



بررسی تجربی و تحلیلی اثر تعداد پره-ها بر روی آیرودینامیک یک ریزپهباد با بال چرخان

سجاد محمودی^۱، محمد حسن جوارشکیان^۲

۱- دانشگاه فردوسی مشهد-گروه مکانیک-آزمایشگاه هوافضا

در این تحقیق اثر تعداد پره ها روی عملکرد آیرودینامیکی یک موتور ریزپهباد توسط روش تجربی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی طول، گام و ضخامت پره ها یکسان اما تعداد پره ها بر روی یک روتور تغییر داده شده است. ابتدا "تأثیر پارامتر فوق بر روی عملکرد آیرودینامیک روتور در دوره‌های مختلف توسط آزمایشات تجربی بررسی گردیده است، سپس اثر پارامتر مذکور توسط روش المان پره نیز آنالیز شده است. مقایسه نتایج روش تجربی و تحلیلی صحت داده ها را تایید می نماید. نتایج این تحقیق نشان می دهد با افزایش دور موتور، اختلاف نتایج برای روتور با تعداد پره های مختلف افزایش می یابد. همچنین اثر توان مصرفی برای روتور با تعداد پره های متفاوت نشان می دهد که در دور های کمتر از ۴۰۰۰ دور در دقیقه تغییرات توان مصرفی نسبت به دورهای بالاتر، کمتر است لذا می توان با افزایش دور در یک توان تقریباً ثابت نیروی پیشران بیشتری را با افزایش تعداد پره ها بدست آورد.

واژه های کلیدی: ریزپهباد- کوادرتور-دستگاه اندازه گیری نیروی پیشران- تئوری المان پره-پره-تراست

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هوافضا- آیرودینامیک

۲- دانشیار مهندسی مکانیک وهوافضا

بررسی تجربی و تحلیلی اثر تعداد پره‌ها بر روی آیرودینامیک یک ریزپهباد با بال چرخان

سجاد محمودی¹، محمد حسن جوارشکیان²
دانشگاه فردوسی مشهد-گروه مکانیک-آزمایشگاه هوافضا

چکیده

در این تحقیق اثر تعداد پره‌ها روی عملکرد آیرودینامیکی یک موتور ریزپهباد توسط روش تجربی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی طول، گام و ضخامت پره‌ها یکسان اما تعداد پره‌ها بر روی یک روتور تغییر داده شده است. ابتدا "تأثیر پارامتر فوق بر روی عملکرد آیرودینامیک روتور در دوره‌های مختلف توسط آزمایشات تجربی بررسی گردیده است، سپس اثر پارامتر مذکور توسط روش المان پره نیز آنالیز شده است. مقایسه نتایج روش تجربی و تحلیلی صحت داده‌ها را تأیید می‌نماید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش دور موتور، اختلاف نتایج برای روتور با تعداد پره‌های مختلف افزایش می‌یابد. همچنین اثر توان مصرفی برای روتور با تعداد پره‌های متفاوت نشان می‌دهد که در دور‌های کمتر از 4000 دور در دقیقه تغییرات توان مصرفی نسبت به دورهای بالاتر، کمتر است لذا می‌توان با افزایش دور در یک توان تقریباً ثابت نیروی پیشران بیشتری را با افزایش تعداد پره‌ها بدست آورد.

واژه‌های کلیدی: ریزپهباد- کوادرتور-دستگاه اندازه‌گیری نیروی پیشران- تئوری المان پره-پره- تراست

مقدمه

در دهه اخیر علاقه قابل توجهی از سوی صنعت، دولت‌ها و دانشگاه‌ها به طراحی وسایل بدون سرنشین با قابلیت پرواز و فرود عمودی نشان داده شده است. کوادرتور موضوع مورد مطالعه قابل توجهی است که مورد توجه پژوهشگران رباتیک از اوایل سال 2000 بوده است، و مقالات متعددی در مورد دینامیک و آیرودینامیک و کنترل این پهباد نوشته شده است. در این پژوهش نیز با توجه به اهمیت موضوع به بررسی کوادراتور پرداخته شده و با توجه به افزایش و تولید وسایل نقلیه بدون سرنشین، بررسی آیرودینامیکی آن الزامی است. از سوی دیگر افزایش راندمان کوادرتور و قدرت باربری پره‌ها برای اهداف گوناگون استفاده از آنها، بسیار قابل اهمیت می‌باشد [1]. این سازه می‌تواند در کاربردهای مختلف جذاب باشد، خصوصاً برای نظارت، تصویربرداری، محیط‌های خطرناک، جهت‌یابی در داخل محیط‌های پوشیده، نقشه‌برداری و... [2]. پارامترهای آیرودینامیکی مختلفی وجود دارد که روی عملکرد پره و رتور تأثیر می‌گذارد، مثل اثر زمین (FIGE)، نیروی آیرودینامیکی مؤثر، ناشی از نیروهای افقی مؤثر روی پره و گشتاور دورانی R_M [3] و از همه مهم‌تر این دو اثر یعنی نیروی پیشران (T) و پسا (Q) می‌باشد که با تغییرات در این دو کمیت، می‌توان پهباد را کنترل کرد [4]. تحقیقات زیادی در مورد شبیه‌سازی جریان روی پهبادهای بال چرخشی انجام شده است. از جمله این تحقیقات در سال 2009 اوهاگور و روزن [5]، در سال 2009 مارتین، برسیتو و همکارانشان [6]، در سال 2011 هافمن و همکاران [7]، در سال 2011 آقایان مارینو و سینیبالی [8]، می‌توان نام برد.

هدف از این تحقیق، آنالیز فاکتورهای مؤثر بر پره یک پهباد با بال چرخشی در دوره‌های متفاوت بمنظور استفاده از پره فوق در یک پهباد می‌باشد. بعلاوه تحقیق تحلیلی انجام شده، بررسی آزمایشگاهی مدل فوق در آزمایشگاه ریز پهباد دانشگاه فردوسی انجام و نتایج دو روش مقایسه می‌شود.

دستگاه اندازه‌گیری نیروی پیشران

همان‌طور که در شکل 1 می‌بینید، برای اندازه‌گیری نیروی پیشران تولیدی توسط موتور و پره و همچنین اثر پارامترهای مختلف آیرودینامیکی بر روی نیروی پیشران لازم است دستگاهی با توانایی محاسبه پارامترهای فوق طراحی و ساخته شود. تست رانش برای مشخص کردن ترکیب‌های مختلف از موتور و ملخ به عنوان گزینه‌های مناسب برای نیروی مورد نیاز در ریزپهباد مورد نظر انجام می‌شود. برای انجام آزمایش، باید یک سیستم با قابلیت بررسی این پارامترها طراحی و ساخته می‌شود که به طور مؤثر به نمایش معادل اثر آن پارامترها روی نیروی پیشران در هر ترکیب موتور و پروانه بپردازد. با توجه به تجربیات مختلفی که گروه ویرجینیا داشتند، از تجربیات آنها در طراحی و ساخت و ساز مکانیزم مورد نظر استفاده شد. در نهایت هم با توجه به مفید بودن، دقیق بودن و همچنین ساده بودن و کم هزینه بودن، دستگاه طراحی و ساخته شد.

برای انتقال نیروی پیشران از موتور و پره به ترازوی دیجیتال با توجه به امکانات و ساده بوده آن، از بازویی به شکل L استفاده شد. در قسمت بالای (عمودی) بازو موتور و پره در یک مکان مشخص نصب گردید و در قسمت افقی اهرم یعنی محل ارتباط اهرم با ترازو ابتدا سوراخی توسط دریل در آن تعبیه شد و یک میله آهنی که دقیقاً در مکان با فاصله مشخص نسبت به موتور نصب شده در راستای عمودی اهرم نصب گردید. برای آنکه این اهرم به طور کاملاً ثابت و بدون لرزش نصب گردد از یک پایه با طراحی خاص استفاده گردید، بطوریکه اهرم نسبت به ترازو کاملاً عمود قرار گرفت و همچنین برای عدم انتقال و حذف و به حداقل رساندن هرگونه نیرو از جمله نیروی اصطکاک و حرکت جانبی توسط پره و موتور به پایه، از بلبرینگ استفاده شد، بلبرینگ‌ها دقیقاً در مرکز اتصال قسمت افقی و عمودی اهرم نصب گردید، همچنین برای ارتباط دادن اهرم و پایه با بلبرینگ از یک میله فولادی که دو سر آن رزوه گردیده بود استفاده شد. اگر طول قسمت عمودی اهرم را I_T و طول قسمت افقی اهرم را I_F بنامیم، طوری این بازو طراحی و ساخته شد که $I_F=I_T$ بوده و همین‌طور که در بالا اشاره شد محل نصب پره و موتور در قسمت عمودی دقیقاً برابر طولی است که میله رابط بین ترازو و قسمت افقی اهرم نصب گردیده بوده است. از این رو نیروی پیشران و نیروی برآیی که بواسطه حرکت و دوران پره و موتور تولید می‌شود دقیقاً به ترازو منتقل گردیده و محاسبات می‌تواند با کمترین خطا با توجه به حساسیت بالای ترازو که با دقت دهم گرم می‌باشد،

1- دانشجوی کارشناسی ارشد هوافضا- آیرودینامیک

2- دانشیار مهندسی مکانیک وهوافضا

حاصل گردد. در ادامه ادوات الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته توضیح داده می‌شود.

تجهیزات الکتریکی

موتور انتخاب شده برای آزمایش 6T2215/ 09 EMAX که از نوع Brushless بوده و برای تامین قدرت و توان راه‌اندازی آن از یک باتری 3Cell استفاده گردید. همچنین برای آنکه بتوانیم سرعت‌ها و دورهای مختلف را به موتور وارد کنیم و اثر آن را روی پارامترهای مختلف، مثلاً نیروی پیشران، ولتاژ، توان، آمپر و گشتاور برای هر پره مورد بررسی قرار دهیم از دستگاه تنظیم کننده سرعت استفاده کردیم. چون دقت اندازه‌گیری در دورهای مختلف بسیار مهم بوده و اثر بسیار بالایی در نتیجه‌گیری دارد، از دو دستگاه برای انتقال اطلاعات به موتور مربوطه استفاده گردید، رادیو کنترل به همراه رسیور و همچنین برد پردازشگر که از دومی برای اعتبار سنجی اولی مورد استفاده قرار گرفت. برای آنکه دور مشخصی را به موتور وارد کنیم ابتدا یک رسیور در مدار قرار داده شد و از طریق رادیو دور مورد نظر بطور آنالوگ به موتور منتقل می‌گردید. همانطور که در شکل 2 مشاهده می‌شود، اطلاعات نمایش داده می‌شود.

همچنین برای آنکه بتوانیم صحت دور اتخاذ شده برای موتور را بررسی کنیم از دورسنج لیزری استفاده گردید. نحوه عملکرد دستگاه در قسمت عملکرد دستگاه شرح داده می‌شود. همین‌طور برای اندازه‌گیری ولتاژ، توان و آمپر مصرفی در هر دور مشخص، از ولت‌متر و آمپرمترهای مخصوص که دقت بسیار بالایی برخوردارند استفاده کردیم.

نحوه عملکرد دستگاه

در ابتدا توسط کامپیوتر و یا رادیو کنترل یک دور مشخص برای موتور انتخاب می‌شود، سپس از طریق اهرم مورد نظر نیروی پیشران تولیدی توسط موتور به ترازو منتقل شده و به نمایش گذاشته می‌شود که این نیرو برابر نیروی پیشران در پرواز افقی و یا برابر نیروی برآ در پرواز عمودی است. همچنین از طریق دورسنج لیزری دور موتور چک شده و با استفاده از ولت‌سنج و آمپرمتر، ولتاژ، آمپر و توان مصرفی در یک دور مشخص موتور و پره حاصل می‌گردد. سپس در دورهای مختلف پارامترهای فوق اندازه‌گیری شده و از آن حالت بهینه با توجه به هدف مورد نظر انتخاب می‌گردد. این دستگاه قابلیت بررسی اثر پارامترهای مختلف آیرودینامیکی بر روی نیروی پیشران را دارا می‌باشد. به طور مثال بررسی اثر تعداد پره، اثر طول پره، اثر گام پره، اثر زمین، و همچنین اثر دو پره و فاصله قرارگرفتن آنها از یکدیگر بر روی نیروی پیشران تولیدی توسط موتور و پره را دارا می‌باشد. که در تحقیق حاضر به بررسی اثر تعداد پره ها بر روی پارامترهای مذکور پرداخته شده است.

در شکل 3 موتور و ملخ‌های دو، سه و چهار پره با قطر 10 و گام 4/7 اینچ (10×4/7) قابل مشاهده است.

از آنجائیکه از ملخ‌های دو، سه و چهار پره با یک طول و گام برابر در بازار موجود نبوده، لذا ملخ‌های سه و چهار پره را ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفته تا نتایج بر اساس قطر و گام یکسان انجام پذیرد.

همانطور که در شکل 4 نشان داده شده است، با افزایش دور نیروی پیشران تولیدی حاصل از موتور برای هر سه نوع ملخ افزایش می‌یابد. اما نکته قابل توجه آن است که نیروی پیشران تولید شده توسط ملخ 3 و 4 پره افزایش قابل توجهی نسبت به ملخ دو پره دارد این افزایش نیروی تراست،

روی برخی از پارامترهای دیگر اثر می‌گذارد که ممکن است از بعضی نقطه نظرها قابل توجه باشد در شکل‌های بعدی به بررسی و اثر آنها پرداخته می‌شود

در شکل 5 می‌بینیم که با افزایش دور در حالی که نیروی پیشران تولیدی حاصل از موتور و پره برای هر سه نوع ملخ افزایش می‌یابد، تغییرات قابل توجهی بر توان مصرفی موتور و ملخ مربوطه دارد و باعث می‌شود در یک بازه زمانی مشخص باتری زودتر خالی شود و زمان استفاده از باتری را کم می‌کند و این درحالی است که اثرات افزایش توان مصرفی ملخ 3 و 4 پره متفاوت است. لذا باید با توجه به هدف از ساخت ریزپهپاد مورد نظر، نیروی پیشران مورد نیاز آن را تامین کنیم.

همچنین در بازه دورهای بین 1000 تا 4000 دور در دقیقه تغییرات توان مصرفی نسبت به افزایش دور با شیب کمتری مواجه است که این امر نکته قابل توجهی است، چراکه در این بازه می‌توان تقریباً با یک توان مصرفی ثابت، نیروی پیشران بیشتری را با افزایش دور تولید کرد.

از شکل 6 بر می‌آید، اثر دور بر روی آمپر مصرفی موتور و ملخ مربوطه به صورت افزایشی است، و با افزایش دور، جریان مصرفی آنها افزایش می‌یابد، اما نکته قابل توجه آن است، همانطور که در نمودار دور برحسب توان مشاهده می‌شود در بازه دورهای 1000 تا 4000 تغییرات جریان مصرفی موتور و پره نسبت به دورهای بالاتر کم است، و این نکته به ما کمک خواهد کرد که در یک جریان مصرفی تقریباً ثابت، بتوانیم با افزایش دور، نیروی پیشران بیشتری تولید کنیم، و این امر از طرفی امکان استفاده از ملخ‌هایی با پره‌های بالاتر را می‌دهد.

تحلیل آیرودینامیک پره

پره‌ها در روی رتور با زاویه گام ثابت نصب شده‌اند. به این مفهوم که زاویه گام θ که زاویه تیغه معرفی می‌شود ثابت باقی می‌ماند (به طوریکه زاویه نصب پره‌ها ثابت‌اند). با این حال این زاویه ثابت نباید اشتباه گرفته شود. در واقع زاویه گام خود پره در راستای خود پره تغییر می‌کند اما قابل تنظیم نیست که در شکل 2 نیز نشان داده شده است. هندسه پره می‌تواند پیچیده باشد بطوریکه در آن طول وتر C و پروفیل ایرفویل در امتداد طول پره متفاوت باشد. زاویه گام تعیین کننده گام پره P است به طوریکه گام می‌تواند در امتداد طول پره برای هر دوران تغییر کند که بسیار شبیه به پیچ است و به همین علت است که گاهی اوقات به ملخ هواپیما لقب پیچ هوایی را می‌دهند که این ارتباط را به صورت زیر می‌توان شرح داد.

$$P = 2\pi.r(\tan \theta) \quad (1)$$

بطوریکه r فاصله در امتداد تیغه است که در آن زاویه گام خاصی وجود دارد. از آنجا که گام‌های مختلفی برای پره‌ها وجود دارد، یک نسبت به طور معمول برای آنها لحاظ می‌شود که به عنوان نسبت قطر گام شناخته می‌شود.

$$\frac{P}{D} = \pi.x \cdot \tan \theta \quad (2)$$

بطوریکه D قطر پره هست و x نسبت شعاع‌هایی که در قسمت از پره وجود دارد و به این شکل نشان می‌دهند.

$$x = \frac{r}{R} \quad (3)$$



پره ها از یک خط مرجع متفاوت استفاده می کنند یعنی خط وتر² خط لیفت برابر صفر نیستند). بطوریکه لیفت و درگ که مولفه های نرمال و مماسی پره هستند می توانند از طریق مولفه های کردن تراست و گشتاور در هر المان محاسبه گردند.

اختلاف زاویه بین راستای تراست و لیفت بدین صورت تعریف می شود:

$$\varphi = \theta - \alpha \quad (4)$$

تراست و گشتاور برای هر المان از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\Delta T = \Delta L \cos(\varphi) - \Delta D \sin(\varphi) \quad (5)$$

$$\frac{\Delta Q}{r} = \Delta D \cos(\varphi) - \Delta L \sin(\varphi) \quad (6)$$

از جایگذاری مقادیر هر قسمت (مقادیر C_L و C_D برای هر α) منجر به روابط زیر می شود.

$$\Delta L = C_L \frac{1}{2} \rho V_1^2 c dr \quad (7)$$

$$\Delta D = C_D \frac{1}{2} \rho V_1^2 c dr \quad (8)$$

بطوریکه ρ چگالی هوا، c وتر پره است که در نتیجه $c dr$ نشان دهنده مساحت هر المان می باشد. اگر تعداد پره ها را با β نشان دهیم، داریم:

$$\Delta T = \frac{1}{2} \rho V_1^2 c (C_L \cos(\varphi) - \Delta L \sin(\varphi)) \beta dr \quad (9)$$

$$\frac{\Delta Q}{r} = \frac{1}{2} \rho V_1^2 c (C_D \cos(\varphi) + \Delta L \sin(\varphi)) \beta dr \quad (10)$$

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \rho V_1^2 c (C_D \cos(\varphi) + \Delta L \sin(\varphi)) \beta dr \quad (11)$$

از نتایج روش فوق برای مقایسه با داده های تجربی استفاده شده است. در شکل 9 نتیجه مقایسه تغییرات تراست بر حسب دور با دو روش تحلیلی و تجربی آورده شده است.

همانطور که در نمودار مشاهده می شود با توجه به اینکه روش المان پره به بررسی دو بعدی می پردازد و اثرات نوسانات و سه بعدی بودن جریان را بررسی نمی کند. لذا راندمان و پارامترهای دیگر پره دارای مقادیر 5 تا 10 درصد بیشتر از روش تجربی است. لذا جواب ها کاملاً منطقی است و نشان از دقت بالای دستگاه دارد.

نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج این تحقیق نشان می دهد که 1- تطابق نتایج تجربی و تحلیلی صحت تحقیق انجام شده را تایید می نماید. 2- نیروی پیشران تولید شده توسط ملخ 3 و 4 پره افزایش قابل توجهی نسبت به ملخ دو پره دارد این افزایش نیروی تراست، روی برخی از پارامترهای دیگر اثر می گذارد 3- در بازه دوره های بین 1000 تا 4000 دوربر دقیقه تغییرات توان مصرفی نسبت

از آنجا که θ و c در طول شعاع پره تغییر می کنند، زاویه حمله (α) نیز تغییر می کند که این موضع به شکل گرافیکی در شکل 3 به نمایش گذاشته شده است [7] [8].

برای تجزیه و تحلیل موثر پره هایی از این نوع، می توان از تئوری المان پره استفاده کرد و پره را در سراسر شعاع آن به صورت بخش بخش مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و سپس به تعیین عملکرد کلی و ویژگی های آن پردازیم. که در واقع در این روش نتایج تجربی با روش مذکور مقایسه گردیده است.

روش المان پره

یک روش نسبتاً ساده که قابلیت پیشبینی عملکرد بطور مثال پره های توربین بادی و فن ها و کوادرتور ها را دارد، روش المان پره است. در این روش پره به قسمت های مختلف مستقل در راستای طول خود تقسیم می شود. در هر بخش یک تعادل نیرویی دو بعدی برای برآ و پسا با تراست و گشتاور تولید شده بوسیله هر بخش، اعمال شده است. در یک حالت مشابه یک موازنه برای مومنتم محوری و مومنتم زاویه ای اعمال می شود. این ها از حل یک سری معادلات غیر خطی که در هر بخش انجام می شود محاسبه می گردد. از نتایج نیروی پیشران و گشتاور بدست آمده در هر بخش، می توان برآیند کلی عملکرد پره را پیش بینی کرد.

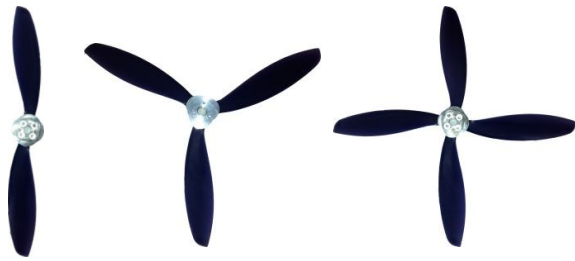
این نظریه برای انجام مطالعات تطبیقی، مثل بهینه سازی گام پره، برای تنظیم سرعت کرور و یا بهینه سازی استحکام پره بسیار مفید می باشد. با توجه به محدودیت های موجود هنوز یک ابزار خوب برای بدست آوردن تراست، گشتاور و راندمان پره تحت طیف وسیعی از شرایط عملیاتی است. لازم به ذکر است همگرایی برای این سیستم معادلات غیر خطی تضمین شده نیست. البته معمولاً یک روش ساده در این مواقع، استفاده از برخی تکنیک های افزایش همگراییست (مثلاً ضرب تخفیف کرانک نیکلسون) برای بدست آوردن پارامترهای پره استفاده کرد. وقتیکه از خواص های غیر خطی دیگر مثل اثراتی که شامل جدایش جریان از روی سطح نیز در نظر گرفته شود همگرایی روش تکرار به سختی اتفاق می افتد.

در شکل 7 دیده می شود که در راستای r از مرکز، پره به بی نهایت بخش مستقل از هم تقسیم شده است. برای هر بخش، جریان می تواند به طور مستقل مورد تجزیه تحلیل قرار گیرد. اگر فرض کنیم برای هر بخش یک سرعت محوری و یک سرعت زاویه ای وجود دارد و جریان ورودی ناشی از سایر بخش ها قابل اغماض است، ازاینرو برش AA نشان می دهد جریان روی پره از اجزای زیر تشکیل شده است.

همانطور که در شکل 8 دیده می شود، وقتی که برای پره زاویه گام θ (زاویه پیچ هندسی) ایجاد می کنیم، بردار سرعت محلی جریان یک زاویه حمله α برای هر بخش بوجود می آورد. نیروی لیفت و درگ هر بخش می تواند از طریق خواص استاندارد ایرفویل های دوبعدی¹ محاسبه شود. (توجه:

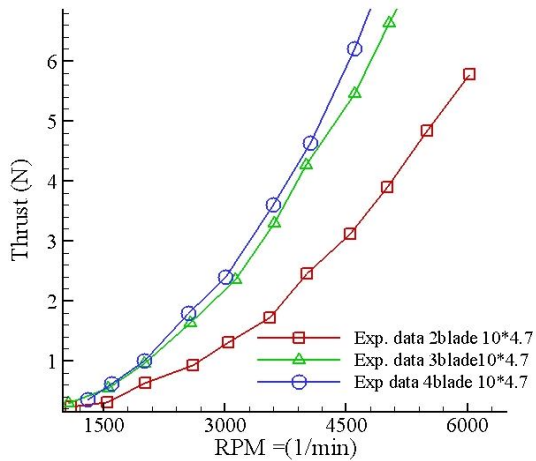
² Chord line

¹ 2D Airfoil

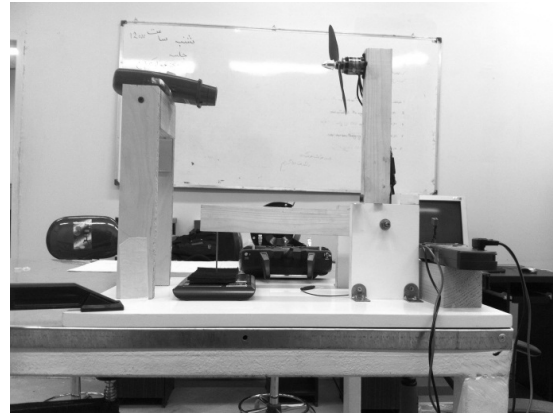


شکل 3- ملخ دو، سه و چهار پره 10×4.7 مورد استفاده شده در این تحقیق

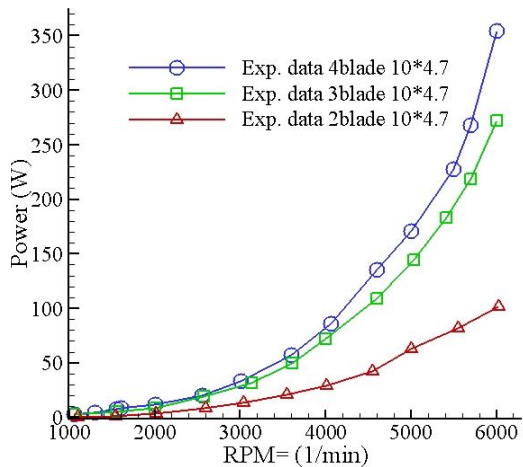
به افزایش دور با شیب کمتری مواجه است 4- در بازه دورهای 1000 تا 4000 تغییرات جریان مصرفی موتور و پره نسبت به دورهای بالاتر کم است.



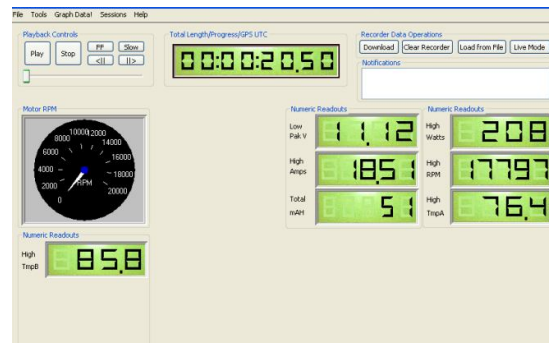
شکل 4- مقایسه تغییرات تراست بر حسب دور بر دقیقه



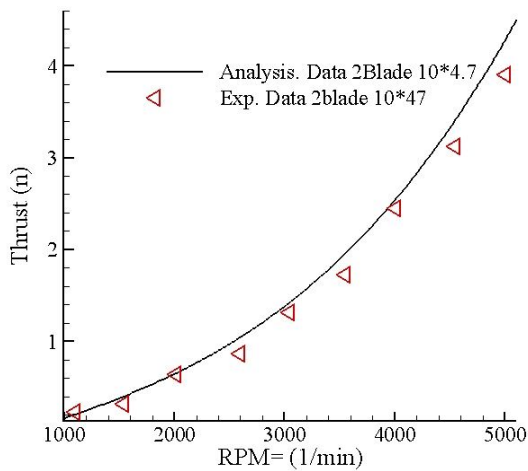
شکل 1: دستگاه اندازه گیری نیروی پیشران ساخته شده در آزمایشگاه ریزپهباد



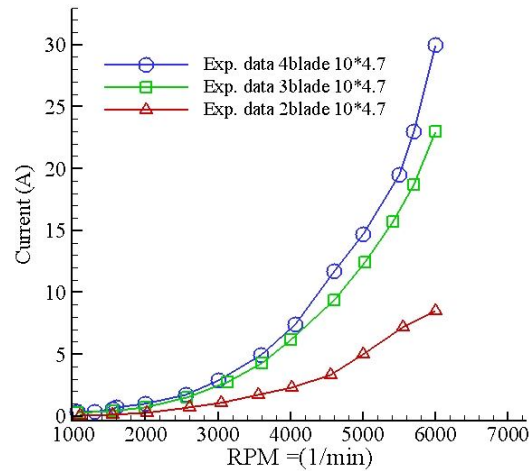
شکل 5- مقایسه تغییرات توان بر حسب دور بر دقیقه



شکل 2- نمایش اطلاعات برد پردازشگر بر روی کامپیوتر



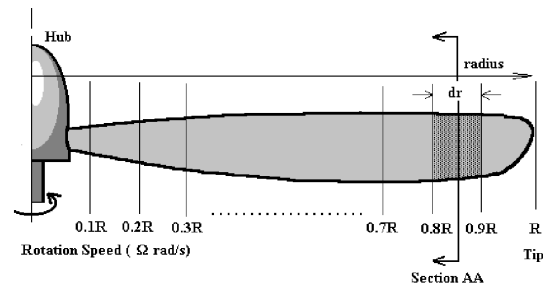
شکل 9- مقایسه تغییرات تراست بر حسب دور به دو روش المان پره و روش تجربی



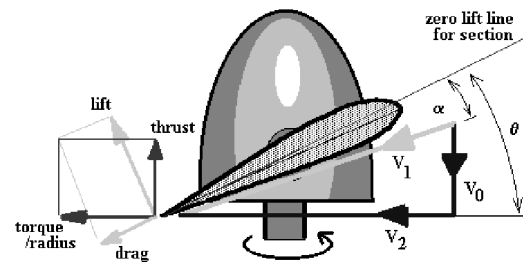
شکل 6- تغییرات جریان مصرفی موتور و ملخ مربوطه با دور بر دقیقه

مراجع

- [1] Giorgia Sinibaldi, A., Luca Marino, B., 2012. “Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV”. *Applied Acoustics*, 1(10), July, pp.1–10.
- [2] Grzegorz Jastrzebski.A.,Leszek Ulanowicz. B. Experimental method of determining characteristics of power and torque engine for low- power unmanned aerial vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 18, n. No. 3, 2011.
- [3] Pierre-Jean Bristeau, A., Philippe Martin, B., and Erwan Salaun, C., 2009. “The Role of Propeller Aerodynamics in the Model of a Quadrotor UAV”. *Proceedings of the European Control Conference*, May, pp. 1–6.
- [4] Ohad Gur, A., Aviv Rosen, B., 2009. “Design of a Quiet Propeller for an Electric Mini Unmanned Air Vehicle”. *JOURNAL OF PROPULSION AND POWER*, Vol. 25, May, pp. No. 3.
- [5] Gabriel M. Hoffmann, A., Haomiao Huang, B., and Steven L. Waslander, C., 2011. “Precision flight control for a multi-vehicle Quadrotor helicopter test bed”. *JOURNAL OF Control Engineering Practice*, vol.14, May, pp.1023–1036.
- [6] Adam Smedresman, A., Derrick Yeo, B. and Wei Shyy C, 2009. “Design, Fabrication, Analysis, and Testing of a Micro Air Vehicle Propeller”. *AIAA Applied Aerodynamics Conference*, June 2011.
- [7] B.W. McCormick, “Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics”, John Wiley & Sons, Inc, 1995.
- [8] <http://www.pilotfriend.com>, accessed 13th August 2011.



شکل 7- نحوه المان بندی پره بوسیله روش المان پره



شکل 8- نیروهای واژه بر روی پره