



E-ISSN: 2676-4253

Journal of Technology in Aerospace Engineering

Vol. 8, No. 4, pp. 39-48, 2024

<https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.4.4>

Journal Homepage: <https://jtae.ari.ac.ir>



Original Research Paper

Preliminary Performance Study and Technology Demonstrator of UAV Toroidal Propellers

Jamshid Fazilati

Associate Professor, Department of Aeronautical Science and Technology, Aerospace Research Institute, Ministry of Science Research and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 28 August 2023

Revised 23 October 2023

Accepted 13 November 2023

Available Online 13 November 2023

Keywords:

Toroidal propeller
Bladed propeller
Drone
FDM additive manufacturing
Thrust measurement
Rpm measurement
Propeller performance

ABSTRACT

Toroidal propellers are among the ideas recently introduced by MIT-Lincoln Center for aerial applications. It is claimed that this design significantly reduces the annoying noise level compared to the conventional bladed propellers by eliminating the fluid escape points at the blade ends. Due to the importance of reducing environmental footprint of flying robots, this design paradigm can be particularly advantageous wherever the noise pollution is a concern. This will result in the adoption of drones for various applications. In this study, with the aim of identifying this modern type of design, the process of prototyping and testing a set of the toroidal propellers has been carried out. The main functional parameter of interest in this study is thrust. For the sake of comparison, samples of common bladed propellers have also been produced and tested. As a quick and accessible method for prototyping, the propellers have been made by additive manufacturing using a 3D printer. In the assessment process, simultaneous measurement of the motor speed and thrust have been performed. Finally, performance graphs for all propellers have been extracted and compared. The results showed that the three-ring toroidal propeller with slightly more weight, provides more thrust than the conventional three-bladed propeller.

Corresponding Author's E-mail: jfazilati@ari.ac.ir

How to Cite this Article:

J. Fazilati, "Preliminary performance study and technology demonstrator of UAV toroidal propellers," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 39-48, 2024 (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.4.4>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





مطالعه عملکرد و اثباتگر فن آوری پروانه‌های حلقوی پهناد

جمشید فضیلتی 

دانشیار، پژوهشکده علوم و فناوری هوایی، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

چکیده

پروانه‌های (ملخ) حلقوی با مبدأ استفاده دریایی یکی از ایده‌هایی است که به‌تازگی توسط محققان مرکز لینکلن MIT برای کاربردهای هوایی معرفی شده‌است. ادعا شده‌است که این طراحی با حذف نقاط فرار سیال در انتهای تیغه‌ها، به‌طور قابل توجهی سطح نویز را در مقایسه با ملخ‌های متداول کاهش می‌دهد. با توجه به اهمیت کاهش آثار زیست‌محیطی وسایل پرنده، این نوع طراحی می‌تواند به‌ویژه در محیط‌های شهری مفید باشد و پذیرش پهنادها را برای کاربرد تسهیل کند. در این مطالعه، باهدف شناسایی این نوع طراحی، فرایند نمونه‌سازی و آزمون نوعی از این پروانه انجام گرفته است. پارامتر عملکردی اصلی مورد توجه در این مطالعه نیروی پیش‌ران (تراست) است. جهت ایجاد بستری برای مقایسه، نمونه‌هایی از پروانه‌های متداول تیغه‌ای نیز تولید و آزموده شده‌است. به‌عنوان یک روش سریع و در دسترس برای نمونه‌سازی، ساخت نمونه‌های پروانه به روش تولید افزایشی و با استفاده از چاپگر سه‌بعدی انجام شده‌است. در اجرای آزمون، اندازه‌گیری هم‌زمان دور چرخش موتور و تراست پروانه انجام شده‌است. در نهایت نمودارهای عملکردی برای تمام پروانه‌ها استخراج و مقایسه شده‌است. نتایج این مطالعه نشان داد که پروانه حلقوی سه حلقه با وزن کمی بیشتر، تراست بیشتر از پروانه متداول سه‌تیغه ارائه می‌کند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۶ شهریور ۱۴۰۲
بازنگری ۱ آبان ۱۴۰۲
پذیرش ۲۲ آبان ۱۴۰۲
اولین انتشار ۲۲ آبان ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

پروانه حلقوی
پروانه متداول
پهناد
چاپ سه‌بعدی
اندازه‌گیری تراست
اندازه‌گیری دور موتور
عملکرد پروانه

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: jfazilati@ari.ac.ir

How to Cite this Article:

J. Fazilati, "Preliminary performance study and technology demonstrator of UAV toroidal propellers," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 39-48, 2024 (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.4.4>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



۱ مقدمه

امروزه کاربرد پهپادهای چندروتوره عمودپرواز که کاملاً به نیروی رانش ملخ (پروانه) برای ثابت ماندن و مانور در ارتفاع متکی هستند در طیف وسیعی از کاربردها شامل فیلم برداری عمومی، بازرسی صنعتی، نظارت هوایی، حمل و نقل و تحویل هوایی و مخابراتی و شناسایی گسترش یافته است. افق‌های گسترده‌تری نیز در این حوزه‌ها برای آینده نه چندان دور متصور هستیم. یکی از مهم‌ترین چالش‌های این ابزارهای هوایی تولید نویز و آلودگی صوتی و بصری به‌ویژه در محیط‌های شهری و کاربری‌های نظامی است. بدیهی است که کاهش آثار جانبی زیست‌محیطی این وسایل کمک شایانی به افزایش کاربردهای آن در محیط‌های انسانی خواهد داشت. دو منبع اصلی نویز صوتی در این ابزارها شامل نویز مکانیکی (ناشی از قطعات گردنده موتور) و ایرودینامیکی (ناشی از حرکت پروانه) است. در شرایط استفاده از موتورهای الکتریکی برق مستقیم دارای کنترلر (موسوم به براشلس brushless DC motor) نویز موتور سهم کمتری در آلودگی کلی دارد. چالش‌های مرتبط با نویز در این پرنده‌ها محققان و علاقه‌مندان را به سمت ایده‌پردازی برای طرح‌های جدیدتر سوق داده است. برای مثال تکنیک‌هایی شامل تغییر در هندسه (مانند پروانه زیپ‌لاین) برای کاهش یا تغییر محدوده فرکانسی نویز استفاده شده است. یکی از طرح‌هایی که از این منظر معرفی شده است، طرح پروانه‌های با تیغه‌های حلقوی یا به اختصار پروانه‌های حلقوی (toroidal propellers) است. از سوی دیگر در دهه اخیر گسترش دانش در حوزه ساخت و تولید و در دسترس قرار گرفتن روش‌های تولید سریع، جنبش بزرگی در تمام شاخه‌های صنعتی ایجاد کرده است. این پویایی از این جهت است که فرایند نمونه‌سازی و توسعه قطعات بسیار تسهیل شده است و با کم‌ترین هزینه مالی و زمانی قابل انجام است. یکی از روش‌های تولید سریع که امروزه حتی در سطح خانگی در دسترس محققان قرار گرفته است، روش چاپ سه‌بعدی است. این روش از جمله روش‌های ساخت افزایشی^۱ است و تکنیک‌های متفاوتی شامل تکنیک FDM، SLA و SLS دارد.

آندریا و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱] پروانه‌هایی از نوع متداول را مدل‌سازی و با ابزارهای دینامیک سیالات محاسباتی از نظر تراست تولیدی ارزیابی کرده‌اند. این نمونه‌ها با استفاده از چاپ سه‌بعدی و از ماده ABS ساخته و تحت آزمون استحکامی در سرعت‌های عملیاتی و اندازه‌گیری نیروی رانش قرار داده شد. این نتایج با شبیه‌سازی مقایسه شده است. بنا بر نتایج این مطالعه، با توجه به این

که در توسعه پروانه جدید، مراحل تولید قالب تا تزریق بسیار پرهزینه است، زمان صرف‌شده برای ساخت پروانه از طریق چاپ سه‌بعدی قابل قبول است. بر اساس مطالعه ایرودینامیک، بخشی از تیغه که بیشترین تأثیر را بر رانش می‌گذارد، قسمت نزدیک به نوک آن است و نیز با تغییر زاویه حمله و وتر تیغه، رانش بزرگ‌تری به دست می‌آید. ایشان پیشنهاد کردند ماده ترکیبی نایلون و فیبر کربن که فشرده‌تر و سبک‌تر است استفاده شود. همچنین ایشان بر اهمیت ناهمواری سطح در کاهش قابل توجه نیروی رانش تأکید کرده‌اند. در همین سال، بیسواس و همکاران [۲] به موضوع مدل‌سازی و پیش‌بینی خرابی‌های احتمالی قطعات ساخته شده به روش چاپ سه‌بعدی از ماده ABS پرداخته‌اند. روش تولید FDM معایبی مانند تخلخل و اتصال بین لایه‌های ضعیف به دلیل گرادیان حرارتی دارد که منجر به شکست ناخواسته قطعه در حین استفاده می‌شود. فرایند تولید عملکرد یک مدل پروانه هواپیمای بدون سرنشین به صورت عددی در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است. نتایج تحلیل نشان داده است که ملخ چاپ‌شده نسبت به پروانه قالبگیری شده سطح تنش بالاتری در سراسر هندسه دارد که باعث می‌شود بیشتر در معرض شکستگی قرار گیرد. تحقیقات محققان آزمایشگاه لینکلن دانشگاه MIT آمریکا در موضوع نویز سامانه پیشران هوایی، منتج به ایده‌پردازی پروانه‌هایی با ساختار حلقوی برای کاربری هوایی شده است. مبنای این ایده نمونه‌هایی تاریخی از پروانه‌های حلقوی بوده است که کاربری دریایی داشته‌اند. این ایده به ساخت نمونه‌هایی از پروانه حلقوی تا شعاع ۲۰ سانتی‌متر منتهی شد که تحت آزمون‌های عملی قرار گرفتند و نتایج امیدوارکننده آن در سال ۲۰۲۰ به‌عنوان نوآوری با نام پروانه حلقوی (toroidal propellers) به ثبت رسیده است [۳]. نمونه بررسی کارکردی این طراحی در شکل ۱ ارائه شده است. این ایده مورد توجه علاقه‌مندان تفریحات هوایی قرار گرفته است لیکن از منظر علمی فعالیت قابل توجهی در راستای توسعه چنین مدل‌هایی از پروانه مشاهده نمی‌شود. سوالات زیادی هنوز وجود دارد و فرایند استاندارد پژوهشی در این توسعه طی نشده است. انگیزه اولیه ارائه این ایده این بوده است که استفاده از این نوع هندسه می‌تواند به کاهش آثار زیست‌محیطی به‌ویژه نویز کمک کند. لیکن امیدواری به افزایش ایمنی پروانه به دلیل هندسه خاص آن نیز به وجود آمده است. به عبارت دیگر تلقی این است که در صورت برخورد هر مانعی با این نوع پروانه، بدون نیاز به وجود حلقه حفاظتی در محیط دیسک پروانه، بسته‌بودن محیط پروانه حلقوی خودبه‌خود ضربه را به یک نیروی فشاری تبدیل می‌کند و

تغییرپذیری افزایش می‌یابد. تغییرات در یک اجرا قابل توجه و از مرتبه ۲dBA است. دو پژوهش اخیر اهمیت نویز پرنده‌های بی‌سرنشین شهری را نشان داده است اما به موضوع طراحی پروانه ورود نکرده است.

شیما، سوسامی و فوجی‌موتو [۸] طی یک پژوهش پروانه‌ی حلقوی معرفی کردند. ایشان بر اهمیت کم‌صدا شدن فناوری‌های هوایی شهری در آینده تاکید کرده‌اند. به‌منظور دستیابی به سطح پایین‌تری از نویز، ایشان نمونه اولیه‌ای از ملخ حلقوی-شکل نوآورانه خود را به نام Loopprop طراحی کرده‌اند. سپس ویژگی‌های پروانه در آزمایش‌های ساده بر روی نمونه ساخته شده تأیید شده است. در طراحی هندسه پروانه حلقوی، از منحنی‌های مسأله معروف طناب آویخته در راستای نیروهای گریز از مرکز استفاده شده است (شکل ۲). به‌عنوان نتیجه، پروانه طراحی شده نسبت به طراحی متناظر تیغه‌ای عملکرد مشابهی داشته است اما کاهش نویز به میزان ۲ تا ۵ دسی‌بل در همان سرعت چرخش گزارش شده است.

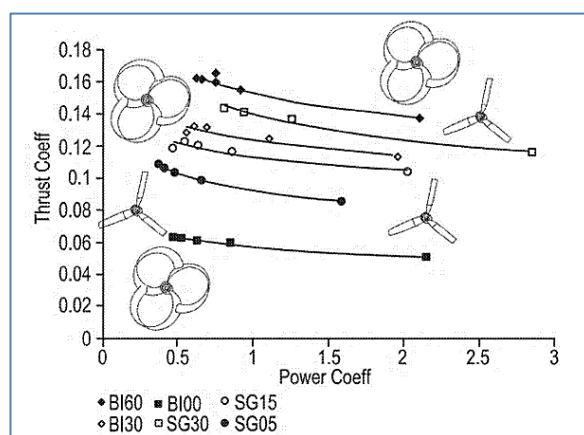


شکل ۲- نمونه‌ی ساخته شده و تحت آزمون پروانه حلقوی شیما و همکاران [۸]

سان و همکارانش [۹] در مقاله‌ای عملکرد آیرودینامیکی و اثر صوتی پروانه پرنده چندروتوره را با تمرکز بر اثر زاویه تابیدگی (twist) تیغه ارائه کرده‌اند. دو نمونه حلقوی در کنار سه نمونه تیغه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی برای بررسی و مقایسه عملکرد آیرودینامیکی و کاهش نویز پروانه وابسته به پیچش طولی در تیغه‌ها انجام شده است. تاکید این مطالعه بر نقش مهم تابیدگی تیغه در تغییر ویژگی‌های هواآکوستیک پروانه بوده است. نتایج نشان داده است که انواع حلقوی مورد بررسی، مزیت صوتی دارند اما مزیت عملکردی خاصی ارائه نکرده‌اند.

مرکز هوافضای آلمان (DLR) به‌همراه آژانس محیط زیست آلمان (UBA) آزمایش‌های پروازی برای اندازه‌گیری سطوح انتشار صدا در انواع مختلف پهپادها در حال پرواز انجام داده است. از این آزمون‌ها توصیه‌هایی برای استانداردسازی ارائه شده است. این تحقیق قصد داشته که راه را برای افزایش پذیرش هواپیماهای بدون

مانع از آسیب شدید به مانع می‌شود. همچنین باتوجه‌به نوع توزیع جرمی تیغه‌ها، پیش‌بینی دیگر این است که باتوجه‌به اتصال انتهای تیغه‌های پروانه به یکدیگر، یک ساختار مستحکم‌تر ایجاد می‌شود که احتمالاً خواص ایروالاستیک بهتری به‌دست دهد، لیکن مستند مطالعاتی در این زمینه در مجلات مشاهده نشده است.



شکل ۱- نتایج ارزیابی کارکرد یک نمونه پروانه حلقوی [۳]

یک ارزیابی اولیه نیز این است که این نوع ساختارهای حلقوی نوعاً باعث افزایش جرم پروانه می‌شود و حداکثر تا شعاع پروانه ۴۵ سانتی‌متر بازدهی خواهد داشت [۴]. در تحقیق دیگری [۵] ادعا شده است که طرح حلقوی پروانه با افزایش قابل پذیرش وزن پروانه، بدون افزایش توان مصرفی آن و بدون کاهش مهم در نیروی رانش، نویز صوتی را در محدوده فرکانسی که گوش انسان حساس‌تر است، کاهش می‌دهد. در آن مطالعه یک طرح ارائه شده است که شدت صوت آن کمی کم‌تر از پروانه‌های متداول (تیغه‌ای) است و سطح نویز صوتی آن در محدوده ۱ تا ۵ کیلوهرتزی که محدوده حساس‌تر برای گوش انسان است، پایین‌تر است. کریستین و کابیل [۶] نتایج یک آزمایش اولیه روان‌آکوستیک انسانی را در حوزه مزاحمت ایجاد شده توسط نویز پرنده‌های شهری کوچک ارائه داده‌اند. ایشان نشان دادند که بیشترین آزردهگی صوتی در محدوده ۱ تا ۵ کیلوهرتز رخ می‌دهد و اگر به‌توان اصوات نویز را در این محدوده کنترل کرد، بیشترین تاثیرگذاری را خواهد داشت. با فرض سطح صدای یکسان، در حال حاضر پهپادهای چندموتوره نسبت به وسایل نقلیه زمینی آزردهگی بیشتری برای گوش انسان ایجاد می‌کنند که مقایسه‌ای در آن مطالعه ارائه شده است. کانزل و گرین وود [۷] نیز در پژوهشی آلاینده‌گی و آثار صوتی پهپادهای چندروتوره را از روی زمین اندازه‌گیری و گزارش کردند. بر اساس یافته‌ها نویز صوتی از لحاظ تونال و پهنای باند قابل توجه هستند، اما اهمیت نسبی آن‌ها به زاویه مشاهده بستگی دارد. با افزایش فاصله بین میکروفون و هواپیما،

عملکرد، پروانه‌هایی با ساختار متداول تیغه‌ای نیز آماده‌سازی، ساخته و آزموده شده‌است. با راه‌اندازی تجهیز مناسب، اندازه‌گیری تغییرات تراست با دور برای هر یک از محصولات انجام شده‌است و نتایج آن مورد تحلیل قرار گرفته است. لازم به ذکر است در تحقیقات گزارش شده پیشین (منابع مکتوب بررسی شده)، پارامتر جرم پروانه لحاظ نشده‌است. در مطالعه حاضر اثر این پارامتر نیز لحاظ شده و تحلیل‌هایی بر مبنای آن ارائه می‌شود.

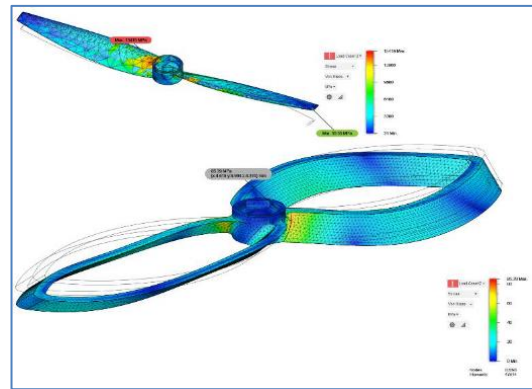
۲ طراحی و ساخت نمونه‌ها و ابزار آزمون

در طراحی پروانه پهنادهای عمودپرواز چندروتوره، پارامترهای مختلفی می‌تواند تغییر داده شود. لیکن از مهم‌ترین پارامترهای هر پروانه، قطر آن است. در این تحقیق قطر خارجی هر پروانه ۶ اینچ (۱۵ سانتی‌متر) در نظر گرفته شده‌است. ضخامت پروانه ۱۰ میلی‌متر است. هاب پروانه به قطر ۲۲ میلی‌متر با کانال محوری قطر ۶/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. تعداد تیغه‌ها نیز تغییر داده شده‌است. در این بخش مراحل و مشخصات ساخت مدل عددی، تولید نمونه و آماده‌سازی تجهیز آزمون توصیف شده‌است.

۱.۲ طراحی

تولید هندسه در نرم‌افزار تجاری سالیدورکز^۱ انجام شده‌است. باتوجه‌به این که تولید هندسه حلقوی نسبت به نوع متداول آن پیچیدگی بیشتری دارد و طراحی آن روشمند نیست، تولید مدل پروانه‌ها صرفاً به گونه‌ای انجام شده‌است که تا جای ممکن قیاس معناداری بین نوع حلقوی و نوع تیغه‌ای برقرار باشد و این دو قابل مقایسه باشند. همچنین باتوجه‌به اهداف مقایسه‌ای این مطالعه، برای طراحی پروانه‌ها فرایند طراحی پروانه انجام نشده و یک ترکیب ساده مد نظر قرار گرفته است. از هندسه ایرفویل سری چهاررقمی ناکا ۴۴۱۲ برای مقاطع تیغه‌ها در هر دو ترکیب پروانه استفاده شده‌است. این مقاطع در چهار شعاع مشخص تعریف شده‌است و در سایر نقاط و محدوده میانی این مقاطع با استفاده از دستور loft تخمین زده شده‌است. این مقاطع در شعاع‌های ۴، ۳۰، ۵۵ و ۷۵ میلی‌متری از محور قرار داده شده‌است. جهت افزایش استحکام تیغه‌ها، در شعاع ۴ م.م. از مقطع ۴۴۱۵ استفاده شده‌است. برای تولید نمونه‌های حلقوی، مقاطع در مختصات قطبی انتقال زاویه‌ای نیز داده شده‌است. مطابق جدول ۱، اندازه وتر و زاویه حمله مقطع تیغه‌ها در مقاطع هم شعاع، برابر در نظر گرفته شده‌است. صرفاً در شعاع بیرونی و شعاع داخلی (اتصال به هاب) تغییرات کمی از منظر اندازه وتر و ضخامت

سرنشین در فضای زیست همگانی هموارتر کند و با به اشتراک گذاشتن نتایج آزمایش‌های پرواز صوتی توصیه‌هایی را برای مقررات و استانداردهای جدید برای اندازه‌گیری صدای پهناد در آینده ارائه کند [۱۰]. در سال ۲۰۲۲، مالیم و همکاران [۱۱] طراحی و تحلیل سازه تیغه پروانه با هسته ترموپلاستیک چاپ‌شده را برای پهنادهای ارتفاع بالا انجام داده‌اند. یک مدل ماده همسانگرد برای ماده چاپ‌شده استفاده شده که ضرایب آن بر مبنای آزمون‌های استاندارد کشش و خمش استخراج شده‌است. تأثیر پارامترهای چاپ مانند جنس ماده و ضخامت لایه‌گذاری دیده شده‌است. مدل عددی همسانگرد به‌خوبی قادر به پیش‌بینی تغییرشکل کششی و خمشی بوده است. ایشان امکان ساخت پروانه‌های بزرگ مقیاس را به این روش از منظر تحمل تنش تایید کرده‌اند. یون و سیمون [۱۲] در سال ۲۰۲۳ یک کوادکوپتر با ملخ‌های حلقوی ساخته شده با استفاده از فناوری چاپ سه بعدی طراحی کرده و ساختند. سپس ارزیابی عملکرد آن را انجام داده‌اند. ایده این بوده است که بازده آیرودینامیکی پروانه حلقوی در مقایسه با انواع متداول بهتر است. مدل پروانه حلقوی از جنس ASA با استفاده از روش اجزای محدود تحلیل شده‌است. ماده تحمل دور بالا را نداشته است و وزن نمونه تولیدی نسبت به نمونه متداول بیشتر بوده است اما تراست بیشتری تولید کرده است. شکل ۳ نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق را ارائه کرده است.



شکل ۳- تحلیل اجزای محدود دو نمونه‌ی پروانه ساخته شده از جنس ASA [۱۲]

در این مطالعه با هدف معرفی و شناسایی رفتار پروانه حلقوی و مقایسه کارایی آن با طرح‌های متداول تیغه‌ای، فرایند ایجاد هندسه، ساخت و آزمون چند نمونه پروانه از نوع حلقوی اجرا شده‌است. ساخت نمونه‌ها با استفاده از فن آوری پرینت سه‌بعدی از نوع FDM انجام شده‌است. عملکرد پروانه‌های نمونه‌سازی شده از منظر تراست تولیدی مورد آزمون قرار گرفته است. جهت مقایسه

۲.۲ ساخت نمونه‌ها

باتوجه به در دسترس قرارگرفتن روش‌ها و فن‌آوری نمونه‌سازی سریع به ویژه دستگاه‌های چاپ سه‌بعدی در دهه اخیر، نمونه‌سازی ایده‌ها به راحتی قابل اجرا است در حالی که تا قبل از آن این امر بسیار پرهزینه بود. در این مطالعه نیز جهت نمونه‌سازی از فن‌آوری ساخت افزایشی لایه‌ای چاپ سه‌بعدی از نوع FDM استفاده شده‌است. چاپگر مورد استفاده از نوع Keytec M230 موجود در محل آزمایشگاه سازه‌های هوشمند و ایروالاستیسیته بوده است. ساخت نمونه‌ها با استفاده از مواد نیمه‌سنتزی PLA از برند HE انجام گرفته است. به‌صورت نوعی، خواص مکانیکی ماده PLA مطابق جدول ۲ است.

جدول ۲- مشخصات نوعی مکانیکی PLA [۱۳]

خواص	مقدار	واحد
استحکام مکانیکی	۳۵/۶	MPa
مدول کششی	۳/۴۲۰	GPa
استحکام خمشی	۸۵/۲	MPa
مدول خمشی	۲/۳۷۸	GPa
چگالی	۱۲۴۰	Kg/m ³
کرنش شکست کششی	۴/۲	%

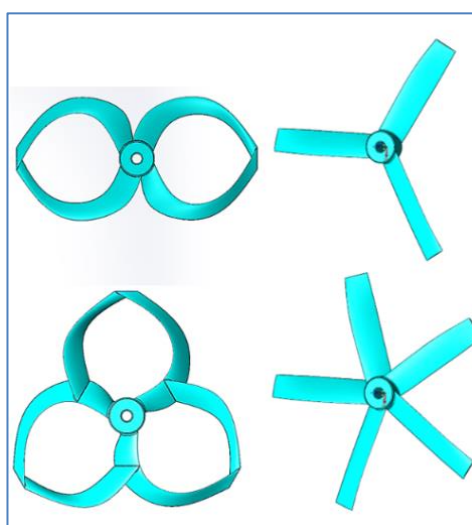
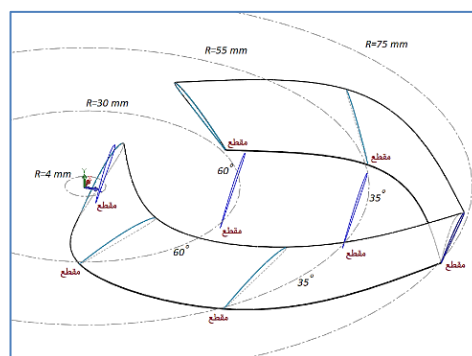
مدل‌های ساخته شده با استفاده از نرم‌افزار لایه‌بندی کیورا^۱ به gcode ورودی دستگاه چاپ تبدیل شده‌است. چاپ در حضور تکیه‌گاه هندسی و با ارتفاع لایه ۱۲۰ میکرون و تنظیمات پرشدگی کامل انجام شده‌است. چهار لایه دیواره در نظر گرفته شده‌است. به‌طور متوسط به ازای هر تیغه حدود ۴۰ دقیقه زمان پرینت پیش‌بینی شد. به‌عبارت دیگر برای پروانه سه تیغه حدود ۱۲۰ دقیقه زمان چاپ صرف می‌شود. نمونه‌های تولید شده به روش چاپ سه‌بعدی پس از جداسازی قطعات کمکی تکیه‌گاه چاپ، نیازمند بررسی و اجرای فرایند سطحی هستند. به دلیل طبیعت فن‌آوری و نوع مواد مورد استفاده در روش ساخت لایه به لایه سطوح به‌صورت پلکانی تولید می‌شود. بنابراین افزایش کیفیت سطح تولیدی در وهله اول نیازمند کاهش ارتفاع لایه‌گذاری است که خود به افزایش زمان ساخت می‌انجامد. همچنین خود فن‌آوری FDM نیز محدودیت دقت دارد. لذا به هر حال تمام سطوح بر اساس مقدار ارتفاع لایه‌گذاری دارای ناهمواری خواهد بود. مقدار اسمی این ناهمواری برابر است با

مقطع جهت ایجاد امکان اتصال اعمال شده‌است. سایر داده‌های ضروری ساخت مدل نیز در جدول ۱ ارائه شده‌است.

جدول ۱- مشخصات تولید هندسه پروانه

مقطع	۱	۲	۳	۴
موقعیت از محور	۴ م.م	۳۰ م.م	۵۵ م.م	۷۵ م.م
زاویه حمله	۳۰	۳۰	۳۰	۱۵
وتر ایرفویل	۱۳/۴۵	۱۷/۳۰	۱۷/۳۰	۱۴/۳۵
انتقال زاویه‌ای	-۱۵ و +۵۰	±۶۰	±۳۵	۰

دو مدل حلقوی به ترتیب با ۲ و ۳ حلقه و دو مدل پروانه تیغه‌ای با به ترتیب ۳ و ۵ تیغه ساخته شده‌است. نمایشی از فرایند تولید هندسه و نیز مدل‌های نهایی ساخته‌شده در شکل ۴ ارائه شده‌است.



شکل ۴- الگوریتم تولید هندسه (بالا) و هندسه تولیدشده پروانه حلقوی و متداول

۳.۲ مشخصات تجهیز آزمون

تجهیزی شامل المان لودسل جهت سنجش مقدار تراست تولیدی پروانه و المان دورسنج جهت اندازه‌گیری دور موتور استفاده شده‌است. از طریق یک صفحه نمایش دوخطی با نرخ به‌روزرسانی ۲ ثانیه، نتایج اندازه‌گیری‌ها مشاهده می‌شود. همچنین داده‌ها از طریق رایانه ثبت می‌شود. کنترل دور موتور از طریق اسپیدکنترلر با استفاده از یک تیونر دستی (مقاومت متغیر) انجام شده‌است. شکل ۷ نسخه گرافیکی از ستاپ آزمون را ارائه کرده است.

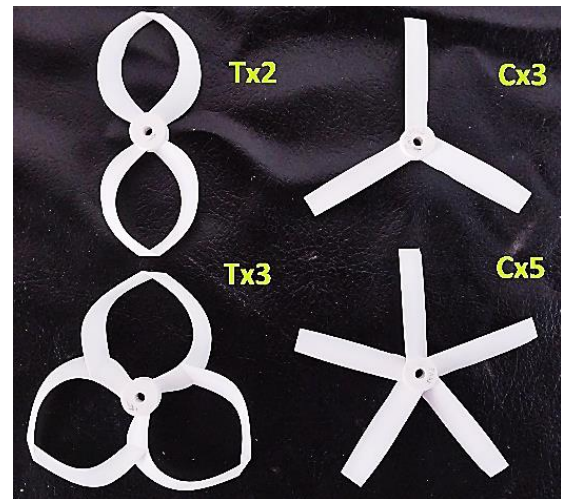


شکل ۷- پروانه حلقوی بر روی موتور، تیونر کنترلر موتور و نمایش داده بر روی صفحه نمایشگر (تصویر شماتیک)

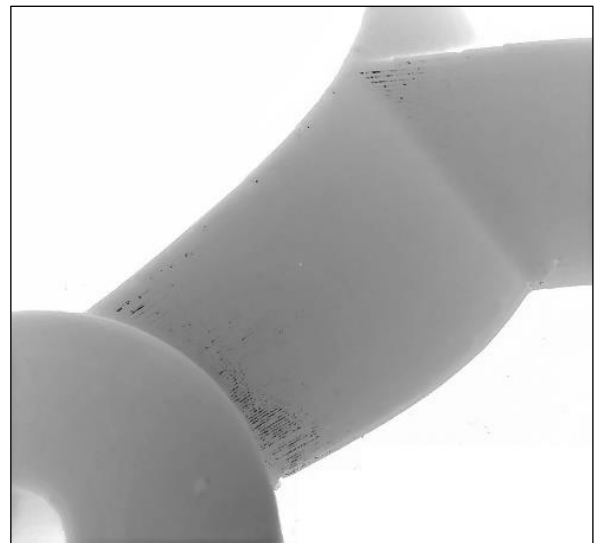
۳ نتایج آزمون عملی

در اجرای فرایند آزمون، از یک تیونر دستی (مقاومت متغیر) برای کنترل دور موتور استفاده شده‌است. این کنترل عملاً غیر قابل تکرار است و نمی‌توان بر اساس موقعیت تیونر مقدار تراست مشخصی را تنظیم نمود. بنابراین عملاً امکان اندازه‌گیری نتایج عملکرد پروانه‌ها در دوره‌های موتور مشخص وجود نداشت. همچنین توجه شود که با تغییر پروانه، ارتباط دور موتور و تیونر تغییر خواهد داشت. لذا باتوجه به این موارد، آزمون‌ها به صورت مجزا انجام شده‌است و در هر کدام با توقف کوتاه در موقعیت‌های خاصی از تیونر، مقدار دور موتور و تراست (پس از رسیدن به تعادل)، ثبت شده‌است. در ستاپ آزمون از موتور برائلس با مشخصات Leopard Hobby LC3536-1520 kv متصل به اسپیدکنترلر مدل Hobbywing SkyWalker 50A 2-4S است. نتایج اجرای آزمون برای چهار مدل مورد بررسی در نمودار شکل ۸ به صورت منحنی عملکرد ارائه شده‌است. علاوه بر این نتایج آزمایشگاهی عملکرد یک نوع پروانه تجاری با کد HQ 6x4.5 بر روی موتور Leopard Hobby PHS2307 2400kv از مرجع [۱۴] استخراج و با هدف مقایسه

که در آن $h \cdot \cos q$ ارتفاع لایه و q زاویه سطح است. بر اساس ارتفاع لایه‌گذاری ۱۲۰ میکرونی تنظیم شده در این فرایند حداکثر ناهمواری سطح را می‌توان کمتر از این مقدار دانست. همچنین ناهمواری‌هایی در نقاط سقف (نقاط تلاقی با قطعات تکیه‌گاه) وجود خواهد داشت. برای کاهش این ناهمواری از روش سنباده‌زنی دستی استفاده شده‌است. بر این اساس با استفاده از دو مرحله سنباده‌زنی نمره مناسب، ناهمواری‌های سطوح بالا و زیر تیغه‌ها زدوده و لبه حمله پردازش شده‌است. مناسب‌سازی سطح تا رسیدن به سطح هموار (بر مبنای درک لمسی) انجام شده‌است. شکل ۵ پروانه‌های تولید و آماده شده و شکل ۶ تصویری از نتیجه کیفیت سطح پیش از آزمون را نمایش داده است.



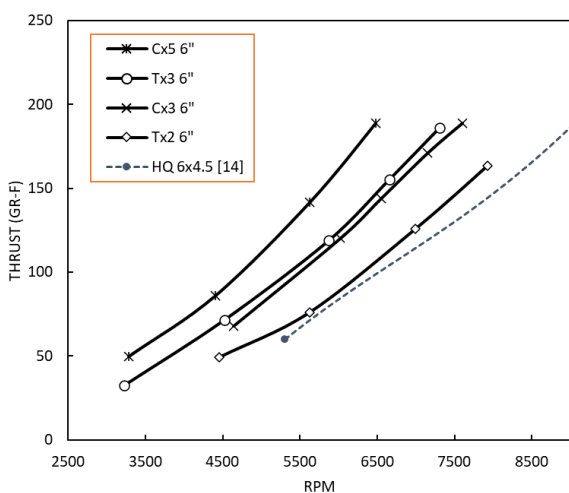
شکل ۵- نمونه‌های آماده شده برای آزمون



شکل ۶- نمونه‌ی سطح پردازش شده پیش از آزمون (inverted color)

مقایسه در حالت تراست افقی و بر مبنای وزن پروانه مد نظر قرار گرفته است.

جرم پروانه حلقوی با دو و سه حلقه به ترتیب ۹ و ۱۰ گرم و جرم پروانه ۵ و ۳ تیغه متداول ۱۰ و ۷ گرم است. جرم پروانه ۲ تیغه استاندارد HQ 6x4.5 بر اساس جنس تولید آن متفاوت است که در اینجا مقدار ۴.۷ گرم در نظر گرفته می‌شود [۱۵]. به عبارت دیگر از نظر وزنی، پروانه Tx3 حدود ۴۲٪ سنگین‌تر از پروانه Cx3 است اما تراست ۵٪ بالاتر از آن ارائه داده است. لذا مطابق نمودار شکل ۱۰، نمونه Cx3 نسبت تراست به جرم بالاتری ارائه می‌کند. بر اساس این نتایج از میان پروانه‌های مورد آزمون، پروانه Cx3 بهترین وضعیت را دارد و بسیار نزدیک به پروانه دیگر متداول یعنی Cx5 است. این نتایج صرفاً وضعیت نمونه‌های طراحی شده در این مطالعه را نشان می‌دهد که اصولاً به دلیل هاب نسبتاً بزرگ، سنگین‌تر از حالت بهینه هستند. به عبارت دیگر بهینه‌سازی بخش مرکزی پروانه احتمالاً می‌تواند اختلاف نتایج این بخش را کمی بیشتر کند.



شکل ۸- منحنی عملکرد پروانه‌های مورد بررسی



شکل ۹- پروانه استاندارد دو تیغه HQ 6x4.5 [۱۵]

در نمودار نمایش داده شده است. این پروانه از نوع متداول با تعداد دو تیغه با قطر خارجی ۱۵۲ میلی‌متر و گام ۴/۵ اینچ است. هاب این پروانه به قطر ۱۴/۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷/۴ میلی‌متر است. در شکل ۹ نمایشی از هندسه این پروانه ارائه شده است.

باتوجه به عدم وجود داده‌های استحکامی ماده مورد استفاده در این تحقیق و عدم امکان انجام بازرسی کیفیت ساختار درونی قطعات، استخراج نتایج در دوره‌های بالا به دلیل احتمال شکست پروانه مخاطره‌آمیز است. تخمین حد تحمل پروانه‌ها به جز با انجام یک آزمون تخریبی ممکن نیست. لذا به این دلایل فنی، استخراج داده تا حداکثر تراست حدود ۲۰۰ گرم انجام شده است. بدیهی است برای استفاده عملی از پروانه‌ها که نیازمند دور گردش بالاتر است، انجام آزمون‌های استقامتی ماده نیز ضروری است. لذا مقایسه در محدوده پایین عملکردی انجام شده است.

با مقایسه نتایج مشخص است که کارایی پروانه حلقوی با ۳ حلقه (Tx3) نسبت به مدل پروانه متداول سه تیغه (Cx3) اختلاف کمتر از ۵٪ دارد و بسیار مشابه است. لذا این تیغه می‌تواند از منظر تولید تراست جایگزین پروانه ۳ تیغه شود. نتایج تراست مدل پروانه دو حلقه (Tx2) کمترین مقادیر و ۴۳ درصد کمتر از مقادیر مربوط به بهترین پروانه است. میزان تراست تولیدی پروانه متداول ۵ تیغه (Cx5) بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده است. در دور ثابت مقدار تراست تولیدی از زیاد به کم عبارت از پروانه Cx5، سپس Tx3، سپس Cx3 و در نهایت Tx2 است. مقدار تراست تولیدی پروانه ۲ تیغه‌ای مرجع HQ 6x4.5 در محدوده دور موتور مورد بررسی کمترین مقدار در بین موارد است. اختلاف تراست تولیدی پروانه حلقوی Tx3 با پروانه متداول Cx5 در دور ۳۲۰۰ (بر دقیقه) حدود ۲۳٪ است و با افزایش دور کم می‌شود به طوری که بر اساس تخمین مدل جبری مرتبه دوم، پیش‌بینی می‌شود در دور ۷۴۰۰ (بر دقیقه) اختلاف کاهش یابد و به ۲۴٪ برسد. رابطه تخمینی تراست با دور براساس تطابق منحنی درجه دو جبری بر داده‌های موجود در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$\begin{cases} T_{Cx5} = 0.0000053 rpm^2 - 0.0077289 rpm + 18.3238367 \\ T_{Cx3} = 0.000001 rpm^2 + 0.023 rpm - 71.102 \\ T_{Tx3} = 0.0000031 rpm^2 + 0.0049481 rpm - 15.2775388 \\ T_{Tx2} = 0.000004 rpm^2 - 0.0133 rpm + 33.486 \end{cases} \quad (1)$$

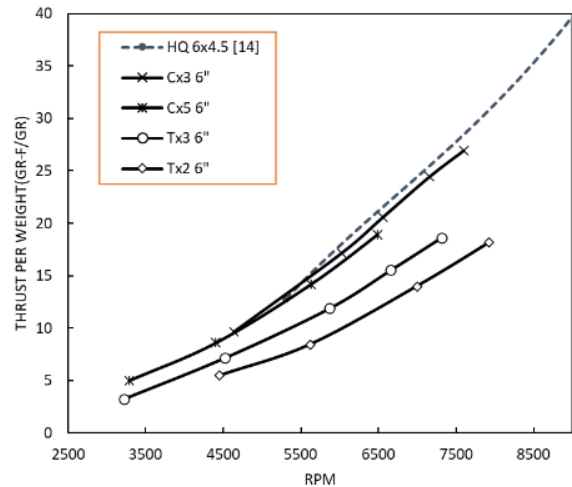
در صورتی که جرم پروانه نیز به‌عنوان یک پارامتر حایز اهمیت لحاظ شود، مقایسه‌ای می‌توان بر اساس نسبت تراست به جرم پروانه انجام داد. این مقایسه می‌تواند معیاری از استفاده بهینه از ماده در تولید هندسه ایرودینامیکی در نظر گرفته شود. شایان تذکر است که در مدارک علمی عموماً این نسبت به‌عنوان کارایی و برای سامانه‌های عمودپرواز تعریف می‌شود و وزن موتور نیز در آن لحاظ می‌شود. با این حال در اینجا صرفاً

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسنده بیان نشده‌است.

مراجع

- [1] G. Andria, A. Di Nisio, A. M. L. Lanzolla, M. Spadevecchia, G. Pascasio, and F. Antonacc, "Design and performance evaluation of drone propellers," in *5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, Rome, Italy, 2018, pp. 407-412. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453604>.
- [2] P. Biswas, A. Heryudono, J. Li, and J. Bi, "Prediction of printing failure of a 3d printed drone propeller using fused deposition modeling," in *Science in the Age of Experience Conference*, Boston, USA, 2018.
- [3] T. Sebastian and C. Stern, "Toroidal propeller," US20190135410A1, Nov 17, 2020.
- [4] P. Brinkmann, "These strangely shaped propellers sprang from research into propellerless flight," 2023. [Online]. Available: <https://aerospaceamerica.aiaa.org/?s=These+strangely+shaped+propellers+sprang+from+research+into+propellerless+flight>.
- [5] O. liang, "Toroidal Propellers: A Quieter Future for FPV Drones?," [Online]. Available: <https://oscarliang.com/toroidal-propellers/>
- [6] A.W. Christian and R. Cabell, "Initial investigation into the psychoacoustic properties of small unmanned aerial system noise," in *23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Denver, Colorado, 2017, 4051 Paper, <http://dx.doi.org/10.2514/6.2017-4051>.
- [7] N. B. Konzel and E. Greenwood, "Ground-based acoustic measurements of small multirotor aircraft," in *Vertical Flight Society's 78th Annual Forum and Technology Display, Ft. Worth Conference*, Texas, USA, 2022, <http://dx.doi.org/10.4050/F-0078-2022-17435>.
- [8] E. Shima, S. Tsutsumi, and K. Fujimoto, "Preliminary study on innovative loop propellers for quiet eVTOL," in *8th Asian/Australian Rotorcraft Forum*, Ankara, Turkey, 2019.
- [9] J. Sun, K. Yonezawa, Y. Tanabe, H. Sugawara, and H. Liu, "Blade twist effects on aerodynamic performance and noise reduction in a multirotor propeller," *Drones*, vol. 7, no. 4, 2023, Art. no. 252, <http://dx.doi.org/10.3390/drones7040252>.
- [10] T. J. Lieb, J. Treichel, and A. Volkert, "Noise measurements of unmanned aircraft vehicles: Experiences, challenges and recommendations for standards taken from flight trials," in *Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, Herndon, VA, U.S.A., 2023, pp. 1-7, <http://dx.doi.org/10.1109/ICNS58246.2023.10124257>.
- [11] A. Malim, N. Mourousias, B. G. Marinus, and T. De Troyer, "Structural design of a large-scale 3D-printed high-altitude propeller: Methodology and experimental validation," *Aerospace*, vol. 10, no. 3, 2023, Art. no. 256, <https://doi.org/10.3390/aerospace10030256>.



شکل ۱۰-۱ منحنی عملکرد بی‌بعد شده بر اساس جرم پروانه

۴ نتیجه‌گیری

در این مطالعه با هدف ارزیابی عملکرد پروانه‌های پهناد با ساختار حلقوی تولید شده به روش چاپ سه‌بعدی، دو پروانه از نوع حلقوی با ۲ و ۳ حلقه به همراه پروانه‌های متداول با ۳ و ۵ تیغه طراحی شد. مدل‌های طراحی شده با استفاده از روش چاپ سه‌بعدی FDM از جنس PLA با تنظیمات ارتفاع لایه ۱۲۰ میکرون و چهار دیواره ساخته شد. پس از ساخت فرایند اصلاح صافی سطح اجرا شد. پروانه بر روی موتور براساس نصب و عملکرد تولید تراست آن در دوره‌های مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که تغییرات تراست با دور موتور برای تمام نمونه‌ها روند افزایشی مشابه دارد. همچنین نرخ تغییرات تراست با دور موتور (شیب نمودار) برای پروانه‌های ساخته شده در این مطالعه بسیار به هم نزدیک است. بر اساس نتایج آزمون نشان داده شد پروانه حلقوی با سه حلقه، با وزن کمی بیشتر، در دوره‌های مختلف، تراست حدود ۵٪ بالاتر از پروانه متداول سه تیغه ارائه می‌کند که کاملاً قابل قبول است. البته این پروانه در مقایسه با نمونه متداول ۵ تیغه عملکرد ضعیف‌تری دارد. در صورتی که معیار جرمی پروانه نیز لحاظ شود، کارایی پروانه حلقوی حدود ۲۰٪ پایین‌تر از پروانه تیغه‌ای با جرم مشابه است. به عبارت دیگر عملکرد پروانه‌های حلقوی ساخته شده در این مطالعه با نمونه‌های متداول قابل قیاس است اما در شرایط بهینه نشده، باید افزایش وزن پروانه پذیرفته شود. در این مطالعه طراحی پروانه از لحاظ ایرودینامیکی یا بهینه آن مد نظر نبود و صرفاً آثار تغییر فلسفه طراحی هندسه آن به همراه نمونه‌سازی سریع از طریق چاپ سه‌بعدی مورد توجه قرار گرفت.

additive manufacturing technique," *Materials*, vol. 13, no. 8, Art. no 1924, 2020, <https://doi.org/10.3390/ma13081924>.
[14] "Motor Data Explorer," Mini Quad Test Bench. [Online]. Available: <https://www.miniquadtestbench.com/motor-explorer.html>
[15] "HQ Prop 6x4.5 Propeller (Black) (2)," Amain hobbies. [Online]. Available: <https://www.amainhobbies.com/hq-prop-6x4.5-propeller-black-2-hq-p010506452/p456710>

[12] G. Ion and I. Simion, "Performance of 3D printed conventional and toroidal propeller for small multirotor drones," *Journal of Industrial Design and Engineering Graphics*, vol. 18, no. 1, pp. 27-32, 2023.
[13] J. M. Reverte, M. A. Caminero, J. M. Chacón, E. García-Plaza, P. J. Núñez, and J. P. Becar, "Mechanical and geometric performance of PLA-based polymer composites processed by the fused filament fabrication