ریاست جمهوری
مرکز همکاریهای تحوّل و پیشرفت

پرنده الکتریکی، فرصت‌ها و ظرفیت‌ها

شماره : 1009
تاریخ انتشار: 1397/5/13

http://cpdi.ir/news/id/2961/

PIPISTREL

Elektra Two

elias
DAMELO
IABG

فهرست مطالب صفحه

۱- مقدمه ۸

۲- تعریف پرنده الکتریکی ۹

۳- انواع الکتریکی شدن پرنده ۱۰

۴- دلایل اهمیت یافتن پرواز الکتریکی ۱۴

۵- وضعیت کنونی پرواز الکتریکی در دنیا ۱۶

۵-۱- بخش هوانوردی عمومی و هواپیماهای تفریحی ۲۰

۵-۲- تاکسی شهری هوایی ۲۱

۵-۳- هواپیماهای منطقه‌ای ۲۲

۵-۴- هواپیماهای بزرگ تجاری ۲۲

۶- موانع توسعه پرواز الکتریکی ۲۴

۶-۱- فناوری ۲۴

۶-۲- تقاضای بازار ۳۰

۶-۳- مقررات ۳۰

۷- آینده پرواز الکتریکی ۳۱

۷-۱- سناریوی اول: ادامه روند کنونی پیشرفت ۳۱

۷-۲- سناریوی دوم: توسعه کاربردی محدود و خاص ۳۱

۷-۳- سناریوی سوم: تحولی در مقیاس کوچک ۳۲

۷-۴- سناریوی چهارم: تحولی در مقیاس بزرگ ۳۲

۸- وضعیت پرواز الکتریکی در ایران ۳۳

۸-۱- ضرورت و مزایای توسعه پرواز الکتریکی در ایران ۳۳

۸-۲- موانع توسعه پرواز الکتریکی در ایران ۳۶

۹- جمع‌بندی ۳۷

۱۰- کمیت‌های مهم در پرواز الکتریکی ۳۹

۱۱- انواع باتری و مقایسه آن‌ها ۴۰
۱۱-۱- باتری لیتیوم-یون ۴۱
۱۱-۲- باتری لیتیوم-سولفور ۴۱
۱۱-۳- مقایسه باتری با سوخت فسیلی ۴۲
۱۲- انواع موتور الکتریکی و مقایسه آن‌ها ۴۲
۱۲-۱- شرکت‌های مطرح در حوزه موتورهای الکتریکی ۴۴
۱۲-۲- مقایسه موتورهای معرفی‌شده ۵۶
۱۳- پیوست ۵۷
۱۳-۱- شرکت‌های داخلی در زمینه موتور الکتریکی ۵۷
۱۳-۲- مشخصات پرنده‌های الکتریکی ۵۸
۱۴- فهرست منابع ۷۸

فهرست اشکال

صفحه

شکل ۱: مدل پرنده تمام الکتریکی ۱۱
شکل ۲: مدل پرنده الکتریکی هیبرید موازی ۱۲
شکل ۳: مدل پرنده الکتریکی هیبرید سری ۱۲
شکل ٤: مدل پرنده الکتریکی هیبرید موازی ۱۳
شکل ٥: مدل پرنده الکتریکی توربو الکتریک ۱۳
شکل ٦: مدل پرنده الکتریکی نیمه توربو الکتریک ۱٤
شکل ۷: سهم هزینه سوخت درمجموع هزینه‌های یک پرنده[۱] ۱٦
شکل ۸: پروژه‌های توسعه پیشرانه الکتریکی از ۲۰۰٦ تا ۲۰۳۰+ (سال اولین پرواز) - بر اساس نوع سازنده پرنده .. ۱۷
شکل ۹: پروژه‌های توسعه پیشرانه الکتریکی از ۲۰۰٦ تا ۲۰۳۰+ (سال اولین پرواز) - بر اساس محل سازنده ۱۸
شکل ۱۰: پروژه‌های توسعه پیشرانه الکتریکی از ۲۰۰٦ تا ۲۰۳۰+ (سال اولین پرواز) - بر اساس نوع پیشرانه ۱۸
شکل ۱۱: برنامه‌های توسعه پرنده‌هایی با سیستم پیشرانه الکتریکی بر اساس تاریخ اولین پرواز[۳] ۲۰
شکل ۱۲: توسعه هواپیمای الکتریکی توسط ایرباس، بوئینگ و استارت‌آپ‌ها[۳] ۲۳
شکل ۱۳: نقشه راه توسعه فناوری باتری لیتیوم-یون[۳] ۲٥
شکل ۱٤: افت بازدهی در زنجیره توان برای کاربردهای هیبرید-الکتریک[۳] ۲٦
شکل ۱٥: سرانه پرنده‌های رده هوانوردی عمومی در کشورهای مختلف به ازای هر ۱۰۰ هزار نفر ۳٥
شکل ۱٦: محدودیت چگالی انرژی باتری‌ها ازلحاظ عملی[۴] و تئوری [٥] ٤۱
شکل ۱۷: نقشه راه توسعه پرنده الکتریکی شرکت زیمنس[۹] ٤٥
شکل ۱۸: سیستم پیشرانه موتور گلایدر پرنده DA 36 E-Star 2 شرکت زیمنس ٤٥
شکل ۱۹: نسل دوم پرنده DA 36 E-Star شرکت زیمنس ٤٦
شکل ۲۰: موتور الکتریکی Direct drive با توان ۰٫۲٥ مگاوات شرکت زیمنس ٤۷
شکل ۲۱: موتور الکتریکی ۱۷۰ کیلووات شرکت زیمنس ٤۹
شکل ۲۲: مقایسه موتورهای Magniflux با انواع متداول آن ٥۱
شکل ۲۳: موتور الکتریکی Magni5 ..... ٥۲
شکل ۲٤: نمودار عملکرد Magni5 (گشتاور به سرعت)[۱۱] ٥۳
شکل ۲٥: ابعاد و اندازه موتور Magni5 [۱۱] ٥۳
شکل ۲٦: موتور الکتریکی براشلس NT-Power ٥٤
شکل ۲۷: ابعاد موتور ۱٥ کیلووات شرکت NT-Power [۱۲] ٥٥

خلاصه مدیریتی

با انجام اولین پرواز توسط پرنده‌ای که نیروی پیشرانه خود را از موتور الکتریکی و باتری می‌گرفت، موضوع پرواز الکتریکی اهمیت پیدا کرد. اما به علت کندی سرعت پیشرفت فناوری‌های مرتبط با ذخیره‌سازی انرژی و تولید توان؛ عملیاتی نمودن یک پرنده الکتریکی تا حد زیادی دور از دسترس بوده و ازاین‌رو توجه فعالان صنعت به موتورهای احتراق داخلی جلب شد. در سال‌های اخیر با وقوع پیشرفت‌هایی در تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی و تولید توان ، پرواز الکتریکی دوباره اهمیت ویژه‌ای یافته است، به‌گونه‌ای که بسیاری از شرکت‌های بزرگ هوافضایی مانند ایرباس و بوئینگ نقشه راهی برای فعالیت در این حوزه تدوین نموده و در حال اجرای برنامه‌های گوناگونی جهت توسعه سیستم‌های پیشرانه الکتریکی و پرواز الکتریکی هستند. در مطالعه انجام‌شده بر روی ۷۰ برنامه توسعه پرواز الکتریکی از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۳۰، چهار بخش زیر به‌عنوان بخش‌های موردتوجه شرکت‌ها مشخص شده است: هوانوردی عمومی و هواپیماهای عمومی، تاکسی شهری هوایی، هواپیماهای منطقه‌ای، هواپیماهای بزرگ تجاری.

قسمت عمده‌ای از این ۷۰ برنامه در بخش اول قرار داشته و پس از آن موضوع تاکسی هوایی بیشترین تعداد برنامه‌ها را به خود اختصاص داده است. این موضوع بیانگر اهمیت بخش غیرنظامی و عمومی صنعت هوایی ازلحاظ اقتصادی و راهبردی برای شرکت‌های هوافضایی است. حدود نیمی از این برنامه‌ها توسط شرکت‌های مستقل و استارت‌آپ‌ها آغاز شده، ۵% از آن‌ها توسط شرکت‌های بزرگ غیر هوافضایی پشتیبانی شده و تنها ۲۰% از آن‌ها به‌وسیله شرکت‌های بزرگ OEM مانند بوئینگ، Cessna و Agusta Westland اجرا شده است.

در بخش هوانوردی عمومی و هواپیماهای عمومی سیستم تولید توان پرنده‌های موجود با سیستم پیشرانه الکتریکی جایگزین شده و تغییرات لازم صورت پذیرفته است. برخی از این پرنده‌ها عبارت‌اند از: پرنده الکتریکی Cessna 172، پرنده Taurus Electro و پرنده آموزشی الکتریکی WATTsUP شرکت پی‌پیسترل[1].

در بخش تاکسی شهری، پیشرفت مشهودی در پرنده‌های عمودپرواز تمام الکتریک با برد محدود تا ۵۰ کیلومتر و با ظرفیت ۱ تا ۴ نفر مشاهده می‌شود. برای نمونه در آلمان پرنده VoloCopter VC-200 در سال ۲۰۱۳ اولین پرواز خود را انجام داده است.

بخش هواپیماهای منطقه‌ای شامل هواپیماهایی با برد ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر بوده و بازار هدف آن حمل‌ونقل تجاری بین‌شهری است. در این دسته اکثر برنامه‌ها بر روی سیستم‌های پیشرانه هیبرید و همچنین ارزیابی

[1] Pipistrel

پیشرانه تمام الکتریکی متمرکز است و تلاش می‌کند با توسعه این دو سیستم پیشرانه با حمل‌ونقل جاده‌ای و حتی ریلی رقابت نماید.

در بخش هواپیماهای بزرگ تجاری، با توجه به هزینه‌های بسیار بالای برنامه‌های توسعه تنها شرکت‌هایی مانند ایرباس و بوئینگ در این بخش حضور محسوسی داشته‌اند. شرکت ایرباس و بوئینگ هم‌اکنون نقشه راهی برای توسعه هواپیمای بزرگ تجاری الکتریکی تدوین نموده‌اند.

باوجود تلاش‌های موجود جهت توسعه پرواز الکتریکی، موانعی نیز در این راه وجود دارند که به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند: موانع مرتبط با فناوری، تقاضای بازار و مقررات.

در بحث موانع فناوری، برای توسعه پرنده‌های الکتریکی با برد و وزن محموله مورد انتظار، چگالی انرژی باتری‌ها باید حداقل در حدود $500\frac{Wh}{Kg}$ باشد، درحالی‌که بالاترین چگالی انرژی در بین باتری‌های تجاری کنونی بین $150\frac{Wh}{Kg}$ تا $250\frac{Wh}{Kg}$ و رسیدن به چگالی انرژی $500\frac{Wh}{Kg}$ تا سال ۲۰۲۵ میسر نخواهد بود. همچنین در حال حاضر چگالی توان موتورهای الکتریکی متداول در حوزه پرنده الکتریکی حدود $3.5\frac{kW}{Kg}$ بوده و اخیراً موتورهایی با چگالی $5\frac{kW}{Kg}$ توسط شرکت‌هایی مانند زیمنس طراحی و تولید شده‌اند. این مقدار برای پرنده‌های تک یا چندنفره مطلوب است، اما برای یک هواپیمای منطقه‌ای الکتریکی همچنان فاصله زیادی تا مقدار مطلوب وجود دارد.

برای سرمایه‌گذاری بر روی پرواز الکتریکی باید از وجود بازگشت سرمایه‌ای معقول اطمینان حاصل نمود تا بتوان هزینه‌های عملیاتی و توسعه‌ای را پوشش داد که این خود از موانع به شمار می‌رود. از سوی دیگر برای برخی از کاربردها مانند تاکسی شهری هوایی مقررات کافی نیز وجود ندارد. برای فعال‌سازی پتانسیل پرنده الکتریکی، بایستی همگام با پیشرفت فناوری‌ها، قوانین و مقررات نیز بروز شوند.

با توجه به موانع پرواز الکتریکی، برای آینده این حوزه می‌توان چهار سناریوی زیر را محتمل دانست. لازم به ذکر است که هر سناریو با فرض وقوع کامل سناریوی قبلی بنا نهاده شده است و در کل می‌توان روندی افزایشی برای پیشرفت این حوزه متصور شد:

سناریوی اول، ادامه روند کنونی پیشرفت: استفاده از قطعاتی مانند محرک‌های الکتریکی بیشتر شده و سیستم‌های الکتریکی جایگزین سیستم‌های تمام هیدرولیک یا نیوماتیک خواهند شد. تأمین‌کنندگان سطح ۱ و OEM ها بیش از پیش به قطعات الکتریکی روی می‌آورند.

سناریوی دوم، توسعه کاربردی محدود: وقوع این سناریو نیازمند تغییرات متعددی در قوانین و مقررات است. اثر این سناریو بیشتر از همه بر روی پرنده‌های تمام الکتریک یا هیبرید-الکتریک قابل‌مشاهده است. همچنین پرواز برای پرنده‌هایی تا ظرفیت ۳۰ نفر ممکن خواهد شد.

سناریوی سوم، تحولی در مقیاس کوچک: علاوه بر سناریوی دوم، موضوع پرواز الکتریکی موردپذیرش عمومی قرار می‌گیرد. ازاین‌رو بایستی تدابیر لازم برای دیگر جنبه‌های این فناوری‌ها اتخاذ گردد.باوجود این پیشرفت‌ها، سازگاری با این فناوری‌ها در مقیاس کلان با سرعت کمی انجام خواهد شد.

سناریوی چهارم، تحولی در مقیاس بزرگ:علاوه بر سناریوی سوم، هواپیماهای تجاری هیبرید ممکن می‌شود. به دلیل زمان‌بر بودن تغییرات لازم در زیرساخت‌ها و سیستم‌ها، حرکت به‌سوی تمام الکتریکی شدن به‌کندی انجام می‌پذیرد. سه دسته از فعالان یعنی OEMها، تولیدکنندگان موتور و سیستم‌های پیشرانه، فرودگاه‌ها بایستی تغییرات عمده‌ای کنند.

❖ وضعیت حال و آینده ایران

پرنده الکتریکی می‌تواند بازار بسیار مناسبی در بخش هوانوردی عمومی در ایران داشته باشد. به علاوه با توجه به برنامه ریزی شرکت ایرباس برای تولید جت منطقه‌ای الکتریکی ۹۰ نفره تا سال ۲۰۳۰ و با وجود نیاز کشور به هواپیماهای زیر ۱۰۰ نفره برای فعال سازی ظرفیت بالقوه حمل و نقل هوایی داخل، می‌توان با برنامه ریزی مناسب در این حوزه در ۲۰ سال آینده نتایج مطلوبی در ساخت اینگونه پرنده‌ها برای کشور انتظار داشت. از سوی دیگر، در ایران شرکت‌های مختلفی در حوزه تولید باتری و موتور مشغول به فعالیت هستند، اما ازآنجایی‌که موتورهای الکتریکی و باتری‌های مورداستفاده در بخش هوایی دارای سطح بالایی از فناوری است، بایستی از این شرکت‌ها حمایت شده تا بتوانند دانش فنی خود را ارتقا داده و به توسعه این محصولات بپردازند. زیرا هزینه تحقیق و توسعه بسیار بالاست و بایستی تمامی ذینفعان در این حوزه مشارکت نمایند. یکی از قالب‌های مناسب برای این مشارکت جوینت ونچر است. البته دولت بایستی نقش حمایت‌کننده را ایفا نموده و از ورود به بازار پرهیز نماید. پیش از تشکیل هرگونه قالب مشارکت، پیشنهاد می‌شود به‌منظور امکان و نیازسنجی داخلی و همچنین بررسی فنی فناوری‌های موجود در این حوزه، مطالعه‌ای صورت پذیرد و سپس سندی برای توسعه فناوری پرواز الکتریکی تدوین گردد. مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته پژوهشگاه نیرو آمادگی خود را برای انجام این کار اعلام کرده است.

در پایان باید در نظر داشت که اگر ایران همانند موضوع فناوری نانو در این حوزه نیز ورود به‌موقع نموده و با انجام برنامه‌ریزی، سیاست‌گذاری و حمایت‌های لازم بخش خصوصی را فعال نماید، می‌توان در آینده نزدیک شاهد شکوفایی این بخش در صنعت هوایی باشیم و از سرریز فناوری آن در بخش‌های دیگر نیز بهره ببریم.

۱- مقدمه

اولین پرواز الکتریکی به سال ۱۸۸۳ بازمی‌گردد که یک شیمی‌دان و هوانورد فرانسوی یک کشتی هوایی را به کمک یک موتور الکتریکی زیمنس به پرواز درآورد و برای مدتی بسیار موردتوجه قرار گرفت. اما در ادامه به خاطر مشکلاتی که در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و تولید توان وجود داشت، پیشرفت پرواز الکتریکی به‌کندی پیش رفت و با ظهور و پیشرفت موتورهای احتراق داخلی و نوآوری‌های گوناگون درزمینه توربین‌های گاز، توجه فعالان حوزه هوانوردی از پیشرانه الکتریکی به این منابع تولید توان جلب شد. در صنعت هوافضا، الکتریکی شدن پرنده به دو شکل کلی رخ داد: شکل اول پرنده‌های بیش الکتریکی[1] هستند. در این نوع از الکتریکی شدن، هر هواپیما نسبت به نسل‌های پیشین خود از تجهیزات الکتریکی بیشتری بهره می‌برد که تا پیش از آن مکانیکی، هیدرولیکی یا نیوماتیکی بوده‌اند. شکل دوم پیشرانه الکتریکی[2] است که در سال‌های اخیر به‌عنوان رهیافتی جدید موردتوجه بسیاری از فعالان صنعت هوافضا قرارگرفته است. این شکل از الکتریکی شدن پرنده نه‌تنها پیشرانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه بقیه سیستم‌های پرنده و معماری آن را نیز متحول می‌نماید. این گزارش بیشتر به نوع دوم از ظهور الکتریکی شدن در صنعت هوافضا، یعنی پیشرانه الکتریکی پرداخته و سعی شده تا با تحلیل وضعیت کنونی پرواز الکتریکی و مشخص نمودن نیازمندی‌های فنی، چشم‌انداز پیش روی آن را در دنیا و ایران ترسیم نماید.

[1] More Electric Aircraft (MEA)

[2] Electrical Propulsion

۲- تعریف پرنده الکتریکی

«پرنده الکتریکی» به‌نوعی از پرنده‌ها گفته می‌شود که نیروی پیشران خود را از موتورهای الکتریکی می‌گیرند. مهم‌ترین اجزای یک پرنده الکتریکی که آن را نسبت به پرنده‌های غیر الکتریکی متمایز می‌کند عبارت‌اند از:

۱. سیستم تأمین انرژی

این بخش وظیفه تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز برای سیستم تولید توان و دیگر سیستم‌های پرنده را بر عهده دارد. این انرژی الکتریکی می‌تواند به روش‌های گوناگونی تأمین شود، ازجمله: باتری، کابل برق از زمین، سلول‌های خورشیدی، ابررساناها و سلول‌های سوختی. هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب مختص به خود را دارد. برای مثال: باتری‌ها می‌توانند بار الکتریکی قابل‌توجهی را ذخیره نمایند، اگرچه وزن آن‌ها هنوز به‌عنوان یکی از محدودیت‌ها مطرح است. کابل برق نیز می‌تواند از یک منبع بر روی زمین به پرنده متصل شود، اما محدودیت‌هایی در محدوده پروازی پرنده ایجاد می‌نماید. سلول خورشیدی نیز یکی دیگر از راه‌های تولید نیروی الکتریکی موردنیاز است. ابررساناها نیز می‌توانند مقدار محدودی از انرژی را در خود ذخیره نمایند. سلول‌های سوختی مشابه باتری هستند و انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نمایند، اما واکنش دهنده خود را از یک منبع خارجی دریافت می‌نمایند و برخلاف نام آن‌ها، هیچ احتراقی در آن‌ها رخ نمی‌دهد. با توجه به وجود محدودیت‌هایی برای وزن منبع انرژی و ظرفیت ذخیره‌سازی آن، تنها برخی از فناوری‌های موجود قابلیت استفاده در موضوع پرنده الکتریکی را دارا هستند. معیارهای انتخاب فناوری مناسب برای سیستم تأمین انرژی در بخش‌های بعدی معرفی خواهند شد.

۲. سیستم تولید توان

این سیستم وظیفه تولید توان لازم برای به پرواز درآمدن پرنده را به عهده دارد و این عمل را به‌وسیله موتورهای الکتریکی انجام می‌دهد. موتورهای الکتریکی انواع گوناگونی دارند، مانند موتورهای جریان مستقیم و جریان متناوب، موتورهای تک فاز و چند فاز، موتورهای جاروبک دار و بدون جاروبک (براشلس). البته همانند سیستم‌های تأمین انرژی، در این بخش نیز به علت وجود محدودیت‌هایی در وزن و توان تولیدی، تنها برخی از انواع موتورها برای پرنده الکتریکی مناسب هستند. این محدودیت‌ها و همچنین شاخص‌های انتخاب نوع مناسب موتور در بخش‌های بعدی معرفی خواهند شد.

۳. سیستم انتقال انرژی

این بخش وظیفه انتقال انرژی منبع انرژی (مانند باتری) به موتورها را دارد. در پرنده‌های الکتریکی با توجه به حضور انرژی الکتریکی به‌جای انرژی مکانیکی، نیازی به سیستم‌های انتقال نیروی مکانیکی نبوده و انتقال انرژی توسط سیم‌ها و کابل‌ها صورت می‌پذیرد. ازاین‌رو تلفات انتقال تا حد بسیار زیادی کاهش یافته و به‌صورت تئوری انرژی توسط کابل‌ها با بازدهی نزدیک به ۱۰۰% به موتور منتقل می‌گردد.

۳- انواع الکتریکی شدن پرنده

پرنده‌های الکتریکی ازنظر نوع سیستم پیشرانه به سه دسته کلی تمام الکتریکی، هیبرید-الکتریک و توربوالکتریک تقسیم می‌شوند که هر یک از این دسته‌ها خود دارای انواع مختلفی است [۲]. البته لازم به ذکر است که نوعی از پرنده‌ها به نام پرنده‌های بیش الکتریکی[1] نیز وجود دارد که در آن سیستم پیشرانه غیر الکتریکی بوده و تنها بخش‌هایی مانند سیستم‌های کنترلی الکتریکی هستند.

۱- پرنده تمام الکتریکی

۲- پرنده هیبرید الکتریک

۲-۱- هیبرید موازی

۲-۲- هیبرید سری

۲-۳- هیبرید نیمه سری/موازی

۳- پرنده توربوالکتریک

۳-۱- نیمه توربوالکتریک

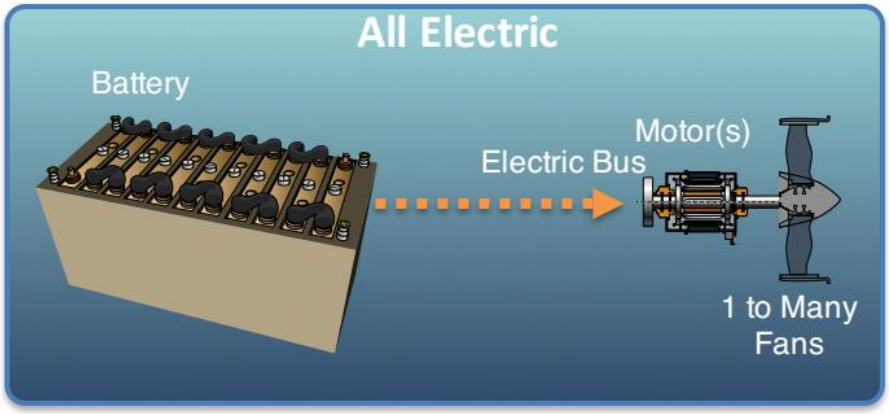
۳-۲- تمام توربوالکتریک

در ادامه به بررسی انواع پرنده الکتریکی از منظر نوع سیستم پیشرانه می‌پردازیم.

[1] More Electric Aircraft (MEA)

۱- پرنده تمام الکتریکی[1]:

در این نوع، از باتری به‌عنوان تنها منبع تولید توان پیشرانه در پرنده استفاده می‌شود و موتور به‌وسیله باتری تغذیه شده و فن‌ها را به حرکت درمی‌آورد. در حال حاضر چنین امکانی برای هواپیماهای تجاری وجود ندارد، زیرا توان موردنیاز بسیار زیاد بوده و باتری‌های موجود چگالی انرژی کافی برای تأمین آن را ندارند. البته ازلحاظ تجاری این امکان برای هواپیماهای دونفره موجود است.



شکل ۱: مدل پرنده تمام الکتریکی

۲- پرنده هیبرید الکتریک[2]:

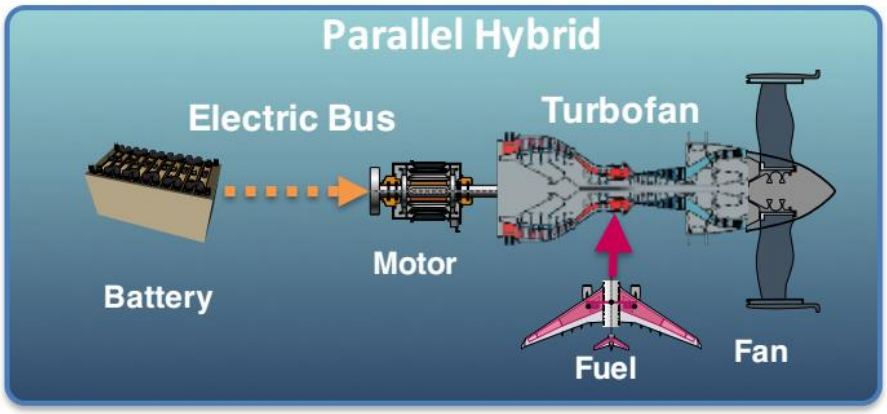
در این مدل، توان موردنیاز توسط چندین منبع مانند توربین گاز و باتری تأمین می‌شود. این نوع پرنده‌ها به سه دسته موازی، سری و نیمه سری/موازی تقسیم می‌شوند:

۲-۱- پرنده الکتریکی هیبرید موازی[3]

سامانه‌های هیبرید موازی از موتور توربین گاز برای ایجاد نیروی پیشرانه و همچنین شارژ نمودن باتری‌ها استفاده می‌کنند. در این نوع سیستم پیشرانه، باتری‌ها وظیفه تأمین انرژی لازم برای پیشرانه پرنده را در یک یا چند مرحله از پرواز بر عهده دارند. توربین‌های گاز اغلب در قسمت‌های مرسوم و روی بال نصب می‌شوند و ژنراتور نیز به‌صورت یکپارچه[4] در داخل قرار می‌گیرد.

[1] All Electric Aircraft (AEA)
[2] Hybrid Electric Aircraft (HEA)
[3] Parallel Hybrid Electric Aircraft (PHEA)
[4] Integrated

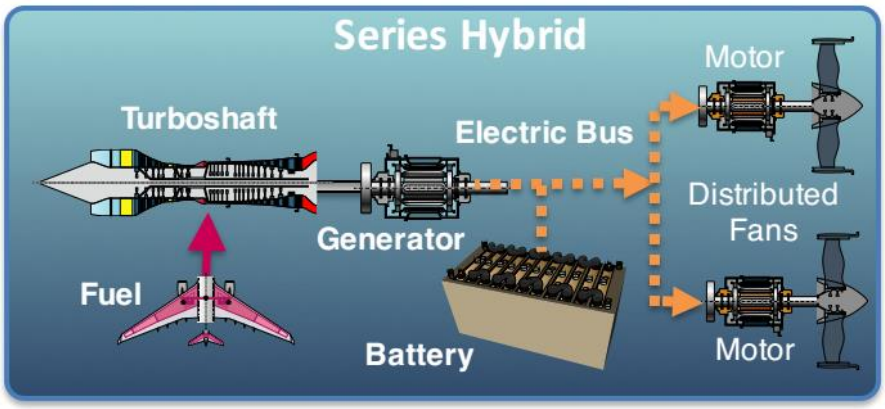
همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، یک موتور که با باتری کار می‌کند به همراه یک موتور توربینی بر روی یک شفت نصب می‌شوند و این شفت یک فن را به حرکت درمی‌آورد؛ بنابراین هم موتور الکتریکی و هم موتور توربینی می‌توانند نیروی پیشرانه را در زمان دلخواه تأمین نمایند.



شکل ۲: مدل پرنده الکتریکی هیبرید موازی

۲-۲- پرنده الکتریکی هیبرید سری[1]:

در سیستم‌های هیبرید سری، تنها موتورهای الکتریکی به‌صورت مکانیکی به فن‌ها متصل هستند. از توربین گاز برای به حرکت درآوردن یک ژنراتور استفاده می‌شود و خروجی این ژنراتور موتورهای الکتریکی را به حرکت درآورده و باتری‌ها را شارژ می‌نماید. موتورهای الکتریکی نیز با استفاده از انرژی الکتریکی تولیدشده فن‌ها را به چرخش درمی‌آورند. لازم به ذکر است که سامانه‌های هیبرید سری با مفاهیم پیشرانه توزیع یافته[2] سازگار بوده و در این نوع، از موتورها و فن‌هایی به نسبت کوچک استفاده می‌شود.



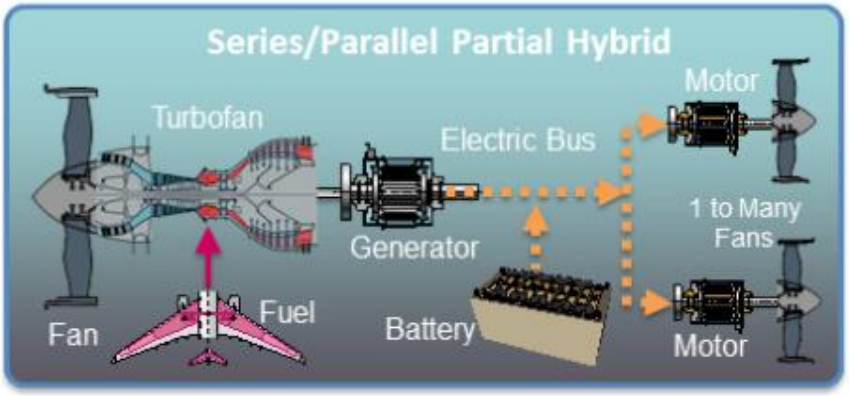
شکل ۳: مدل پرنده الکتریکی هیبرید سری

[1] Series Hybrid Electric Aircraft (SHEA)

[2] Distributed Propulsion

۲-۳- پرنده الکتریکی نیمه سری/موازی:

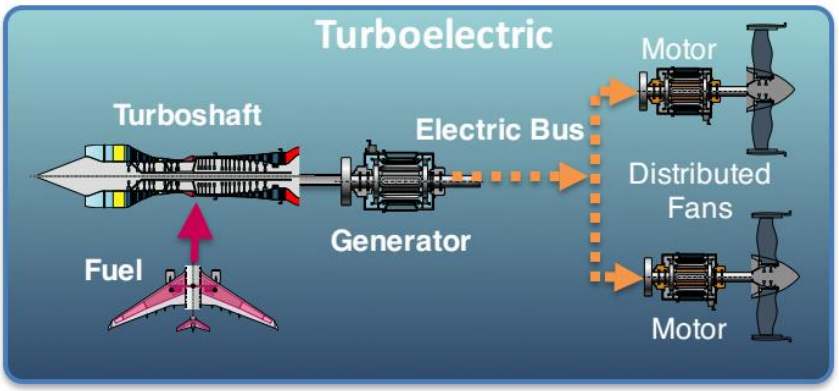
سیستم‌های هیبرید سری / موازی یک یا چند فن دارند که می‌توان آن‌ها را به‌طور مستقیم به‌وسیله یک توربین گاز به حرکت درآورد. همچنین فن‌هایی دیگری نیز وجود دارند که به شکل اختصاصی به‌وسیله موتورهای الکتریکی به حرکت درمی‌آیند. خود این موتورهای الکتریکی نیز به‌وسیله باتری به حرکت درمی‌آیند و یا یک ژنراتور که توسط توربین می‌چرخد.



شکل ٤: مدل پرنده الکتریکی هیبرید موازی

۳- پرنده‌های توربو الکتریک

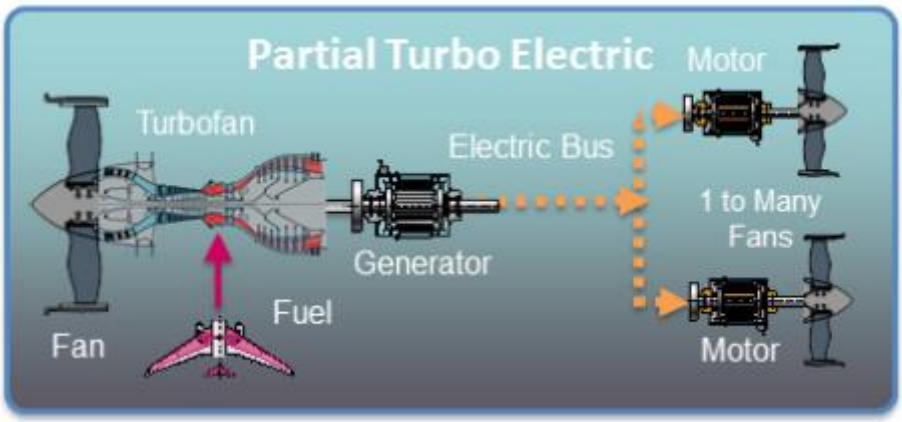
سیستم‌های نیمه توربوالکتریک یا تمام توربوالکتریک برای تولید نیروی پیشرانه پرنده در هیچ‌یک از مراحل پرواز به باتری وابسته نیستند، بلکه از توربین‌های گاز برای به حرکت درآوردن ژنراتورهای الکتریکی استفاده می‌کنند. این ژنراتورها اینورترها را تغذیه نموده و درنهایت موتورهای جریان مستقیم را به حرکت می‌آورند. سپس این موتورهای الکتریکی، فن‌های الکتریکی توزیع یافته[1] را می‌چرخانند.



شکل ٥: مدل پرنده الکتریکی توربو الکتریک

[1] Distributed fans

سیستم نیمه توربوالکتریک نوعی از سیستم تمام توربوالکتریک است که برای تأمین بخشی از نیروی پیشرانه از پیشرانه الکتریکی استفاده می‌نماید. بقیه نیروی پیشرانه از یک توربوفن تأمین می‌شود که توسط یک توربین گاز می‌چرخد. ازاین‌رو برای توسعه اجزای الکتریکی یک سامانه نیمه توربوالکتریک در مقایسه با سامانه تمام توربوالکتریک به توسعه و پیشرفت کمتری در سامانه‌های موجود نیاز است.



شکل ٦: مدل پرنده الکتریکی نیمه توربو الکتریک

۴- دلایل اهمیت یافتن پرواز الکتریکی

از مطرح‌شدن موضوع پرواز الکتریکی زمان زیادی می‌گذرد و در تمامی این سال‌ها با پیشرفت‌هایی که در فناوری‌های مرتبط رخ‌داده، بحث و مطالعه در مورد آن همواره در جریان بوده است؛ اما به‌طور خلاصه می‌توان آنچه را که باعث شده موضوع پرواز و پیشرانه الکتریکی در سال‌های اخیر بیشتر در دستور کار محققان و طراحان قرار گیرد به‌صورت زیر مطرح نمود:

- **ضرورت کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی**

امروزه با توجه به افزایش حجم سفرهای هوایی و پیش‌بینی روند افزایشی آن در سال‌های آینده، موضوع آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی توسط هواپیماها تبدیل به یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های فعالان و نهادهای قانون‌گذار این حوزه شده است. استفاده از سیستم‌های پیشرانه الکتریکی به علت نداشتن آلودگی‌های زیست‌محیطی آینده‌ای روشن را برای صنعت حمل‌ونقل هوایی به تصویر می‌کشد.

- **پیشرفت‌های چشمگیر در سیستم‌های تولید و ذخیره‌سازی انرژی**

همواره یکی از بزرگ‌ترین موانع پرواز الکتریکی، مشکلات مربوط به سیستم‌های تولید و ذخیره‌سازی انرژی بوده است. درگذشته به دلیل وزن بالای باتری‌های سربی و بازدهی پایین آن‌ها در ذخیره‌سازی انرژی نسبت به وزنشان، امکان استفاده از آن‌ها در پرنده الکتریکی وجود نداشت؛ اما باروی کار آمدن باتری‌هایی با فناوری

لیتیوم-یون و لیتیوم-پلیمر که دارای ظرفیت ذخیره‌سازی بالاتر و وزن سبک‌تری هستند دوباره تمامی توجه‌ها به این موضوع جلب شده است.

❖ پیشرفت موتورهای الکتریکی

با توجه به وجود محدودیت‌های جدی در مورد وزن پرنده و اجزا و سیستم‌های بکار رفته در آن، درگذشته استفاده از موتورهای الکتریکی متداول ناکارآمد به نظر می‌رسید. چراکه این موتورها وزن بالایی داشته و نسبت توان الکتریکی تولیدی به وزن آن‌ها پایین بود. در سال‌های اخیر با استفاده از فناوری‌هایی مانند ابررساناها و موتورهای براشلس، امکان کاهش وزن موتورهای الکتریکی و تولید بیشتر توان ممکن شده است.

❖ استفاده از پیشرانه توزیع یافته[1]

در سیستم‌های پیشرانه کلاسیک، به علت وجود سیستم‌های انتقال قدرت پیچیده امکان استفاده از چندین موتور و توزیع سیستم پیشرانه در قسمت‌های مختلف پرنده وجود نداشت؛ اما اکنون با روی کار آمدن موتورهای الکتریکی با بازده بالا می‌توان در بخش‌های مختلفی از پرنده و با آزادی عمل بیشتر اقدام به تولید نیروی پیشران نمود. این کار به افزایش بازدهی آیرودینامیکی پرنده نیز کمک کرده است. از سوی دیگر، با استفاده از چندین موتور بجای یک یا دو موتور، در صورت از دست دادن یک موتور پرنده با خطرات جدی روبرو نخواهد بود و می‌تواند به‌وسیله موتورهای دیگر خود به پرواز ادامه دهد. به‌علاوه در برخی شرایط پروازی که نیازی به نیروی پیشرانه بالا نیست، می‌توان با خاموش کردن یک یا چند موتور بازدهی بالاتری را به دست آورد.

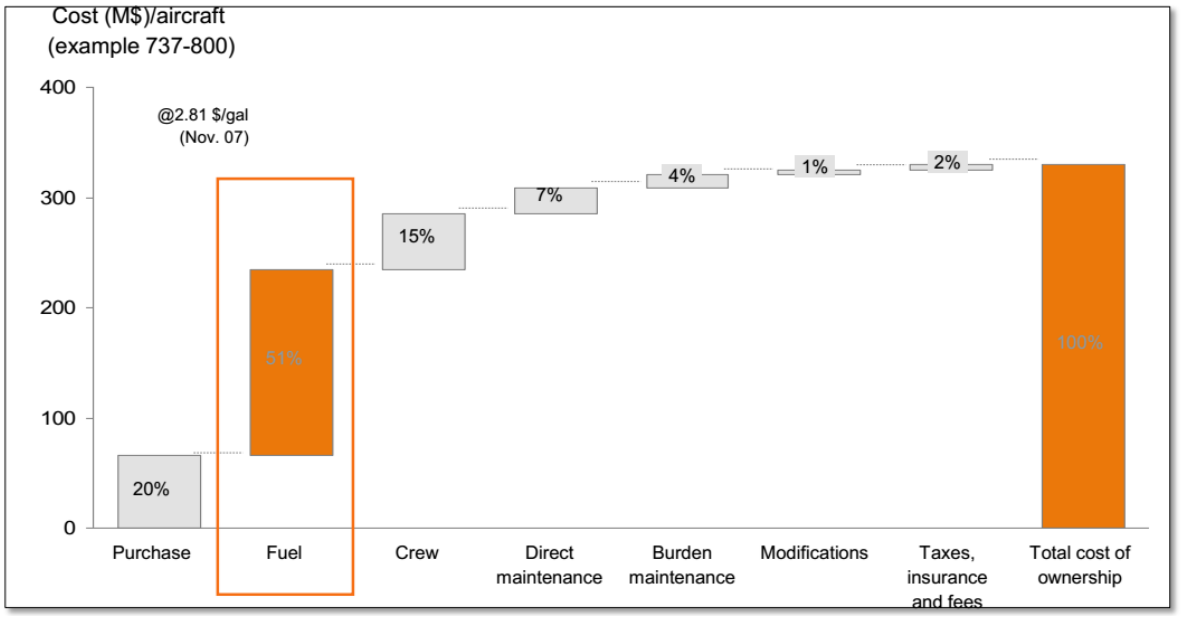
❖ پیشرانه بی‌صدا در هنگام استارت و نشستن در شب

کاهش نویزها و آلودگی صوتی تولیدشده توسط پرنده در هنگام استارت و نشستن نیز یکی از دغدغه‌های موجود در حمل‌ونقل هوایی به شمار می‌رود. اکنون با استفاده از سیستم پیشرانه الکتریکی می‌توان به این اهداف دست یافت.

[1] Distributed propulsion

❖ **نیاز به کاهش هزینه‌های عملیاتی**

هزینه‌های مربوط به مصرف سوخت همواره یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های شرکت‌های هواپیمایی به شمار می‌رود، چراکه بیش از ۵۱% کل هزینه‌های مالکیت یک هواپیما را همین هزینه سوخت تشکیل می‌دهد.



شکل ۷: سهم هزینه سوخت درمجموع هزینه‌های یک پرنده[۱]

❖ **افزایش ایمنی پرنده با استفاده از منابع انرژی اضافی**

در هواپیماهای کنونی تنها سوخت موجود، سوخت‌های فسیلی است. این موضوع می‌تواند یکی از مسائل مهم در بحث ایمنی پرواز به شمار رود. با استفاده از سیستم‌های پیشرانه الکتریکی می‌توان از انرژی الکتریکی در کنار سوخت فسیلی بهره برد و با این کار ایمنی پرواز را افزایش داد.

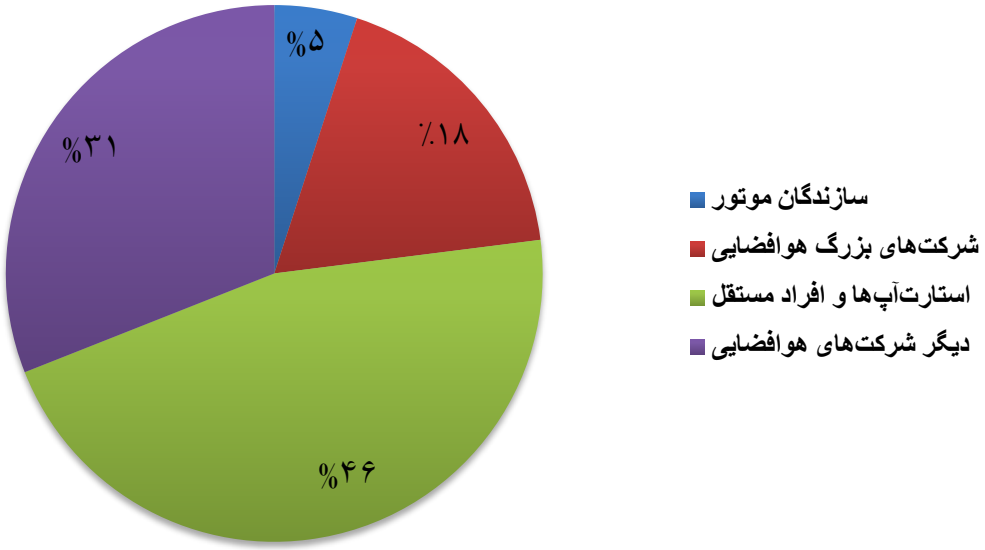
۵- وضعیت کنونی پرواز الکتریکی در دنیا

در حال حاضر بسیاری از برنامه‌هایی که درزمینه توسعه پرواز با پیشرانه الکتریکی مطرح است در مراحل آغازین خود قرار داشته و برای بقای نیازمند پیشرفت‌های جدی در فناوری‌های مرتبط هستند. بااین‌وجود بسیاری از سرمایه‌گذاران به وجود پتانسیل بزرگی در این حوزه اعتقاد داشته و بر روی برنامه‌های طراحی و توسعه سیستم‌های پیشرانه الکتریکی اقدام به سرمایه‌گذاری کرده‌اند. در مطالعه‌ای که در ماه سپتامبر ۲۰۱۷ به‌منظور شناسایی روندهای مربوط به فناوری، بازار و رقابت‌های موجود در این حوزه بر روی برنامه‌های توسعه پیشرانه الکتریکی انجام شد [۳]، مشخص گردید که درمجموع حدود ۷۰ شرکت از بزرگان صنعت تا

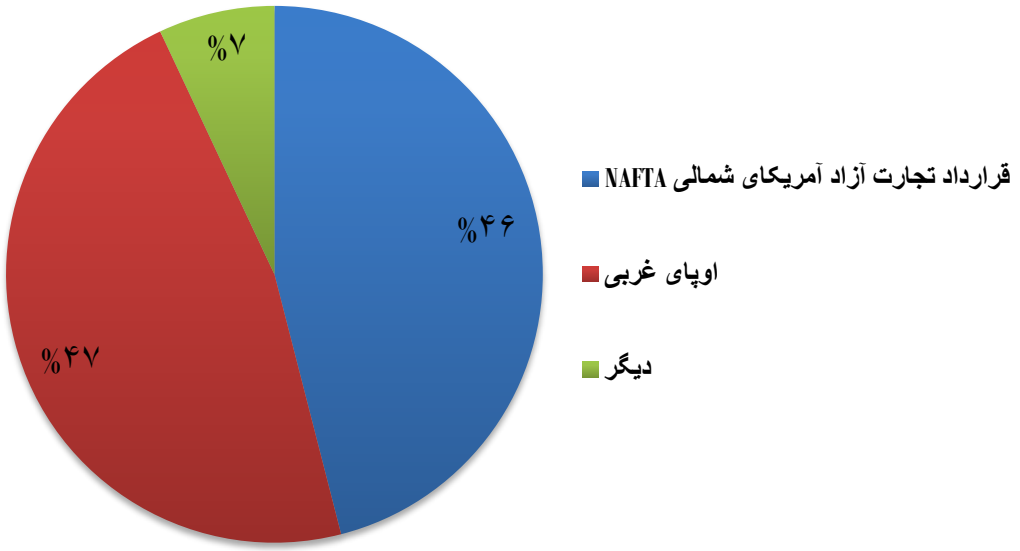
استارت‌آپ‌ها در این برنامه‌ها مشغول به فعالیت هستند. این تعداد نشان‌دهنده اهمیت این موضوع برای طیف وسیعی از فعالان صنعت هوافضا است.

طبق این مطالعه، حدود نیمی از این برنامه‌های توسعه توسط شرکت‌های مستقل و استارت‌آپ‌ها آغاز شده است. همچنین ۵% از آن‌ها توسط شرکت‌های بزرگ غیر هوافضایی پشتیبانی شده و تنها ۲۰% از آن‌ها به‌وسیله شرکت‌های بزرگ OEM مانند بوئینگ، Cessna و Agusta Westland اجرا شده است. لازم به ذکر است که بیشتر توسعه و پیشرفت انجام‌شده در این حوزه توسط شرکت ایرباس صورت پذیرفته است.

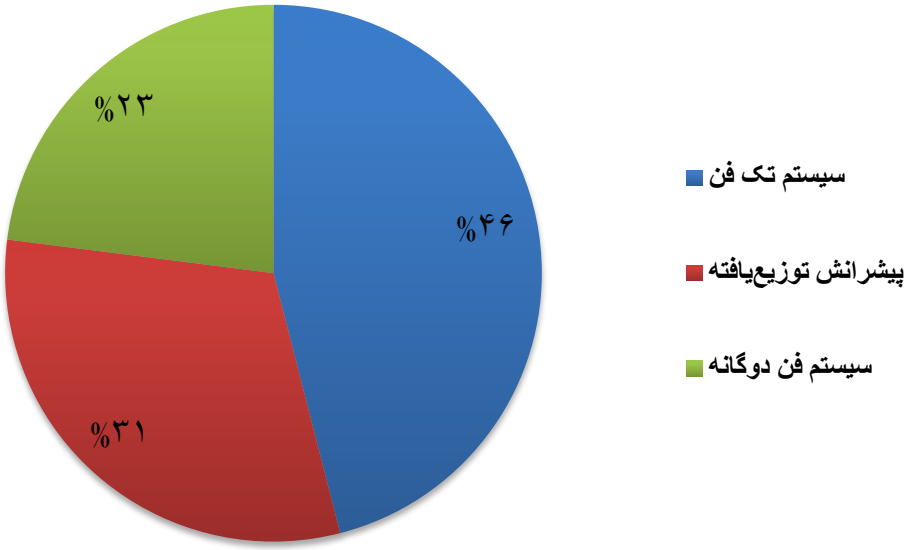
در نمودارهای زیر، دسته‌بندی پروژه‌های توسعه پیشرانه الکتریکی از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۳۰ و بعدازآن (سال اولین پرواز) به تفکیک نوع سازنده پرنده، محل سازنده و نوع پیشرانه نشان داده شده است.



شکل ۸: پروژه‌های توسعه پیشرانه الکتریکی از ۲۰۰۶ تا ۲۰۳۰+ (سال اولین پرواز) - بر اساس نوع سازنده پرنده



شکل ۹: پروژه‌های توسعه پیشرانه الکتریکی از ۲۰۰۶ تا ۲۰۳۰+ (سال اولین پرواز) - بر اساس محل سازنده



شکل ۱۰: پروژه‌های توسعه پیشرانه الکتریکی از ۲۰۰۶ تا ۲۰۳۰+ (سال اولین پرواز) - بر اساس نوع پیشرانه

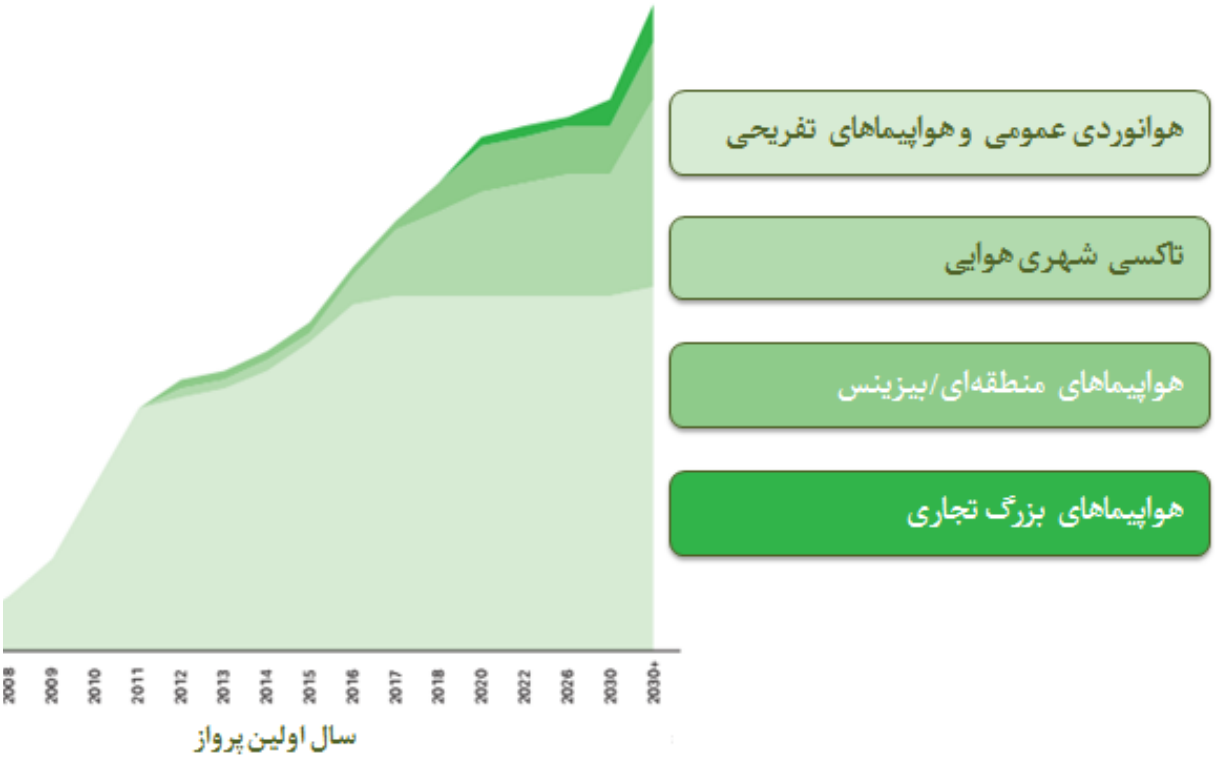
توزیع جغرافیایی شرکت‌های سرمایه‌گذاری بین آمریکای شمالی و اروپا تقریباً به‌صورت برابر تقسیم شده است. در حال حاضر اکثر هواپیماها در این دو بخش از دنیا تولید می‌شوند. تقریباً نیمی از برنامه‌ها بر طراحی تک فن[1] متمرکز بوده و یک‌سوم از آن‌ها نیز به دنبال کسب مزیت موجود در بازدهی سیستم‌های پیشرانه الکتریکی از طریق فن‌های توزیع‌شده هستند.

این برنامه‌ها را می‌توان در قالب چهار بخش زیر دسته‌بندی نمود:

۱- بخش هوانوردی عمومی[2] و هواپیماهای تفریحی[3]
۲- تاکسی شهری هوایی[4]
۳- بخش هواپیماهای منطقه‌ای[5]
۴- بخش هواپیماهای تجاری بزرگ[6]

در شکل زیر، تعداد برنامه‌های موجود در هر یک از این چهار بخش بر اساس سال اولین پرواز آمده است. با توجه به این شکل، می‌توان مشاهده نمود که سهم عظیمی از برنامه‌ها را بخش هوانوردی عمومی و هواپیماهای تفریحی به خود اختصاص داده‌اند.

[1] Single fan
[2] General Aviation (GA)
[3] Recreational Aircraft
[4] Urban Air Taxis
[5] Regional Aircraft
[6] Large Commercial Aircraft



شکل ۱۱: برنامه‌های توسعه پرنده‌هایی با سیستم پیشرانه الکتریکی بر اساس تاریخ اولین پرواز[۳]

۵-۱- بخش هوانوردی عمومی و هواپیماهای تفریحی

بخش هوانوردی عمومی و هواپیماهای تفریحی یکی از جذاب‌ترین قسمت‌ها در برنامه‌های توسعه بوده است. بسیاری از فعالیت‌های انجام‌شده در این بخش بر روی ساختارهای موجود پرنده‌های دارای ملخ انجام‌گرفته است. به این صورت که سیستم تولید توان آن‌ها با سیستم پیشرانه الکتریکی جایگزین شده و تغییرات لازم نیز صورت پذیرفته است. در حال حاضر شرکت‌های فعال در حوزه هوانوردی عمومی نسخه‌هایی از پرنده‌های خود را که به تجهیزات الکتریکی مجهز شده‌اند ارائه کرده‌اند. برخی از این پرنده‌ها عبارت‌اند از: پرنده الکتریکی Cessna 172، پرنده Taurus Electro و پرنده آموزشی الکتریکی WATTsUP شرکت پی‌پیسترل[۱]. همچنین استارت‌آپ‌هایی همچون DigiSky با پرنده SkySpark در این حوزه فعالیت‌هایی داشته‌اند. این کلاس از پرنده‌ها پتانسیل بالایی جهت تبدیل‌شدن به «بستر آزمایش» برای توسعه آینده پرنده الکتریکی دارد. برای نمونه، شرکت زیمنس اولین گام خود را درزمینه پرواز الکتریکی در سال ۲۰۱۶ به‌وسیله پرنده تمام الکتریکی Extra 330LE برداشته است. شرکت ایرباس نیز برنامه E-Fan خود را در همین حوزه پیگیری می‌نماید.

[۱] Pipistrel

۵-۲- تاکسی شهری هوایی

در بخش تاکسی شهری پیشرفت مشهودی در پرنده‌هایی با ظرفیت ۱ تا ۴ نفر مشاهده می‌شود. این پیشرفت‌ها در حال حاضر بر روی پرنده‌های عمودپرواز تمام الکتریک با برد محدود تا ۵۰ کیلومتر متمرکز شده‌اند تا بتوانند حداکثر بهره را از مزایای نداشتن آلودگی‌های صوتی و زیست‌محیطی این پرنده‌ها ببرند. برای نمونه در آلمان پرنده VoloCopter VC-200 در سال ۲۰۱۳ اولین پرواز خود را انجام داده است. این پرنده در آغاز سه‌ماهه چهارم سال ۲۰۱۷ با اخذ تأییدیه از نهاد مسئول حمل‌ونقل امارات متحده عربی[۱] کار خود را به‌صورت رسمی به‌عنوان تاکسی هوایی در دبی آغاز کرده است. همچنین شرکت Lilium نیز اولین پرواز خود را در سال ۲۰۱۶ انجام داده و برنامه‌ای برای توسعه یک تاکسی ۵ نفره برای حمل‌ونقل شهری دارد. شرکت پهپادی چینی Ehang نیز در پایان سال گذشته آغاز آزمایش Ehang 184 را در نوادا اعلام کرده و کار اخذ مجوزهای آن از FAA را آغاز نموده است.

شرکت‌های دیگری نیز با کمتر رسانه‌ای نمودن فعالیت‌هایشان، در حال انجام آزمایش‌ها و توسعه محصولات خود هستند. برای نمونه اولیه مقیاس کامل شرکت Zee Aero اخیراً پرواز خود را انجام داده است. همچنین انتظار می‌رود که پرنده S2 شرکت Joby Aviation اواخر سال جاری آزمایش نمونه اولیه مقیاس کامل خود را آغاز نماید.

از سوی دیگر، شرکت‌های خودروسازی و فعالان حوزه حمل‌ونقل نیز به‌عنوان دیگر بازیگران این بخش نقش بسزایی در توسعه پرواز الکتریکی ایفا می‌نمایند. برای مثال، شرکت Geely با اکتساب شرکت آمریکایی Terrafugia به صنعت هوافضا وارد شده و ماشین پرنده TF-X خود را در اختیار دارد. همچنین شرکت تاکسی اینترنتی Uber با انتشار گزارش Elevate خود در اکتبر ۲۰۱۶ باعث ایجاد انگیزه در شرکت‌هایی مانند Bell Helicopter، Mooney Aircraft و Pipistrel برای همکاری با Uber شده تا با یکدیگر بر روی یک پروژه در این زمینه فعالیت نمایند.

از طرفی، شرکت‌های بزرگ این صنعت مانند ایرباس و بوئینگ رهیافت متفاوتی اتخاذ نموده‌اند. ایرباس در کنار رهیافت کلی‌نگر خود با پورفولیوی شرکت Urban، نه‌تنها پروژه‌هایی را در دپارتمان‌های فعلی خود آغاز کرده است (مانند بالگرد ایرباس، CityAirbus که یک پرنده عمودپرواز تمام الکتریکی ۴ نفره برای محیط شهری است)، بلکه نیاز به ایجاد یک سازمان مجزا را نیز تشخیص داده است[۲]. این شرکت همچنین از طریق شرکت‌های سرمایه‌گذاری ایرباس در حال سرمایه‌گذاری بر روی استارت‌آپ‌های این حوزه است.

[۱] United Arab Emirates' Roads and Transport Authority (RTA)

[۲] این تشخیص منجر به ایجاد A^3 شده است.

شرکت بوئینگ نیز رهیافتی فرصت‌طلبانه اتخاذ نموده و شرکت سرمایه‌گذاری خود یعنی HorizonX را با همکاری برنامه‌هایی مانند پرنده منطقه‌ای Zunum مأمور نموده است تا استارت‌آپ‌های آینده دار در این حوزه را شناسایی نماید.

۵-۳- هواپیماهای منطقه‌ای

این بخش شامل هواپیماهایی با برد بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر بوده و بازار هدف آن حمل‌ونقل تجاری بین‌شهری، هوانوردی عمومی و بیزینس است. در این دسته نیز اکثر برنامه‌ها بر روی سیستم‌های پیشرانه هیبرید و همچنین ارزیابی پیشرانه تمام الکتریکی متمرکز است. این بخش تلاش می‌کند با توسعه این دو سیستم پیشرانه با حمل‌ونقل جاده‌ای و حتی ریلی رقابت نماید. همان‌طور که گفته شد، یکی از مزیت‌های آن تولید آلودگی صوتی بسیار کمتر و نداشتن آلودگی‌های زیست‌محیطی است. برای نمونه، پروژه Alice شرکت سرمایه‌گذاری Eviation که یک پرنده بیزینس و commuter تمام الکتریکی ۹ نفره است طبق برنامه اولین پرواز خود را در اواخر سال ۲۰۱۸ انجام خواهد داد. البته شرکت‌های دیگر در بحث توسعه کمی عقب‌تر هستند. ازجمله این شرکت‌ها می‌توان پرنده TriFan 600 شرکت XTI Aviation که پرنده بیزینس عمودپرواز[1] هیبرید-الکتریک ۶ نفره است و یا محصول اولیه Zunum Aero که درحال‌توسعه پلتفرم‌های هوانوردی تجاری با سه اندازه مختلف است نام برد.

برخی از شرکت‌ها به پرنده‌های بیزینس و منطقه‌ای به‌عنوان یک بستر آزمون نگاه کرده که درنهایت قرار است به پلتفرم‌های بزرگ‌تر مقیاس شوند. شرکت بوئینگ نیز اخیراً با شرکت JetBlue در قالب یک همکاری و سرمایه‌گذاری مشترک بر روی Zunum Aero کار می‌کنند که قرار است در آینده به یک پلتفرم ۵۰ نفره مقیاس شود.

۵-۴- هواپیماهای بزرگ تجاری

با توجه به هزینه‌های بسیار بالای برنامه‌های توسعه در این بخش، تنها شرکت‌های بزرگ حوزه هوایی مانند ایرباس و بوئینگ در این بخش حضور محسوسی داشته‌اند. شرکت ایرباس هم‌اکنون اقدام به معرفی یک نقشه راه برای اولین هواپیمای بزرگ تجاری الکتریکی نموده است. اگرچه این شرکت تاریخی را برای شروع خدمت‌رسانی این هواپیما پیش‌بینی و اعلام نکرده است، اما تلاش نموده تا هدف درازمدت خود را که توسعه یک هواپیمای تک ردیفه[2] با ساختار هیبرید-الکتریک است دنبال نماید. با توجه به‌اندازه این پرنده، برای برخاستن به حدود ۴۰ مگاوات و برای کروز به ۲۰ مگاوات توان نیاز دارد. البته ایرباس در حال توسعه یک

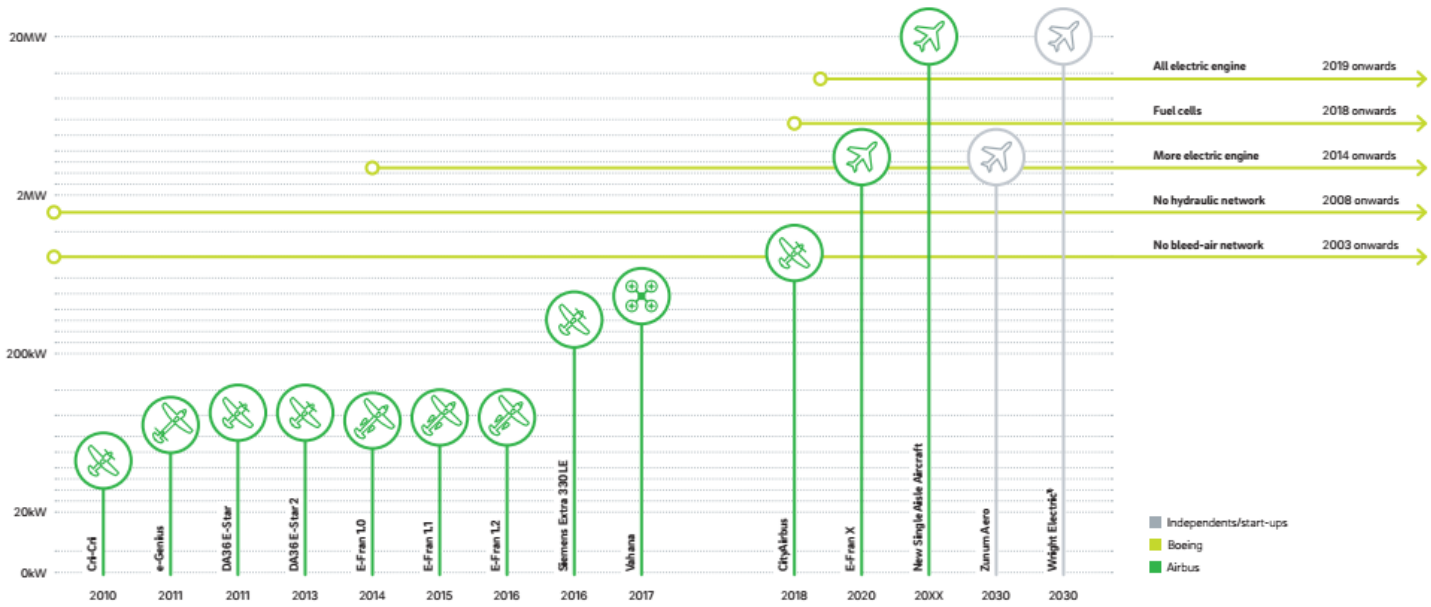
[1] VTOL

[2] Single aisle

پرنده به نام E-Fan X در کلاس توان ۲ مگاوات است که طبق برنامه‌ریزی اولین پرواز خود را طرف سه سال آینده انجام خواهد داد.

در همین راستا، شرکت بوئینگ نیز برای پرنده‌ای با سیستم پیشرانه الکتریکی نقشه راهی تا سال ۲۰۳۰ ارائه نموده است که بر مبنای پیشرفت‌های حاصل از هواپیمای بیش‌الکتریک ۷۸۷ خواهد بود.

استارت‌آپ جدید Wright Electric با کارکنانی از تیمی که قبلاً توسط ناسا تأمین مالی شده است پیش‌بینی می‌کند که ظرف ۲۰ سال آینده تمامی پروازهای مسافت کوتاه تمام الکتریکی خواهد شد و بر همین اساس قصد دارد تا یک هواپیمای با پیشرانه الکتریکی با ظرفیت ۱۵۰ نفر بسازد که ظرف یک دهه با اعضای کوچک‌تر خانواده‌های ایرباس A320 و بوئینگ ۷۳۷ رقابت نماید. این شرکت با رهیافتی فرصت‌طلبانه نسبت به فناوری‌هایی که در این حوزه مطرح هستند بر این عقیده است که اگر فناوری‌های مرتبط با باتری با سرعتی مناسب پیشرفت نمایند، پرنده آن‌ها تمام الکتریک خواهند بود و اگر سرعت این پیشرفت کندتر باشد یک پرنده هیبرید-الکتریک خواهند ساخت.



شکل ۱۲: توسعه هواپیمای الکتریکی توسط ایرباس، بوئینگ و استارت‌آپ‌ها[۳]

۶- موانع توسعه پرواز الکتریکی

باوجود تمام تلاش‌ها و انگیزه‌های موجود درزمینه پرواز الکتریکی، هنوز موانع متعددی جهت توسعه این حوزه وجود دارد. این موانع را می‌توان در قالب سه بخش فناوری، تقاضای بازار و مقررات دسته‌بندی نمود.

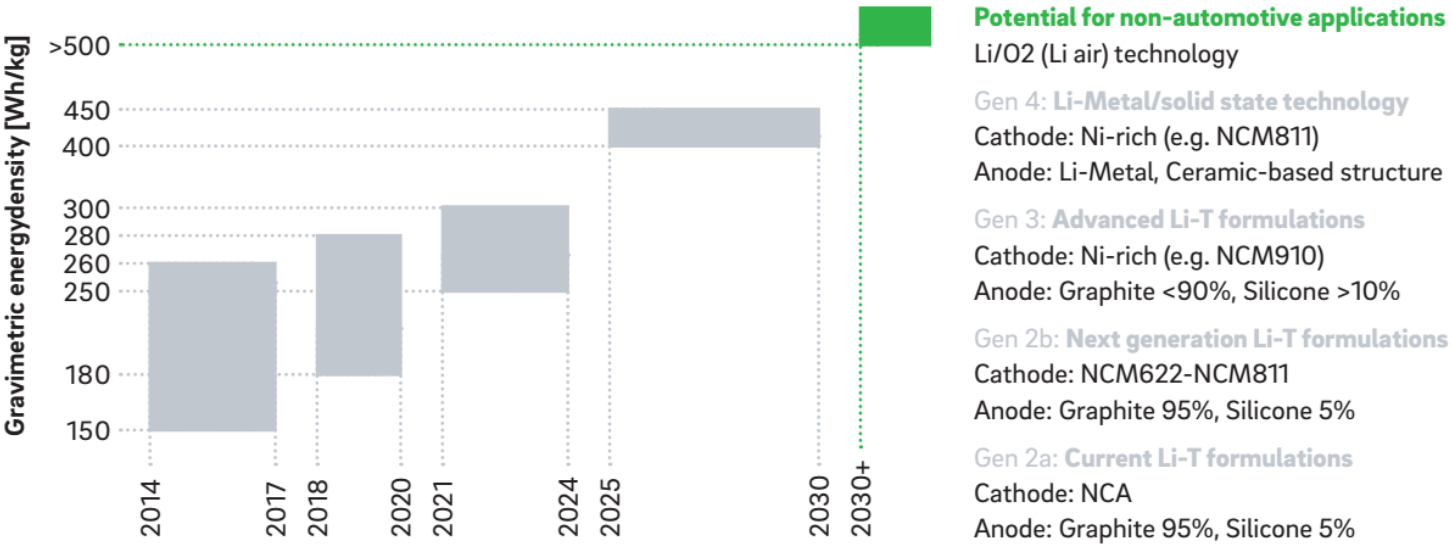
۶-۱- فناوری

موانع فناوری را می‌توان به دسته کلی تقسیم‌بندی کرد: موانعی که به‌طور مستقیم با سیستم‌های الکتریکی پرنده در ارتباط بوده و موانعی که مرتبط با نوع کاربرد مدنظر برای پرنده هستند. موانع مرتبط با سیستم‌های الکتریکی پرنده عبارت‌اند از:

- **کارایی باتری**

داشتن ظرفیت ذخیره‌سازی بالا و وزن کمتر دو مؤلفه اصلی در توسعه باتری هستند. برای ساخت و توسعه پرنده‌های الکتریکی باصرفه اقتصادی و داشتن برد و وزن محموله مورد انتظار، چگالی انرژی باتری‌ها باید حداقل در حدود $500\frac{Wh}{Kg}$ باشد، درحالی‌که بالاترین چگالی انرژی در بین باتری‌های تجاری کنونی بین $150\frac{Wh}{Kg}$ تا $250\frac{Wh}{Kg}$ است. البته چگالی انرژی باتری ۲۱-۷۰ شرکت تسلا $250\frac{Wh}{Kg}$ تا $320\frac{Wh}{Kg}$ گزارش شده است. طبق مطالعات موسسه Roland Berger تحقیقات در حال انجام بر روی باتری‌های لیتیوم-یون چگالی آن‌ها را تا اواسط دهه ۲۰۲۰ به میزان $400\frac{Wh}{Kg}$ تا $450\frac{Wh}{Kg}$ خواهد رساند. البته به‌غیراز چگالی انرژی باتری، مسائلی همچون سرعت شارژ مجدد و چرخه عمر طولانی باتری نیز اهمیت دارد.

لازم به ذکر است که چگالی انرژی نظری باتری‌های لیتیوم-سولفور $2680\frac{Wh}{Kg}$، آلومینیوم-هوا $8140\frac{Wh}{Kg}$ و لیتیوم-هوا $11000\frac{Wh}{Kg}$ در حالت شارژ شده و $3500\frac{Wh}{Kg}$ در حالت تخلیه است.



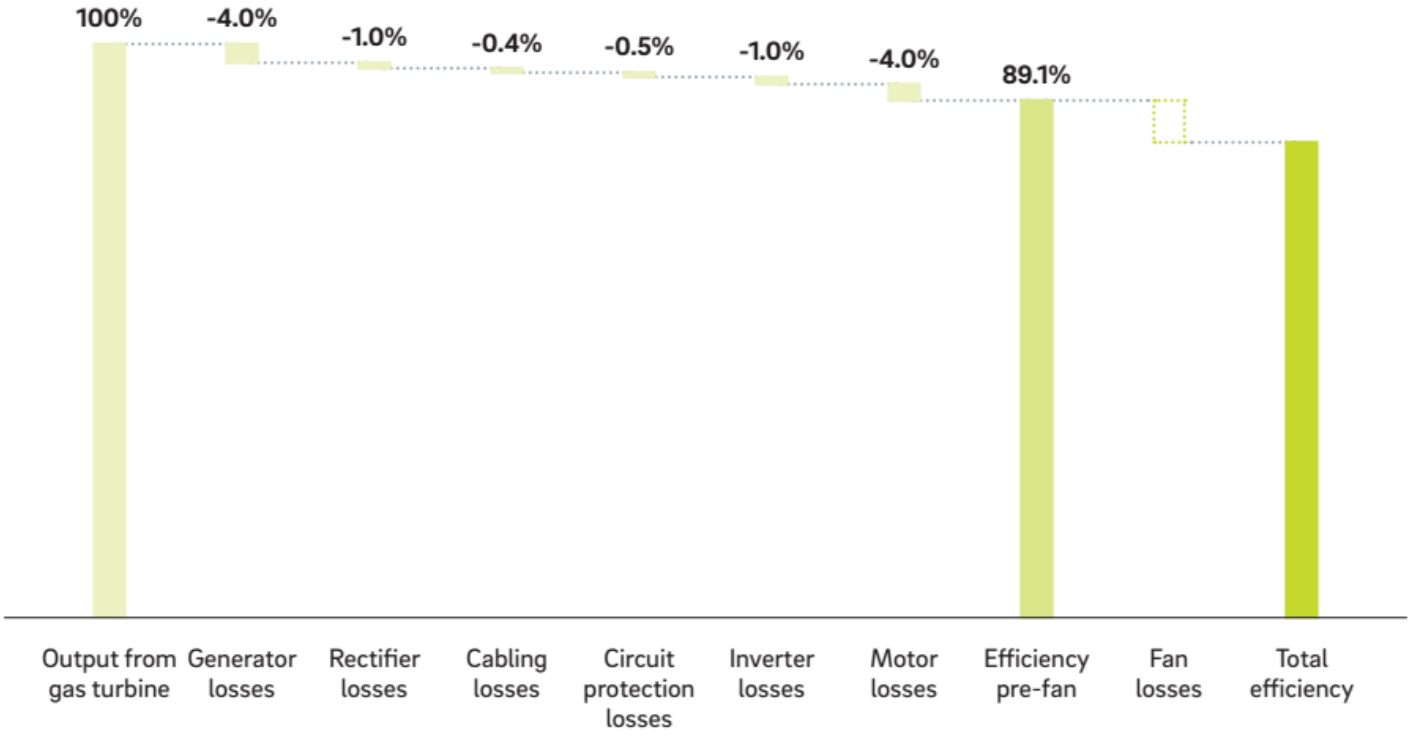
Source: Roland Berger

شکل ۱۳: نقشه راه توسعه فناوری باتری لیتیوم-یون[۳]

طبق نقشه راهی که در شکل بالا آمده است، رسیدن به چگالی انرژی $500\ \frac{Wh}{Kg}$ که برای حوزه پرنده‌های بزرگ ضروری است از سال ۲۰۲۵ به بعد میسر خواهد شد.

❖ موتورهای الکتریکی سبک‌وزن با چگالی توان بالا

تمامی پرنده‌های هیبرید-الکتریک، توربو الکتریک و تمام الکتریک برای رسیدن به محدودیت‌های وزنی و ابعادی در پرنده به موتورهای الکتریکی با توان بالاتر و وزن کمتر و به عبارتی با چگالی توان بیشتر نیازمند هستند. در حال حاضر چگالی توان موتورهای الکتریکی متداول در حوزه پرنده الکتریکی در حدود $3.5\ \frac{kW}{Kg}$ است و اخیراً موتورهایی با چگالی $5\ \frac{kW}{Kg}$ نیز توسط شرکت‌هایی مانند زیمنس طراحی و تولید شده است. این مقدار برای پرنده‌های تک یا چند نفره مطلوب است، اما برای یک هواپیمای منطقه‌ای الکتریکی همچنان فاصله زیادی تا مقدار مطلوب وجود دارد.



شکل ١٤: افت بازدهی در زنجیره توان برای کاربردهای هیبرید-الکتریک[٣]

با توجه به متفاوت بودن پرنده‌ها از لحاظ اندازه، ماموریت و کاربرد، اجزای مختلف سیستم پیشرانه الکتریکی آن‌ها نیز الزامات و نیازمندی‌های فنی مختلفی را دارند. جدول ٦-١ ارتباط بین این الزامات مربوط به کارایی اجزای الکتریکی سیستم‌های پیشرانه را با انواع مختلف پرنده و معماری سیستم پیشرانه (هیبرید موازی، تمام الکتریک و توربوالکتریک) بیان می‌کند. لازم به ذکر است که در جدول ٦-١، کاربردهای بالقوه و زمان‌بندی مربوط به مفاهیم هیبرید موازی و تمام الکتریک عمدتا بر اساس پیشرفت فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی بنا بیان شده است.

با استفاده از مقادیر موجود در این جدول‌ها می‌توان برای توسعه فناوری اهداف مشخصی تعیین نموده و برای پیشرفت فناوری‌ها همگام با پیشرفت پرنده به صورت گام به گام برنامه ریزی نمود. به نظر می‌رسد معماری توربوالکتریک زودتر از معماری‌های هیبرید موازی و تمام الکتریک محقق گردد.

جدول ٦-١: الزامات و پیش‌نیازهای مربوط به کارایی اجزای الکتریکی سیستم‌های پیشرانه مختلف[١٣]

رده پرنده	سامانه الکتریکی[1]			باتری[2]
		ظرفیت توان (MW)	چگالی توان ($\frac{kW}{kg}$)[3]	چگالی انرژی ($\frac{Wh}{kg}$)
هوانوردی عمومی و کامیوتر	هیبرید موازی	موتور <۱	۳<	۲۵۰<
	تمام الکتریک	موتور <۱	۶٫۵<	۴۰۰<
	توربوالکتریک	موتور و ژنراتور <۱	۶٫۵<	-
منطقه‌ای و تک راهرو	هیبرید موازی	موتور = ۱ الی ۶	۳<	۸۰۰<
	تمام الکتریک	موتور = ۱ الی ۱۱	۶٫۵<	۱۸۰۰<
	توربوالکتریک	موتور= ۱٫۵ الی ۳ ژنراتور=۱ الی ۱۱	۶٫۵<	-
پهن پیکر	هیبرید موازی	-	-	-
	تمام الکتریک	ممکن نیست	-	-
	توربوالکتریک	موتور= ۴، ژنراتور = ۳۰	۱۰<	-
APU برای پرنده‌های بزرگ	-	ژنراتور = ۰٫۵ الی ۱	۳<	-

همانطور که در جدول جدول ٦-١ آمده است، برای آنکه یک پرنده در رده هوانوردی عمومی بتواند با سیستم هیبرید موازی پرواز نماید کافی است موتوری الکتریکی با چگالی بزرگتر از $3\ \frac{\mathrm{kW}}{\mathrm{kg}}$ داشته باشد و چگالی انرژی باتری‌های آن $250\ \frac{\mathrm{Wh}}{\mathrm{kg}}$ باشد. همچنین یک هواپیمای منطقه‌ای و یا تک ردیفه، با سیستم پیشرانه هیبرید موازی برای پرواز کافی است باتری‌هایی با چگالی انرژی $800\ \frac{\mathrm{Wh}}{\mathrm{kg}}$ داشته باشد. برای همین نوع هواپیما با سیستم پیشرانه تمام الکتریک به چگالی انرژی $1800\ \frac{\mathrm{Wh}}{\mathrm{kg}}$ نیاز است. البته با استفاده از مفهوم پیشرانه توزیع یافته، می‌توان از تعداد بیشتری موتور الکتریکی با چگالی توان پایین‌تر استفاده نمود.

اگرچه، این دو مقدار فاصله زیادی با مقادیر کنونی چگالی انرژی باتری‌ها ($200 - 250\ \frac{Wh}{kg}$) دارند و طبق پیش‌بینی محققین، مقدار چگالی انرژی باتری‌ها تا ۲۰ سال آینده به $400 - 600\ \frac{Wh}{kg}$ خواهد رسید.

[1] سامانه الکتریکی بخش‌های الکترونیکی تولید توان را نیز شامل می‌شود.

[2] این مقدار بیانگر مجموع سامانه باتری و انرژی قابل استفاده برای مدت زمان تخلیه شارژ است که با مدت زمان پروازهای تجاری رابطه دارد و به صورت اسمی بین ۱ تا ۱۰ ساعت است. مقادیر ذکر شده برای باتری‌های قابل شارژ است.

[3] نسبت تبدیل: $1\frac{kW}{Kg} = 0.61\frac{HP}{lb}$

در جدول ٦-٢ اجزای مختلف سیستم پیشرانه الکتریکی در سه بخش زیر بررسی شده است:

الف - وضعیت کنونی اجزای الکتریکی موجود با کاربردهای هوایی

ب- اهداف پژوهشی بیان شده توسط برخی از برنامه‌های پژوهشی

ج- پیش‌بینی ۲۰ سال آینده کمیته در مورد کارایی اجزای سامانه‌های الکتریکی در صنعت هوایی

برای مطالعه مقادیر موجود در این جدول بایستی نکات زیر مد نظر قرار گیرد:

- منظور از اجزای الکترونیکی، تجهیزات الکترونیکی مورد نیاز برای تبدیل توان است.
- بخش توان غیر تبریدی و تبریدی:
  - مقادیر بیان شده در بخش تولید توان غیر تبریدی[1] مربوط به سامانه‌هایی است که هم‌اکنون بر روی پرنده‌های در حال عملیات نصب شده است.
  - در محاسبه چگالی انرژی در بخش توان تبریدی[2] تنها جرم خود موتور یا ژنراتور لحاظ شده است.
- بخش اهداف پژوهشی:
  - مقادیر بیان شده الزاما شامل وزن بسته‌بندی مورد نیاز برای استفاده از سامانه‌ها در پرنده نمی‌شود.
  - ناسا به طور معمول فناوری را حداکثر تا سطح TRL 6 به بلوغ می‌رساند و در اهداف ۱۰ ساله خود، سطح TRL 4 را (تایید عملکرد یک قطعه در شرایط آزمایشگاهی) مدنظر قرار داده است و وزن بسته‌بندی را در نظر نگرفته است.
  - اهداف نیروی هوایی آمریکا با درنظر گرفتن وزن بسته بندی مورد نیاز در یک پرنده بیان شده است.
- بخش پیش‌بینی آینده:
  - این پیش‌بینی با این فرض انجام شده که فناوری ظرف ۲۰ سال آینده به سطح TRL 6 خواهد رسید و سامانه‌های پیشرفته ظرف ۳۰ سال آینده شروع به کار خواهند نمود.

[1] Noncryogenic Power

[2] Cryogenic Power

جدول ٦-٢: تحلیل اجزای مختلف سیستم پیشرانه الکتریکی در سه بخش حال، اهداف پژوهشی و پیش‌بینی آینده[۱۳]

			موتور و ژنراتور		اجزای الکترونیکی		باتری
	نام شرکت یا موسسه	بازه زمانی	ظرفیت توان (MW)	چگالی توان $(\frac{kW}{kg})$	ظرفیت توان (MW)	چگالی توان $(\frac{kW}{kg})$	انرژی ویژه $(\frac{Wh}{kg})$
وضعیت کنونی		توان غیر تبریدی	۰٫۲۵	۲٫۲	۰٫۲۵	۲٫۲	۲۰۰-۲۵۰
		توان تبریدی	۱٫۵	۰٫۲	-	-	-
اهداف پژوهشی	ناسا	اهداف ۱۰ ساله	۱-۳	۱۳	۱-۳	۱۵	-
		اهداف ۱۵ ساله	۵-۱۰	۱۶	۵-۱۰	۱۹	-
	نیروی هوایی آمریکا	اهداف ۲۰ ساله	۱	۵	۱	۵	۴۰۰-۶۰۰
	دانشگاه دولتی اوهایو	اهداف ۳ ساله	۰٫۳	۱۵	-	-	-
		اهداف ۵ ساله	۲	۱۵	۲	۲۳	-
	ایرباس	هدف ۱۵ ساله	-	۱۰-۱۵	-	-	-
	پیش‌بینی مک‌لارن[۱]	-	-	-	۰٫۲۵	۵۰	-
پیش‌بینی آینده	۲۰ سال آینده	غیر تبریدی	حدود ۱-۳	حدود ۹	حدود ۱-۳	حدود ۹	حدود ۴۰۰-۶۰۰

[۱] مک‌لارن یک شرکت خودروسازی در بریتانیا است و اهداف بیان شده برای این شرکت مربوط به کاربردهای خودروسازی است.

۶-۲- تقاضای بازار

یکی از مهم‌ترین موانع بر سر راه توسعه پرواز الکتریکی و ظهور کاربردهایی همچون تاکسی‌های هوایی شهری[1] عدم اطمینان از تقاضای بازار به این کاربردها است. برای سرمایه‌گذاری بر روی پرواز الکتریکی باید به‌وضوح مشخص گردد که آیا تقاضای بازار با قیمت و بازگشت سرمایه‌ای معقول همراه خواهد بود تا بتوان هزینه‌های انجام‌شده جهت توسعه و همچنین هزینه‌های عملیاتی را پوشش داد. از سوی دیگر، با توجه به اینکه اکثر شرکت‌های هواپیمایی در سال‌های اخیر اقدام به خرید هواپیماهای منطقه‌ای ۷۰-۹۰ نفره کرده‌اند و این هواپیماها ممکن است روزانه چند پرواز انجام دهند، شرکت‌های سازنده پرنده‌های تمام الکتریکی بایستی محصولات خود را به‌گونه‌ای طراحی نمایند که قابلیت شارژ سریع باتری‌ها یا تعویض آن‌ها در حداقل زمان را داشته باشند تا بتوانند ارزش پیشنهادی محصولات خود را به‌خوبی به شرکت‌های هواپیمایی نشان دهند.

۶-۳- مقررات

برای فعال‌سازی پتانسیل پرنده الکتریکی، بایستی قوانین و مقررات جدیدی برای فناوری‌ها، پلتفرم‌ها و سیستم‌های هوانوردی جدید تنظیم و ایجاد شود.

نخست، هم‌زمان با توسعه فناوری‌های جدید در حوزه هوانوردی الکتریکی، برای هر فناوری باید مقررات ویژه‌ای برای اجرا وجود داشته باشد. برای مثال، مقررات نقشی کلیدی در صحه‌گذاری و تائید استفاده از سیستم‌های پرنده‌های بیش الکتریکی، سیستم‌های پیشرانه الکتریکی، استفاده از باتری‌های توان بالا و سیستم‌های توزیع فشارقوی ایفا خواهد کرد.

در حال حاضر برای برخی از کاربردهای پرنده الکتریکی مانند تاکسی شهری هوایی مقررات کافی وجود ندارد. برای نمونه نحوه رفت‌وآمد آن‌ها در فضای شهری و در بین ساختمان‌ها، چگونگی تعامل آن‌ها با دیگر بخش‌ها و زیرساخت‌های حمل‌ونقل مانند مترو، جاده‌ها و شبکه ریلی؛ بنابراین بایستی همگام با پیشرفت فناوری‌ها در این حوزه، قوانین و مقررات نیز بروز رسانی شده و در صورت لزوم موارد جدیدی ایجاد شوند تا بتوان کنترل مناسبی بر روی این فناوری‌ها داشت.

[1] Urban Air Taxi

۷- آینده پرواز الکتریکی

با توجه به موانعی که برای پرواز الکتریکی گفته شد، برای آینده این حوزه می‌توان چهار سناریوی زیر را محتمل دانست. لازم به ذکر است که هر سناریو با فرض وقوع کامل سناریوی قبلی بنا نهاده شده است و در کل می‌توان روندی افزایشی برای پیشرفت این حوزه متصور شد.

۷-۱- سناریوی اول: ادامه روند کنونی پیشرفت

با ادامه روند فعلی برای پرنده‌های بیش الکتریک، استفاده از قطعاتی مانند محرک‌های الکتریکی[1] که شامل محرک‌های الکتریکی-هیدرولیکی[2] و الکترومکانیکی[3] است در مصارفی همچون سیستم‌های کنترل پرواز، سیستم معکوس کننده تراست بیشتر خواهد شد. سیستم‌های الکتریکی نیز جایگزین سیستم‌های تمام هیدرولیک یا نیوماتیک خواهند شد.

با توجه به برنامه‌های توسعه فعلی، برای پیشرفت در این بخش نیازی به تغییر عمده‌ای در قوانین و مقررات نبوده و با قوانین موجود نیز فرآیند الکتریکی شدن برای پرنده‌های تجاری بزرگ نیز به‌خوبی طی خواهد شد.

در ادامه، تأمین‌کنندگان سطح ۱[4] و OEM ها نیز بیشتر از قبل به قطعات الکتریکی روی آورده و تولید سیستم‌ها و قطعات هیدرولیکی و نیوماتیکی کاهش پیدا خواهد کرد.

۷-۲- سناریوی دوم: توسعه کاربردی محدود و خاص

وقوع این سناریو نیازمند تغییرات متعددی در قوانین و مقررات است. در این حالت، علاوه بر سناریوی اول استفاده از پیشرانه الکتریکی در کاربردهای بخصوصی موردپذیرش صنعت قرار می‌گیرد. این کاربردها بیشتر در مواردی است که محدودیت‌هایی مانند میزان آلودگی صوتی تولیدشده توسط سیستم‌های پیشرانه متداول وجود دارد. اثر این سناریو بیشتر از همه بر روی پرنده‌های تمام الکتریک یا هیبرید-الکتریک قابل‌مشاهده بوده و این پرنده‌ها قادر خواهند بود پروازهای با برد بین ۱۵۰ تا ۸۰۰ کیلومتر را با سرعت و چگالی انرژی باتری متوسط به شکلی بهینه انجام دهند. با استفاده از سیستم پیشرانه هیبرید-الکتریک امکان پرواز برای پرنده‌های متوسط (تا ظرفیت ۳۰ نفر) ممکن خواهد بود. اگر سیستم پیشرانه تمام الکتریک امکان‌پذیر شود،

[1] Electric actuator
[2] Electric-hydrostatic actuator (EHA)
[3] Electro-mechanical actuators (EMA)
[4] Tier 1 suppliers

پرنده‌های سبک با اندازه متوسط نیز به پرواز درخواهند آمد. به‌علاوه، بازدهی سفر هوایی با هزینه و زمان سفر معقول باعث کاهش ترافیک در حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی خواهد شد.

۷-۳- سناریوی سوم: تحولی در مقیاس کوچک

علاوه بر سناریوی دوم و وقوع پیشرفت‌های فناوری، مقررات و قوانین در این حوزه تغییر یافته و موضوع پرواز الکتریکی در جامعه موردپذیرش قرار می‌گیرد و کاربردهایی مانند تاکسی شهری هوایی گسترش می‌یابد؛ بنابراین بایستی تدابیر لازم برای دیگر جنبه‌های این فناوری‌ها اتخاذ گردد. برای مثال در بحث حمل‌ونقل هوایی شهری باید مقررات لازم جهت تعامل با بخش زمینی و ریلی تدوین گردد. باوجوداین پیشرفت‌ها، سازگاری شهرها و مردم با این فناوری‌ها در مقیاس کلان با سرعت کمی انجام خواهد شد و هر شهر پیش از گشودن آسمان خود به روی این فناوری‌ها، تحلیل‌های مربوط به کسب‌وکار را به شکلی دقیق انجام خواهد داد تا نسبت به همه جنبه‌های آن اشراف لازم را پیدا نماید. بخش تعمیر، نگهداری و اورهال این پرنده‌ها نیز بازار مناسبی برای شرکت‌های فعال در این زمینه ایجاد خواهد نمود.

۷-۴- سناریوی چهارم: تحولی در مقیاس بزرگ

علاوه بر سناریوی سوم، تحولات عظیمی در فناوری‌های حوزه هوافضا رخ می‌دهد و کاربردهایی مانند هواپیماهای تجاری هیبرید را ممکن ساخته و گام بزرگی در جهت به وجود آمدن هواپیمای تجاری تمام الکتریک برداشته می‌شود. البته حرکت به‌سوی تمام الکتریکی شدن هواپیماهایی در سطح بوئینگ ۷۳۷ و ایرباس ۳۲۰ به‌کندی انجام می‌پذیرد زیرا زیرساخت‌ها و سیستم‌های زیادی باید دچار تحول شده و عملیاتی شدن آن‌ها چند دهه زمان خواهد برد.

در این سناریو، سه دسته از فعالان و ذینفعان صنعت هوافضا بایستی تغییرات عمده‌ای کنند.

اول OEM هایی مانند ایرباس و بوئینگ باید برنامه‌هایی برای توسعه بخش هیبرید-الکتریکی و تمام الکتریکی خود ایجاد نمایند. با این کار، احتمال حضور OEM های غیرمتداول درزمینه هوافضا مانند شرکت زیمنس نیز به این بازار قوت می‌یابد.

بخش دوم تولیدکنندگان موتور و سیستم‌های پیشرانه پرنده خواهند بود. باوجود سیستم‌های پیشرانه الکتریکی و حضور پررنگ شرکت‌های تولیدکننده موتورهای الکتریکی، شرکت‌هایی مانند جنرال الکتریک، رولز رویس و پرت اند ویتنی[1] با تهدیدی جدی روبرو خواهند شد.

[1] Pratt & Whitney

بخش سوم، فرودگاه‌ها خواهند بود که باید علاوه بر زیرساخت مربوط به توزیع سوخت‌های فسیلی، زیرساخت توزیع انرژی الکتریکی را نیز ایجاد نمایند. شرکت‌های خدمات فرودگاهی نیز باید بین سرمایه‌گذاری بر روی فناوری باتری‌های با شارژ سریع و داشتن باتری اضافی در انبار جهت تعویض سریع انتخاب نمایند.

۸- وضعیت پرواز الکتریکی در ایران

در قسمت «ضرورت پرواز الکتریکی» برخی از دلایل توجه دنیا به توسعه این حوزه گفته شد. بسیاری از دلایل موجود در مورد کشورهایی چون ایران نیز صدق می‌کند. ازاین‌رو با توجه به موارد بیان‌شده، در این بخش به تشریح عواملی می‌پردازیم که باعث اهمیت یافتن موضوع پرواز الکتریکی در ایران شده و می‌تواند آن را به یک فرصت راهبردی تبدیل نماید.

۸-۱- ضرورت و مزایای توسعه پرواز الکتریکی در ایران

❖ **آلودگی صوتی و هوای ناشی از پرواز هواپیما در ایران**

در ایران مشکل آلودگی هوا در سال‌های اخیر تبدیل به بحران شده است. یکی از منابع ایجاد آلودگی هواپیماها هستند که با انجام پرواز و مصرف حجم بالایی از سوخت فسیلی، باعث انتشار آلاینده‌ها می‌شوند. در مورد مسئله آلودگی صوتی نیز در قوانینی مانند قانون حفاظت و بهسازی مصوب ۱۳۵۳ و ماده ۱۰۴ قانون برنامه سوم توسعه مصوب ۱۳۷۹ اشاره شده است؛ اما دراین‌بین، «آئین‌نامه اجرایی جلوگیری از آلودگی صوتی» مصوب هیئت‌وزیران در تاریخ ۱۳۷۸/۰۳/۱۹ دارای ۱۳ ماده و ۶ تبصره، مشخص‌ترین قاعده حقوقی کشورمان درزمینه جلوگیری از آلودگی صوتی به شمار می‌رود. باوجوداینکه در ماده‌های ۶ تا ۸ این آئین‌نامه قوانین مرتبط به منابع آلاینده متحرک (وسایل نقلیه) بیان شده است، اما قانون‌گذار در مورد هواپیماها در ماده‌ای جداگانه صحبت نموده است:

ماده ۹ - کلیه هواپیماهایی که در ایران ثبت می‌شوند و یا در آسمان ایران به پرواز درمی‌آیند یا در فرودگاه‌های آن تردد می‌نمایند، ملزم به رعایت ضوابط و استانداردهای سازمان هوانوردی بین‌المللی (ICAO - ۱۹۷۴) می‌باشند.

تبصره ۱ - نظارت بر اجرای این ماده بر عهده سازمان هواپیمایی کشوری است.

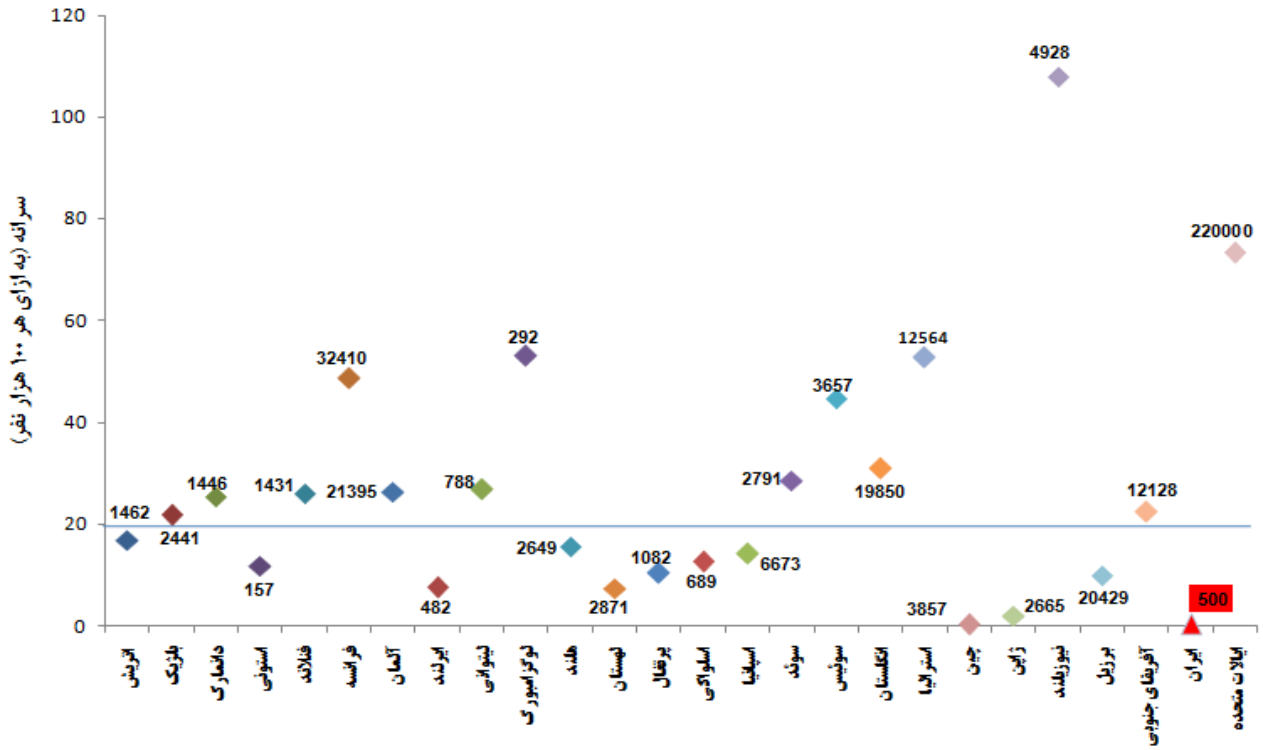
تبصره ۲ - رسیدگی به شکایت‌های واصله به سازمان محیط‌زیست از طریق سازمان هواپیمایی انجام خواهد شد.

برای اجرای این قوانین بایستی میزان آلایندگی صوتی و هوای پرنده‌ها را به‌صورت دقیق و منظم اندازه‌گیری نمود. اگرچه هواپیماهای هیبرید-الکتریکی یا تمام الکتریکی نیز برای پرواز به انرژی نیاز دارند، اما برای تأمین آن می‌توان از انرژی‌های تجدید پذیر و پاک استفاده نمود و مصرف سوخت‌های فسیلی را کاهش داد.

❖ کاربرد هواپیماهای چندنفره

همان‌طور که در شکل ۱۱ در مورد سهم هر یک از بخش‌های چهارگانه صنعت هوایی در برنامه‌های توسعه پرواز الکتریکی نشان داده شد، بیشترین تعداد برنامه‌ها مربوط به هوانوردی عمومی و هواپیماهای تفریحی بوده که به معنی سرمایه‌گذاری بیشتر شرکت‌ها در این بخش است. هوانوردی عمومی ازلحاظ اقتصادی یکی از قسمت‌های جذاب و پربازده صنعت هوایی به شمار می‌رود. محصولات این رده در حوزه‌های فراوانی کاربرد دارد، ازجمله: تاکسی هوایی، آمبولانس هوایی، آموزش خلبانی، پست و حمل بار، بازرگانی، گشت هوایی، عکس‌برداری، نقشه‌برداری و زمین‌شناسی، حوزه تحقیقات هوانوردی، چک‌های پروازی.

بر اساس آمار ارائه‌شده توسط موسسه گاما از سرانه پرنده‌های رده هوانوردی عمومی در کشورهای مختلف دنیا به ازای هر ۱۰۰ هزار نفر، سرانه مطلوب برای کشوری همچون ایران برابر با ۲۰ فروند به ازای هر ۱۰۰ هزار نفر برآورد می‌شود؛ اما وضعیت فعلی و آمارهای به‌دست‌آمده بیانگر مقدار ۰/۶۲۵ در مورد ایران است.



شکل ۱۵: سرانه پرنده‌های رده هوانوردی عمومی در کشورهای مختلف به ازای هر ۱۰۰ هزار نفر

این مقدار بیانگر این مطلب است که در کشوری مانند ایران پتانسیل حضور ۱۶۰۰۰ فروند هواپیما در رده هوانوردی عمومی وجود دارد، در حالی که این مقداراکنون ۵۰۰ فروند است. با فعال شدن بخش هوانوردی عمومی در کشور، نه تنها زمینه اشتغال برای تعداد زیادی از افراد فراهم می‌گردد، بلکه بازار بسیار مناسبی برای پرواز الکتریکی بوجود خواهد آمد. از آنجایی که هوانوردی عمومی در کشور ما هنوز فاصله فراوانی با حد مطلوب داشته و به تعبیری در آغاز راه توسعه قرار دارد، می‌توان با توجه بیشتر به فناوری‌های نوین در این حوزه همگام با دیگر کشورها در مسیر توسعه و پیشرفت گام برداشت. یکی از این فناوری‌ها که بسیار مورد توجه فعالان بخش هوانوردی عمومی قرار گرفته است، سیستم‌های پیشرانه الکتریکی است که به عنوان جایگزینی برای سیستم‌های پیشرانه احتراقی مطرح شده است. شرکت پیپیسترل به عنوان یکی از پیشگامان این صنعت اقدام به الکتریکی نمودن سیستم پیشرانه چند پرنده موجود خود از جمله Taurus Electro G2، Alpha Electro WattsUP و Panthera Electro نموده است. از سوی دیگر به خاطر وجود مزیتی که در پیشرانه الکتریکی به نام پیشرانه توزیع‌یافته وجود دارد، در هر پرنده الکتریکی می‌توان از چندین موتور الکتریکی استفاده برد. برای نمونه پرنده شرکت JOBY دارای ۱۶ موتور الکتریکی است. این به معنی چندین برابر بزرگتر بودن بازار این موتورها نسبت به موتورهای احتراق داخلی است؛ بنابراین شرکت‌های داخلی نیز می‌توانند با استفاده از سیستم پیشرانه الکتریکی در پرنده‌های موجود خود، در آینده نزدیک سهم مناسبی در بازار آن داشته باشند.

❖ ساخت هواپیمای منطقه‌ای

همانطور که گفته شد، شرکت‌های بزرگ هواپیماسازی دنیا مانند ایرباس و بوئینگ درزمینه توسعه پرواز الکتریکی برنامه‌ها و اهداف بلند مدتی را پیگیری می‌نمایند. برای نمونه شرکت ایرباس در سال ۲۰۱۴ کار در زمینه پرواز الکتریکی را با پرنده دو نفره E-Fan آغاز نمود و اعلام کرد که پرنده دو نفره E-Fan 2.0 را درسال ۲۰۱۷ و پرنده ۴ نفره E-Fan 4.0 را درسال ۲۰۱۹ به پرواز در خواهد آورد؛ اما در آوریل ۲۰۱۷ اعلام نمود که برنامه E-Fan را متوقف نموده تا با تمرکز بیشتری بر روی ساخت یک جت منطقه ای ۹۰ نفره با نام E-Thrust فعالیت کند. ایرباس قصد دارد تا سال ۲۰۳۰ خدمت رسانی با این پرنده را آغاز نماید.

این مورد به خوبی نشان می‌دهد که موضوع پرنده الکتریکی تنها مختص رده هوانوردی عمومی نبوده و در شرکت‌های هواپیما سازی بزرگ برنامه هایی برای توسعه هواپیماهای الکتریکی منطقه‌ای در میان مدت و هواپیماهای تجاری بزرگ در دراز مدت دارند. با توجه به وجود مشکلات خرید هواپیما برای ایران، ساخت هواپیما در داخل یکی از گزینه‌های معتبر و راهبردی به نظر می‌آید. از آنجایی که تنها چند فرودگاه از میان

فرودگاه‌های مختلف کشور در حال خدمت رسانی هستند و مابقی در وضعیت اقتصادی مطلوبی به سر نمی‌برند، وجود هواپیماهای با ظرفیت بین ۷۰ تا ۱۰۰ نفره می‌تواند بسیاری از مسیرهای پروازی غیرفعال فعلی را که پرواز در آن‌ها با هواپیماهای بزرگ فعلی مقرون به صرفه نیست فعال نماید؛ بنابراین می‌توان با انجام برنامه‌ریزی مناسب در ۲۰ سال آینده شاهد ساخت هواپیماهای منطقه‌ای در کشور بود و بخش عمده‌ای از نیاز حمل و نقل هوایی را مرتفع نمود.

۸-۲- موانع توسعه پرواز الکتریکی در ایران

❖ فناوری

همان‌طور که در بخش موانع توسعه پرواز الکتریکی گفته شد، یکی از موانع مهم در این حوزه، فناوری‌های موجود است. در ایران شرکت‌های مختلفی در زمینه تولید باتری و موتور الکتریکی فعالیت می‌کنند، اما به علت جدید بودن موضوع پرواز الکتریکی هنوز هدف‌گذاری دقیقی برای تولید باتری‌ها و موتورهای الکتریکی مناسب این زمینه در بین این شرکت‌ها مشاهده نمی‌شود؛ اما با توجه به سطح فناوری موجود در کشور، رسیدن به سطح مطلوب چندان دور به نظر نمی‌رسد.

❖ مقررات و دستورالعمل‌ها

از سوی دیگر، اگرچه مقررات و دستورالعمل‌های لازم برای پرواز در کشور وجود دارد، اما دستورالعمل‌های مخصوص پرنده الکتریکی به علت نوظهور بودن فناوری‌های این حوزه هنوز تدوین نشده است و بایستی نهادهای ذی‌ربط به‌موقع برای تدوین آن اقدام نمایند.

نکته‌ای که باید در تهیه این اسناد مدنظر قرار گیرد، توجه داشتن به مسائل و منافع بخش خصوصی در آن‌هاست. برای نمونه، قوانین و مقررات بخش هوانوردی عمومی هنوز فاصله زیادی تا ایجاد جذابیت اقتصادی برای سرمایه‌گذاران و علاقه‌مندان آن بخش دارد. همچنین در موضوع پهپاد نیز ممنوعیت‌های پروازی مختلف و قوانین دست‌وپا گیر باعث عدم شکوفایی بخش غیرنظامی آن شده است که البته این مشکلات در حال رفع است.

❖ نیاز به حمایت جهت توسعه فناوری

به علت بالا بودن هزینه‌های تحقیق و توسعه باتری و موتور الکتریکی با چگالی مطلوب، بخش خصوصی توانایی و رغبت لازم برای سرمایه‌گذاری در این بخش را نداشته و بایستی جهت فعال نمودن این بخش مشوق‌ها و حمایت‌هایی از سوی دیگر ذینفعان و همچنین نهادهای دولتی مرتبط تهیه و ارائه گردد.

یکی از چارچوب‌های مناسب برای ایجاد مشارکت بین بخش‌های مختلف خصوصی و دولتی، جوینت ونچر است. با ایجاد یک جوینت ونچر و مشارکت همه ذینفعان می‌توان هزینه‌های مربوط به تحقیق و توسعه را بهتر مدیریت نموده و به مدلی اجرایی و عملی برای رسیدن به پرواز الکتریکی دست یافت. البته بدیهی است که دولت باید در این میان نقش تسهیل‌گر را ایفا نموده و درنهایت موجب شکوفایی بازار این حوزه برای بخش خصوصی گردد.

پیش از تشکیل جوینت ونچر و شروع کار، پیشنهاد می‌گردد ابتدا مطالعه کاملی در مورد توسعه پرواز الکتریکی و فناوری‌های مرتبط با آن در جهان و ایران صورت پذیرفته و سپس یک سند توسعه فناوری برای این حوزه تدوین گردد. با انجام این کار، داده‌های کافی برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی به‌دست‌آمده و برنامه‌ای عملی برای توسعه پرواز الکتریکی در ایران تدوین می‌گردد که تطابق خوبی با شرایط ایران دارد.

۹- جمع‌بندی

در موضوع پرواز الکتریکی در دنیا، شرکت‌ها متناسب با ظرفیت‌ها و بازار هدف خود، اقدامات مختلفی در توسعه پرواز الکتریکی برداشته‌اند. شرکت‌های بزرگ مانند ایرباس و بوئینگ نقشه راه به دنبال تمام الکتریکی خود را ارائه نموده‌اند و شرکت‌های کوچک و چند استارت‌آپ‌ها نیز بر روی پرنده‌هایی در حوزه هوانوردی عمومی مشغول به فعالیت هستند. بااین‌حال هنوز موضوع توسعه پرواز الکتریکی در مراحل آغازین خود قرار داشته و به نظر می‌رسد که اگر ایران نیز با برنامه‌ریزی و زمان‌بندی مناسب به این عرصه ورود نماید می‌تواند دست آوردهای راهبردی مطلوبی را در میان‌مدت و بلندمدت کسب نماید. مزایای برنامه‌ریزی درست و اقدام به‌موقع در کشور را می‌توان به‌خوبی در حوزه فناوری‌های نانو در مشاهده نمود، چراکه ایران توانست با برنامه‌ریزی به‌موقع و جهت‌دهی مناسب منابع خود در این حوزه گام برداشته و ظرف مدت نسبتاً کوتاهی تبدیل به یکی از کشورهای مطرح در حوزه فناوری نانو گردد. با توجه به فعالیت شرکت‌ها و برنامه‌های گوناگون توسعه در این حوزه می‌توان در آینده نزدیک بازار بزرگی برای پرواز الکتریکی متصور بوده و کاربردهای آن می‌تواند در سراسر جهان گسترش یافته و رشد نمایند. در ایران نیز می‌توان با حمایت از شرکت‌های فعال در حوزه موتور الکتریکی و سیستم‌های انرژی، به توسعه فناوری کمک نموده و در سال‌های آینده همگام با دنیا پیش رفت.

بخش دوم:

مباحث فنی پرواز الکتریکی

۱۰- کمیت‌های مهم در پرواز الکتریکی

❖ چگالی انرژی باتری

به نسبت انرژی خروجی باتری به وزن آن چگالی انرژی باتری[1] گفته می‌شود و با واحد وات‌ساعت بر کیلوگرم ($\frac{Wh}{Kg}$) بیان می‌شود. این کمیت مشخص می‌کند که یک باتری نسبت به وزن خود چقدر می‌تواند انرژی تولید نماید و معیاری مناسب برای تشخیص بهینه و کارآمد بودن باتری است. برای مثال یک باتری که ۱۰۰۰ وات‌ساعت انرژی تولید می‌کند و ۴ کیلوگرم نیز وزن دارد، چگالی توانی برابر با $250\ \frac{Wh}{Kg}$ خواهد داشت. هرچه این مقدار بیشتر باشد، باتری نسبت به وزن خود انرژی بیشتری را می‌تواند تولید نماید.

❖ وزن محموله

به گنجایشی که یک پرنده برای به همراه بردن بار ارزشمند دارد وزن محموله[2] یا بار مفید گفته می‌شود. واحد این کمیت کیلوگرم است.

❖ وزن خالی

به وزن پرنده بدون در نظر گرفتن وزن محموله (شامل بار، مسافر، سوخت قابل‌استفاده و ...) وزن خالی[3] پرنده گفته می‌شود. اگرچه تعاریف مختلفی برای وزن خالی وجود دارد، اما انجمن سازندگان هوانوردی عمومی[4] در سال ۱۹۷۵، تعریف زیر را ارائه کرده است:

وزن خالی پایه = وزن خالی استاندارد + تجهیزات دلخواه

[1] Battery Power Density
[2] Payload Weight
[3] Empty Weight
[4] General Aviation Manufacturers Association (GAMA)

وزن خالی استاندارد شامل این مواردی همچون وزن خالی پرنده، سیال هیدرولیک پر، سوخت غیرقابل استفاده و روغن پر می‌شود. تجهیزات دلخواه نیز به تمام تجهیزاتی که فراتر از استاندارد نصب شده باشد گفته می‌شود.

❖ مداومت پروازی

مدت‌زمانی که پرنده با منبع انرژی خود قادر به پرواز است مداومت پروازی[1] پرنده نام دارد و معمولاً برحسب دقیقه یا ساعت بیان می‌شود.

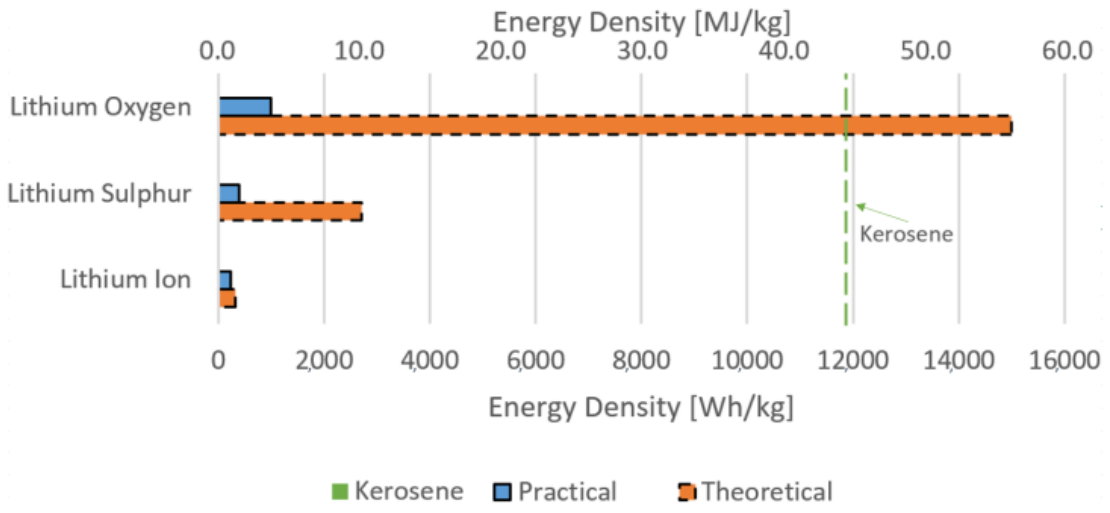
❖ چگالی توان موتور

نسبت توان خروجی موتور الکتریکی به وزن آن‌که با واحد کیلووات بر کیلوگرم ($\frac{kW}{Kg}$) بیان می‌شود را چگالی توان موتور[2] می‌نامند. این کمیت مشخص می‌کند که یک موتور الکتریکی نسبت به وزن خود چقدر می‌تواند انرژی الکتریکی تولید نماید و معیاری مناسب برای تشخیص بهینه و کارآمد بودن موتور است. برای مثال موتوری که توان پیوسته‌ای برابر با ۱۴ کیلووات تولید می‌کند و ۴ کیلوگرم نیز وزن دارد، چگالی توانی برابر با $3.5\frac{KW}{Kg}$ خواهد داشت. هرچه این مقدار بیشتر باشد، موتور نسبت به وزن خود توان بیشتری را می‌تواند تولید نماید.

۱۱- انواع باتری و مقایسه آن‌ها

در حال حاضر یکی از پرکاربردترین باتری‌ها در صنعت هوافضا و خودرو، باتری لیتیوم-یون است . یکی دیگر از فناوری‌های بسیار امیدوارکننده، فناوری لیتیوم سولفور (Li-S8) است. البته محدودیت تئوری فناوری باتری‌ها در حال حاضر، لیتیوم-اکسیژن (Li-O2) است. باوجود همه پیشرفت‌ها در حوزه باتری، هنوز فاصله زیادی بین چگالی انرژی باتری و سوخت کروسین[3] وجود دارد، چراکه چگالی انرژی باتری‌های لیتیوم-یون در حدود $250\frac{Wh}{Kg}$ بوده و چگالی انرژی کروسین نزدیک به $15000\frac{Wh}{Kg}$ است. البته دستیابی به چگالی انرژی بالاتر در باتری‌ها می‌تواند در دراز مدت و با بهره‌گیری از مفاهیم پیشرفته باتری مانند لیتیوم-سولفور، آلومینیوم-هوا و لیتیوم-هوا محقق شود. برای نمونه، چگالی انرژی نظری باتری‌های لیتیوم-سولفور $2680\frac{Wh}{Kg}$، آلومینیوم-هوا $8140\frac{Wh}{Kg}$ و لیتیوم-هوا $11000\frac{Wh}{Kg}$ در حالت شارژ شده و $3500\frac{Wh}{Kg}$ در حالت تخلیه است.

[1] Endurance
[2] Motor Power Density
[3] Kerosene



شکل ۱۶: محدودیت چگالی انرژی باتری‌ها ازلحاظ عملی[۴] و تئوری [۵]

۱۱-۱- باتری لیتیوم-یون

چگالی انرژی باتری‌های لیتیوم-یون فعلی حدود $250\frac{Wh}{Kg}$ است [۶] و به‌صورت تقریبی هرسال ۷ تا ۸ واتساعت افزایش می‌یابد. محدودیت تئوری این باتری‌ها $320\frac{Wh}{Kg}$ است [۵]. مشکل استفاده از باتری‌های لیتیوم-یون بازه محدود تخلیه شارژ است: به دلیل امکان افت کارایی، ۲۰% از انرژی ذخیره‌شده درون باتری غیرقابل استفاده است. با پیشرفت‌هایی در مواد بکار رفته در کاتد و آند و الکترولیت‌ها در حال وقوع است، این پتانسیل وجود دارد که چگالی انرژی باتری‌های لیتیوم-یون تا حدود ۲ برابر افزایش یابد [۱۳].

۱۱-۲- باتری لیتیوم-سولفور

مزیت اصلی این باتری‌ها وزن کاهش‌یافته آن‌ها در عین حفظ بازه بسیار وسیع تخلیه شارژ است. محدودیت تئوری این باتری‌ها $2680\frac{Wh}{Kg}$ بوده و عمق تخلیه شارژ آن‌ها ازلحاظ تئوری ۱۰۰% است [۴]. به‌علاوه می‌توان از باتری بدون نیاز به شارژ مجدد برای زمان بیشتری استفاده نمود. چگالی انرژی باتری‌های لیتیوم-سولفور (Li-S8) تجاری کنونی $350\frac{Wh}{Kg}$ و در مقیاس آزمایشگاهی $400\frac{Wh}{Kg}$ است [۱۳].

۱۱-۳- مقایسه باتری با سوخت فسیلی

چگالی انرژی باتری‌ها بسیار کمتر از سوخت‌های فسیلی است. فرد اسلاکتر[۷] در مقاله خود در انجمن فیزیک آمریکا چنین بیان می‌کند:

انرژی ذخیره‌شده در سوخت‌های فسیلی بسیار قابل‌ملاحظه است. بنزین در این زمینه با چگالی انرژی $47.5\frac{MJ}{Kg}$ و $34.6\frac{MJ}{liter}$ پیشگام است، درحالی‌که چگالی انرژی یک بسته باتری لیتیوم-یون حدود $0.3\frac{MJ}{Kg}$ و $0.4\frac{MJ}{liter}$ است. بنابراین چگالی انرژی بنزین حدود ۱۰۰ برابر چگالی انرژی باتری‌های لیتیوم-یون است.

۱۲- انواع موتور الکتریکی و مقایسه آن‌ها

در سال‌های اخیر درزمینه موتورهای الکتریکی پیشرفت‌های فراوانی حاصل شده است. امروزه موتورهای الکتریکی می‌توانند بیش از ۵۰۰ اسب بخار توان تولید نموده و با موتورهای احتراق داخلی رقابت نمایند. هنگامی‌که موضوع انتخاب موتور الکتریکی به میان می‌آید، معیارهای مختلفی مطرح می‌شوند که همگی وابسته به نوع کاربرد آن موتور هستند. برای مثال موتور جریان مستقیم یا جریان متناوب، موتور تک فاز یا چند فاز، موتور براش یا براشلس. موتور مناسب برای یک پرنده الکتریکی بایستی یک موتور الکتریکی جریان مستقیم براشلس باشد [۸] . در جدول زیر موتور الکتریکی جریان مستقیم با موتور جریان متناوب مقایسه شده است:

جدول ۱۲-۱: مقایسه موتور الکتریکی جریان مستقیم با موتور جریان متناوب

	موتور جریان متناوب	موتور جریان مستقیم
مزایا	**گشتاور بالاتر**	**گرمای کمتر روتور**
	نداشتن آهنربای دائم	**طیف گسترده‌تر برای تنظیمات بهینه توان**
	قدرت قابل تنظیم میدان مغناطیسی	**فاقد افت بازدهی ناشی از تبدیل جریان مستقیم به متناوب**
	قیمت بهتر	
معایب	**کنترل مشکل**	**آهنربای دائم گران‌قیمت**
	ضریب توان بهینه: ۸۵%	

موتورهای جریان مستقیم برای تولید یک میدان مغناطیسی حداقل به دو آهنربای دائم نیاز دارند، درحالی‌که موتورهای جریان متناوب هیچ آهنربایی نداشته و دارای لایه‌هایی از ورقه‌های فولادی به همراه رساناهای ثانویه هستند. وجود این آهنرباهای دائمی در موتورهای جریان مستقیم هزینه ساخت آن‌ها را نسبت به موتورهای جریان متناوب بالاتر می‌برد. اگرچه موتورهای جریان مستقیم می‌توانند در طیف وسیع‌تری از تنظیمات

مربوط به توان کار کنند. این در حالی است که نقطه بهینه توان در موتورهای جریان متناوب در حدود ۸۵% ظرفیت کل موتور است. حتی باوجود برتری موتورهای جریان متناوب در هزینه و گشتاور بیشینه نسبت به موتورهای جریان مستقیم، افت بازدهی به خاطر تبدیل جریان مستقیم باتری به جریان متناوب برای کاربردهای هوایی اصلی‌ترین دلیل انتخاب موتورهای جریان مستقیم است [۸].

تک فاز و چند فاز بودن نیز از ویژگی‌های موتورهای جریان متناوب است که با توجه به دلایل بالا در بحث پرواز الکتریکی جایی ندارند. اما موضوع جاروبک[1] داشتن یا بدون جاروبک بودن[2] به موتورهای جریان مستقیم مربوط می‌شود. در جدول زیر مقایسه‌ای بین این دو نوع موتور آورده شده است.

جدول ۱۲-۲: مقایسه موتور الکتریکی براش و براشلس

	موتور Brushed	موتور Brushless
مزایا	سادگی در کنترل	نیاز کمتر به نگهداری
	سادگی در نگهداری	تنظیمات گشتاور/سرعت باقابلیت کنترل بیشتر
	هزینه ساخت پایین‌تر	نبود افت ولتاژ در طول براش‌ها
	واحد کنترل ساده‌تر	توان خروجی بالا
	عملکرد زیست‌محیطی فوق‌العاده	اندازه کوچک قاب
		عملکرد در بازه سرعت‌بالا
		نیروهای الکترومغناطیسی کمتر
معایب	نیروهای الکترومغناطیسی بیشتر	پیچیدگی/گرانی واحد کنترل
	پخش گرمای ضعیف	
	نیاز به نگهداری مستمر	هزینه ساخت بالا
	سرعت عملیاتی پایین‌تر	
	بهینگی کمتر سرعت/گشتاور	

موتورهای Brushed نسبت به موتورهای Brushless ساده‌تر هستند، زیرا یک موتور Brushless نیازمند سه فاز از کویل‌های محرک، یک یا چند حسگر اثر هال برای تشخیص موقعیت روتور و یک روتور خارجی است. مزیت موتورهای Brushless نسبت به موتورهای Brushed نداشتن قطعات دارای تماس است. موتورهای Brushed دارای بلوک‌های کربن هستند که توان را به یکسوساز[3] در روتور درحالی‌که چرخش منتقل می‌کند. این بلوک‌ها فرسایش یافته، گرمای ناشی از اصطکاک را منتقل کره و سرعت عملیاتی کلی موتور، گشتاور مفید و

[1] Brush
[2] Brushless
[3] Commutator

بازه زمانی نگهداری را کاهش می‌دهد. ازاین‌رو موتورهای جریان مستقیم Brushless انتخاب بهتری به‌حساب می‌آیند.

برای مقایسه وزن یک موتور احتراقی با موتور الکتریکی، موتور روتاکس ۴۴۷ را در نظر بگیرید. اگرچه این موتور دیگر تولید نمی‌شود اما در بین پرنده‌های فوق سبک بسیار محبوب است. وزن این موتور ۳۷٫۱ کیلوگرم است (با موتور، جعبه‌دنده و سیستم اگزاست). این موتور ۲۹٫۵ کیلووات توان تولید می‌کند[۷]. موتور الکتریکی Gieger Engineering HP25D نیز با وزن ۹٫۸ کیلوگرم توان پیوسته ۲۵ کیلووات و توان پیک ۳۲ کیلووات را تولید می‌نماید. وزن موتور حرارتی به همراه سوخت ۵۰٫۷ کیلوگرم بوده، درحالی‌که وزن موتور الکتریکی به همراه معادل ۵ گالن باتری برابر با ٦٤٫۲ کیلوگرم است.

۱۲-۱- شرکت‌های مطرح در حوزه موتورهای الکتریکی

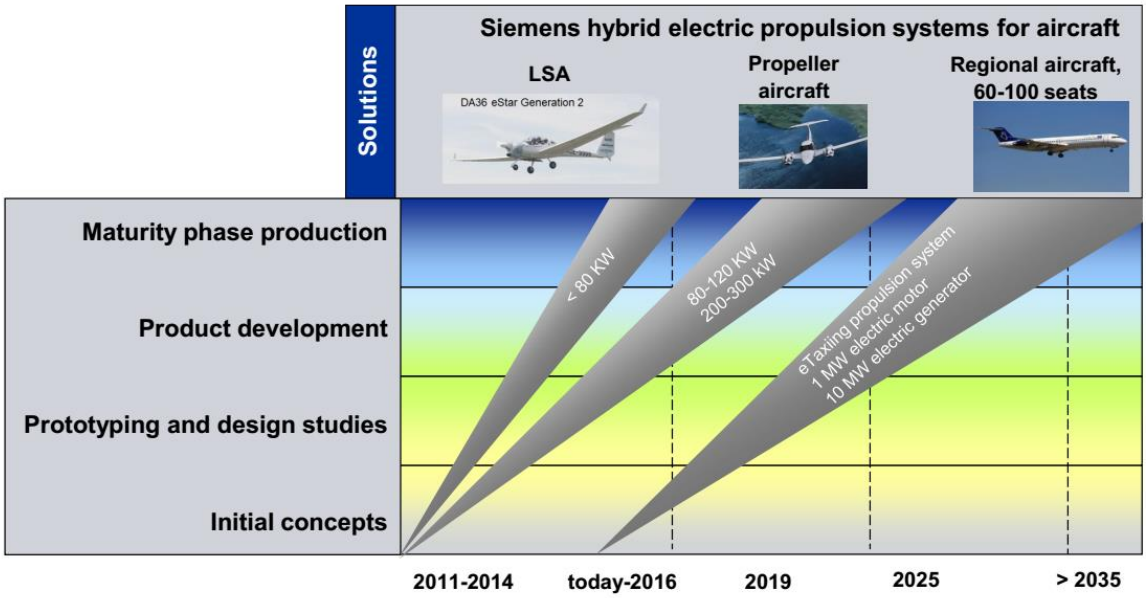
۱۲-۱-۱- شرکت SIEMENS

شرکت زیمنس در سال ۲۰۱۳ اقدام به توسعه یک موتور الکتریکی با بازدهی بالا، وزن پایین به همراه جعبه‌دنده نموده است که چگالی توانی برابر با $5\frac{KW}{Kg}$ دارد.

این شرکت درحال‌توسعه یک سیستم پیشرانه هیبرید سری برای پرنده است[1]. به گفته آن‌ها، این فناوری مقیاس‌پذیر بوده و به‌زودی راه خود را به‌سوی پرنده‌های کوچک و در آینده نزدیک هواپیماهای تجاری با ۶۰ تا ۱۰۰ مسافر بازخواهد نمود.

شرکت زیمنس نقشه راه خود را برای توسعه پرواز الکتریکی تا سال ۲۰۳۵ به‌صورت زیر بیان کرده است:

[1] serial hybrid electric propulsion systems for aircraft

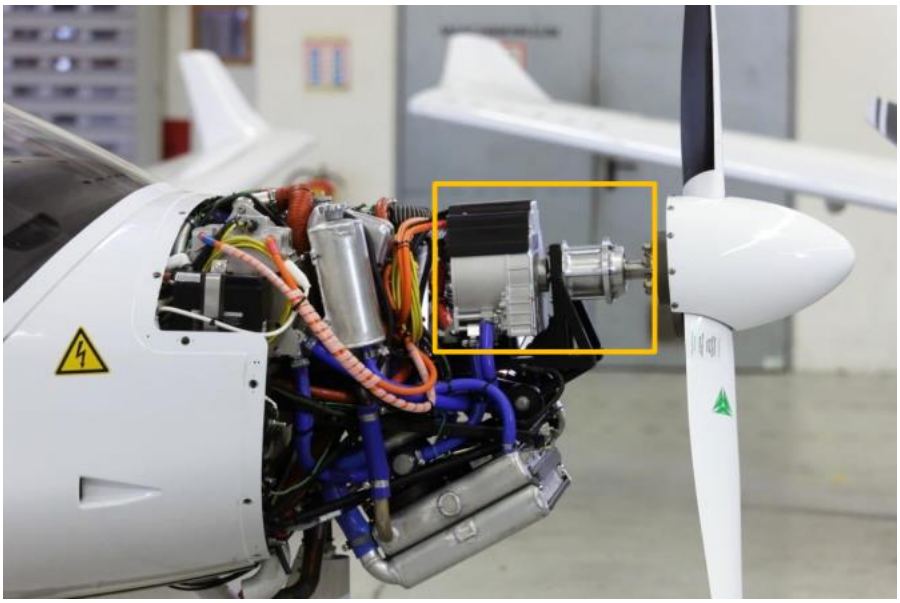


شکل ۱۷: نقشه راه توسعه پرنده الکتریکی شرکت زیمنس[۹]

همین‌طور که در شکل بالا مشخص‌شده است، شرکت زیمنس قصد دارد تا سال ۲۰۲۵ کار توسعه محصول موتور الکتریکی ۱ مگاواتی و ژنراتور ۱۰ مگاواتی خود را به پایان برساند و تا حدود ۲۰۳۵ نیز فاز تولید این محصولات را که به بلوغ کافی رسیده‌اند آغاز نماید.

سیستم‌های پیشرانه الکتریکی طراحی‌شده توسط زیمنس:

- سیستم پیشرانه موتور گلایدر پرنده DA 36 E-Star 2 ساخته‌شده در سال ۲۰۱۳



شکل ۱۸: سیستم پیشرانه موتور گلایدر پرنده DA 36 E-Star 2 شرکت زیمنس

شکل ۱۹: نسل دوم پرنده DA 36 E-Star شرکت زیمنس

این سیستم با همکاری شرکت Compact Dynamics ساخته‌شده است و یک پرنده الکتریکی هیبرید سری است که وزن محموله و برد آن با پرنده استاندارد یکسان است.

مشخصات فنی کلیدی این سیستم پیشرانه الکتریکی به شرح زیراست:

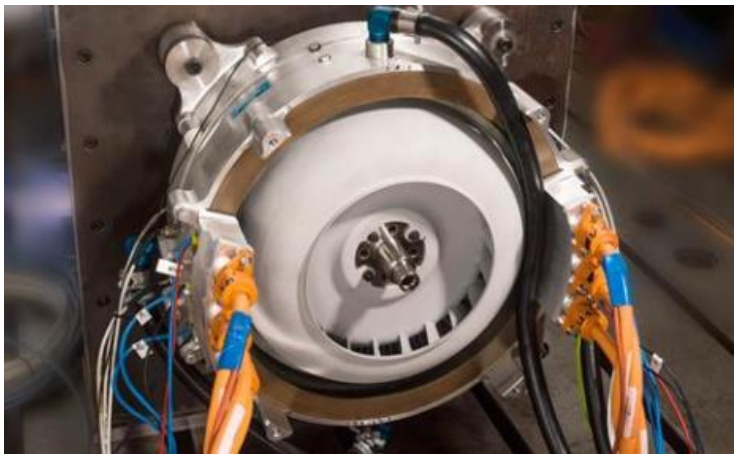
جدول ۱۲-۳: مشخصات فنی موتور الکتریکی ۶۵ کیلووات زیمنس[۹]

کمیت	مقدار
توان پیوسته	۶۵ کیلووات
وزن	۱۳ کیلوگرم
چگالی توان (شامل اینورتر و جعبه‌دنده)	۵ کیلووات بر کیلوگرم
سرعت بیشینه شفت	۲۴۰۰ دور در دقیقه
سرعت بیشینه اینترن (intern)	۱۱۰۰۰ دور در دقیقه
توان (180s)	۸۰ کیلووات
گشتاور (180s)	۷۰ نیوتن متر
خنک کاری	مایع خنک

- موتور الکتریکی $\frac{1}{4}MW$ برای سیستم پیشرانه پرنده که در ژانویه ۲۰۱۵ عملیاتی شد

این موتور برای کاربرد در حوزه پرنده الکتریکی توسعه داد ه شده و با موفقیت باقدرت مکانیکی ۲۶۱ کیلووات در ۲۵۰۰ دور در دقیقه آزمایش شده است. به‌علاوه برای به حرکت درآوردن ملخ، نیازی به جعبه‌دنده نداشته و این کار را به‌صورت مستقیم انجام می‌دهد. رفتار حرارتی این موتور عالی توصیف‌شده و قابلیت مقیاس‌پذیری

تا توان ۱ مگاوات را نیز دارد. به گفته شرکت زیمنس این موتور، قوی‌ترین موتور با چگالی $5\frac{KW}{Kg}$ است که تابه‌حال ساخته‌شده است.



شکل ۲۰: موتور الکتریکی Direct drive با توان ۰٫۲۵ مگاوات شرکت زیمنس

داده‌های طراحی:

جدول ۱۲-٤: داده‌های طراحی موتور ۰٫۲۵ مگاوات زیمنس [۹]

کمیت	مقدار
توان پیوسته	۲۳۰ کیلووات
سرعت اسمی	۲۲۵۰ دور در دقیقه
توان (180s)	۸۰ کیلووات
گشتاور پیوسته	۹۷۷ نیوتن متر
بازدهی (در توان ۲۳۰ کیلووات)	بیش از ۹۵%

داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون روی میز:

جدول ۱۲-۵: داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون روی میز موتور ۰٫۲۵ مگاوات زیمنس [۹]

کمیت	مقدار
توان پیوسته (در ۲۵۰۰ دور در دقیقه)	۲۶۰ کیلووات
سرعت بیشینه شفت	۲۵۰۰ دور در دقیقه
گشتاور پیوسته	۱۰۰۰ نیوتن متر
بازدهی در توان ۲٦۰ کیلووات	> ۹۵%

این موتور دارای مشخصات فنی زیر است:

جدول ۱۲-۶: مشخصات فنی موتور ۰٫۲۵ مگاوات زیمنس [۹]

کمیت	مقدار
توان پیوسته	۲۶۰ کیلووات
وزن (شامل موتور و یاتاقان ملخ)	۵۰ کیلوگرم
چگالی انرژی	> ۵ کیلووات بر کیلوگرم
سرعت بیشینه شفت	۲۴۰۰ دور در دقیقه
سرعت بیشینه اینترن	۱۱۰۰۰ دور در دقیقه
توان (180s)	۸۰ کیلووات
گشتاور (180s)	۷۰ نیوتن متر
خنک کاری	خنک کاری مستقیم با Tinlet 90 ºC
ابعاد	طول = ۳۰۰ میلی‌متر، قطر = ۴۱۵ میلی‌متر

- ژنراتور ۱۷۰ کیلووات، نمونه تائید شده آزمایشگاهی ساخته شده است

جدول ۱۲-۷: داده‌های طراحی موتور ۱۷۰ کیلووات زیمنس [۹]

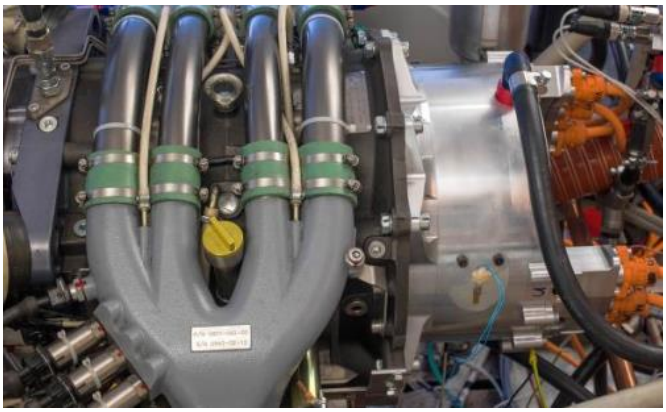
کمیت	مقدار
توان پیوسته (در ۶۲۵۰ دور در دقیقه)	۱۷۰ کیلووات
سرعت بیشینه	۶۵۰۰ دور در دقیقه
توان (180s)	۸۰ کیلووات
گشتاور پیوسته	۲۶۰ نیوتن متر
بازدهی (در توان ۱۷۰ کیلووات)	> ۹۵%

این موتور دارای مشخصات فنی زیر است:

جدول ۱۲-۸: مشخصات فنی موتور ۱۷۰ کیلووات زیمنس [۹]

کمیت	مقدار
توان پیوسته (در ۶۲۵۰ دور در دقیقه)	۱۷۰ کیلووات
وزن	۲۴٫۴ کیلوگرم
چگالی انرژی (فقط ماشین الکتریکی)	۷ کیلووات بر کیلوگرم
خنک کاری	خنک کاری مستقیم
ابعاد	طول = ۱۵۰ میلی‌متر، قطر = ۳۰۸ میلی‌متر

- دارای سیستم سیم‌پیچ redundant که هرکدام می‌توانند برای سه دقیقه over boost شوند.
- کاربرد به‌عنوان موتور یا ژنراتور
- طراحی مکانیکی برای کوپلینگ مستقیم به ICE یا جعبه‌دنده (شامل یاتاقان ملخ)



شکل ۲۱: موتور الکتریکی ۱۷۰ کیلووات شرکت زیمنس

شرکت زیمنس گام‌های لازم برای طراحی موتور الکتریکی سبک‌وزن را به‌صورت زیر بیان کرده است:

۱- طراحی الکترومغناطیسی با مواد آهنربای با کارایی بالا:

i. فرکانس الکتریکی بالا برای دستیابی به بالاترین چگالی گشتاور[1] ممکن

ii. سیم‌پیچ تخت

iii. دایره آهنربایی هوشمند با استفاده از آرایه Halbach

۲- خنک کاری با کارایی بالا

i. بخش عمده اتلاف، از نوع اتلاف فلز مس است، ازاین‌رو خنک کاری مستقیم مناسب است.

ii. چگالی جریان مداوم بسیار بالاتر از حد متداول است

iii. امکان وجود سطح بالای دمای مبرد (۹۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

[1] Torque

۱۲-۱-۲- شرکت JOBY Motors

این شرکت در سال ۲۰۰۸ توسط JoeBen Bevirt با نام Joby Energy تأسیس شد که درزمینه توربین‌های بادی و انرژی‌های تجدید پذیر فعالیت می‌کرد. سپس در سال ۲۰۱۱ با شرکت Makani Power ادغام شده و با عنوان Joby Motors اقدام به تولید موتورهای الکتریکی با چگالی انرژی بالا کرد[1]. این شرکت هم‌اکنون در محصولات خود چهار موتور الکتریکی تولید می‌نماید که مشخصات آن‌ها به شرح زیر است:

جدول ۱۲-۹: مشخصات فنی موتور JM2 شرکت Joby [۱۰]

کمیت	واحد	موتور JM2	موتور JM2S	موتور JM1	موتور JM1S
نوع ساخت	-	Inrunner	Inrunner	Inrunner	Inrunner
ولتاژ اسمی	ولت	۱۰۰ - ۶۰۰	۵۰ - ۷۰۰	۳۵ - ۶۰۰	۴۰ - ۴۵۰
تعداد قطب‌ها	عدد	۴۶	۴۶	۲۲	۲۲
سرعت اسمی	دور در دقیقه	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۶۰۰۰	۶۰۰۰
سرعت بیشینه	دور در دقیقه	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۹۰۰۰	۹۰۰۰
وزن	کیلوگرم	۴	۳٫۳۵	۲٫۷۵	۱٫۸
گشتاور پیوسته	نیوتن متر	۵۳	۴۰	۲۱	۱۳
توان پیوسته شفت در سرعت اسمی	کیلووات	۱۴	۱۰٫۵	۱۳٫۲	۸٫۲
چگالی انرژی	کیلووات بر کیلوگرم	۳٫۵	۳٫۱	۴٫۸	۴٫۵
گشتاور بیشینه (نیوتن متر)	نیوتن متر	۸۰	۶۰	۳۲	۲۰
توان بیشینه شفت در سرعت اسمی، ۱۵ ثانیه	کیلووات	۲۰٫۹	۱۵٫۷	۲۰٫۱	۱۲٫۶
ابعاد (طول، قطر)	میلی‌متر	۷۵ ،۲۰۰	۶۵ ،۲۰۰	۶۵ ،۱۵۴	۱٫۵۳ ،۱۵۴

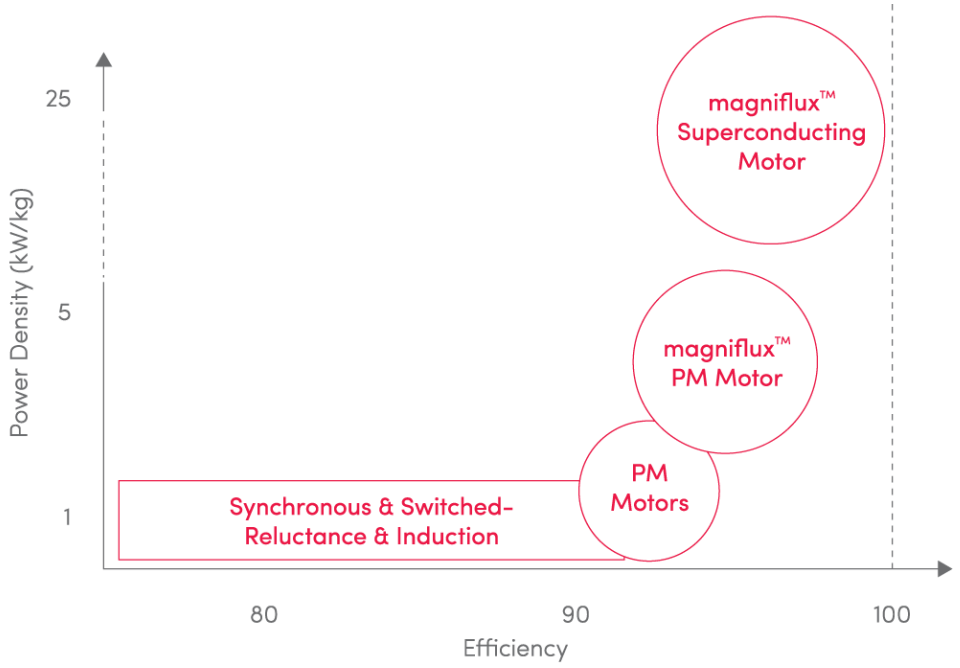
۱۲-۱-۳- شرکت Magniflux

شرکت مگنی‌فلاکس زیرمجموعه شرکت Heron Energy[2] است که در کوئینزلند استرالیا قرار دارد و موتور و ژنراتورهایی با چگالی انرژی بالا تولید می‌نماید. این شرکت از فناوری‌های ابررسانا و آهنربای دائمی در تولید موتورهای خود بهره می‌برد.

بنا به گفته این شرکت، موتورهای آن دارای چگالی توان بین $10\frac{KW}{Kg}$ تا $25\frac{KW}{Kg}$ هستند، درحالی‌که این مقدار در موتورهای متداول در حدود $2.5\frac{KW}{Kg}$ است. در شکل زیر مقایسه بازدهی و چگالی توان موتورهای این شرکت با انواع متداول آن را مشاهده می‌نمایید.

[1] http://www.jobymotors.com/public/views/pages/company.php

[2] http://www.heronenergy.com/



شکل ۲۲: مقایسه موتورهای Magniflux با انواع متداول آن

این شرکت توانسته با استفاده از فناوری magniflux، نیاز به استفاده از فلز در پشت روتور را بیش از ۴۰% کاهش داده و وزن روتور تا حد خیلی زیادی کاهش دهد.

بنا به تعریف این شرکت، فناوریmagniflux یعنی جایگذاری دقیق میدان مغناطیسی، به‌طوری‌که بنا به نیاز میدان مغناطیسی در بخش‌هایی قوی‌تر و یا ضعیف‌تر خواهد بود که باعث افزایش چگالی توان می‌شود. بارزترین مزایای فناوری magniflux عبارت‌اند از[1]:

- بازدهی بالا در بازه وسیعی از گشتاورها و سرعت‌ها
- بازدهی بالا (تا ۹۷%)
- چگالی توان بالا
- روتور سبک‌وزن
- استفاده از میدان مغناطیسی بیشتر برای تولید گشتاور

[1] https://www.magniflux.com/

❖ موتور Magni5

این موتور، به‌روزترین موتور این شرکت به‌حساب آمده که به شکل اختصاصی برای کاربردهایی با چگالی توان بالا ساخته‌شده است. چگالی انرژی این موتور $5\frac{KW}{Kg}$ است که برای استفاده در پرنده‌های الکتریکی بسیار مناسب است.

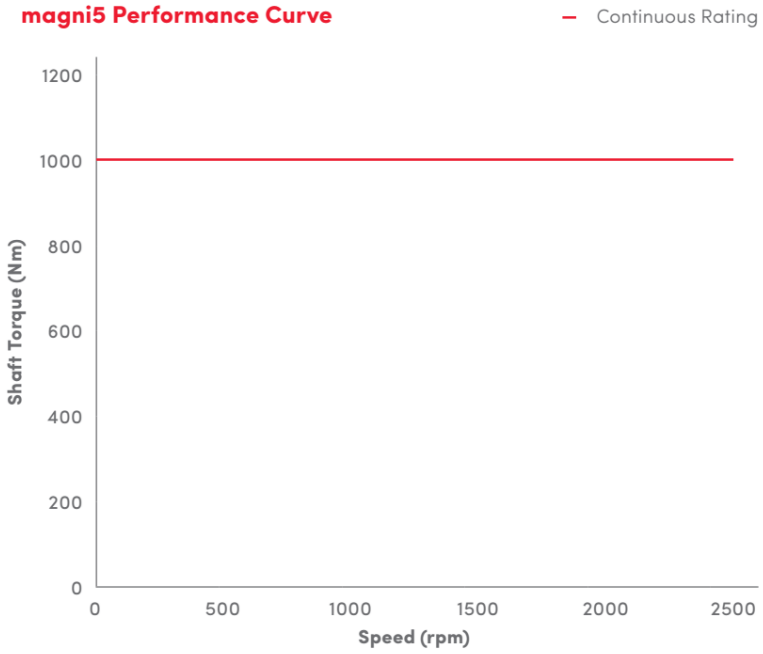
شکل ۲۳: موتور الکتریکی Magni5

بر اساس مشخصات فنی، این موتور می‌تواند توان پیوسته ۲۶۵ کیلووات را با سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه تولید نماید. مشخصات فنی موتورهای Magni5 به شرح زیر است:

جدول ۱۲-۱۰: مشخصات فنی موتور Magni5 [۱۱]

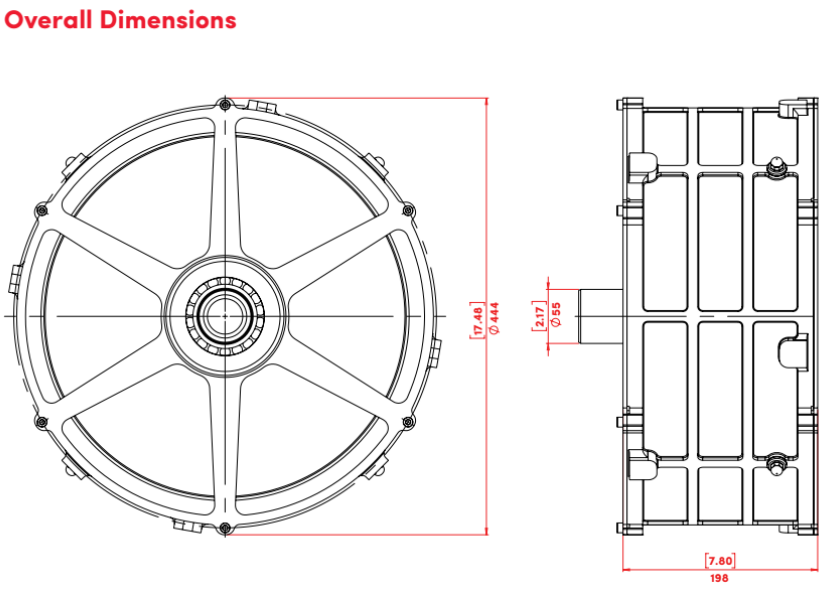
کمیت	مقدار
توان پیوسته	۲۶۵ کیلووات
وزن (خشک موتور)	۵۳ کیلوگرم
چگالی انرژی	۵ کیلووات بر کیلوگرم
سرعت بیشینه	۳۰۰۰ دور در دقیقه
سرعت اسمی	۲۵۰۰ دور در دقیقه
توان بیشینه	۳۰۰+ کیلووات
گشتاور پیوسته	۱۰۱۲ نیوتن متر
گشتاور بیشینه	۱۳۰۰ نیوتن متر
بیشینه بازدهی موتور	%۹۵
ولتاژ باتری / DC Bus (اسمی)	۶۰۰ ولت
ابعاد	طول = ۲۷۵ میلی‌متر، قطر = ۴۴۴ میلی‌متر

همچنین در شکل زیر نمودار عملکرد Magni5 (گشتاور به‌سرعت) قابل‌مشاهده است:



شکل ۲۴: نمودار عملکرد Magni5 (گشتاور به سرعت)[۱۱]

ابعاد و اندازه این موتور نیز به شرح زیر است:



شکل ۲۵: ابعاد و اندازه موتور Magni5 [۱۱]

۱۲-۱-۴- شرکت NT-power

این شرکت موتورهای براشلس خود را با توان خروجی ۱۲، ۱۵ و ۱۸ کیلووات و ولتاژ ۵۸ولت ارائه می‌نماید.

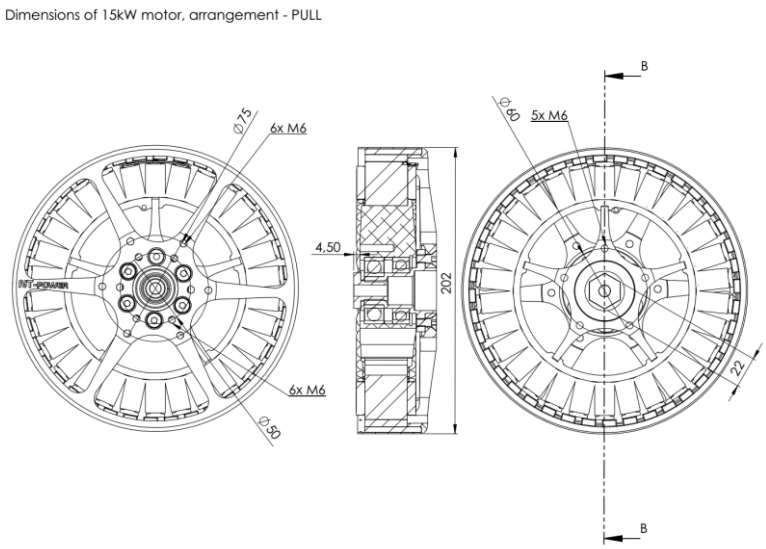
شکل ۲۶: موتور الکتریکی براشلس NT-Power

مشخصات فنی این موتورها بدین شرح است:

جدول ۱۲-۱۱: مشخصات فنی موتورهای شرکت NT-Power [۱۲]

کمیت	واحد	NT-Power 12kW	NT-Power 15kW
ولتاژ بیشینه	ولت	۸۰	۸۰
جریان بیشینه	آمپر	۲۵۰	۲۸۰
سرعت بیشینه	دور در دقیقه	۳۱۲۰	۲۸۵۰
نسبت سرعت به ولتاژ	دور در دقیقه بر ولت	۳۹٫۵	۳۸٫۵
بیشینه توان ورودی	کیلووات	۱۳٫۲	۱۶٫۵
بیشینه توان خروجی	کیلووات	۱۲	۱۵
بازدهی موتور	درصد	%۹۳	%۹۳
تعداد کویل‌ها	عدد	۳۰	۳۰
تعداد قطب‌ها	عدد	۴۰	۴۰
گشتاور بیشینه	نیوتن متر	۵۲	۶۱
وزن	کیلوگرم	۴٫۱	۵٫۴
چگالی توان	کیلووات بر کیلوگرم	۲٫۹	۲٫۸
ابعاد (طول، قطر)	میلی‌متر	۲۰۲، ۵۴	۲۰۲، ۵۶٫۵

این موتورها دارای حسگر دما و بازخورد حسگر هال[1] هستند.



شکل ۲۷: ابعاد موتور ۱۵ کیلووات شرکت NT-Power [۱۲]

۱۲-۱-۵- شرکت Rotex Electric

این شرکت که در جمهوری چک قرار دارد از سال ۲۰۰۳ درزمینه تولید و توسعه موتورهای جریان مستقیم براشلس[2] فعالیت دارد. موتورهای جریان مستقیم این شرکت به چهار سری REX، RET، REB و REG تقسیم می‌شوند. موتورهای این چهار سری عبارت‌اند از[3]:

- سری REX: REX 30، REX 50 و REX 90
- سری RET: RET 30 و RET 60
- سری REB: REB 20، REB 30، REB 50 و REB 90

❖ موتورهای سری REX

موتور REX 30 با وزن ۵٫۲ کیلوگرم می‌تواند برای مدت‌زمان کوتاه توان پیوسته ۱۵ تا ۱۸ کیلووات تولید نماید. همچنین موتور REX 50 نیز با وزن ۷٫۹ کیلوگرم می‌تواند برای مدت‌زمان کوتاه توان پیوسته ۲۰ تا ۲۵ کیلووات تولید نماید.

[1] Hall sensor Feedback
[2] BLDC Motors
[3] http://www.rotexelectric.eu/products/bldc-motors/rex-series/

۱۲-۲- مقایسه موتورهای معرفی‌شده

در این بخش مشخصات فنی موتورهای الکتریکی معرفی‌شده از شرکت‌های Siemens، Magniflux، Joby، NT-Power و Rotex Electric را با یکدیگر مقایسه می‌نماییم.

جدول ۱۲-۱۲: مقایسه موتورهای بررسی‌شده

نام موتور	توان پیوسته، توان بیشینه (کیلووات)	وزن (کیلوگرم)	چگالی انرژی (کیلووات بر کیلوگرم)	گشتاور پیوسته، گشتاور بیشینه (نیوتن متر)	بیشینه بازدهی	طول، قطر (میلی‌متر)
Siemens 65kW	۶۵، -	۱۳	۵	۷۰، -	%۹۵	-
Siemens ¼ MW	۲۳۰، ۲۶۱	۵۰	۵	۹۷۷، -	%۹۵	۳۰۰، ۴۱۵
Siemens 170kW	۱۷۰، -	۲۴٫۴	۷	۲۶۰، -	%۹۵	۱۵۰، ۳۰۸
Joby JM1S	۸٫۲، ۱۲٫۶	۱٫۸	۴٫۵	۱۳، ۲۰	-	۵۳٫۱، ۱۵۴
Joby JM1	۱۳٫۲، ۲۰٫۱	۲٫۷۵	۴٫۸	۲۱، ۳۲	-	۶۵، ۱۵۴
Joby JM2S	۱۰٫۵، ۱۵٫۷	۳٫۳۵	۳٫۱	۴۰، ۶۰	-	۶۵،۲۰۰
Joby JM2	۱۴، ۲۰٫۹	۴	۳٫۵	۵۳، ۸۰	-	۷۵،۲۰۰
NT-Power 12	۱۲، -	۴٫۱	-	۵۲، -	%۹۳	۵۴،۲۰۲
NT-Power 15	۱۵، -	۵٫۴	-	۶۱، -	%۹۳	۵۶٫۵،۲۰۲
Rotex REX 30	۱۵، ۲۰	۵٫۲	۲٫۹	-	-	-
Rotex REX 50	۲۰، ۲۸	۷٫۹	۲٫۶	-	-	-
Mangi5	۲۶۵، +۳۰۰	۵۳	۵	۱۰۱۲، ۱۳۰۰	%۹۵	۴۴۴،۲۷۵

۱۳- پیوست

۱۳-۱- شرکت‌های داخلی در زمینه موتور الکتریکی

در این بخش، تعدادی از شرکت‌های داخلی فعال در حوزه موتورهای الکتریکی آورده شده است. در وب‌سایت[1] مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته وابسته به پژوهشگاه نیرو ۴۵ شرکت در حوزه موتورهای الکتریکی معرفی شده‌اند که با بررسی اولیه رزومه شرکت‌ها و تمرکز بر موتورهای براشلس جریان مستقیم، ۸ شرکت زیر انتخاب شده‌اند. رزومه این شرکت‌ها در وب‌سایت مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته موجود است.

جدول ۱۳-۱: شرکت‌ها داخلی تولیدکننده موتور الکتریکی

ردیف	نام شرکت	آدرس وب‌سایت
۱	شرکت سرآمدان مدیریت علم و فناوری سلمانیان فارس	www.kasagroup-co.ir
۲	شرکت الکتروژن	www.electrogenco.com
۳	شرکت رشد صنعت نیرو	www.roshdsanatniroo.com
٤	شرکت رعد موتور کوشا	www.raadmotor.com
۵	شرکت دانش‌بنیان فناوران الکتروموتور آریا	www.electromototech.com
٦	شرکت نیان الکترونیک	www.nianelectronic.com
۷	شرکت مهندسی فن آورگستر صنعت الکترونیک ایرانیان	www.ieie-ir.com
۸	جهاد دانشگاهی خواجه نصیرالدین طوسی	www.jdnasir.ac.ir

[1] http://motor.nri.ac.ir/شرکت-موتور-کننده-داخلی

۱۳-۲- مشخصات پرنده‌های الکتریکی

در این بخش مشخصات فنی و عمومی ۳۳ پرنده الکتریکی آورده شده است [۱۴].

۱- Electraflyer Trike

- تعداد سرنشین: ۱	- کلاس: فوق سبک
- کشور: امریکا	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: Electric Aircraft Corporation	- وضعیت کنونی: در حال پرواز
- سال: ۲۰۰۷	- هزینه واحد: ۱۶۰۰۰ - ۲۱۰۰۰ دلار

۲- Electric Lazair

- تعداد سرنشین: ۱	- کلاس: فوق سبک
- کشور: کانادا	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: Ultraflight Aircraft Sales	- وضعیت کنونی: نمونه آزمایشی
- سال: ۲۰۱۱	- هزینه واحد: -

۳- MC30 Firefly

- تعداد سرنشین: ۱	- کلاس: فوق سبک
- کشور: -	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: Luxembourg Spécial Aerotechnics	- وضعیت کنونی: در حال پرواز
- سال: ۲۰۰۷	- هزینه واحد: -

٤- EADS Cri-Cri

- تعداد سرنشین: ۱	- کلاس: فوق سبک
- کشور: -	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: European consortium EADS	- وضعیت کنونی: در حال پرواز
- سال: ۲۰۱۰	- هزینه واحد: -

۵- E-Cristaline CriCri

- تعداد سرنشین: ۱	- کلاس: فوق سبک
- کشور: فرانسه	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: Electravia	- وضعیت کنونی:
- سال: ۲۰۱۰	- هزینه واحد: -

۶- Electraflyer C

- تعداد سرنشین: ۱	- کلاس: فوق سبک
- کشور: امریکا	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: Electric Aircraft Corporation	- وضعیت کنونی: نمونه اولیه
- سال: ۲۰۰۸	- هزینه واحد: -

۷- PC Aero- Electra One

- تعداد سرنشین: ۱	- کلاس: فوق سبک
- کشور: آلمان	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: PC-Aero	- وضعیت کنونی: در حال پرواز
- سال: ۲۰۱۱	- هزینه واحد: -

۸- Silent 2

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: موتور گلایدر
- کشور:	- منبع انرژی: باتری
- سازنده:	- وضعیت کنونی:
- سال:	- هزینه واحد:

۹- Yuneec E-spyder

- تعداد سرنشین: ۱	- کلاس: فوق سبک
- کشور: چین	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: Yuneec International	- وضعیت کنونی: -
- سال: ۲۰۰۹	- هزینه واحد: ۲۵۰۰۰ دلار

۱۰- Yuneec E430

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: فوق سبک
- کشور: چین	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: Yuneec International	- وضعیت کنونی: در حال توسعه
- سال: ۲۰۰۹	- هزینه واحد: ۹۰۰۰۰ دلار

۱۱- Yuneec Eviva

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: موتور گلایدر
- کشور: چین	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: Yuneec International	- وضعیت کنونی: در حال توسعه
- سال: ۲۰۱۲	- هزینه واحد: ۱۱۰۰۰۰ دلار

۱۲- Pipistrel Taurus

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: موتور گلایدر
- کشور: اسلوونی	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: Pipistrel	- وضعیت کنونی:
- سال:۲۰۰۷	- هزینه واحد:

۱۳- Pipistrel Alpha ElectroWattsUP

- تعداد سرنشین: -	- کلاس: فوق سبک
- کشور: اسلوونی	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: Pipistrel	- وضعیت کنونی: در حال توسعه
- سال: ۲۰۱۴	- قیمت: -

۱۴- Pipistrel Panthera Electro

- تعداد سرنشین: ۴	- کلاس: عمومی
- کشور: اسلوونی	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: Pipistrel	- وضعیت کنونی: در حال توسعه
- سال: ۲۰۱۴	- قیمت: ۴۷۰۰۰۰ دلار

۱۵- E-genius

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: موتور گلایدر
- کشور: آلمان	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: IFB-Stuttgart	- وضعیت کنونی: در حال توسعه
- سال: ۲۰۱۱	- هزینه واحد: -

۱۶- Bye Cessna 172

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: عمومی
- کشور:	- منبع انرژی: باتری
- سازنده:	- وضعیت کنونی:
- سال:	- هزینه واحد:

۱۷- Antares 20E

- تعداد سرنشین: -	- کلاس: موتور گلایدر
- کشور:	- منبع انرژی: باتری
- سازنده:	- وضعیت کنونی:
- سال:	- هزینه واحد:

۱۸- Sonex E-Flight

- تعداد سرنشین: ۱	- کلاس: عمومی
- کشور:	- منبع انرژی: باتری
- سازنده:	- وضعیت کنونی:
- سال:	- هزینه واحد:

۱۹- Pipistrel Taurus G4

- تعداد سرنشین: ۴	- کلاس: موتور گلایدر
- کشور: اسلوونی	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: Pipistrel	- وضعیت کنونی: در حال توسعه
- سال: ۲۰۱۱	- هزینه واحد: -

۲۰- Arcus E

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: موتور گلایدر
- کشور: آلمان	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: Schempp-Hirth	- وضعیت کنونی: -
- سال: ۲۰۰۹	- هزینه واحد: -

San JoséState University Designed Aircraft -۲۱

- تعداد سرنشین: ۴	- کلاس: عمومی
- کشور: آمریکا	- منبع انرژی: باتری
- سازنده: دانشگاه سن خوزه	- وضعیت کنونی: -
- سال:	- هزینه واحد: -

TriFan 600 -۲۲

- تعداد سرنشین: ۶	- کلاس: -
- کشور: امریکا	- منبع انرژی: -
- سازنده: XTI Aircraft	- وضعیت کنونی: در حال طراحی و توسعه
- سال: ۲۰۲۰	- هزینه واحد: -

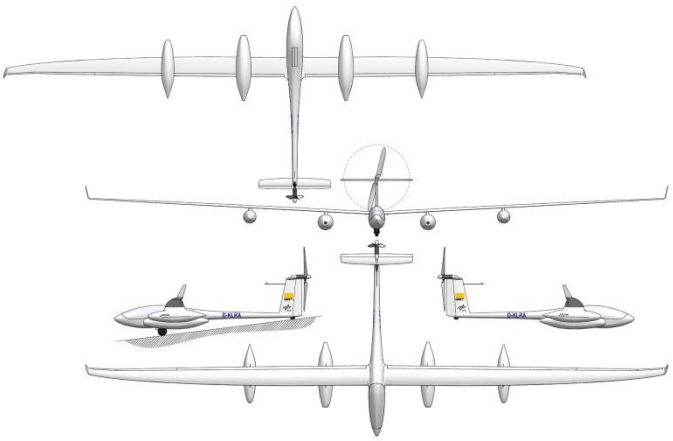
۲۳- Eco-Eagle ERAU(Stemme S10)

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: موتور گلایدر
- کشور: امریکا	- منبع انرژی: باتری و گاز
- سازنده: Embry-Riddle	- وضعیت کنونی: در حال توسعه
- سال: ۲۰۱۱	- هزینه واحد: -

۲۴- Diamond, Siemens & EADS (HK36 Dimona)

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: موتور گلایدر
- کشور: -	- منبع انرژی: باتری و گاز
- سازنده: Diamond, Siemens & EADS	- وضعیت کنونی: -
- سال: ۲۰۱۱	- هزینه واحد: -

۲۵- Antares H3



- تعداد سرنشین: -	- کلاس: موتور گلایدر
- کشور: آلمان	- منبع انرژی: سلول سوختی
- سازنده: DLR	- وضعیت کنونی: نمونه اولیه
- سال: ۲۰۱۱	- هزینه واحد: -

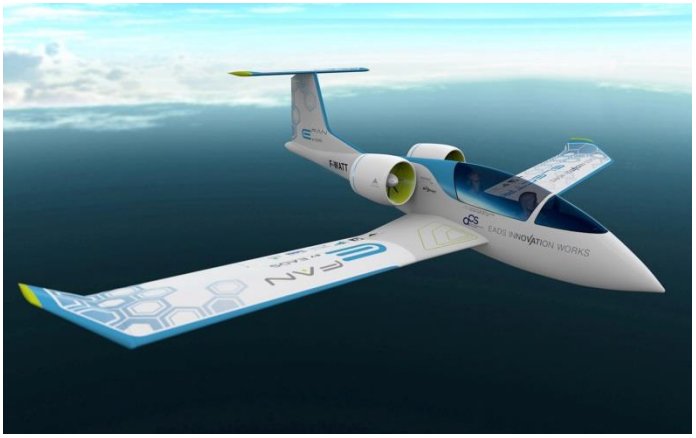
۲۶- Sky-Spark

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: عمومی
- کشور: اتحادیه اروپا	- منبع انرژی: سلول سوختی
- سازنده: DigiSky	- وضعیت کنونی: نمونه اولیه
- سال: ۲۰۰۹	- هزینه واحد: -

۲۷- Boeing´s Plane (Dimona)

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: موتور گلایدر
- کشور: امریکا	- منبع انرژی: سلول سوختی
- سازنده: بوئینگ	- وضعیت کنونی: -
- سال: ۲۰۰۸	- هزینه واحد: -

۲۸- E-Fan 2.0



- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: عمومی
- کشور: فرانسه	- منبع انرژی: سلول سوختی
- سازنده: ایرباس	- وضعیت کنونی: متوقف شده
- سال: ۲۰۱۷	- هزینه واحد: -

۲۹- Solar Impulse 2

- تعداد سرنشین: ۱	- کلاس: آزمایشی
- کشور: Switzerland	- منبع انرژی: خورشیدی
- سازنده: Solar Impulse	- وضعیت کنونی: در حال توسعه
- سال: ۲۰۱۱	- هزینه برنامه: ۱۷۰ میلیون دلار

۳۰- PC AeroElectra One Solar

- تعداد سرنشین: ۱	- کلاس: فوق سبک
- کشور: آلمان	- منبع انرژی: خورشیدی
- سازنده: PC-Aero	- وضعیت کنونی: -
- سال: ۲۰۱۱	- هزینه واحد: -

۳۱- PC AeroElectra Two Record

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: فوق سبک
- کشور: آلمان	- منبع انرژی: خورشیدی
- سازنده: PC-Aero	- وضعیت کنونی: -
- سال: -	- هزینه واحد: -

۳۲- PC Aero-Electra Two Standard 14 m wing span

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: فوق سبک
- کشور: آلمان	- منبع انرژی: خورشیدی
- سازنده: PC-Aero	- وضعیت کنونی: -
- سال: -	- هزینه واحد: -

۳۳- PC Aero-Electra Two Standard 17 m wing span

- تعداد سرنشین: ۲	- کلاس: فوق سبک
- کشور: آلمان	- منبع انرژی: خورشیدی
- سازنده: PC-Aero	- وضعیت کنونی: -
- سال: -	- هزینه واحد: -

جدول ۱۳-۲- مشخصات فنی پرنده‌های الکتریکی

ردیف	نام پرنده	دسته بندی	منبع انرژی	تعداد سرنشین	نوع	موتور							ملخ	باتری				وزن			بال			بدنه	سرعت			مداوم	برد
						توان	وزن	چگالی توان	تعداد	سرعت	ولتاژ	جریان	طول	ظرفیت	انرژی ویژه	وزن	نوع و نام	خالی	محموله	MTOW	پهنه	مساحت	نسبت منظری	طول	استال	کروز	بیشینه		
						کیلووات	کیلوگرم	کیلووات بر کیلوگرم	عدد	دور بر دقیقه	ولت	آمپر	متر	کیلووات ساعت	وات ساعت بر کیلوگرم	کیلوگرم		کیلوگرم			متر	مترمربع	-	متر	کیلومتر بر ساعت			ساعت	کیلومتر
۱	Electraflyer Trike	فوق سبک	باتری	۱	DC Brushless	۱۳	۱۱,۷	۱,۱۱	۱	۱۸۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۱,۳۵	۵,۶	۳۵	۱۶۰	–	۶۵	۷۰	۱۸۲	۱۰	۱۷-۱۶	–	–	۳۲,۴	۶۱,۲	–	۱,۵	۷۷
۲	Electric Lazair	فوق سبک	باتری	۱	Brushless	۱۰	۱۵,۹	۰,۶۳	۲	۴۵۰۰	-۳۰ ۷۰	۲۵۰	–	–	–	–	Zippy Li-Pob	–	۷۰	۱۷۰	۱۱	–	–	۴,۳	۳۶	۶۴,۸	–	۱,۳	–
۳	MC30 Firefly	فوق سبک	باتری	۱	–	۱۹	۵,۴	۳,۵۲	۱	–	–	–	–	۴,۷	۵۳	۸۹	Kokam	۴۴	۷۰	۱۸۳	۶,۸	۴,۶	۱۰,۳۵	–	–	۱۶۲	۲۱۹,۶	۴,۶	۸۰۰
۴	EADS Cri-Cri	فوق سبک	باتری	۱	Brushless	۱۱	۱۰	۱,۱۰	۴	–	۱۰۰	۵	–	–	۲۶,۱	–	Li-Po	۸۰	۷۰	۱۷۶	۴,۹	۳۳,۴	–	۳,۹	–	۱۸۳,۶	۲۲۶,۸	۰,۵	۴۶۳
۵	E-Cristaline CriCri	فوق سبک	باتری	۱	E-MOTOR GMPE	۲۵,۶	۱۰	۲,۵۶	۲	–	–	–	–	۳	۲۴	۱۲۵	Li-Po	۷۶	۷۰	۱۷۰	۴,۹	–	–	۳,۹	–	–	۲۵۹,۲	۱,۷	۴۶۲
۶	Electraflyer C	فوق سبک	باتری	۱	–	۱۳,۴۱	–	–	۱	۲۸۰۰	–	–	–	۵,۶	۳۵,۳	۱۵۹	Li-Po	۱۷۲	۷۰	۲۸۴	۱۰,۰۸	۱۴,۶	۱۸	۱۳,۴	–	۱۱۱,۶	۱۴۴	۱,۵	۱۶۹
۷	PC Aero-Electra One	فوق سبک	باتری	۱	HPD 13.5	۱۶	۴,۷	۳,۴۰	۱	–	–	–	–	۵,۸	۱۰۰	۵۸	Li-Ion	۱۰۰	۱۰۰	۳۰۰	۸,۶	۶,۴	۱۱,۶۵	–	–	۱۵۸,۴	–	۳	۴۰۰
۸	Silent 2	موتور گلایدر	باتری	۲	–	۲۲	۷	۳,۱۴	۱	۴۵۰۰	۱۱۶	–	۱	۴,۴	۳۳	۱۳۳	Li-Po	۱۳۸	۱۰۰	۳۰۰	۱۳,۵	۹	۲۰	۶,۳۴	۶۴,۸	–	۲۱۹,۶	–	–
۹	Yuneec E-spyder	فوق سبک	باتری	۱	–	۲۰	۷	۲,۸۶	۱	۲۲۰۰	۷۴	۷۰	۱,۶۵	۲,۴	۲۶	۹۲	Li-Po	۱۷۹	۷۰	۲۸۲	۱۰,۱۳	۱۴,۶	–	۵,۹۱	۴۶,۸	۶۱,۲	۱۰۸	۱	۶۰
۱۰	Yuneec E430	فوق سبک	باتری	۲	–	۴۰	۱۹	۲,۱۱	۱	–	۲۳۰	۷۰	۱,۶۵	–	۱۱۰	–	Li-Po	۲۰۷	۲۲۰	۴۷۶	۱۳,۸	۱۱,۴	–	۶,۹۸	۶۴,۸	۹۷,۲	۱۵۱,۲	۲	۲۲۵
۱۱	Yuneec Eviva	موتور گلایدر	باتری	۲	–	۴۰	۲۳	۱,۷۴	۱	–	–	–	۱,۶	–	۶۷	–	Li-Po	۲۲۵	۱۴۰	۴۵۵	۱۷	۱۴,۲	–	۷	۶۴,۸	۱۵۸,۴	۲۲۶,۸	۱,۳	۲۰۶
۱۲	Pipistrel Taurus	موتور گلایدر	باتری	۲	–	۴۰	۱۱	۳,۶۴	۱	–	–	–	–	۴	۴۲	۹۵	Li-Po	۲۵۳	۱۹۷	۴۵۰	۱۴,۹۷	۱۲,۳	۱۸,۶	۷,۲۷	–	۱۰۸	۱۴۷,۶	۰,۵	۲۰۰
۱۳	Pipistrel Alpha ElectroWattsUP	فوق سبک	باتری	–	Siemens AG	۸۵	۱۴	۶,۰۷	۱	۲۲۰۰	–	-۳۰ ۴۰	–	۱۷	۱۲۶	۱۳۵	–	۲۳۷	۱۷۳	۵۵۰	۱۰,۵	۹,۵۱	۱۱,۳	۶,۵	۶۸,۴	۱۵۴,۸	۲۴۸,۴	۱	۲۰۰
۱۴	Pipistrel Panthera Electro	عمومی	باتری	۴	–	۱۴۵	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۱۳۱۵	۱۰,۸۶	۱۱,۲	–	–	۱۰۸	–	۴۰۶,۸	–	۴۰۰

مشخصات فنی پرنده‌های الکتریکی (ادامه)

ردیف	نام پرنده	دسته بندی	منبع انرژی	تعداد سرنشین	نوع	موتور								ملخ	باتری				وزن			بال			بدنه	سرعت			مداومت	برد
						توان	وزن	چگالی توان	تعداد	سرعت	ولتاژ	جریان		طول	ظرفیت	انرژی ویژه	وزن	نوع و نام	خالی	محموله	MTOW	پهنه	مساحت	نسبت منظری	طول	استال	کروز	بیشینه		
						کیلووات	کیلوگرم	کیلووات بر کیلوگرم	عدد	دور بر دقیقه	ولت	آمپر		متر	کیلووات ساعت	وات ساعت بر کیلوگرم	کیلوگرم		کیلوگرم			متر	مترمربع	-	متر	کیلومتر بر ساعت			ساعت	کیلومتر
۱۵	E-genius	موتور گلایدر	باتری	۲	-	۵۹	۴۵	۱,۳۱	۱	-	-	-		-	۵۶	۲۷۲	۲۰۶	-	۴۸۵	۱۴۰	۹۳۸	۱۶,۸	۱۲,۳	۲۴	۸,۰۷	۸۲,۸	-	-	۲,۵	۳۲۲
۱۶	Bye Cessna 172	عمومی	باتری	۲	UQM 125	۱۲۵	۱۹	۶,۵۸	۱	-	-	-		-	-	۴۷	-	Li-Po	۵۴۳	۱۴۰	۶۷۹	۱۱	۱۶	۷,۵	۸,۳	۹۷,۲	۲۳۷,۶	۳۰۲,۴	۲	۱۷۷
۱۷	Antares 20E	موتور گلایدر	باتری	-	DC brushless	۴۲	۷۰	۰,۶۰	۱	۱۵۰۰	۲۱۲	-		-	-	۸۰	-	Li-Po	۴۴۱	-	۶۶۱	۲۰	۱۲,۶	۳۱,۷	۷۲	-	-	-	-	-
۱۸	Sonex E-Flight	عمومی	باتری	۱	DC Brushless	۵۴	۲۲,۶	۲,۳۹	۱	-	۲۲۰	۲۰۰		-	۱۴,۵	۹۰	۱۶۱	Li-Po	۴۱۸	۷۰	۶۰۰	۱۰,۸۷	۱۲	-	۶,۲	۷۹,۲	-	-	-	-
۱۹	Pipistrel Taurus G4	موتور گلایدر	باتری	۴	-	۱۵۰	۹۰	۱,۶۷	۱	۵۵۰۰	۳۲۵	-		۱	۹۰	۵۰۰	۱۸۰	-	۶۳۲	۲۸۰	۶۸۰	۲۱,۳۶	۱۲,۳۳	۱۸,۶	۷,۴	۸۲,۸	۱۸۳,۶	۲۱۶	۲,۷۵	۴۰۰
۲۰	Arcus E	موتور گلایدر	باتری	۲	DC Brushless	۴۲	-	-	۱	۱۵۰۰	-۱۹۰ ۲۸۸	۱۶۰		۲	-	-	-	Li-ion	-	۱۴۰	۸۱۲	۲۰	۱۵,۶	۲۵,۶	۸,۷۳	-	-	-	-	-
۲۱	San JoséState University Designed Aircraft	عمومی	باتری	۴	DC brushless	۱۶۰	-	-	-	-	-	-		۱,۵۸	۱۳۵	۵۰۴	۲۶۸	-	۱۱۶۶	۳۶۴	۱۷۵۰	۱۳	۱۷	۱۰	۸,۲	۱۱۱,۶	۱۹۸	۲۴۸,۴	۴	۸۰۰
۲۲	TriFan 600	-	-	۶	HTS900	۲۵۰	۱۵۳	۱,۶۳	-	-	-	-		۱,۸۳	-	-	-	-	-	۱۰۰۰	۲۴۹۴	۱۱,۶	-	-	۱۲	-	۶۲۶,۴	-	۴,۴	۲۷۷۹
۲۳	Stemme) S10)Eco-Eagle ERAU	موتور گلایدر	باتری و گاز	۲	Rotax 912 ULS lectric &	۲۹	-	-	۲	-	-	-		-	۱۵۰	۹۰	۱۶۶۷	Li-Po	۷۵۳	۱۴۰	۱۰۷۵	۲۲,۹	-	-	۸,۲۲	۸۲,۸	۱۵۸,۴	-	۲	۳۲۲
۲۴	Diamond, Siemens EADS & (HK36 (Dimona	موتور گلایدر	باتری و گاز	۲	-	۷۰	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۲۵	Antares H3	موتور گلایدر	سلول سوختی	۰	-	۳۶	-	-	۱	-	-	-		-	-	-	-	-	-	۲۰۰	۱۲۵۵	۲۳	-	-	۸,۷۳	-	۱۱۸,۸	۲۴۸,۴	۵۰	۵۹۹۸
۲۶	Sky-Spark	عمومی	سلول سوختی	۲	-	۶۴	۳۳	۱,۹۴	۱	-	-	-		-	۷,۵	-	-	-	-	۴۰۹	۵۳۰	۲۴,۷	۱۰	-	۶,۲۵	-	۲۴۸,۴	۲۹۵,۲	۲	۴۹۹
۲۷	Boeing´s Plane ((Dimona	موتور گلایدر	سلول سوختی	۲	Brushless DC	۴۸	-	-	۱	۸۰۰۰	-	-		-	-	-	-	Li-ion	-	-	۷۷۰	۱۶,۳	-	-	-	-	۹۷,۲	-	۰,۳۳	-

مشخصات فنی پرنده‌های الکتریکی (ادامه)

ردیف	نام پرنده	دسته بندی	منبع انرژی	تعداد سرنشین	نوع	موتور								ملخ	باتری				وزن			بال			بدنه	سرعت			مداومت	برد
						توان	وزن	چگالی توان	تعداد	سرعت	ولتاژ	جریان	طول	ظرفیت	انرژی ویژه	وزن	نوع و نام	خالی	محموله	MTOW	پهنه	مساحت	نسبت منظری	طول	استال	کروز	بیشینه		
						کیلووات	کیلوگرم	کیلووات بر کیلوگرم	عدد	دور بر دقیقه	ولت	آمپر	متر	کیلووات ساعت	وات ساعت بر کیلوگرم	کیلوگرم		کیلوگرم			متر	مترمربع	-	متر	کیلومتر بر ساعت			ساعت	کیلومتر
۲۸	E-Fan 2.0	عمومی	سلول سوختی	۲	-	۳۰	-	-	۲	-	-	-	-	۲۹	۱۶۷	۱۷۴	Li-ion	۲۹۳	۱۴۰	۶۰۰	۱۱	-	-	۵,۶۷	-	۲۷۷,۲	-	۱,۱	۳۰۴
۲۹	Solar Impulse 2	-	خورشیدی	۱	-	۵۲	-	-	۴	۵۲۵	۳۰۰	-	۴	۱۵۴	۶۳۳	۲۴۳	Kokam Li-Po	۸۹۴	۷۰	۲۳۰۰	۷۲	-	-	-	-	۶۸,۴	۷۵,۶	۱۱۷	۸۰۹۵
۳۰	PC AeroElectra One Solar	فوق سبک	خورشیدی	۱	HPD 13.5	۱۶	۴,۷	۳,۴۰	۱	-	-	-	-	۵,۸	۱۰۰	۵۸	Li-ion	۱۰۰	۱۰۰	۳۰۰	۱۱	۸,۲	۱۴,۷	-	-	۱۳۶,۸	-	۸	۱۰۰۰
۳۱	PC AeroElectra Two Record	فوق سبک	خورشیدی	-	-	۱۶	-	-	-	-	-	-	-	-	۸۰	-	-	۱۴۰	۱۵۰	۳۵۰	۱۷	۱۹	۱۵	-	-	۷۹,۲	-	۲۰	۲۰۰۰
۳۲	PC Aero-Electra Two Standard 14 m wing span	فوق سبک	خورشیدی	-	-	۴۰	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۰۰	-	-	۲۰۰	۱۸۰	۳۵۰	۱۴	۱۵	۱۳	-	-	۱۳۶,۸	-	۵	۵۰۰
۳۳	PC Aero-Electra Two Standard 17 m wing span	فوق سبک	خورشیدی	-	-	۴۰	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۰۰	-	-	۲۰۰	۱۸۰	۳۵۰	۱۷	۱۹	۱۵	-	-	۱۱۸,۸	-	۸	۷۰۰

۱۴- فهرست منابع

[1] Carrier Form 41 reports, IATA, airfinancejournal.com, TeamSai, Aerostrategy; BCG

[2] Series Hybrid Electric Aircraft Comparing the Well-to-Propeller Efficiency With a Conventional Propeller Aircraft, R.H. Lenssen.

[3] Roland Berger, Think:Act, Aircraft Electrical Propulsion, September 2017

[4] Abbas Fotouhi, Daniel J. Auger, Karsten Propp, Stefano Longo, and Mark Wild. A review on electric vehicle battery modeling: From lithium-ion toward lithium–sulphur. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56:1008 – 1021, 2016.

[5] Philipp Adelhelm, Pascal Hartmann, Conrad L. Bender, Martin Busche, Christine Eufinger, and Juergen Janek. From lithium to sodium: cell chemistry of room temperature sodium–air and sodium–sulfur batteries. Beilstein Journal of Nanotechnology, 6:1016–1055, 2015.

[6] Panasonic. Lithium ion nrc18650b. http://industrial.panasonic.com/cdbs/www data/pdf2/ACA4000/ACA4000CE240.pdf, 2012. Visited on 14-12-2015.

[7] e-flight-Journal01-2017

[8] Electric Motor & Power Source Selection for Small Aircraft Propulsion, Jeremy Fehrenbacher, etal.

[9] Transformative Vertical Flight Workshop – Electric propulsion components with high power densities for aviation, 2015

[10] http://www.jobymotors.com/public/views/pages/products.php

[11] MagniX-magni5 DataSheet, Version 1.0, May 2017

[12] NT-Power motor’s datasheets (12Kw, 15Kw)

[13] Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research : Reducing Global Carbon Emissions, National Academies Press, 2016

[14] Advances, Challenges and Future of All-Electric Aircraft, José A. Posada, 7TH EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES (EUCASS), 2015