوری شده است اما برخی جزئیات ۱۵۰ – ECO و ۱۰ZA در دسترس نیست. ظرفیت بار مسافر با استفاده از تعداد صندلی نشان داده می‌شود و همچنین خلاصه‌ای از معماری هیبریدی هر مفهوم هواپیمای هیبریدی ارائه می‌شود.

جدول۱ تعدادی از طرح‌های مفهومی پرنده‌های بدون سرنشین با پیشرانش هیبریدی کوچک مقیاس

زمان پرواز	حداکثر ظرفیت باربری	حداکثر وزن برخواست	ساختار هیبریدی	موسسه یا شرکت	هواپیما
نامعلوم	۱,۲ کیلوگرم	۱۶ کیلوگرم	موازی	موسسه فناوری نیروی هوایی[۱۳]	
۲ ساعت	۶ کیلوگرم	۲۰ کیلوگرم	سری	کواترنیوم[۱۴]	
۱ ساعت	۱۰ کیلوگرم	۵۰ کیلوگرم	سری	فن آوری برتر پرواز[۱۵]	
ساعت۱	۵ کیلوگرم	۱۰ کیلوگرم>	موازی	Yeair![۱۶]	

جدول۲ تعدادی از مهم‌ترین پروژه‌های هواپیماهای هیبریدی مقیاس متوسط

موتور درونسوز/الکتریکی	حداکثر وزن برخواست	ساختار هیبریدی	نام	نام موسسه یا سازمان	تصویر
۱۲/۸ کیلووات	۲۱۰ کیلوگرم	موازی	سول[۱۹]	دانشگاه کمبریج	
۷۰/۳۰ کیلووات	۷۷۰ کیلوگرم	سری	دی. ای ۳۶. ای. استار[۲۰]	ای ای دی اس و دیاموند ایر کرفت و زیمنس	
۱۸۰/۱۵۶ کیلووات	۲۱۰۰ کیلوگرم	نا مشخص	ای ای ال[۲۱]	امپیر	
۱۵۰/– کیلووات	۶۸۰ کیلوگرم	سری	شرفلای[۲۲]	ورک هورس	

DA36 E-Star
EEL
Surefly

Air Force Institute of Technology
Quaternium
Top Flight Tech
soul

۵۰۰/ -کیلووات	نامشخص	سری-موازی	ای ویتول[۲۳]	رولزرویس	

جدول ۳ داده‌های طراحی چندین هواپیمای بزرگ مقیاس هیبریدی تجاری

موتور درونسوز/الکتریکی	تعداد صندلی	حداکثر وزن برخواست	ساختار هیبریدی	موسسه یا شرکت	نام پروژه	هواپیما
۱,۲/۲,۲مگاوات	۶۸	۲۲ تن	موازی	دانشگاه صنعتی دلف	- [۲۴]	
۳ تا ۳۱ کیلو نیوتن و یک ۲ مگاوات	۱۰۰	-	سری	ایرباس- رولزرویس - زیمنس	ای فن ایکس[۲۵]	
۱مگاوات	۱۲	۵ تن	سری	زونوم[۳]	زد ای ۱۰[۲۶]	
-/۱۸ مگاوات	۱۰۰	۶۳ تن	TeDP[۵]	ای اس آئرو[۶]	اکو -۱۵۰ [۲۷]	
۶۵/۶۰ مگاوات	۳۰۰	۲۲۳ تن	TeDP	ناسا	ان-۳ ایکس[۲۸][۴]	

٤- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بطور کلی هدف اصـــلی تحقیقات در مورد هواپیماهای هیبریدی در مقیاس کوچک ارزیابی امکان‌پذیری و تست پتانسیل هواپیماها با پیشرانش هیبریدی می‌باشد. گروه تحقیقاتی AFIT دریافت که فناوری پیشرانش هیبریدی با عملکرد اسـتقامتی رضـایت‌بخش می‌تواند مصـرف سـوخت را کاهش دهد. پهبادهای چند روتوره نیز می‌توانند از مزایای هواپیما با پیشـــرانش هیبریدی اسـتفاده کنند به این صـورت که ظرفیت باربری و طول مدت ماموریتشـان افزایش می‌یابد. پیشرفت‌های فنی در حوزه باتری‌ها و بهره‌وری انرژی نقش مهمی را در صـــنعت هواپیمایی بازی می‌کند چرا که فناوری پیشـــرانش هیبریدی می‌تواند قابلیت‌های پهپادها را برای سمپاشی، بازرسی و نظارت بر محصولات و برنامه‌های کشاورزی/ صنعتی افزایش دهد. در سال‌های اخیر چندین تولید کننده‌ی مطرح در زمینه و سایل نقلیه پرنده، که شروع به تولید مالتی کوپتر هیبریدی کرده‌اند. تاکســـی‌های هوایی eVTOL، همانند مالتی کوپترها، این ایراد را دارند که مدت زمان پروازش کوتاه است.

پیشـرانش احتراقی – الکتریکی می‌تواند مدت زمان سـفر هوایی را به طور چشـمگیری افزایش دهد. در نتیجه فرآیند حمل و نقل شـهری را تسـهیل ببخشـد. با این حال، در مورد هواپیماهای بال – ثابت سـبک، مزایا و معایب واضـــح و روشـــن نیســـتند همچنان تردیدهایی در مورد اقتصـــادی بودن ســـرمایه‌گذاری بر آن‌ها وجود دارد. برای مقیاس‌های متوســـط و کوچک، انیستیتوهای آکادمیک و صنعتی نسخه‌های آزمایشی پروازی یا قابل پرواز

EVTOL
E-FAN X
ZUNUM
ZA10
Turboelectric Distributed Propulsion
ES AERO
ECO-150
N3-X

ارائه کرده‌اند. علاوه بر این، شـرکت‌های تولید کننده‌ی پهباد در حال حاضـر یک سری محصولات با تولید انبوه را به بازار عرضه کرده‌اند. با این حال، مطالعات مربوط به هواپیماهای هیبریدی بزرگ به دلیل محدودیت فناوری‌های الکتریکی و سـایر فناوری‌ها، کماکان در مرحله طراحی مفهوم و تجزیه و تحلیل باقی مانده است. پروژه‌ی SELECT ناسا نشان داد که با پیشـرفت‌های تکاملی فناوری‌های متداول برای وسـایل نقلیه‌ی حمل و نقل هوایی مقیاس بزرگ، اهداف اصـلی پروژه‌ها برآورده نمی‌شـوند. اما به طور خلاصـه، مطالعه کاربرد در هواپیمای مقیاس متوسـط نه تنها دارای اهمیت نظری است، بلکه دارای اهمیت عملی نیز می‌باشد.

مراجع و منابع

[1] Dr. Arvind Gangoli Rao, Advanced Hybrid Engines for Aircraft Development, Delft University of Technology,2011.

[2] Felix Leach, Gautam Kalghatgi, Richard Stone, Paul Miles, The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines, Transportation Engineering,2020.

[3] Yujie Yi, Review and Future of Aircraft's Propulsion Type, Journal of Physics: Conference Series, 2019.

[4] Report of the High Level Group on Aviation Research, Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation, EUROPEAN COMMISSION,2011.

[5] C.E.D. Riboldi, F. Gualdoni, An integrated approach to the preliminary weight sizing of small electric aircraft, Aerospace Science and Technolog, 28 July 2016.

[6] C. C. Chan,The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles, IEEE, April 2007.

[7] Ye XIE, SAVVARISAL, Tsourdos ANTONIOS,zhang Dan,Gu JASON, Review of hybrid electric powered aircraft, its conceptual design and energy management, Chinese Journal of Aeronautics,2022.

[8] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. GayAli Emadi, Modern Electric Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicle Fundamentals Theory and Design, TL221.15.G39 2004.

[9] Guzzella L, Sciarretta A, Vehicle propulsion systems, Berlin Heidelberg, 2008.

[10] Lei T, Yang Z, Lin Z, et al, State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle Chinese J Aeronaut 2019;32(6):1488–503.

[11] Liu L, Du M, Zhang X, Conceptual design and energy management strategy for uav with hybrid solar and hydrogen energy, Acta Aeronaut Astronaut 2016.

[12] Hiserote R, Harmon F, Analysis of hybrid-electric propulsion system designs for small unmanned aircraft systems8th annual international energy conversion engineering conference, 2010 Jul.12

[13] Molesworth MP, Rapid prototype development of a remotely piloted aircraft powered by a hybrid-electric propulsion system Air Force Institute of Technology; 2012.

[14] Press. Four hour forty minute flight for quaternium hybrix.20, Available from: https://www.suas news.com/2017/12/four-hour-forty-minute-flight-quaternium hybrix-20.

[15] Top Flight Technologies. AirborgTM h8 10k with top flight hybrid-power system. [Internet], https://www.topflighttech.com/products/airborg-h8-10k-with-top-flight-hybrid-power-system.html

[16] Yeair. Table of specs: yeair! [Internet], https://yeair.de/specs/.

[17] Pipistrel. HYPSTAIR. [Internet]. [cited 2020 May 9]; Available from: https://www.pipistrel aircraft.com/hypstair

[18] Schiff B. Ampaire 337 "parallel hybrid" unveiled. [Internet]. 1447 [cited 2020 May 9]; Available from: https://www.aopa.org/news- and-media/all-news/2019/june/10/ampaire-337-parallel-hybrid-unveiled.

[19] Friedrich C, Robertson PA. ,Hybrid-electric propulsion for aircraft. J Aircr 2015

[20] Paur J. Siemens builds the chevrolet volt of airplanes. [Internet]. [cited 2020 May 9]; Available from:https://www.wired.com/2011/06/electric-airplane-uses-hybrid-power-similar-to-chevy- volt/.

[21] Schiff B. Ampaire 337 "parallel hybrid" unveiled. [Internet].[cited 2020 May 9]; Available from: https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2019/june/10/ampaire-337-parallel-hybrid-unveiled.

[22] Electric VTOL NewsTM. Workhorse surefly. [Internet]. [cited 2020 May 9]; Available from: http://evtol.news/aircraft/workhorse/.

[23] Rolls-Royce. The rolls-royce evtol project. [Internet]. [cited 2020 May 9]; Available from: https://www.rolls royce.com/media/our-stories/discover/2018/blue-sky-thinking-rr-unveils-evtol-concept-at-farnborough-airshow.aspx.

[24] Van BJ, Assessment of potential fuel saving benefits of hybrid- electric regional aircraft [dissertation], Delft: Delft University of Technology; 2015.

[25] Airbus. E-fan x: a giant leap towards zero-emission flight.[Internet]. [cited 2020 May 9]; Available from: https://www.airbus.com/innovation/future-technology/electric-flight/e-fan-x.html.

[26] Writer S. Zunum aero za10: hybrid-electric regional airliner aircraft. [Internet]. [cited 2020 May 9 Available from:https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.aspaircraft_id=2028.

[27] Schiltgen BT, Freeman J. ECO-150-300 design and performance, a tube-and-wing distributed electric propulsion airlinerAIAA Scitech 2019 Forum; 2019 Jan 7; Virginia, USA. Reston: AIAA;2019. p. 1808–20.

[28]Welstead JR, Felder JL, Patterson MD. Conceptual design of a single-aisle turboelectric commercial transport with fuselage boundary layer ingestion, Washington, D.C.: NASA Langley Research Center; 2017.