

طراحی و ساخت یک ملخ به منظور تولید پیشران با الهام از آیرودینامیک برگ درخت افرا

فرید چوبتاشانی*

۱- کارشناس ارشد هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۴)

چکیده

در سال‌های اخیر، الهام‌گیری از پدیده‌های طبیعی به عنوان یک رویکرد نوآورانه در مهندسی و طراحی، به ویژه در حوزه آیرودینامیک، توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است. این مطالعه به بررسی ویژگی‌های آیرودینامیکی برگ افرا به منظور طراحی ملخ‌های جدید پرداخته است. برای این منظور، ابعاد میانگین تعدادی از برگ‌ها با استفاده از نرم‌افزار دیجیتالایزر و اکسل محاسبه و سپس یکی از برگ‌ها برای اسکن سه‌بعدی انتخاب شد تا ایرفویل‌هایی از مقاطع مختلف آن استخراج گردد. نتایج نشان داد که برگ‌ها در حالت‌های دوپره و سه‌پره خاصیت چرخش خودکار را از خود نشان می‌دهند، که این امر منجر به توسعه ملخ‌های تک‌پره‌ای به ملخ‌های دوپره‌ای و سه‌پره‌ای گردید. علاوه بر این، مقیاس‌های بزرگ‌تری از این پرها طراحی و ساخته شد. با توجه به این که برگ‌ها در حین نزول، زاویه‌ای بین ۵ تا ۲۰ درجه نسبت به صفحه چرخش و صفحه افقی به خود می‌گیرند، ملخ‌های دوپره‌ای در این زوایای مختلف نیز طراحی و بررسی شدند. یافته‌ها نشان داد که افزایش تعداد پرها به‌طور چشم‌گیری نیروی پیشران را افزایش می‌دهد و ملخ با زاویه ۱۰ درجه بیشترین نیروی پیشران را تولید می‌کند. همچنین، ملخ‌ها در مقیاس ۲ برای تولید نیروی پیشران بهینه بودند، در حالی که ملخ در مقیاس ۳ نیروی کمتری نسبت به مقیاس ۲ تولید کرد. نتایج این تحقیق می‌تواند به طراحی و بهینه‌سازی ملخ‌های جدید کمک شایانی نماید و زمینه‌ساز توسعه فناوری‌های نوین در این حوزه باشد.

واژه‌های کلیدی: برگ افرا، گردابه‌های لبه‌حمله، پیشران، چرخش خودکار، زاویه مخروطی، ملخ

The design and construction of a propeller for thrust generation inspired by the aerodynamics of the maple tree leaf

Farid choobtashani

Abstract

In recent years, drawing inspiration from natural phenomena has emerged as an innovative approach in engineering and design, particularly in the field of aerodynamics, attracting increasing attention. This study investigates the aerodynamic characteristics of maple leaves with the aim of designing new propellers. To this end, the average dimensions of several leaves were calculated using digitizer software and Excel, and then one leaf was selected for three-dimensional scanning to extract airfoils from its various sections. The results indicated that leaves exhibit self-rotating properties in both two-blade and three-blade configurations, leading to the development of single-blade propellers into two-blade and three-blade designs. Additionally, larger scales of these blades were designed and constructed. Considering that leaves adopt an angle between 5 to 20 degrees relative to the rotation plane and the horizontal plane during descent, two-blade propellers were also designed and examined at these various angles. The findings revealed that increasing the number of blades significantly enhances thrust, with the propeller at a 10-degree angle generating the highest thrust. Furthermore, the propellers at scale 2 were optimal for thrust production, while the propeller at scale 3 produced less thrust compared to scale 2. The results of this research can significantly contribute to the design and optimization of new propellers and pave the way for the development of innovative technologies in this field.

Key words: Maple leaf, leading-edge vortices, thrust, autorotation, conical angle, propeller

مقدمه

ویژگی‌های آیرودینامیکی برگ‌های افرا و خاصیت خودچرخشی این برگ‌ها توجه بسیاری از مهندسان و طراحان این حوزه را به خود جلب کرده است. افرا، نام یک سرده از درخت‌ها و درختچه‌ها از خانواده‌ی افراسانان است. این درختان دارای برگ‌هایی دو باله به شکل عدد ۸ بوده و زاویه بین دو بال آن‌ها از ۴۵ تا ۱۸۰ درجه متغیر است [۱-۳]. برگ افرا نوعی میوه خشک است که دانه‌ای در آن قرار گرفته و روی آن از یک پوسته نازک پوشیده شده است. در شرایط وزش باد این دانه از درخت رها شده، و به طور خودکار شروع به چرخش می‌کند. این دانه و سطح چسبیده به آن چرخشی شبیه به چرخش پره‌های ملخ هلیکوپتر دارد. این چرخش باعث تولید نیروی برا شده و تولید این نیرو مدت زمان پرواز و نزول برگ‌ها را بیشتر می‌کند. این نزول آهسته در حضور وزش باد شرایطی مناسب را برای پراکندگی و تولید مثل این دانه‌ها فراهم می‌کند. هر برگ افرا دارای جرم، اندازه، میزان زبری سطح، شکل خاص و منحصر به فرد است. بنابراین هر برگ، عملکرد آیرودینامیکی منحصر به فرد را از خود نشان می‌دهد. به طور میانگین، بیش‌تر برگ‌های افرا دارای اسپینی به اندازه چند سانتی‌متر هستند و سرعت نزول ثابت حدود ۱ متر بر ثانیه را در هنگام نزول خود ثبت می‌کنند و اعداد رینولدز پروازی آن‌ها حدود ۱۰۰۰ است [۴ و ۵].

برگ افرا در طول نزول خود یک پرواز خود چرخشی انجام می‌دهد که این چرخش از تعادل بین نیروی گرانش و نیروهای آیرودینامیکی ناشی می‌شود. نیروی گرانش در تقابل با نیروهای آیرودینامیکی رو به بالا خنثی می‌شود. از طرفی در این حالت سرعت نزول برگ کند می‌شود [۳]. راز این فرود آهسته از ایجاد مکانیزم جریان به نام گردابه‌های لبه‌حمله^۱ ناشی می‌شود. فیزیک این گردابه‌ها شبیه تورنادو است که از لبه جلویی برگ آغاز و روی سطح بالایی آن قرار می‌گیرد [۵]. گردابه‌های ایجاد شده در لبه‌حمله برای پرواز و نزول این برگ نقش مثبتی ایفا می‌کنند و باعث افزایش میزان نرخ چرخش می‌شوند. این گردابه‌ها با ایجاد ناحیه‌ای کم فشار در سطح برگ، نیروی برا را در برگ تولید می‌کنند [۶ و ۷]. گردابه‌های تولید شده انرژی خود را از جریانی که از لبه‌حمله جدا شده دریافت می‌کنند و تولید برا تا زمانی که این گردابه‌ها تولید می‌شوند ادامه می‌یابد. این گردابه‌ها در ۲۵٪ از ناحیه نزدیک

ریشه تولید می‌شوند و بیش‌ترین نیروی برا نیز در این ناحیه تولید می‌شود [۸-۱۰]. در این راستا تحقیقات زیادی انجام شده است که در ادامه مهم‌ترین آن‌ها بیان می‌شود. جانگ و همکاران [۵]، با استفاده از تونل باد عمودی عملکرد چرخش خودکار مدل‌های ساخته شده از برگ‌های افرا را مقیاس شده را بررسی کردند. نتیجه تحقیق آن‌ها نشان داد، هنگامی که این مدل‌ها به مقیاس ۸:۱ (اندازه ۳۰ سانتی متری) رسیدند، افزایش زیادی در سرعت فرود عمودی آن‌ها رخ داد که نشان می‌دهد در این مقیاس اثرات گردابه‌های لبه-حمله ناپدید می‌شود. لنتینک [۲]، با استفاده از یک تونل باد عمودی و با فیلم برداری آزادانه از پرواز ۳۴ برگ افرا، مشاهده کرد تمام این برگ‌ها از خاصیت چرخش خودکار برخوردار بوده و نیز یک گردابه ثابت و برجسته در نزدیکی دانه خود ایجاد می‌کنند. او بیان کرد ساختار گردابه‌های ایجاد شده در لبه‌حمله به عدد رینولدز، هندسه برگ و زاویه حمله جریان بستگی دارد. او مشاهده کرد که زاویه حمله در نوک این برگ‌ها از ۱۲ تا ۳۲ درجه متغیر و این زاویه در ریشه برگ می‌تواند به ۹۰ درجه برسد، بدون این‌که پدیده استال رخ دهد. سالسدو [۱۱]، مطالعه خود را با روش استروبو اسکوپ و دوربینی با نرخ فریم بالا از یک برگ افرا در یک تونل باد عمودی انجام داد. او متوجه شد که جریان‌های در راستای اسپن، گردابه‌های لبه حمله را تثبیت می‌کنند. نتایج او نشان داد که وجود جریان در راستای اسپن، قدرت این گردابه‌ها را بیش‌تر کرده و باعث می‌شود که جریان بعد از جدایش، مجدداً به سطح برگ بچسبد. او در نتایج خود بیان کرد که وجود این جریان در راستای اسپن، افزایش شدیدی در اختلاف فشار ایجاد می‌کند و در نتیجه نیروی برا بیش‌تری تولید می‌شود. لینتیک و دیکسون [۱۲]، فیزیک تولید گردابه‌های لبه‌حمله بال مگس میوه‌خوار را که هندسه آن شبیه برگ افرا است را با انجام اندازه‌گیری جریان و تجسم در مخزن آب با استفاده از حباب‌های هوا بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تشکیل و پایداری این گردابه‌ها، فقط در اعداد راسبی پایین وجود دارد. این خاصیت فقط با داشتن نسبت ابعاد بال کم و سرعت چرخش بالا مطلوب بود. آن‌ها متوجه شدند که اگر عدد راسبی بیش‌تر از عدد بحرانی یعنی سه شود، گردابه‌های لبه‌حمله بال مگس میوه‌خوار شروع به جدا شدن می‌کند و ناپایدار می‌گردد. یاسودا و همکاران [۱۳ و ۱۴]، با استفاده از یک تونل باد عمودی، سرعت باد را برای شناور کردن

برگ‌های در حال چرخش خودکار در مطالعه خود به دست آوردند. این سرعت شناور ماندن برگ‌ها در تونل باد همان سرعت نزول برگ‌ها در طبیعت است. آن‌ها سایر پارامترهای حرکتی را با استفاده از روش استروبو اسکوپ و دوربینی با نرخ فریم بالا اندازه‌گیری کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد برگ‌های افرا نرخ نزول پایین و نرخ چرخش بالایی دارند آن‌ها نرخ نزول را حدود ۱ متر بر ثانیه و نرخ چرخش را حدود ۱۰۰۰ دور بر دقیقه اندازه‌گیری کردند که این نرخ نزول و این نرخ چرخش بالا تحت یک زاویه مخروطی^۴ (β) کم (از ۵ تا ۲۰ درجه) تنظیم و کنترل شده و منجر به یک چرخش پایدار در برگ می‌شود. اورتگا خیمنز و همکاران^۵ [۱۵]، از حرکات برگ‌های افرا در حین سقوط آزاد و آزمایش‌های پرتاب افقی و عمودی فیلم برداری و جابجایی‌های افقی و عمودی و سرعت چرخش را محاسبه کردند. آزمایش‌های انجام شده در محدوده رینولدز ۲۶۰۰ تا ۱۲۰۰۰ مقایسه شد. نتایج نشان داد که برگ‌های پرتاب شده نیروهای آیرودینامیکی که باعث کاهش سریع سرعت آن‌ها می‌شود تولید می‌کنند. هولدن و همکاران [۱۶]، شبیه‌سازی جریان سه بعدی را در اطراف برگ افرا با هدف کاربرد در توربین‌های بادی تجزیه و تحلیل کردند. آن‌ها مقادیر عملکرد کلیدی برگ افرا و توربین بادی واقعی را مقایسه و به این نتیجه رسیدند که هندسه برگ‌های افرا می‌تواند در طراحی اولیه پره توربین‌های بادی کارآمد باشد. سون [۱۷]، نتایج کار خود را این‌گونه بیان کرد که شکل هندسی خاص یک برگ افرا با یک هندسه سطح یکسان، هیچ اثر قابل توجهی بر رفتار گذرا و پایدار این برگ‌ها و پارامترهای حرکتی پرواز دانه‌های افرا نداشته، و مهم‌ترین نقش را موقعیت مرکز جرم بر عهده دارد. او اثرات دسته‌های آوندی را در آیرودینامیک این برگ‌ها بی‌اثر تفسیر کرد. نوربرگ [۱۸]، در مطالعاتش بیان کرد که تراکم خطوط آبرسان در لبه حمله برگ و کاهش ضخامت در این ناحیه به سمت لبه فرار برای توزیع جرم مناسب ضروری است. لی و همکاران [۳]، در یک آزمایش تجربی چند ویژگی بارز پرواز برگ‌های افرا را مورد بررسی قرار دادند آن‌ها بیان کردند که پرواز خود چرخشی هر برگ افرا در طول نزول خود همواره پایدار است. آن‌ها با استفاده از یک دوربین با نرخ فریم ۱۰۰۰ و تونل باد عمودی مقادیر اسمی پارامترهای حرکت دینامیکی را برای پنج برگ مختلف و برای هر کدام آزمایش را پنج بار تکرار کردند. آن‌ها میانگین سرعت نزول برگ را ۱/۲ متر بر ثانیه،

سرعت چرخش را حدود ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، زاویه مخروط (β) را حدود ۲۰ درجه و زاویه پیچ (θ) را ۱/۵ درجه اندازه‌گیری کردند. آیدین و همکاران [۱۹]، در یک آزمایش تجربی یک مدل معمولی از برگ افرا را با استفاده از فناوری پرینت سه بعدی ساخته و برای اولین بار عملکرد آیرودینامیکی این برگ‌ها را در سرعت‌های معین در شرایطی که برگ افرا در تونل باد ثابت است اندازه‌گیری کردند. آن‌ها مشاهده کردند که برگ‌های افرا دارای ویژگی نامتقارن بوده و بهترین عملکرد در زوایای حمله ۱۲- تا ۱۸ درجه برای زوایای مثبت و منفی، بدون توجه به عدد رینولدز به دست می‌آید. سون و همکاران [۲۰]، پرواز برگ‌های افرای واقعی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها میدان جریان اطراف برگ افرا در پرواز خود چرخشی و نیروهای آیرودینامیکی وارد بر آن را با استفاده از معادلات ناوراستوکس محاسبه کردند و به طور هم‌زمان حرکت شش‌درجه آزادی برگ افرا را تحلیل کردند و محل CG معقول را در (۱۸/۹٪ دهانه و ۴/۳۱٪ وتر) محاسبه کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که پارامترهای حرکتی مثل نرخ چرخش، زاویه مخروطی، زاویه پیچ و نرخ نزول در ابتدای نزول در حال تغییرات بوده ولی هنگام رسیدن به حالت چرخش پایدار، ثابت می‌شوند. جانگ و رزگی [۲۱]، در یک مطالعه تجربی با استفاده از سه نمونه مختلف از برگ‌های افرا و یک تونل باد عمودی در سرعت‌های مختلف جریان هوا در دوره‌های مختلف به بررسی نیروی پیشران تولیدی برای این سه نمونه پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که این خواص متفاوت می‌تواند تأثیرات مهمی را بر عملکرد پروازی آن‌ها داشته باشد. با توجه به این که در این راستا تحقیقات زیادی انجام شده است، ولی تا کنون مطالعه‌ای با هدف ساخت ملخ با الهام از این برگ‌ها انجام نشده است لذا تحقیق حاضر به بررسی و طراحی ملخ‌هایی با الهام از ویژگی‌های آیرودینامیکی برگ‌های افرا می‌پردازد و نوآوری اصلی آن در استفاده از اصول طبیعی برای بهبود عملکرد ملخ‌ها نهفته است. با تحلیل دقیق هندسه و رفتار دینامیکی برگ‌های افرا، ملخ‌های تک‌پره‌ای، دوپره‌ای و سه‌پره‌ای در ابعاد و زوایای مختلف طراحی و ساخته شدند. این مطالعه به‌ویژه بر خاصیت خود چرخشی برگ‌ها و تأثیر آن بر تولید نیروی پیشران تمرکز دارد، که به‌طور قابل توجهی می‌تواند کارایی ملخ‌ها را در شرایط مختلف پروازی بهبود بخشد. این رویکرد نوآورانه می‌تواند به طراحی نسل

ساخته شدند. همچنین ملخ دوپره‌ای در مقیاس ۱ و در زوایای مخروطی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه طراحی و مدل‌های CAD آن‌ها ایجاد شد. شکل ۵ ملخ‌های ساخته شده با فناوری چاپ سه بعدی را نشان می‌دهد. ملخ‌های ساخته شده از سه رنگ مختلف سفید، سیاه و آبی کم‌رنگ بودند. علت این تغییر رنگ، جنس ماده استفاده شده برای ساخت آن‌ها است.

جدول ۱ - مشخصات برگ افرای اسکن شده

پارامتر	سیمبل	مقدار
طول (mm)	x	۴۶/۸۲
کورد (mm)	c	۱۷/۳۱
وزن (grams)	m	۰/۱۵

جدول ۲ - مشخصات دستگاه اسکن سه بعدی

نوع سنسور	CMOS
نوع لنز	۱۶ میلیمتری
میدان دید	۲۴*۳۰ سانتی متر

شکل ۴ ملخ‌های ساخته شده با فناوری چاپ سه بعدی را نشان می‌دهد. ملخ‌های ساخته شده از سه رنگ مختلف سفید، سیاه و آبی کم‌رنگ بودند. علت این تغییر رنگ، جنس ماده استفاده شده برای ساخت آن‌ها است. ملخ‌های سیاه و آبی از جنس رزین نرم آمریکایی^۸ و ملخ‌های سفید رنگ از جنس پلی لاکتیک اسید^۹ تولید شدند. استفاده از دو جنس مختلف برای ساخت ملخ‌ها به ابعاد و اندازه آن‌ها مرتبط بود، زیرا قابلیت پرینت ملخ‌های کوچک با مواد پلی لاکتیک اسید امکان‌پذیر نبود. با توجه به این نکته که پرینتر استفاده شده توانایی پرینت زبری‌های روی سطح را به طور کامل نداشت، ملخ‌های ساخته شده از زبری سطح کمتری نسبت به برگ طبیعی برخوردار بودند.

جدیدی از ملخ‌ها و همچنین بهبود عملکرد سیستم‌های هوایی در کاربردهای مختلف منجر شود.

مواد و روش انجام آزمایش

این بخش مراحل طراحی و ساخت ملخ‌ها، تجهیزات استفاده شده و نحوه انجام آزمایش را به طور خلاصه بیان می‌کند. به منظور الهام‌گیری، تحلیل فیزیک چرخش، میانگین‌گیری و اسکن سه بعدی، تعدادی برگ خشک افرا مطابق شکل ۱ جمع‌آوری شد. مشاهدات نشان داد که شکل و هندسه تمامی برگ‌ها به هم شبیه بوده و تفاوت آن‌ها تنها در طول، عرض برگ‌ها و اندازه دانه آن‌ها است، همچنین تمامی برگ‌ها خاصیت چرخش خودکار را از خود نشان دادند. مراحل بعد با استفاده از نرم‌افزارهای گراف دیجیتال^۶ و اکسل، مشخصات انحنای برگ‌ها به دست آمد. سپس رسم و میانگین‌گیری از آن‌ها مطابق شکل ۲ انجام شد. به منظور اسکن سه بعدی برگ، به دست آوردن ابرنقاط و تولید هندسه در نرم‌افزار سالیدورکس، یکی از برگ‌ها انتخاب و مطابق شکل ۳ اسکن شد. جدول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات برگ و دستگاه اسکن سه بعدی را نشان می‌دهد. با استخراج ابرنقاط و تولید هندسه برگ نمونه در نرم‌افزار سالیدورکس، ابرفویل مقاطع مختلف برگ به دست آمد. با حذف دانه برگ، یک هاب به جای آن طوری طراحی شد که قابلیت نصب بر روی شفت موتور الکتریکی از نوع برانشلس^۷ ۶۳۰ KV را داشته باشد. جدول ۳ مشخصات این موتور الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - نمونه‌هایی از برگ‌های جمع‌آوری شده

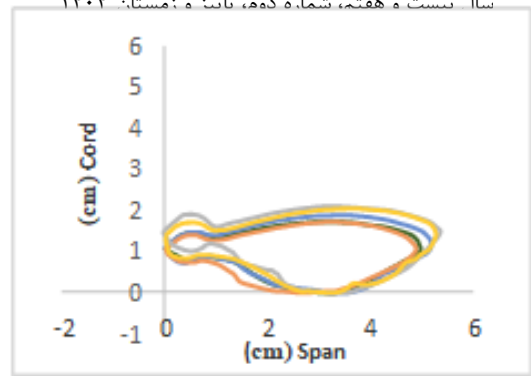
در در مرحله بعد، با الهام از فیزیک چرخش این برگ‌ها در طبیعت، ملخ‌های تک‌پره‌ای، دوپره‌ای و سه‌پره‌ای طراحی و

نحوه انجام آزمایش

آزمایش‌ها با هدف اندازه‌گیری و بررسی نیروی پیش‌ران تولیدی ملخ‌های ساخته شده در حالت استاتیکی در دمای تقریبی ۲۳ درجه سانتی‌گراد انجام شد. به همین منظور ابتدا یک استند با بازوهای افقی و عمودی از جنس چوب سبک به شکل L طراحی و ساخته شد. با هدف کاهش لرزش و خطا هنگام روشن کردن موتور الکتریکی، استند با استفاده از گیره‌های نگه‌دارنده به میز کار ثابت و در محل اتصال دو بازو به پایه، لولا شد. و برای کاهش اصطکاک در محل لولا، از دو بلبرینگ کوچک در طرفین استند استفاده گردید. ترازوی نوت پد دیجیتالی با دقت صدم گرم با چسب‌های دو طرفه روی میز کار و زیر بازوی افقی استند به‌گونه‌ای قرار داده شد که نقطه اثر نیروی وارد شده در مرکز صفحه ترازو اعمال شود. برای راه‌اندازی موتور الکتریکی براسلس، از یک منبع تغذیه که مشخصات آن در جدول ۴ آمده است و اسپید کنترل استفاده شد و برای کنترل دور موتور، از سروو موتور بهره گرفته شد. در قسمت بازوی عمودی استند، موتور و ملخ‌ها نصب شدند و در زیر بازوی افقی، ترازوی دیجیتالی قرار گرفت. اگر طول قسمت عمودی استند را Y و طول قسمت افقی آن را X در نظر بگیریم، استند طوری طراحی شد که $X=Y$ باشد. در هر مرحله، دور ملخ‌ها با استفاده از دورسنج لیزری که دقت آن یک دهم دور بر دقیقه است اندازه‌گیری و ثبت شد. به این ترتیب، نیروی پیش‌ران هر ملخ از طریق بازوها به ترازو منتقل و اندازه‌گیری شد. شکل ۵ تجهیزات و چیدمان آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

جدول ۴ - مشخصات منبع تغذیه استفاده شده

PW-3053D	مدل دستگاه
۳۰-۰ ولت	ولتاژ خروجی
۲۲۰ ولت متناوب	ولتاژ ورودی
۵-۰ آمپر	جریان خروجی
۵۰ هرتز	فرکانس
ال-ای-دی	صفحه نمایش



شکل ۲ - رسم داده‌های استخراج شده با اکسل



شکل ۳ - مراحل اسکن سه بعدی برگ نمونه

جدول ۳ - مشخصات موتور الکتریکی استفاده شده

۷۰ گرم	وزن
۶ میلیمتر	قطر استاتور
۴ میلیمتر	قطر شفت
۶۹۹۳ دور بر دقیقه	دور با باتری ۳ سل
۹۳۲۴ دور بر دقیقه	دور با باتری ۴ سل



شکل ۴ - ملخ‌های ساخته شده با استفاده از پرینتر سه بعدی

نشان می‌دهد که ملخ تک‌پره‌ای در سرعت‌های پایین نیروی کمتری نسبت به سایر ملخ‌ها تولید می‌کند و با افزایش سرعت چرخش ملخ به تدریج نیروی پیشران بیش‌تری ایجاد می‌کند. در سرعت‌های دورانی نزدیک به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، نیروی تولیدی بسیار کم و حدود ۰/۵ گرم است در سرعت‌های دورانی نزدیک به ۴۰۰۰ دور بر دقیقه، این ملخ حدود ۳ گرم نیرو تولید کرد که نسبت به ملخ‌های دیگر مقدار کمتری است. ملخ دوپره‌ای در تمامی سرعت‌های دورانی نیروی بیش‌تری نسبت به ملخ تک‌پره‌ای تولید کرد. در سرعت‌های دورانی نزدیک به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، نیروی تولید شده توسط این ملخ حدود ۰/۶ گرم است. با افزایش دور تا ۴۰۰۰ دور بر دقیقه، نیروی تولیدی به ۴ گرم می‌رسد که نشان دهنده یک افزایش قابل توجه است. ملخ سه‌پره‌ای در تمامی سرعت‌ها بیشترین نیروی پیشران را نسبت به سایر ملخ‌ها تولید کرد. نیروی پیشران تولیدی این ملخ در سرعت‌های دورانی نزدیک به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، حدود ۰/۷ گرم است، اما با افزایش دور تا ۴۰۰۰ دور بر دقیقه، مقدار پیشران به ۶ گرم می‌رسد. این مقدار پیشران به وضوح بیش‌تر از ملخ‌های یک و دو پره‌ای است.



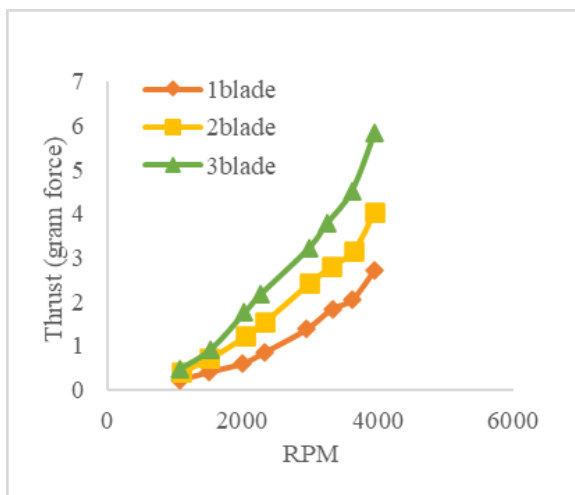
شکل ۵ - تجهیزات و چیدمان آزمایشگاهی

بحث و نتایج

درک تولید نیروی پیشران، از ارکان اصلی کاربرد آیرودینامیک در بخش‌های مختلف فناوری است. پس از نصب ملخ‌ها بر روی موتور الکتریکی، دورسنج لیزری و ترازوی دیجیتالی کالیبره شدند. سپس در هر دور مشخص، نیروی پیشران اندازه‌گیری و نمودار تغییرات نیروی پیشران بر حسب تغییرات دور برای هر ملخ رسم گردید. به منظور اطمینان از صحت نتایج، آزمایش‌ها سه بار تکرار شد و بیشترین اختلاف در نتایج در هر تکرار برای ملخ تک‌پره‌ای حدود ۸ درصد و برای سایر ملخ‌ها حدود ۶ درصد اندازه‌گیری شد.

اثر تعداد پره‌ها بر نیروی پیشران استاتیکی^۱ با تغییرات دور

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، میزان نیروی پیشران تولیدی با افزایش دور و تعداد پره‌ها، افزایش می‌یابد و ملخ‌ها عملکردی مشابه ملخ‌های مرسوم از خود نشان می‌دهند. این امر بدیهی است، زیرا هر پره اضافی سطح بیش‌تری برای برخورد با هوا ایجاد می‌کند و در نتیجه نیروی بیش‌تری تولید می‌شود. با این حال، افزایش تعداد پره‌ها می‌تواند بر بازده نیز تأثیرگذار باشد. اگرچه ملخ سه‌پره‌ای نیروی بیش‌تری تولید می‌کند، اما ممکن است در کاربردهای خاص به دلیل ایجاد مقاومت هوا، بازدهی کمتری داشته باشد. در سرعت‌های بسیار بالا، پره‌های بیش‌تر می‌توانند باعث افزایش اصطکاک شوند که ممکن است برای کاربردهای با سرعت بالا ایده‌آل نباشد. نتایج



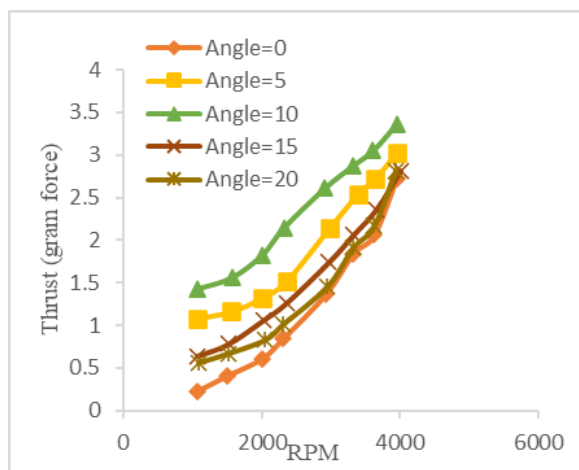
شکل ۶- اثر تعداد پره‌ها بر پیشران استاتیکی

اثر مقیاس کردن ملخ‌های دوپره‌ای بر پیشران استاتیکی با تغییرات دور

اثر مقیاس کردن در ملخ‌های دوپره‌ای با هدف این که ملخ‌های ساخته شده با الهام از برگ افرا تا چه مقیاسی از منظر تولید نیروی پیشران بهینه هستند، مورد بررسی قرار گرفت.

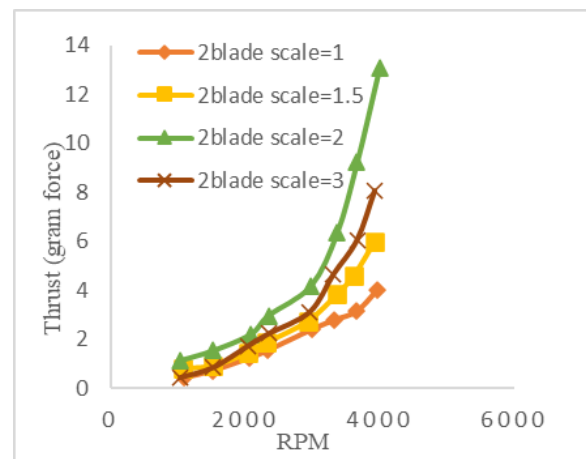
اثر زاویه مخروطی ملخ‌های دوپره‌ای در مقیاس ۱ بر پیشران استاتیکی با تغییرات دور

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود اثر زاویه مخروطی بر تولید نیروی پیشران استاتیکی ملخ‌های دوپره‌ای در مقیاس ۱ نشان داد که در زاویه مخروط صفر درجه، ملخ کمترین نیروی پیشران را در تمامی سرعت‌های دورانی تولید کرد، این وضعیت نشان‌دهنده کاهش شدید کارایی در این زاویه است، زیرا جریان هوا به طور بهینه از پره‌ها عبور نمی‌کند. با افزایش زاویه مخروطی، نیروی پیشران تولیدی افزایش می‌یابد؛ به ویژه در زاویه‌های ۵ تا ۱۰ درجه، این افزایش به طور قابل توجهی بهبود پیدا می‌کند. اثر زاویه ۱۰ درجه به طور خاص نشان داد که در سرعت‌های دورانی بیشتر از ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، نیروی پیشران به صورت پیوسته و قابل توجهی افزایش می‌یابد. این امر به دلیل بهبود جریان هوای عبوری از پره‌ها و هدایت بهتر جریان به سمت پایین است که منجر به انتقال مؤثرتر مومنتوم و افزایش نیروی پیشران می‌شود. با این حال، در زوایای بیش از ۱۰ درجه، نه تنها به بهبود بیش‌تر پیشران منجر نمی‌شود، بلکه به دلیل افزایش نیروی درگ و مقاومت هوا، کارایی ملخ کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد زاویه مخروطی باعث افزایش نیروهای مقاومتی می‌شود که مانع بهبود عملکرد در سرعت‌های بالاتر می‌گردند. نتایج نشان می‌دهد که زاویه‌های بین ۵ تا ۱۰ درجه بهینه‌ترین زوایا برای تولید بیشترین نیروی پیشران هستند و زاویه‌های بیش از ۱۰ درجه عملکرد پره‌ها را کاهش می‌دهد.



شکل ۸- اثر زاویه مخروطی ملخ‌های دوپره‌ای بر پیشران استاتیکی

چهار مقیاس مختلف (۱، ۱/۵، ۲ و ۳) از ملخ‌های دوپره‌ای ساخته و بررسی شدند. نتایج نشان داد که افزایش مقیاس پره‌ها منجر به افزایش قابل توجه در نیروی پیشران تولیدی، به ویژه در سرعت‌های دورانی بالا می‌شود. با این حال، افزایش مقیاس ممکن است با چالش‌های مکانیکی و درگ بیش‌تر همراه باشد. بررسی نتایج نشان داد که تغییر در مقیاس ملخ‌ها، نیروی پیشران را به طور چشم‌گیری تغییر می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، با مقیاس کردن ملخ‌های دوپره‌ای تا مقیاس ۲، نیروی پیشران افزایش می‌یابد، و ملخ در مقیاس ۳، برخلاف آنچه که تصور می‌شود، نیروی پیشران کمتری نسبت به مقیاس ۲ تولید کرد. یکی از دلایل کاهش پیشران در این مقیاس نسبت به مقیاس ۲، به تغییر در تولید فیزیک گردابه‌های تشکیل شده در لبه حمله ملخ‌ها مربوط می‌شود. در این مقیاس، ملخ نسبت به کوچک‌ترین برگ موجود در طبیعت، بیش از ده برابر در تمامی جهات مقیاس شده است؛ لذا در این مقیاس، مکانیسم تولید گردابه‌ها تغییر کرده و قوانین مقیاس‌ها حاکم می‌شود. بنابراین، دینامیک و فیزیک تولید گردابه‌ها تغییر کرده و بر نیروی پیشران اثر منفی می‌گذارد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش مقیاس پره‌های ملخ، به جز مقیاس ۳، به طور مستقیم منجر به افزایش نیروی پیشران در تمامی سرعت‌های چرخش می‌شود.



شکل ۷- اثر مقیاس کردن ملخ‌های دوپره‌ای بر پیشران استاتیکی

نتیجه گیری

منابع و مراجع

این مطالعه به بررسی و تحلیل ویژگی‌های آیرودینامیکی برگ‌های افرا و تأثیر آن بر طراحی ملخ‌های هوایی پرداخته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ملخ‌های طراحی شده با الهام از هندسه و ساختار آیرودینامیکی برگ‌های افرا دارای قابلیت بالایی در تولید نیروی پیشران هستند. این نوآوری در طراحی ملخ‌ها می‌تواند به پیشرفت‌های قابل توجهی در فناوری‌های هوایی منجر شود. یافته‌ها تأکید می‌کنند که تعداد پره‌ها و زاویه مخروطی به عنوان دو عامل کلیدی در بهبود عملکرد آیرودینامیکی ملخ‌ها عمل می‌کنند. افزایش تعداد پره‌ها به طور مستقیم منجر به افزایش نیروی پیشران می‌شود؛ با این حال، این افزایش می‌تواند با افزایش درگ همراه باشد که در سرعت‌های بالا به کاهش کارایی ملخ‌ها منجر می‌شود. تحلیل‌ها نشان داد که زاویه مخروطی بهینه در محدوده ۵ تا ۱۰ درجه بهترین توازن را بین تولید نیروی پیشران و کاهش درگ فراهم می‌کند. استفاده از زوایای بزرگ‌تر به دلیل افزایش نیروی درگ و تغییر در دینامیک جریان، تأثیر منفی بر عملکرد ملخ‌ها دارد. علاوه بر این، نتایج نشان‌دهنده این است که مقیاس کردن ملخ‌های دوطرفه‌ای باید با احتیاط انجام شود، زیرا استفاده از مقیاس‌های بزرگ‌تر از ۲ به طور قابل ملاحظه‌ای عملکرد آن‌ها را کاهش می‌دهد. در نهایت، این مطالعه به عنوان یک نقطه شروع برای تحقیقات آینده در زمینه طراحی ملخ‌های هوایی با الهام از طبیعت عمل می‌کند و می‌تواند به توسعه فناوری‌های نوین در این حوزه کمک نماید. نتایج این تحقیق می‌تواند به مهندسان و طراحان ملخ در بهینه‌سازی عملکرد و افزایش کارایی سیستم‌های هوایی کمک کند.

پی‌نوشت‌ها

- [1] D. S. Green, "the Terminal Velocity and Dispersal of Spinning Samaras," *Am. J. Bot.*, vol. 67, no. 8, pp. 1218–1224, 1980, doi: 10.1002/j.1537-2197.1980.tb07754.x.
- [2] D. Lentink, W. B. Dickson, J. L. Van Leeuwen, and M. H. Dickinson, "Leading-edge vortices elevate lift of autorotating plant seeds," *Science* (80), vol. 324, no. 5933, pp. 1438–1440, 2009, doi: 10.1126/science.1174196.
- [3] S. J. Lee, E. J. Lee, and M. H. Sohn, "Mechanism of autorotation flight of maple samaras (*Acer palmatum*)," *Exp. Fluids*, vol. 55, no. 4, 2014, doi: 10.1007/s00348-014-1718-4.
- [4] S. P. Sane, "The aerodynamics of insect flight," *J. Exp. Biol.*, vol. 206, no. 23, pp. 4191–4208, 2003, doi: 10.1242/jeb.00663.
- [5] B. Jung and D. Rezgui, "Investigating the autorotational performance of scaled samara rotor in vertical and forward flight," 42nd Eur. Rotorcr. Forum 2016, vol. 2, pp. 1252–1266, 2016.
- [6] D. Rezgui, I. H. Arroyo, and R. Theunissen, "Model for sectional leading-edge vortex lift for the prediction of rotating samara seeds performance," *Aeronaut. J.*, vol. 124, no. 1278, pp. 1236–1261, 2020, doi: 10.1017/aer.2020.25.
- [7] E. Limacher and D. E. Rival, "On the distribution of leading-edge vortex circulation in samara-like flight," *J. Fluid Mech.*, vol. 776, pp. 316–333, 2015, doi: 10.1017/jfm.2015.279.
- [8] "Pedersen, C. An indicial-Polhamus aerodynamic model of insect-like flapping wings in hover. *WIT Trans. State-Art Sci. Eng.* 2006, 4, 606–665."
- [9] D. Seter and A. Rosen, "Theoretical and experimental study of axial autorotation of simple rotary decelerators," *J. Aircr.*, vol. 51, no. 1, pp. 236–248, 2014, doi: 10.2514/1.C032305.

- ۱ Leading-edge vortices
- ۲ Jang et al.
- ۳ Lentink
- ۴ Cone angle
- ۵ Ortega-Jimenez et al.
- ۶ Get Data Graph Digitizer
- ۷ Brushless
- ۸ American soft resin
- ۹ Polylactic acid (PLA)
- ۱۰ Static thrust

- Biol. Rev. Camb. Philos. Soc., vol. 48, no. 4, pp. 561–596, 1973, doi: 10.1111/j.1469-185X.1973.tb01569.x.
- [19] N. Aydın, M. E. Caliskan, M. U. Sabirli, and I. Karagoz, “An experimental study of the aerodynamic performance of a maple wing model at low Reynolds numbers,” *Mech. Res. Commun.*, vol. 130, 2023, doi: 10.1016/j.mechrescom.2023.104104.
- [20] B. G. Kwon and M. H. Sohn, “Effects of the CG Positions on the Autorotative Flight of Maple Seeds,” *Int. J. Aeronaut. Sp. Sci.*, vol. 23, no. 2, pp. 241–254, 2022, doi: 10.1007/s42405-021-00436-1.
- [21] B. K. Jung and D. Rezgui, “Sectional Leading Edge Vortex Lift and Drag Coefficients of Autorotating Samaras,” *Aerospace*, vol. 10, no. 5, 2023, doi: 10.3390/aerospace10050414.
- [10] D. Seter and A. Rosen, “Study of the vertical autorotation of a single-winged Samara,” *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.*, vol. 67, no. 2, pp. 175–197, 1992, doi: 10.1111/j.1469-185X.1992.tb01018.x.
- [11] E. Salcedo, C. Treviño, R. O. Vargas, and L. Martínez-Suástegui, “Stereoscopic particle image velocimetry measurements of the three-dimensional flow field of a descending autorotating mahogany seed (*Swietenia macrophylla*),” *J. Exp. Biol.*, vol. 216, no. 11, pp. 2017–2030, 2013, doi: 10.1242/jeb.085407.
- [12] D. Lentink and M. H. Dickinson, “Rotational accelerations stabilize leading edge vortices on revolving fly wings,” *J. Exp. Biol.*, vol. 212, no. 16, pp. 2705–2719, 2009, doi: 10.1242/jeb.022269.
- [13] K. Yasuda and A. Azuma, “The autorotation boundary in the flight of samaras,” *J. Theor. Biol.*, vol. 185, no. 3, pp. 313–320, 1997, doi: 10.1006/jtbi.1996.0299.
- [14] A. Azuma and K. Yasuda, “Flight performance of rotary seeds,” *J. Theor. Biol.*, vol. 138, no. 1, pp. 23–53, 1989, doi: 10.1016/S0022-5193(89)80176-6.
- [15] V. M. Ortega-Jimenez, N. S. W. Kim, and R. Dudley, “Superb autorotator: Rapid decelerations in impulsively launched samaras,” *J. R. Soc. Interface*, vol. 16, no. 150, 2019, doi: 10.1098/rsif.2018.0456.
- [16] J. R. Holden, T. M. Caley, and M. G. Turner, “Maple seed performance as a wind turbine,” *53rd AIAA Aerosp. Sci. Meet.*, 2015, doi: 10.2514/6.2015-1304.
- [17] M. H. Sohn, “Effects of the configuration characteristics on the motion parameters of autorotating flight of plant seeds,” 2018.
- [18] R. A. Norberg, “Autorotation, self stability, and structure of single winged fruits and seeds (Samaras) with comparative remarks on animal flight,”