مقاله

امکان‌سنجی استفاده از موتورهای الکتریکی در سامانهٔ پیشرانش پهپادهای سبک

کامران خرم‌دل*
دانشجوی کارشناسی ارشد
دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوافضا
kamrankh2011@yahoo.com

مصطفی محمودی
استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر
مجتمع دانشگاهی هوافضا
mostafamahmoodi@engineer.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۲۲

چکیده

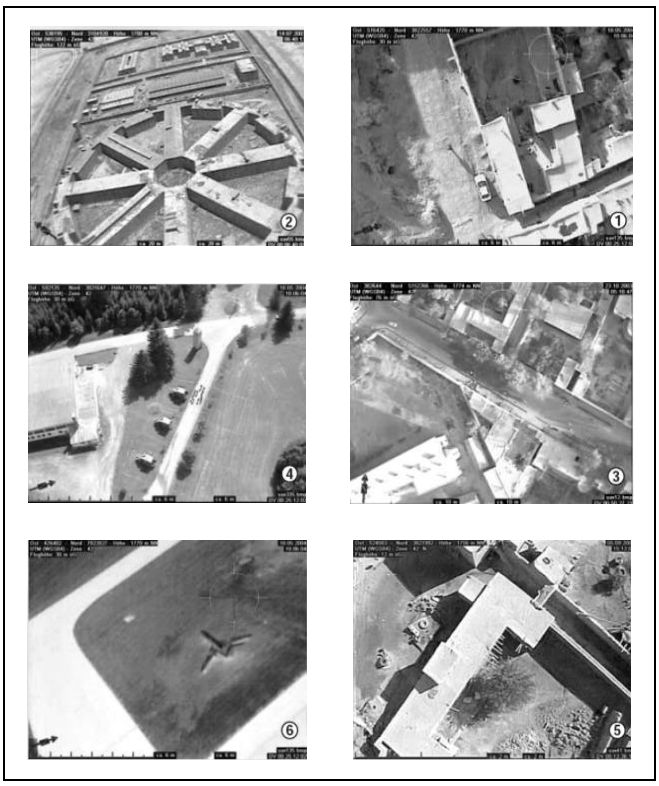
در این مقاله پهپادهای سبک با پیشران موتور الکتریکی بررسی شده است. برای این منظور، موتورهای رایج در این نوع پهپادها، به‌همراه مشخصات فنی آنها از منابع معتبر استخراج و پارامترهای مهم مربوط به انتخاب و استفاده از این نوع موتورها به تفصیل بررسی شده است. به‌علت ویژگی‌های خوب موتورهای الکتریکی از نوع بدون جاروبک، مقاله بیشتر روی این دسته از موتورها متمرکز شده و در نهایت روش‌هایی برای انتخاب موتور الکتریکی، باتری و ملخ مناسب برای یک پهپاد با وزن و سناریوی پروازی مشخص، ارائه شده است. به‌طور خلاصه برای هر کیلوگرم پرندهٔ بدون سرنشین، به‌طور متوسط ۲۵۰ وات قدرت موتور الکتریکی نیاز است که با توجه به سناریوی پروازی، این توان مورد نیاز تغییر خواهد کرد. این معیارها تقریب خوبی برای شروع فاز طراحی مفهومی و انتخاب موتور است که در نهایت در فاز طراحی جزئیات، محاسبات دقیق برای انتخاب موتور انجام می‌شود.

واژگان کلیدی: پهپاد، سیستم پیشرانش، موتور الکتریکی، موتور بدون جاروبک، محموله

۱. مقدمه

بنابر تعریف، به پرندهٔ هدایت‌پذیر از راه دور پهپاد گفته می‌شود [۱]. کنترل پهپاد بدون استفاده از انسان و به‌کمک تجهیزات هدایت و ناوبری درون آن صورت می‌گیرد؛ اگرچه انسان نیز می‌تواند به‌عنوان محموله در آن قرار بگیرد. هواپیماهای بدون سرنشین از قرن بیستم و از زمان جنگ ویتنام در دههٔ پنجاه میلادی به‌کار گرفته شده‌اند. این هواپیماها در مناطق گوناگون مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به جنگ ویتنام، جنگ‌های خلیج فارس و بالکان در دههٔ نود میلادی، جنگ‌های عراق، افغانستان، پاکستان، جیبوتی و سومالی در دهه‌های اخیر و توسط ایالات متحدهٔ امریکا اشاره کرد. اما به‌طور مشخص، بیشترین حجم پروازهای هواپیماهای بدون سرنشین در پاکستان و از سال ۲۰۰۴ م آغاز شده و هر سال نیز روبه افزایش است [۲]. بیشترین سرمایه‌گذاری در جهان نیز

درخصوص ساخت و تجهیز پهپاد، توسط وزارت دفاع ایالات متحدهٔ امریکا انجام شده است، به‌طوری‌که بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۵ م در حدود سه میلیارد دلار برای طراحی، ساخت و تجهیز پهپادها هزینه کرده است. هواپیماهای بدون سرنشین مزایای بسیاری نسبت به هواپیماهای عملیاتی سرنشین‌دار دارند. به‌دلیل ابعاد کوچک‌تر نسبت به هواپیماهای معمولی، طبیعتاً هزینهٔ ساخت آنها بسیار پایین‌تر است، امکان مداومت پروازی طولانی‌تری دارند، رادارهای دشمن نمی‌توانند آنها را ردیابی کنند و حتی درصورت ردیابی، انهدام آنها کار بسیار مشکلی است. علاوه بر مزایای یادشده، امنیت اطلاعاتی آنها در برابر هواپیماهای جنگی سرنشین‌دار نیز بالاست. مثلاً اگر در جنگی هواپیمای سرنشین‌دار مورد اصابت قرار بگیرد، علاوه بر ضررهای مالی، احتمال اسارت خلبان نیز وجود دارد و در این‌صورت مسئلهٔ امنیت اطلاعات کسب‌شده نیز وجود خواهد داشت. اساساً یکی از اهداف ساخت این پرنده‌های کوچک و تیزپرواز، کاهش میزان تلفات انسانی است. مزایای بسیار دیگری نیز همچون قابلیت مانور بیشتر، نبود فشارهای فیزیولوژیکی بر اثر ارتفاع یا شتاب G به خلبان را نیز می‌توان به موارد یادشده افزود. در شکل ۱ تصاویر ضبط‌شده توسط یک پهپاد جاسوسی از یک منطقهٔ نظامی نمایش داده شده است.



شکل ۱. تصاویر ضبط‌شده توسط یک پهپاد جاسوسی

طراحی این نوع پرنده‌ها به‌گونه‌ای است که از نیروهای آیرودینامیکی برای پرواز در مسیر دلخواه استفاده می‌کنند. سیستم هدایت آنها توسط کنترل از راه دور یا با برنامه‌های پیش‌پروازی از قبل و یا با سامانه‌های خودکار دینامیکی انجام می‌شود. به‌طور کلی مأموریت پهپادها به‌صورت نظامی، شامل جاسوسی و حمله به اهداف نظامی و همچنین غیرنظامی مانند خاموش‌کردن آتش، کنترل پلیس در ناآرامی‌ها، صحنه‌های جرم و شناسایی بیشتر حوادث غیرمترقبهٔ طبیعی می‌باشد. قسمت‌های اصلی یک پهپاد شامل بدنه، موتور، محموله[1] و سیستم‌های هدایت می‌باشد.

منظور از محموله، در واقع قطعهٔ اضافی است که همراه پرنده برای انجام مأموریت خاصی فرستاده می‌شود که در پهپادهای شناسایی، دوربین فیلم‌برداری و عکاسی، در پهپادهای هدف، بازتابنده[۲] و در پهپادهای تهاجمی و انتحاری، مهمات می‌باشد. بدنهٔ پهپاد باید به‌گونه‌ای طراحی شود که بتواند سامانه‌های ارتباطی، جنگ‌افزارها، محموله و کلیهٔ لوازم مرتبط با آن را در خود جای دهد و با شرایط جوی منطقهٔ مأموریت سازگار باشد. بهترین عوامل برای طراحی یک بدنهٔ پهپاد، سرعت، مدت پرواز و قابلیت اطمینان بالای آن می‌باشد. پهپادها به‌لحاظ نوع پیشران به پهپادهای الکتریکی، پهپادهای با موتور ملخی و پهپادهای با موتور جت تقسیم می‌شوند که در این میان، پهپادهای نوع اول سبک‌تر و پهپادهای نوع سوم معمولاً سنگین‌تر هستند [۳].

به‌کارگیری پهپادهای سبک در صنایع نظامی نظیر شناسایی و تجسس در مناطق جنگی، پوشش نیروها و مرزها و همچنین در صنایع غیرنظامی نظیر عکسبرداری از اراضی کشاورزی و یا کنترل ترافیک شهری و بسیاری از کاربردهای دیگر، سبب رونق این نوع از پهپادها شده است. امروزه پهپادهایی با پیشران موتور الکتریکی، به‌علت ویژگی‌های منحصر به‌فرد آنها نسبت به سایر نمونه‌ها نظیر هزینهٔ کم، بی‌صدا بودن، دید راداری بسیار کم (به‌جهت کوچک‌بودن ابعاد)، عملکرد آسان، قابلیت دست‌پرتاب بودن، قابلیت مونتاژ در عرض چند دقیقه، وزن کم، هدایت خودکار، قابلیت حمل توسط نفر، برگشت به خانه و فرود خودکار در زمان از دست دادن ارتباط و بسیاری ویژگی‌های دیگر آن مورد توجه قرار گرفته است [۴]. با این‌حال پهپادهای سوختی (پیشران ملخی یا جت) و الکتریکی، هرکدام علاقه‌مندان خاص خودشان را دارند. علاقه‌مندان هر کدام از این پهپادها نیز دلائل خودشان را برای پرداختن به آنها مطرح می‌کنند. امروزه به تعداد کسانی که تمایل به استفاده از پهپادهای الکتریکی دارند، افزوده شده است. موتورهای الکتریکی فاقد تعداد زیاد قطعات متحرک مانند میل‌لنگ، پیستون و غیره هستند. در این موتورها نیازی به تنظیم سوخت نیست. یک موتور الکتریکی در مقایسه با یک موتور سوختی معادلش، بازدهی حدود دو برابر دارد [۵]. این بدان معناست که موتورهای الکتریکی در تبدیل نیروی الکتریسیته به نیروی محرکه بسیار بهتر از موتورهای سوختی در تبدیل سوخت به نیروی محرکه عمل می‌کنند. آب‌وهوای سرد و یا مرطوب، تأثیری بر کار موتور الکتریکی ندارد اما موتورهای سوختی برای کار در چنین آب‌وهوایی می‌بایست تنظیم شوند. موتورهای الکتریکی در مقایسه با موتورهای سوختی بسیار قابل اعتمادتر هستند. یک موتور الکتریکی بسیار مقاوم است و به‌ندرت ممکن است که از کار بیافتد؛ اما موتورهای سوختی به‌علت تعداد زیاد قطعاتی که برای کار انداختن آنها لازم است، ممکن است که به دفعات دچار مشکل شوند. شکل ۲ قابلیت حمل پهپاد الکتریکی و تمام متعلقات آن با استفاده از یک کوله‌پشتی توسط نفر را نمایش می‌دهد.

شکل ۲. قابلیت حمل پهپاد و تمام متعلقات آن توسط نفر

در هنگام انجام مأموریت نیز موتورهای الکتریکی فاقد هرگونه تنظیمات پیش از پرواز هستند. با اتصال باتری، هواپیما آمادهٔ پرواز خواهد بود، اما در موتورهای سوختی مقداری تجربه لازم است تا دور موتور در حالت درجا و برای حالت پرواز تنظیم شود. هواپیمای الکتریکی را به‌راحتی می‌توان شارژ کرد، اما برای هواپیمای سوختی

می‌بایست سوخت با نسبت مناسب برای موتور با روغن مخلوط شود تا بتوان آن را برای پرواز آماده نمود [۶]. شکل ۳ نمونه‌ای از باتری‌های مورد استفاده در پهپادهای الکتریکی را نمایش می‌دهد.

شکل ۳. نمونه‌ای از باتری مورد استفاده در پهپادها

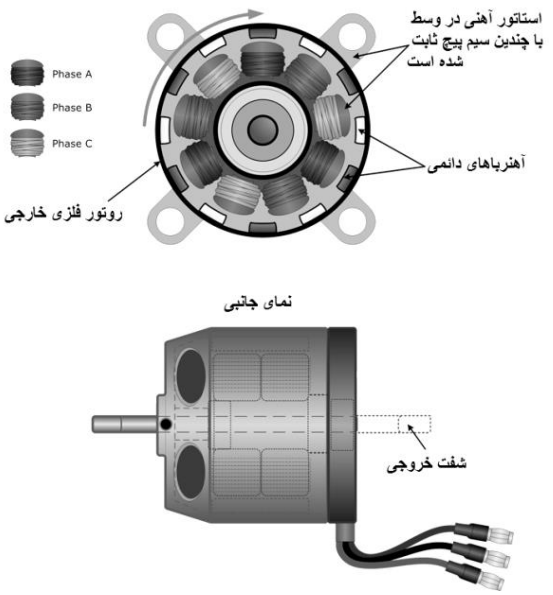
۲. موتور الکتریکی مورد استفاده در پهپاد

موتور الکتریکی نوعی ماشین الکتریکی است که جریان الکتریسیته را به حرکت مکانیکی تبدیل می‌کند. اغلب موتورهای الکتریکی حرکت مکانیکی را به‌صورت حرکت دورانی ایجاد می‌نمایند. اساس عملکرد موتورهای الکتریکی نیروی وارده به سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی می‌باشد که از این نیرو برای دوران محور موتور به‌دور خود استفاده می‌کند. موتورهای الکتریکی انواع گوناگونی دارند و براساس نحوهٔ حرکت، نوع جریان مورد نیاز و نوع سیم‌پیچ‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. انتخاب موتور برای یک سیستم به عواملی چون هزینه، مقدار توان مورد نیاز، عمر و وزن آن بستگی دارد. از جمله انواع موتورهای الکتریکی، موتور دی‌سی بدون جاروبک[۳] است که به‌علت ویژگی‌های خوب آن نظیر نسبت توان به وزن بالا، گستردگی و تنوع مدل و توان، قابلیت اطمینان بالا، بازده بالا، عمر بالای آنها نسبت به گونه‌های دیگر و رایج‌بودن آن، بیشتر در پهپادها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. در این نوع موتورها، چون برس وجود ندارد، فرایند رایج خوردگی موتورهای الکتریکی نیز وجود ندارد و لذا نیازی به نگرانی برای تمیزکردن برس‌ها و محل اتصال نیست. اصطکاک برس برای گرفتن سرعت موتور وجود ندارد و مدت زمان کارکرد موتور با یک باتری در این موتورها بالاتر است. این موتورها چنانچه در شرایط مناسب به‌کار گرفته شوند، عمری بالای ده هزار ساعت خواهند داشت. نسبت قدرت به وزن مطلوب آنها و محدودهٔ بزرگ اندازه‌های در دسترس، از ۵ گرم تا موتورهای صدها واتی، انقلابی در تجارت پهپادهای الکتریکی ایجاد کرده و همچنین سبب رشد پهپادهای ساده و کم‌وزن به‌جای نمونه‌های بزرگ با موتورهای احتراقی شده است. نسبت توان به وزن بزرگ، باتری‌های مدرن و موتورهای بدون جاروبک، به پهپادهای الکتریکی اجازه می‌دهند تا به‌جای صعود تدریجی، به‌صورت عمودی بالا روند. صدای پایین و کاهش وزن در مقایسه با موتورهای احتراقی کوچک، دلیل دیگری برای محبوبیت این موتورهاست. شکل ۴ نمونه‌ای از یک موتور الکتریکی نوع بدون جاروبک مورد استفاده در پهپادهای الکتریکی را نمایش می‌دهد.

شکل ٤. نمونه‌ای از یک موتور الکتریکی بدون جاروبک

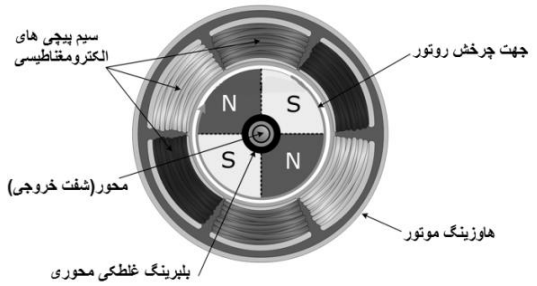
موتورهای الکتریکی بدون جاروبک با همان اصل مورد استفاده در موتورهای الکتریکی معمولی کار می‌کنند، با این تفاوت که در این نوع موتورها سیم‌پیچ ثابت است و آهنرباها می‌چرخد. چون در این موتورها سیم‌پیچ ساکن است، نیازی به برس وجود ندارد. کنترل‌کنندهٔ سرعت موتور[۴]، ولتاژ بین سیم‌پیچ‌ها را تقسیم می‌کند. البته به این نکته باید دقت کرد که نمی‌توان از کنترل‌کنندهٔ سرعت موتورهای معمولی و موتورهای بدون جاروبک به‌جای یکدیگر استفاده کرد؛ زیرا این دو کاملاً متفاوت‌اند [۸]. دو

نوع موتور بدون جاروبک محرک درونی[5] و محرک بیرونی[6] برای پهپادهای الکتریکی وجود دارد. در نوع محرک درونی، آهنرباهای دائمی در قسمت داخلی سیم‌پیچ‌ها قرار داده شده‌اند که این موتورها، ساختمانی بسیار شبیه به موتورهای معمولی دارند با این تفاوت که جای آهنربای دائمی و سیم‌پیچ‌ها عوض شده است. در نوع محرک بیرونی، آهنرباهای دائمی در قسمت بیرونی قرار گرفته است. هر موتور دی‌سی بدون جاروبک دارای دو جزء اولیه می‌باشد. روتور قسمت چرخشی و استاتور قسمت ثابت آن می‌باشد. اجزای مهم دیگر موتور، سیم‌پیچ استاتور و آهنربای استاتور است. شکل‌های ۵ و ۶ دیاگرام موتور بدون جاروبک نوع محرک بیرونی و محرک درونی را نمایش می‌دهند.



شکل ۵. دیاگرام ساختمان موتور بدون جاروبک محرک بیرونی

موتورهای محرک بیرونی بسیار کندتر از موتورهای محرک درونی می‌چرخند و گشتاور بسیار بیشتری ایجاد می‌کنند. بزرگترین مزیت این دسته از موتورها این است که در واقع نیازی به جعبه‌دنده ندارند؛ این موضوع سبب می‌شود که پهپاد، سروصدای بسیار کمتری ایجاد کند و تقریباً بی‌صدا باشد؛ از طرفی، موتورهای محرک بیرونی را بسیار راحت‌تر می‌توان در پهپاد نصب کرد. نکتهٔ منفی در مورد این موتورها این است که دست طراحان در انتخاب ملخ‌های گوناگون برای پرنده باز نیست و طراحان مجبورند در طراحی موتور و ملخ مناسب دقت بیشتری داشته باشند. در موتورهای محرک درونی، با تغییر اندازهٔ چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده می‌توان یک موتور را برای اندازه‌های گوناگون ملخ به‌کار برد. همچنین بازده موتورهای محرک بیرونی در مقایسه با محرک درونی پایین‌تر است؛ اما این مسئله مشکل بزرگی نخواهد بود.



شکل ۶. دیاگرام ساختمان موتور بدون جاروبک محرک درونی

۳. روابط حاکم بر محاسبات موتورهای الکتریکی

براساس روابط حاکم بر موتورهای الکتریکی، برای محاسبهٔ دور یک موتور، می‌بایست ولتاژ تغذیه‌شده در ۹۰ درصد (۰/۹) ثابت ولتاژ ضرب شود [۹]:

$$n = v \times (kv) \times 0.9 \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه، n دور موتور برحسب دور بر دقیقه، v ولتاژ تغذیهٔ موتور برحسب ولت و kv ثابت ولتاژ موتور (تعداد دوری که موتور به ازای هر ولت می‌زند) می‌باشد. ولتاژ تأمین‌شده از باتری‌های لیتیوم پلیمری به ازای هر سل، ۳/۷ ولت در نظر گرفته می‌شود. با ثابت‌بودن توان موتور، تنها راه افزایش قدرت خروجی در پهپادها استفاده از ملخ بزرگ‌تر است. این امر سبب افزایش بار بیشتر روی موتور می‌شود. استفاده از ملخ بزرگ‌تر، چه از نظر قطر و چه از نظر گام، دو محدودیت اساسی دارد: اول اینکه روی یک پرنده تا حد مشخصی می‌توان از ملخ بزرگ‌تر استفاده کرد و دوم اینکه افزایش اندازهٔ ملخ موجب افزایش جریان مورد نیاز موتور می‌شود و ممکن است این

افزایش جریان بیشتر از میزانی باشد که موتور می‌تواند تحمل کند؛ بنابراین باید رابطه‌ای میان اندازهٔ قطر ملخ و مقدار جریان ورودی به موتور به‌دست آورد.

نیروی تراست به سه عامل قطر ملخ، گام ملخ و دور موتور بستگی دارد. همچنین نیروی تراست در واقع قدرت خروجی (برحسب وات) برای پرواز پهپاد است؛ بنابراین می‌توان بیان کرد [۱۰]:

$$F = D^2 \times pi \times n \qquad (۲)$$

$$P = V \times I \qquad (۳)$$

به‌طوری‌که در این روابط F نیروی تراست، D قطر ملخ، pi گام ملخ، P توان موتور برحسب وات و نهایتاً I جریان موتور برحسب آمپر است.

٤. معادلات مستخرج از مطالعات آماری

با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از پهپادهای سبک الکتریکی، مجموعه‌ای از نتایج آماری به‌دست آمده است که می‌تواند در محاسبات اولیه راه‌گشا باشد. اطلاعات پهپادهای سبک در جدول ۱ ذکر شده است.

با بررسی تک‌تک پارامترهای مهم این پهپادها نسبت به‌هم و ایجاد نمودارهای مربوطه نتایج جالبی حاصل می‌شود. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که در برخی موارد، نمودارهای ترسیم‌شده شیب تقریباً یکنواختی دارند و این بدان معناست که پارامترهای این جداول دارای ارتباط قانونمندی نسبت به‌هم می‌باشند.

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، چنانچه پهپادها به نسبت قابلیت وزن شروع به پرواز (W_{to}) مرتب شوند، مشاهده می‌شود که فاصلهٔ بین دو بال (L_w) آنها با یک شیب تقریباً یکنواخت در حال افزایش است. شیب حاصله یک معادلهٔ درجه اول است که به‌صورت رابطهٔ ۴ بیان می‌شود:

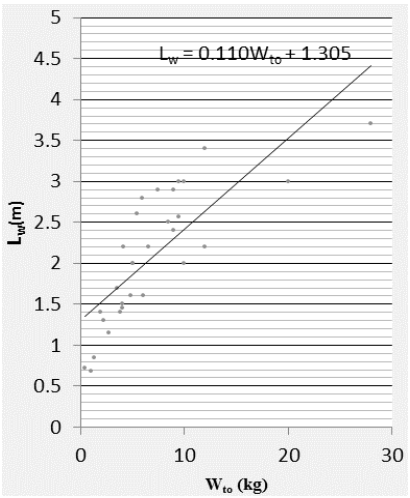
$$L_w = 0.110 W_{to} + 1.305 \qquad (۴)$$

همان‌طور که مشخص است، چنانچه پهپادها به نسبت وزن شروع به پروازشان بررسی شوند، مشاهده می‌شود که نسبت وزن محموله در برد ($W_{pl} \times r$) آنها همانند شکل ۸ و با یک شیب تقریباً یکنواخت در حال افزایش است. شیب حاصل، که یک معادلهٔ درجه اول می‌باشد، در معادلهٔ ۵ ذکر شده است:

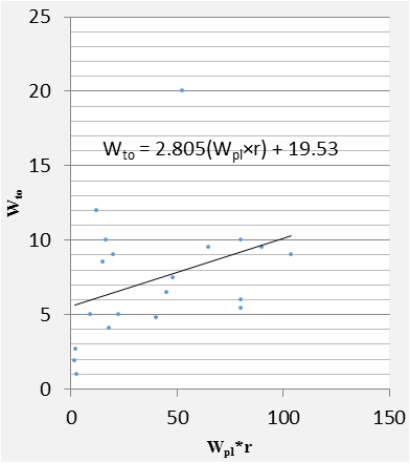
$$W_{to} = 2.805(W_{pl} \times r) + 19.53 \qquad (۵)$$

چنانچه پهپادها نسبت به قابلیت وزن شروع به پروازشان بررسی شوند، مشاهده می‌شود که بیشینهٔ سرعت آنها همانند شکل ۹ با شیب یکنواختی در حال افزایش است. شیب حاصل، که یک معادلهٔ درجه اول می‌باشد، در معادلهٔ ۶ ذکر شده است.

$$V_{\max} = 2.511 W_{to} + 75.6 \qquad (۶)$$



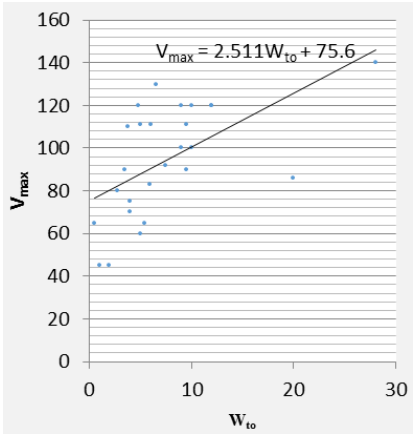
شکل ۷. نمودار فاصلهٔ بین دو بال نسبت به وزن شروع به پرواز



شکل ۸ نمودار وزن محموله در برد پهپاد نسبت به وزن شروع به پرواز

جدول ۱. پهپادهای سبک الکتریکی

نام پهپاد	فاصلهٔ بین دوبال (متر)	وزن عملیاتی (کیلوگرم)	وزن شروع پرواز (کیلوگرم)	وزن محموله (کیلوگرم)
Wasp III	۰/۷۲	۰/۴۳	۰/۴۵	–
TOWhawk	۰/۶۸	۱	۱	۰/۲۷
Ravan	۱/۴	۱/۹	۱/۹	۰/۱۸
XD-40_Wraith	۱/۳	۲/۲	۲/۲	
DRAGON EYE	۱/۱۵	۲/۷	۲/۷	۰/۲۲۵
ALADIN	۱/۴۶	۳/۲	۴	–
Cabure	۱/۷	۳/۵	۳/۵	–
BLACKSTAR	۱/۵	۴	۴	–
ZALA 421-04M	۱/۶	۴/۳	۴/۸	۱
Bayraktar	۲	۵	۵	۱/۵
Skyblade III	۲/۶	۵/۴	۵/۴	۱
Puma AE	۲/۸	۵/۹	۵،۹	–
MICRO FALCON LP	۱/۶	۶	۶	۲
AZIMUT2	۹/۲	۶/۵	۹	۲
Skylark ILE	۲/۹	۶/۵	۷/۵	۱/۲
Spylite	۲/۴	۹	۹	۱/۳
Biodrone	۳/۴	۸/۵	۱۲	۱/۲
Stingray	۳	۹/۵	۹/۵	۲
Strix	۳	۸/۶۵	۲۰	۱/۵
BOOMERANG	۲/۵۷	۹/۵	۹/۵	۱/۳
CARD CH	۳	۱۰	۱۰	۱/۱
MICRO FALCON LE	۲	۱۰	۱۰	۲
vigilant	۳/۷	۲۸	۲۸	
AVATAR	۸/۲	–	–	۱
Bird-Eye 100	۰/۸۵	–	۱/۳	
Bird-Eye 400	۲/۲	–	۴/۱	۱/۲
Bird-Eye 500	۲	–	۵	۰/۹
Bird-Eye 600		–	۸/۵	۱/۵
Orbiter I	۲/۲	–	۶/۵	۱/۵
Orbiter II	۶	–	–	–
Orbiter III	۴/۲	–	–	–
T10E	۲/۲	–	۱۲	–
T23E	۱/۴	–	۳/۸	–



شکل ۹. نمودار بیشینهٔ سرعت پهپاد نسبت به وزن شروع به پرواز

با بررسی ملخ‌های مورد استفاده در پهپادهای الکتریکی به نتایج خوبی برای انتخاب ملخ مناسب در یک پهپاد سبک با موتور الکتریکی می‌توان دست یافت. اندازهٔ ملخ برطبق جریان و ولتاژ کاری مورد نیاز تغییر می‌کند. شرکت‌های تولیدکنندهٔ موتور الکتریکی معمولاً کاتالوگ‌هایی با جداولی درخصوص انواع موتور و ملخ دارند که در آنها برای هر موتور چند ملخ پیشنهاد شده است و با استفاده از این جداول می‌توان به‌راحتی ملخ مناسب را برای پهپاد انتخاب کرد. برای این منظور می‌توان بعد از انتخاب ملخ، جریان دریافتی موتور را در حالت بیشینهٔ دور با باتری کاملاً شارژشده در نظر گرفت. جریان باید در محدودهٔ ۱۰ درصدی جریان محاسبه‌شده باشد. اگر جریان کمتر از آن بود، ملخ بزرگتر و اگر زیادتر بود، ملخ کوچکتر انتخاب می‌شود. همچنین لازم است که یک بیشینهٔ سرعت چرخشی مجاز برای موتور و ملخ در نظر گرفته شود و سرعت چرخش ملخ از این حد بیشتر نباشد. پرنده‌های با سرعت کم می‌بایست دارای نسبت گام به قطر در حدود ۲:۱ باشند. همچنین پهپادهای طراحی‌شده برای پرواز با سرعت بالا، نیازمند ملخی با نسبت گام به قطر در حدود ۱:۱ می‌باشند. به‌عبارت دیگر، بیشینهٔ نیروی تراست با ملخی با نسبت گام به قطر در حدود ۲:۱ و بیشینهٔ سرعت با ملخی با نسبت گام به قطر در حدود ۱:۱ تأمین می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

نتایج آماری این مقاله می‌تواند در طراحی اولیهٔ پهپادهای سبک با پیشران الکتریکی استفاده شود. در انتخاب موتور برای این دسته از پهپادها نمودارهای به‌دست آمده می‌توانند مورد استفاده قرار گیرد. برای انتخاب موتور الکتریکی برای یک پهپاد، با دانستن وزن پرنده بدون احتساب وزن موتور و باتری، می‌توان به محدودهٔ موتورهای مناسب، فاصلهٔ بین دو بال، وزن محموله و بیشینهٔ سرعت پهپاد با موتور الکتریکی رسید. عمدتاً به ازای هرکیلوگرم وزن پرنده، توان ۷۵ تا ۴۰۰ وات نیاز هست که این محدوده، به نوع عملکرد پروازی پهپاد بستگی دارد. انتخاب باتری هم بعد از انتخاب موتور و براساس میزان توان مورد نیاز آن انجام می‌شود. در مورد ملخ‌ها نیز هر چقدر گام بزرگتر باشد، سرعت پرواز بیشتر خواهد شد اما میزان نیروی تراست در سرعت‌های پایین یا برای صعود با زاویهٔ زیاد، کم خواهد بود. ملخ با گام کم نیز برای پهپادهای با سرعت کم و ملخ با گام زیاد برای پهپادهای با سرعت زیاد مناسب است. عمدتاً اندازهٔ ملخ بر طبق جریان و ولتاژ کاری تغییر می‌کند. برای موتور و ملخ لازم است که بیشینهٔ سرعت چرخشی مجاز در نظر گرفته شود و نسبت چرخش از یک حد بیشتر نباشد. با وجود احتیاط‌های محاسباتی، همیشه سرعت و جریان برای موتور باید کمتر از مقدار بارگذاری در حالت حداکثر گاز در نظر گرفته شود؛ زیرا اضافه‌بار یک موتور سبب داغ‌شدن سیستم و درپی آن صدمات جبران‌ناپذیر به موتور خواهد شد. البته سازندگان موتورهای الکتریکی، جدولی برای محصولاتشان ارائه می‌کنند که برای هر موتور میزان kv نوع ملخ، نوع باتری و تعداد سل آن، وزن پرنده و میزان عملکرد پرنده قید می‌شود که به‌راحتی با توجه به ملزومات کار، موتور انتخاب می‌شود. در صورتی که موتور مورد نظر کاملاً با خواستهٔ طراح یکسان نباشد، می‌توان با افزایش اختلاف پتانسیل الکتریکی یا تغییر اندازهٔ ملخ آن را به شرایط ایده‌آل نزدیک کرد.

۶. مآخذ

[۱] فرهنگستان زبان و ادب فارسی. *فرهنگ واژه‌های مصوب فرهنگستان*، تهران: انتشارات فرهنگستان زبان و ادب فارسی، دفتر پنجم.

[2] Maybury, M. T. *The Evolution of Electric Military Aircraft*, Headquarters U.S. Air Force, 2011.

[3] Gur, Ohad, Aviv Rosen. *Optimizing Electric Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles*, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, 2012.

[۴] آشنایی با هواپیمای مدل، سومین دوره طراحی و ساخت هواپیمای بدون سرنشین، پژوهشکدهٔ شهید رضایی، تابستان ۱۳۹۱.

[5] Ogden, Joan, Lorraine Anderson. *Sustainable transportation energy pathways, a research summary for decision makers*, UC Davis Institute of Transportation Studies, Create Space Independent Publishing Platform, 2011.

[۶] آشنایی با زیرسیستم‌های هواپیمای بدون سرنشین، سومین دورهٔ طراحی و ساخت هواپیمای بدون سرنشین، پژوهشکدهٔ شهید رضایی، تابستان ۱۳۹۱.

[۷] بیم، بهارا. *ماشین های الکتریکی*؛ (تئوری، عملکرد و کاربردها)، ترجمهٔ جعفر سلطانی، حمید لسانی، تهران: قائم، ۱۳۸۰.

[8] Logan, Michael J., Julio Chu, Mark A. Motter, Dennis L. Carter, Michael Ol, Cale Zeune. *Small UAV Research and Evolution in Long Endurance Electric Powered Vehicles*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.

[9] Stan Yeo; "Brushless Motors", PHOENIX Range, http://www.phoenixmp.com/articles/magazine-articles.htm (accessed September 15, 2014).

[10] Mohamed Kara Mohamed, Sourav Patra, and Alexander Lanzon; "Designing Electric Propulsion Systems for UAVs", *Control Systems Centre*, EEE, The University of Manchester, Manchester, UK, 2011.

پی‌نوشت

1. payload
2. reflector
3. brushless
4. electronic speed control
5. inrunner
6. outrunner