

## Numerical and experimental investigation of synchronic wavy tubercles method in improving propeller aerodynamic performance

A.H. Hossein<sup>1</sup>A.R Rabiee<sup>\*2</sup>

F. Ghadak

Imam Hossein University, Tehran, Iran.

(Received: 2024/03/19, Revised: 2024/06/08, Accepted: 2024/06/23, Published: 2024/07/22)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.1.9.5>

### ABSTRACT

This research aims to enhance propeller performance, a critical aspect of avian propulsion systems, without altering the original design of various propeller types. The study explores a method to improve the efficiency of wavy edges, inspired by nature, by creating an inherent pitch change along a 45.7 cm diameter wooden blade. Both numerical and experimental methods were utilized. The numerical approach involved simulating a rotating reference frame and solving the Navier-Stokes equations using the K- $\omega$ -SST method to calculate stress expressions in the momentum equation. The analysis demonstrated good accuracy in estimating performance coefficients compared to experimental tests. The experimental tests were conducted in a subsonic wind tunnel, with a propeller surface to test section ratio of 0.2, covering a range of the propeller's functional advance ratio. Data on torque and thrust coefficients were acquired using a balance connected to a brushless motor. Results indicated an increase in propeller efficiency with specific wavelength values and amplitudes, showing a 5.5% increase in the advance ratio according to the flight range compared to the original propeller.

**Keywords:** Propeller Performance Improvement, Synchronic Wavy Tubercles, Computational Fluid Dynamic, Experimental Aerodynamic

## بررسی عددی و تجربی روش برآمدگی‌های موجی شکل هم‌زمان در بهبود عملکرد آیرودینامیکی ملخ

فرهاد قدک

علیرضا ربیعی<sup>\*2</sup>امیر حسین حسین<sup>1</sup>

دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۳، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱)

### چکیده

بهبود عملکرد ملخ به‌عنوان یکی از اجزاء اصلی پیشران پرنده‌ها همواره در حال توسعه قرار دارد. در این میان استفاده از راهکاری با قابلیت استفاده در گستره بالایی از انواع ملخ و با امکان حفظ پارامترهای طراحی اولیه مفید است. در این تحقیق بررسی روش بهبود بازدهی لبه‌های موجی شکل هم‌زمان با ایده اولیه الهام از طبیعت و مبنای ایجاد تغییر گام ذاتی در طول پره ملخ چوبی با قطر ۴۵/۷ سانتی‌متر مبتنی بر روش‌های عددی و تجربی انجام شده است. در روش عددی از راهکار شبیه‌سازی قاب مرجع چرخان و حل معادلات ناویر - استوکس تراکم‌پذیر پایا با محاسبه عبارات تنش در معادله مومنوم از روش میانگین عدد رینولدز و روابط K- $\omega$ -SST استفاده شده است. این تحلیل ضمن بررسی استقلال نتایج از ابعاد و تعداد المان محاسباتی میدان‌های با قاب مرجع چرخان و ثابت اطراف ملخ نسبت به نتایج، دقت مناسبی در تخمین ضرایب عملکردی در مقایسه با آزمایش تجربی داشته است. آزمایش تجربی در تونل باد زیر صوت مرکز تحقیقات آیرودینامیک قدر با نسبت سطح ملخ به مقطع آزمون ۰/۲ برای محدوده‌ای از نسبت پیشروی عملکردی ملخ انجام شد. داده‌برداری ضریب گشتاور و تراست با استفاده از بالانس متصل به موتور برشلس نسبت به تغییرات سرعت چرخش و سرعت جریان در تونل باد انجام شده است. نتایج افزایش بازدهی ملخ با مقادیر طول موج ۱۰ میلی‌متر و دامنه ۵ درجه در مقایسه با ملخ اولیه معادل ۵/۵ درصد در نسبت پیشروی مطابق با محدوده پروازی را نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** بهبود عملکرد ملخ، برآمدگی‌های موجی شکل هم‌زمان، دینامیک سیالات محاسباتی، آیرودینامیک تجربی

۱- دانشجوی دکتری: kpahhosein@ihu.ac.ir

۲- استادیار (نویسنده پاسخگو): arabiee@ihu.ac.ir

۳- دانشیار: fghadak@ihu.ac.ir

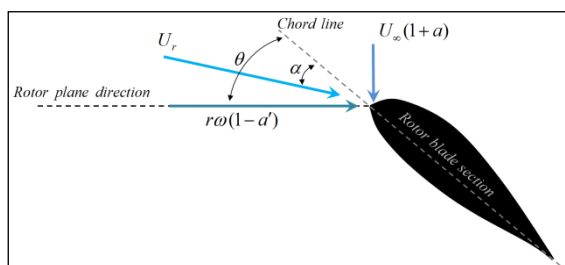
$$J = \frac{V}{nD} \quad (۱)$$

$$C_t = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (۱)$$

$$C_p = \frac{M\omega}{\rho n^3 D^5} \quad (۳)$$

$$\eta_p = \frac{C_t}{C_p} J \quad (۴)$$

فیزیک جریان حول مقطعی از پره در مقادیر نسبت پیشروی کم تا نسبت پیشروی زیاد به دلیل تاثیر در زاویه ی ورود جریان، بررسی شده است. یکی از مولفه های سرعت وارد به هر مقطع از پره ملخ در راستای صفحه ی چرخش ملخ می باشد. از این سرعت با توجه به روابط مومنوم حاکم به میزان ضریب القایی دورانی هر مقطع کاسته می شود [۵]. اما تاثیر غالب در این مقدار متناسب با شعاع دوران افزایش می یابد. مولفه ی بعدی در راستای پیشروی ملخ بسته به سرعت پروازی پرنده و تعیین کننده در نسبت پیشروی است. از این مقدار نیز بسته به میزان ضریب القایی محوری در هر مقطع، مقداری افزوده خواهد شد [۶]. با توجه به نمای شماتیک رسم شده در شکل ۱ در نسبت پیشروی پایین به علت غلبه ی مولفه ی جریان در جهت صفحه ی چرخش میزان زاویه ی حمله در تمامی مقاطع در مقدار حداکثر قرار دارد. بر خلاف آن در نسبت پیشروی بالا به علت ایجاد مولفه ی جریان محوری نسبتاً قوی، میزان زاویه ی حمله به خصوص در مقاطع نزدیک به ریشه ی پره در کمترین مقدار خود قرار دارد [۷].



شکل (۱): نمای مؤلفه های سرعت در مقطع پره

الگوی جریان حول مقطع ملخ در نسبت پیشروی کم حین شروع به حرکت پرنده متناسب با سرعت های پروازی کمتر و الگوی جریان در نسبت پیشروی بالا مربوط به سرعت های پروازی بالای پرنده می باشد [۸]. از طرفی شرایط بحرانی در حرکت جریان حول مقطع آیرودینامیکی مربوط به زوایای حمله ی بالا می باشد. این شرایط نسبت به کاهش

## فهرست علائم و اختصارات

$a$	ضریب القایی سرعت محوری
$a'$	ضریب القایی سرعت دورانی
$A$	مساحت مقطع روتور ملخ، $m^2$
$C$	مساحت مقطع آزمون تونل باد، $m^2$
$C_p$	ضریب توان ملخ
$C_t$	ضریب تراست ملخ
$D$	قطر ملخ، $m$
$J$	نسبت پیشروی ملخ
$n$	سرعت چرخش ملخ، rev/s
$r$	شعاع محلی پره، $m$
$R$	شعاع پره، $m$
$S$	طول میدان محاسباتی، $m$
$t$	ضخامت مقطع آیرودینامیکی پره، $m$
$T$	نیروی تراست ملخ، $N$
$V$	سرعت جریان آزاد، $m/s$
$V'$	سرعت جریان تونل باد، $m/s$

## علائم یونانی

$\alpha$	زاویه حمله، deg
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\eta_p$	بازدهی آیرودینامیکی ملخ
$\theta$	زاویه گام، deg

## ۱- مقدمه

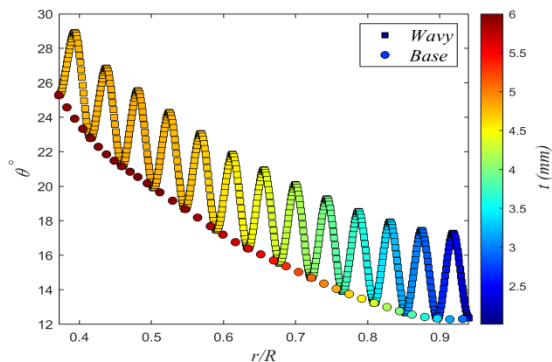
پارامترهای اصلی در طراحی ملخ پیشران هوایی شامل توزیع مقطع آیرودینامیک، اندازه ی وتر، مختصات قرارگیری و زاویه ی پیشش محلی و کلی پره است [۱]. نقاط طراحی ملخ با توجه به سرعت پیشروی ملخ در پرنده، سرعت چرخش و قطر ملخ با پارامتر بی بعد نسبت پیشروی در رابطه ی ۱ تعریف شده است [۲]. میزان ضریب تراست ملخ به عنوان پارامتر بی بعد در نسبت های متنوعی از نیروی پیشران، ارتفاع و سرعت چرخش مطابق رابطه ی ۲ تعریف می شود. ضریب توان ملخ نیز در ارتباط با گشتاور لازم مطابق رابطه ی ۳ معرفی شده است. در نهایت نسبت ضریب تراست ملخ به ضریب توان در نسبت پیشروی معرف بازدهی آیرودینامیکی در رابطه ی ۴ ارائه شده است. هدف از بهبود آیرودینامیکی ملخ افزایش میزان بازدهی آیرودینامیکی در نسبت های معینی از پیشروی ملخ می باشد [۳، ۴].

آیرودینامیکی انجام شده است. تحلیل سیالات محاسباتی با بررسی دقیقی نسبت به ابعاد میدان محاسباتی و همچنین کیفیت شبکه‌بندی، روش مطمئنی برای تحلیل محاسباتی ملخ ارائه می‌دهد. در ادامه آزمایش تجربی در تونل باد مادون صوت با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری دقیق انجام شد و نتایج تطبیق مناسب با تحلیل سیالات محاسباتی را نشان داد.

## ۲- بیان روش

### ۲-۱- روش بهبود عملکرد

بهبود عملکرد آیرودینامیکی ملخ با استفاده از روش ایجاد برآمدگی‌های هم‌زمان موجی شکل انجام شده است. در این روش جدید [۲۸] به مختصات قرارگیری مقاطع ملخ با فواصل معینی به‌عنوان طول موج برآمدگی، تغییرات معینی معادل دامنه موج اعمال می‌شود. در تحقیق حاضر به مقطعی با طول موج ۱۰ میلی‌متر معادل ۲/۱ درصد قطر ملخ از فاصله ۵۰ میلی‌متری ریشه‌ی ملخ (۳۵ درصد شعاع)، به اندازه‌ی ۵ درجه (معادل ۵۰ درصد زاویه‌ی گام) در راستای زاویه‌ی گام پره افزوده شده است. بدین ترتیب این طراحی به نوعی از مزایای تغییرات گام پره اما به صورت ذاتی در مقادیر پیچش هندسی محلی مقاطع بهره می‌برد. در نتیجه مطابق شکل ۲ با استفاده از این روش تا حدی امکان کاهش ضخامت مقاطع آیرودینامیکی وجود دارد. بدین ترتیب این روش علاوه بر افزایش بازدهی آیرودینامیکی در نسبت پیشروی بالا، می‌تواند در نسبت پیشروی پایین در شرایط بیشینه‌ی زاویه‌ی حمله جریان با توجه به کاهش نسبی سرعت جریان آزاد و تمایل جریان به ایجاد گردابه‌های اتلافی موثر باشد. علاوه بر این کاهش ضخامت مقاطع آیرودینامیکی در کاهش میزان نویز منتشر شده از ملخ نیز بسیار مفید است.



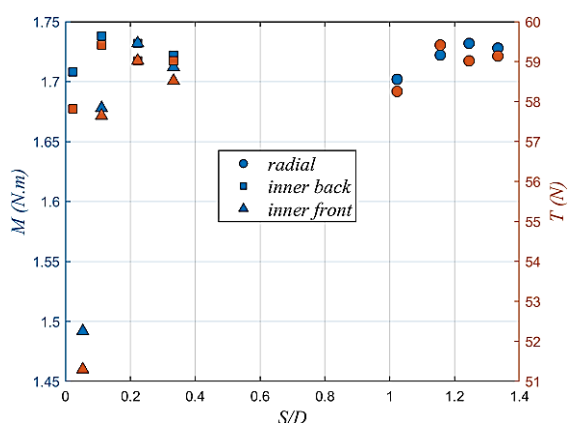
شکل (۲): نمای تغییرات زاویه پیچش هندسی و ضخامت مقاطع پره

عدد رینولدز و همچنین ضخامت بالای مقاطع حساس تر است [۹]. در این محدوده ایجاد ناحیه‌ی گذار روی نواحی کم فشار پره موجب ایجاد گردابه‌های اتلافی در نواحی لایه‌ی مرزی و تمایل جریان به انحراف از سطح و جدایش می‌باشد. جدایش جریان علاوه بر کاهش بازدهی آیرودینامیکی موجب ایجاد بارهای نوسانی و مشکلات سازه‌ای و دینامیکی در عملکرد ملخ خواهد شد [۱۰]. در نتیجه ایجاد راه حلی برای کنترل میزان زاویه‌ی حمله‌ی موثر به صورتیکه پره در حداکثر سرعت‌های پروازی دارای قابلیت پیش‌برندگی باشد و در سرعت‌های کمینه با پدیده‌های مخرب کمتری مواجه شود، مورد نظر می‌باشد. یکی از این راه‌ها استفاده از مکانیزم‌های کنترل زاویه‌ی گام می‌باشد [۱۱].

این مکانیزم‌ها در سرعت‌های پروازی مختلف ملخ، نسبت به ضریب پیشروی در بیشینه‌ی بازدهی، میزان زاویه‌ی گام در پره را تنظیم می‌نمایند [۱۲]. به علت ساختار پیچیده و پرهزینه و همچنین تنظیمات حساس این مکانیزم‌ها استفاده از آن‌ها با محدودیت روبرو است. از طرفی الگوهای کنترل جریان روی پره با دیدگاه ذاتی به صورتی که بدون مصرف انرژی موجب کنترل جریان از روی پره شود، در حال توسعه است [۱۳، ۱۴]. یکی از این روش‌ها استفاده از برآمدگی‌هایی در لبه‌ی حمله‌ی پره با هدف افزایش مومنوم جریان و جلوگیری از پدیده‌ی جدایش از سطح می‌باشد [۱۵، ۱۶]. این برآمدگی‌ها با الهام از طبیعت [۱۷، ۱۸] طبق ساختار شکل موج در مقادیر طول موج و دامنه متنوعی از برآمدگی در تحقیقات عددی و تجربی روی ملخ، پروانه و توربین‌های بادی بررسی شده است [۱۹-۲۱]. از طرفی تحقیقاتی با موضوع استفاده از پروفیل‌های دندان‌اره‌ای در لبه‌ی فرار پره به علت اختلاط موثر جریان در ناحیه‌ی لبه‌ی فرار پره انجام شده است [۲۲-۲۵]. این ناحیه به علت برخورد ناحیه‌ی پرفشار سطح زیرین پره با ناحیه‌ی پرفشار سطح بالای پره موجب ایجاد گردابه‌های اتلافی و ایجاد نویز شدیدی می‌شود [۲۶].

ایده حاضر در رابطه با بهبود عملکرد آیرودینامیکی و آبروآکوستیکی ملخ ضمن در نظر گرفتن تغییرات مفید زاویه گام ذاتی در مقاطع پره، با ایجاد ناحیه‌ای از برآمدگی به شکل موج در لبه حمله موجب کنترل جریان غیرفعال و در ناحیه لبه فرار موجب بهبود اختلاط جریان شده است [۲۷].

در این تحقیق مطالعه‌ی عددی و تجربی از پیاده سازی این ایده روی ملخ با قطر ۴۵/۷ سانتی‌متر در بهبود عملکرد

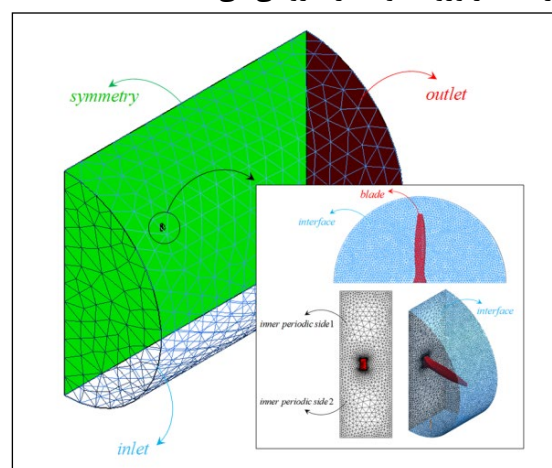


شکل (۴): بررسی استقلال نتایج از ابعاد میدان محاسباتی

در شکل ۵ اندازه‌ی شبکه‌های محاسباتی در نواحی مهم میدان حل، نظیر مرز دیواره‌ی پره، ناحیه‌ی لایه‌ی مرزی پره، صفحات مرزی میدان‌های محاسباتی قاب مرجع چرخان و ثابت نسبت به نتایج مورد بررسی قرار گرفت. در هر یک از نواحی میدان محاسباتی کاهش میزان اندازه‌ی شبکه بندی موجب افزایش حجم میدان و دقت محاسباتی مختلفی همراه است. بیشترین تاثیر در میزان شبکه بندی نتایج مبتنی بر آن مربوط به ابعاد دیواره‌ی ملخ نتیجه گیری شده است. در نهایت تعداد ۲۷۰۹۳۲۴ المان محاسباتی برای شبکه بندی انجام شده به صورت ترکیبی از المان‌های پنج وجهی گونه در نواحی لایه‌ی مرزی حول دیواره به شکل با سازمان و المان‌های چهار وجهی مثلثی به شکل بدون سازمان در سایر نواحی میدان محاسباتی انجام شده است. روش قاب مرجع چرخان برای حل میدان محاسباتی ناحیه‌ی نزدیک به پره با ورود پارامتر سرعت دورانی به معادلات حاکم، چرخش ملخ را شبیه‌سازی کرده است. در این شبیه‌سازی از روش حجم محدود بر پایه‌ی المان محدود و انجام محاسبات مبتنی بر توابع شکل برای ارتباط مقادیر محاسباتی از سطوح به گره‌ها استفاده شده است. برای این منظور حل گر تجاری انسیس سی.اف.ایکس.<sup>۱</sup> در شرایط حل پایه، تراکم پذیر و مدل آشفتگی کی.امگا.اس.اس.تی.<sup>۲</sup> برای تعیین عبارات تنش در معادلات مومنتوم معین شده است. میزان عدد وای. پلاس میانگین روی سطح پره معادل ۸/۹۶ می‌باشد و مطابق شکل ۷ در نواحی لبه‌ی حمله و نوک پره افزایش یافته است.

## ۲-۲- شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی باهدف اطمینان از بهبود عملکرد آیرودینامیکی قبل از ورود به فرآیند ساخت مدل و آزمایش تجربی انجام شده است. ابتدا الگوهای متعددی از برآمدگی‌های موجی شکل در مقادیر طول موج و دامنه برآمدگی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت باتوجه به مقادیر بهبود داده شده در گستره محدود عملکردی و قابلیت ساخت مناسب با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های ساخت دقیق به خصوص در جنس چوب مدل بهینه به دست آمده است. شکل ۳ نمای مرزهای میدان محاسباتی را نمایش می‌دهد. شرایط مرزی استفاده شده در این تحلیل شامل شرط مرزی دیواره، صفحات مرزی مابین میدان‌های محاسباتی، شرط مرزی فشار ورودی و فشار خروجی می‌باشند.



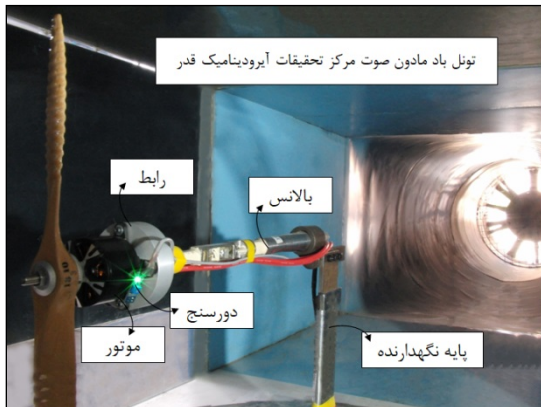
شکل (۳): نمای میدان و مرزهای محاسباتی حول ملخ [۲۷]

برای تحلیل محاسباتی ابتدا ابعاد میدان‌های محاسباتی در شبکه بندی قابل قبولی مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر اندازه پایین دست، بالادست و قطر میدان محاسباتی حول ملخ نسبت به قطر ملخ بی‌بعد شده است. سپس تغییرات آن با میزان نیروی تراست و گشتاور وارد بر ملخ در شکل ۴ مقایسه شده است. نتایج نشان داد، اندازه‌ی مناسب برای فواصل بالادست و پایین دست میدان محاسباتی با قاب مرجع چرخان حول ملخ معادل ۰/۲ قطر ملخ مناسب است. همچنین قطر میدان محاسباتی حول ملخ در محدوده ۱/۲ قطر ملخ همگرایی نتایج را نمایش می‌دهد. حساسیت نتایج نسبت به میدان خارجی حول میدان چرخان نسبت به ابعاد ملخ زیاد نیست و در حد قابل قبول برای فرض اثرات دور دست مناسب است.

<sup>1</sup> ANSYS CFX commercial Software

<sup>2</sup> K- $\omega$ -SST

مقطع پره نسبت به نیروی تراست ناشی از چرخش ملخ می‌باشد؛ بنابراین باتوجه به میزان نسبت پیشروی و حد مجاز توان روتور مقادیر مختلفی از سرعت دورانی ملخ در هر سرعت باد با شرط تراست مثبت ملخ داده‌برداری شده است. در نتیجه برای هر ملخ به تعداد ۷ سرعت باد تونل و در هر سرعت طیفی از سرعت‌های دورانی برای پوشش مقادیر نسبت پیشروی در محدوده کاری ملخ، داده‌برداری متناظر نسبت به میزان نیروی تراست و گشتاور وارد بر ملخ انجام شده است. چرخش ملخ با استفاده از موتور براشلس<sup>۱</sup> به دلیل ایجاد قابلیت سرعت دورانی تا محدوده ۷۵۰۰ دور بر دقیقه در محدوده بیشینه ۱/۵ کیلووات توان موردنیاز بیشینه برای راهاندازی ملخ استفاده شده است. از بالانس آی.بی.اس<sup>۲</sup> برای داده‌برداری گشتاور و تراست وارد بر ملخ با اتصال رابط هم محور استفاده شده است. شکل ۸ نمایشی از آزمایش پیشروی در تونل باد را نمایش می‌دهد.



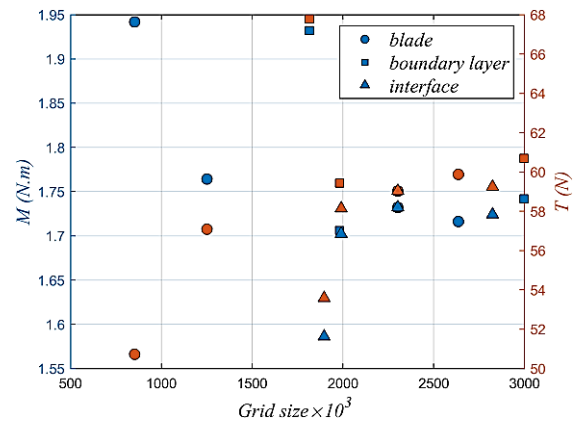
شکل (۸): نمای آزمایش پیشروی ملخ در تونل باد

مطابق نمای شماتیک شکل ۹ برای کنترل سرعت دورانی ملخ از کنترلر سرعت متناسب با توان موتور براشلس استفاده شده است. این کنترلر با قابلیت تقسیم جریان بیشینه‌ی ۱۲۰ آمپر به صورت مستقیم در سه خروجی با اختلاف فاز مناسب، سرعت موتور را تنظیم می‌نماید. فرمان به کنترلر سرعت با ایجاد سیگنال پی.دابلیو.ام.<sup>۳</sup> در محدوده فرکانس و عرض پالس مناسب توسط تنظیم‌گر سیگنال انجام شده است. همچنین تامین توان مجموعه توسط منبع تغذیه‌ی سوئیچینگ ۳ کیلووات با ولتاژ ۲۴ ولت انجام شد. سیگنال‌های آنالوگ خروجی از دور سنج و بالانس با

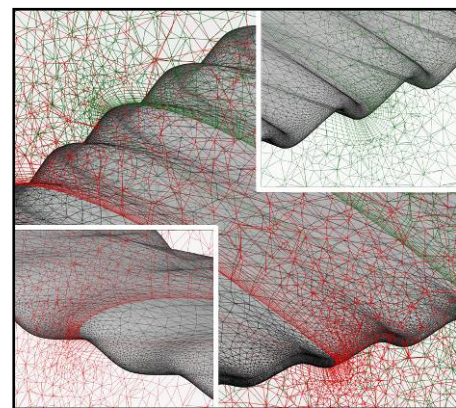
<sup>1</sup> Brushless motor

<sup>2</sup> IBS8 balance

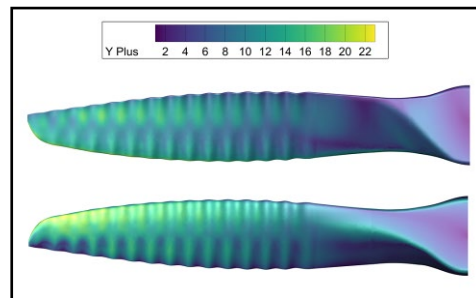
<sup>3</sup> PWM signal



شکل (۵): بررسی استقلال نتایج از تعداد شبکه محاسباتی



شکل (۶): شبکه محاسباتی حول دیواره ملخ

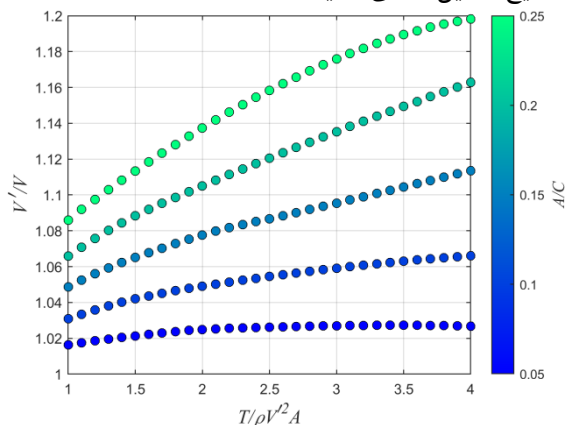


شکل (۷): توزیع مقادیر Y-plus روی دیواره ملخ

### ۳-۲- آزمایش تجربی تونل باد

استخراج ضرایب عملکردی ملخ در تونل باد مادون صوت مرکز تحقیقات آیرودینامیک قدر در ابعاد مقطع آزمون با عرض ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر انجام شده است. کمینه سرعت تونل باد در این آزمایش برای بررسی نسبت پیشروی پایین معادل ۵ متر بر ثانیه و بیشینه سرعت برای بررسی عملکرد ملخ در نسبت پیشروی بالا معادل ۳۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. تغییر مقادیر سرعت باد تونل برای مقابله با غلبه میزان نیروی پسای وارد بر

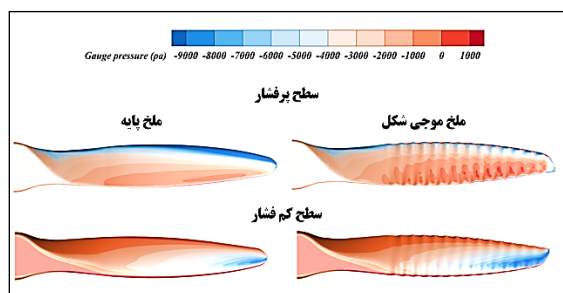
و جریان ثانویه‌ی القایی) شده است. پس از داده‌برداری انجام شده‌ی تحقیق حاضر در تونل باد، اثر اصلاحی وارد بر سرعت در محاسبه‌ی نسبت پیشروی با نسبت سطح ۰/۲ در مقادیر تراست بی‌بعد در هر حالت لحاظ شده است و سپس با نتایج تحلیل عددی مقایسه شده است.



شکل (۱۰): مقادیر اصلاحی اثرات دیواره مطابق با نسبت سطح ملخ به سطح مقطع آزمون تونل باد و تراست بی‌بعد

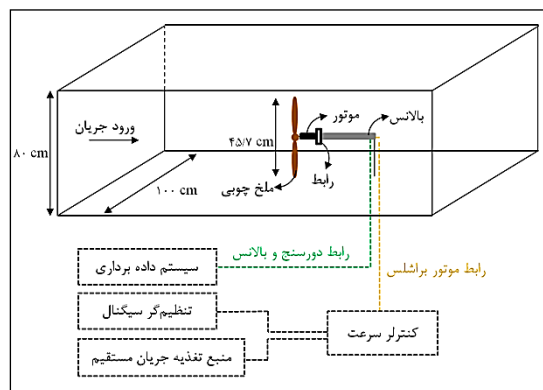
### ۳- نتایج و بحث

بررسی تغییرات فشار استاتیک روی سطح پره در نواحی پرفشار و کم‌فشار برای ملخ اولیه و بهبود یافته در شکل ۱۱ انجام شده است. در سطح پرفشار پره با توجه به کاهش سرعت جریان در برخورد با سطح و همچنین نیاز به نیروی فشاری بیشتر برای تامین نیروی تراست ملخ، نیاز به توزیع بیشینه‌ی فشار استاتیک می‌باشد. از این رو نواحی با فشار نسبی پایین مورد انتظار نیست. توزیع نسبی فشار استاتیک نشان‌دهنده‌ی کاهش نواحی با فشار نسبی پایین در نواحی لبه‌ی فرار و افزایش نواحی با فشار نسبی بالا در نواحی لبه‌ی حمله‌ی پره می‌باشد. همچنین در مقایسه‌ی توزیع فشار نسبی در سطوح کم‌فشار، افزایش نواحی با فشار نسبی پایین در ملخ موجی شکل مشاهده می‌شود.



شکل (۱۱): تغییرات فشار روی سطوح پره ملخ

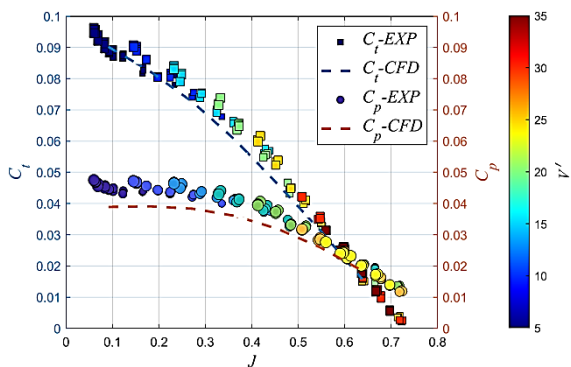
استفاده از سیستم داده‌برداری شامل تقویت کننده و برد آنالوگ به دیجیتال در هر لحظه پایش و ثبت شده است.



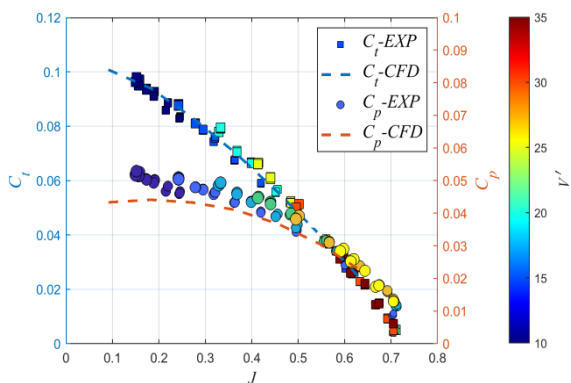
شکل (۹): نمای شماتیک اجزاء آزمایش تجربی ملخ در تونل باد

به دلیل احتمال وجود منابعی متنوع از خطا در فرآیند داده‌برداری دقیق تجربی، از بررسی پارامتر عدم قطعیت ابزارهای دقیق مورد استفاده در محاسبه مقدار عدم قطعیت ضرایب عملکردی استفاده شده است. ابتدا عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق معین شده است. در نهایت ضرایب عملکردی توسط رابطه انتشار خطا برای هر پارامتر محاسبه می‌شود. میزان عدم قطعیت در اندازه‌گیری سرعت، نیرو و گشتاور به ترتیب ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۱۵ درصد نسب به مقادیر آن در این آزمایش به دست آمده است. در نتیجه با استفاده از روابط تعیین پارامترها و انتشار خطا میزان عدم قطعیت ضریب تراست، ضریب توان و بازدهی معادل ۰/۹۸، ۱/۱ و ۰/۶۹ در شرایط کاری ملخ معین شده است. از طرفی باتوجه به فضای محدود شده تونل باد توسط دیواره‌ها و مکش ثانویه جریان هوا توسط ملخ، می‌بایست اثر سرعت القایی افزونه را در محاسبات در نظر گرفت. برای این منظور از ضریب اصلاحی سرعت گلارت [۵] مبتنی بر روابط بقاء مومنوم و توسعه معادلات بر حسب نسبت سطح روتور به سطح مقطع آزمون تونل باد و میزان نیروی تراست بی‌بعد شده، استفاده شده است. در نتیجه‌ی محاسبات گلارت مطابق شکل ۱۰، افزایش میزان سطح مقطع ملخ نسبت به سطح مقطع آزمون تونل باد و همچنین افزایش نیروی تراست بی‌بعد در این شرایط، موجب افزایش میزان نسبت سرعت القایی تونل باد نسبت به سرعت واقعی در شرایط باز (بدون وجود دیواره‌های تونل

<sup>1</sup> Uncertainty

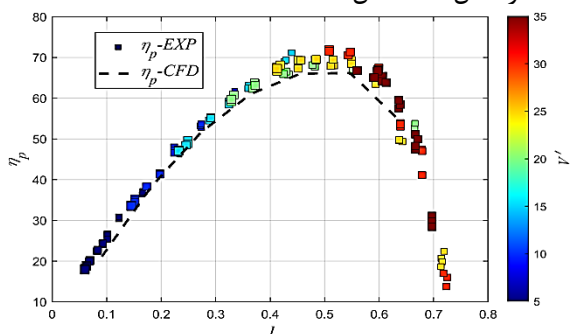


شکل (۱۲): مقایسه تحلیل عددی و آزمایش تجربی ضرایب عملکردی ملخ اولیه



شکل (۱۳): مقایسه تحلیل عددی و آزمایش تجربی ضرایب عملکردی ملخ بهبودیافته

میزان بازدهی آیرودینامیکی از روابط حاکم و نتایج داده‌برداری در آزمایش تجربی و تحلیل سیالات محاسباتی در شکل ۱۴ مربوط به ملخ اولیه و شکل ۱۵ مربوط به ملخ بهبود یافته بررسی شده است. نتایج تجمع بیشتر داده‌برداری در مقادیر بازدهی در ناحیه‌ی بالای ۷۰ درصد مربوط به ملخ بهبود یافته را نشان می‌دهد. همچنین با بررسی ناحیه‌ی عملکردی پرواز کروز ملخ افزایش بازدهی میانگین معادل ۵/۵ درصد مطابق نتایج تجربی و منحنی‌های میان‌یاب عبور داده شده در شکل ۱۶ حاصل شده است.



شکل (۱۴): مقایسه منحنی بازدهی ملخ اولیه در آزمایش تجربی نسبت به تحلیل عددی

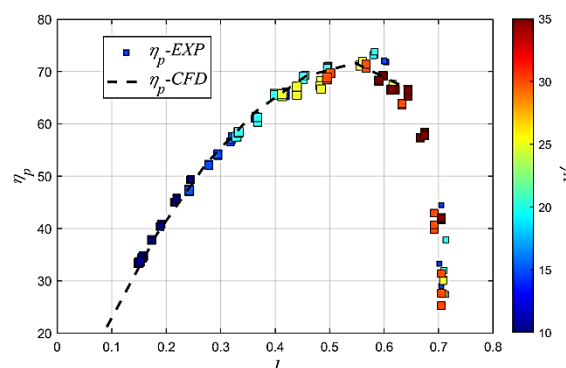
در تحلیل سیالات محاسباتی میزان سرعت دورانی ملخ معادل با ۷۲۰۰ دور بر دقیقه و مقادیر نسبت پیشروی با تغییر در مولفه‌ی سرعت جریان آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. به علت فاصله‌ی زیاد بین مرزهای میدان محاسباتی، مشابه حالت پروازی تاثیر متقابلی میان مرزها در این تحلیل ایجاد نشده است. اما در آزمون تجربی به علت مکش مضاعف جریان هوا بواسطه‌ی چرخش ملخ در راستای جریان تونل باد، کاهش میزان سرعت باد تونل از محدوده‌ای کمتر متناظر با مکش جریان ملخ بی اثر است. همچنین در مقادیر سرعت باد بالای تونل باد که تراستی در ملخ متناظر با سرعت دورانی پایین ایجاد نمی‌شود، داده‌برداری صورت نمی‌گیرد. در نتیجه برای داده‌برداری آزمایش تجربی، سرعت‌های چرخشی مختلفی متناظر با سرعت‌های متناسب در تونل باد بررسی شده است. این بررسی ضمن ایجاد محدوده مناسب در ایجاد ضریب پیشروی برای مقایسه با تحلیل عددی، به بررسی صحت آزمون تجربی با اطمینان از تکرارپذیری مناسب کمک می‌نماید. در شکل ۱۲ مقادیر ضریب تراست و ضریب توان ملخ اولیه و در شکل ۱۳ مقادیر مربوط به ملخ بهبود یافته در نسبت‌های پیشروی مختلف نسبت به تحلیل سیالات محاسباتی مقایسه شده است. میزان سرعت باد تونل باد در هر آزمون از مقدار ۵ تا ۳۵ متر بر ثانیه با فواصل ۵ متر بر ثانیه متغیر می‌باشد. همچنین سرعت چرخش ملخ برای داده‌برداری محدوده‌ای از نسبت پیشروی در هر سرعت تونل باد با شرط میزان کمینه با نیروی تراست مثبت و بیشینه‌ی حداکثر توان موتور در هر آزمایش مقدار دهی شده است. در نتیجه در هر میزان سرعت مقادیر مربوط به نسبت پیشروی بالا دارای میزان سرعت چرخش پایین و مقادیر مربوط به نسبت پیشروی کم دارای سرعت بالایی می‌باشد. برای بیان مقادیر سرعت چرخش ملخ در نمودارها با استفاده از ابعاد مربع‌ها در شکل از سرعت چرخش ۲۵۰۰ تا ۷۸۰۰ دور بر دقیقه نمایش داده شده است. همچنین میزان نسبت پیشروی در آزمایش تجربی با توجه به نسبت مقطع ۰/۲ در آزمایش حاضر و محاسبه‌ی مقدار سرعت جریان آزاد معادل اصلاح شده است. نتایج در مقایسه با تحلیل سیالات محاسباتی، تطبیق مناسبی را در رفتار ضریب تراست و توان مربوط به ملخ اولیه و بهبود یافته به خصوص در نسبت‌های پیشروی بالاتر با توجه به کاهش انبساط جریان حول صفحه‌ی روتور و کاهش اثرات دیواره‌ی تونل باد را نشان می‌دهد.

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از راهنمایی‌ها و زحمات اساتید و پژوهشگران مرکز تحقیقات آیرودینامیک قدر دانشگاه جامع امام حسین (ع) که در انجام این طرح یاری نمودند، تشکر و قدردانی به عمل آورند.

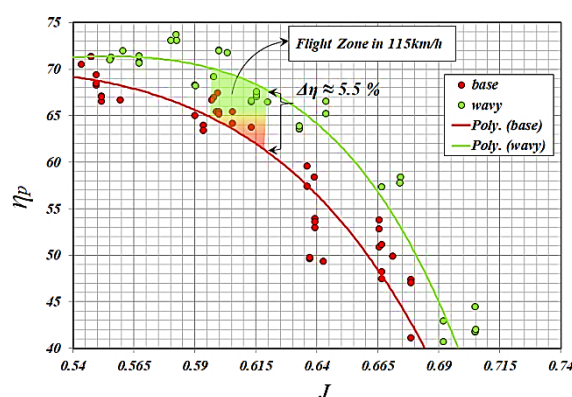
## ۶- مراجع

- [1] Kelei W, Zhou Z, Zhongyun F, Jiahao G. Aerodynamic design of tractor propeller for high-performance distributed electric propulsion aircraft. Chinese Journal of Aeronautics. 2021;34(10):20-35.
- [2] Wald QR. The aerodynamics of propellers. Progress in Aerospace Sciences. 2006;42(2):85-128.
- [3] Stojaković P, Velimirović K, Rašuo B. Power optimization of a single propeller airplane take-off run on the basis of lateral maneuver limitations. Aerospace Science and Technology. 2018;72:553-63.
- [4] D'Angelo S, Berardi F, Minisci E. Aerodynamic performances of propellers with parametric considerations on the optimal design. The Aeronautical Journal. 2002;106(1060):313-20.
- [5] Glauert H. The elements of aerofoil and airscrew theory: Cambridge university press; 1983.
- [6] Ruh ML, Hwang JT. Fast and Robust Computation of Optimal Rotor Designs Using Blade Element Momentum Theory. AIAA Journal. 2023;61(9):4096-111.
- [7] Gur O, Rosen A. Propeller performance at low advance ratio. Journal of aircraft. 2005;42(2):435-41.
- [8] Liu Z, Liu P, Qu Q, Hu T. Effect of advance ratio and blade planform on the propeller performance of a high altitude airship. Journal of Applied Fluid Mechanics. 2016;9(6):2993-3000.
- [9] White FM, Majdalani J. Viscous fluid flow: McGraw-Hill New York; 2006.
- [10] Wang M, Yan K, Zhang X, Zhu Y, Hong J. A comprehensive study on dynamic performance of ball bearing considering bearing deformations and ball-inner raceway separation. Mechanical Systems and Signal Processing. 2023;185:109826.
- [11] Heinzen SB, Hall Jr CE, Gopalarathnam A. Development and testing of a passive variable-pitch propeller. Journal of Aircraft. 2015;52(3):748-63.
- [12] Cong K, Ma D, Zhang L, Xia X, Yao Y. Design and analysis of passive variable-pitch propeller for VTOL UAVs. Aerospace Science and Technology. 2023;132:108063.
- [13] Joshi SN, Gujarathi YS. A review on active and passive flow control techniques. International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering. 2016;3(4):1-6.
- [14] Bellcock AC, Rouser KP. Design of Vortex Generator Jets for Small UAS Propellers at Low Reynolds



شکل (۱۵): مقایسه منحنی بازدهی ملخ بهبودیافته در

آزمایش تجربی نسبت به تحلیل عددی



شکل (۱۶): مقایسه منحنی بازدهی دو ملخ در محدوده

پروازی کروز در آزمایش تجربی

## ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق روش بهبود برآمدگی‌های موجی شکل هم‌زمان با طول موج ۱۰ میلی‌متر و دامنه افزایش گام ۵ درجه بر عملکرد ملخ با روش‌های عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا تحلیل سیالات محاسباتی با بررسی استقلال نتایج از میدان محاسباتی و شبکه بندی، ابزار دقیق محاسباتی برای تخمین ضرائب عملکردی ملخ را ارائه داد. در ادامه با استفاده از تونل باد مادون صوت مرکز تحقیقات آیرودینامیک قدر با نسبت مساحت سطوح ۰/۲ آزمایش تجربی آیرودینامیک انجام شد. در این آزمایش ضمن اطمینان از صحت مدل ساخته شده و استفاده از ابزارهای دقیق داده‌برداری و کنترلی ملخ، اصلاحات مورد نیاز برای سرعت القایی افزوده‌ی تونل در آزمایش ملخ بررسی و در نتایج اعمال شد. در نهایت ضمن اطمینان از انطباق مناسب نتایج، بهبود عملکرد آیرودینامیکی ملخ در محدوده پیشروی عملکردی به میزان ۵/۵ درصد نتیجه‌گیری شده است.



- [25] Lee HM, Lu Z, Lim KM, Xie J, Lee HP. Quieter propeller with serrated trailing edge. *Applied Acoustics*. 2019;146:227-36.
- [26] Avallone F, Van Der Velden W, Ragni D, Casalino D. Noise reduction mechanisms of sawtooth and combed-sawtooth trailing-edge serrations. *Journal of Fluid Mechanics*. 2018;848:560-91.
- [27] Hossein A, Rebiee A, Ghadak F. Improving aerodynamic and aeroacoustic performance of the propeller by synchronic wavy tubercles. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2023;55(9):6-.
- [28] Hossein A, inventor Rotary blade with synchronous wave-shaped edges. Iran patent 108965. 2024.
- [29] Sagharichi, A., Maghrebi, M. J. and ArabGolarcheh, A. "Numerical Investigation of the Effect of Fixed and Variable Pitch Angle Blade on Dynamic Stall of Flow Field Around Darrieus Wind Turbine Blade". *Fluid Mechanics and Aerodynamics.*, Vol. 5 (1), pp. 29-46, 2017. (In Persian). DOR: 20.1001.1.23223278.1395.5.2.1.3
- [30] Tahani, M., Rabbani, A., Kasaeian, A., Mehrpooya, M., and Mirhosseini, M. "Design and numerical investigation of Savonius wind turbine with discharge flow directing capability". *Energy.*, Vol. 130, pp. 327-38, 2017. Doi: 10.1016/j.energy.2017.04.125.
- [31] Hassanzadeh, R. and Mohammad, N. M. "Effect of Overlapping Size on the Performance of the Savonius Wind Turbine, in Both Conventional and the Bach-Type Models". *Modares Mechanical Engineering.*, Vol. 85, pp. 2599-2606, 2019. (In Persian).
- Number Operation. 2018 AIAA Information Systems-AIAA Infotech@ Aerospace2018. p. 0749.
- [15] New D, Ng BF. Flow control through bio-inspired leading-edge tubercles. Springer Nature Switzerland AG Part of Springer Nature, University of Edinburgh, Springer, Cham, doi. 2020;10:978-3.
- [16] Harley W. Leading Edge Tubercles as Passive Flow Control Devices. 2019.
- [17] Gopinathan V, Bruce Ralphin Rose J. Aerodynamics with state-of-the-art bioinspired technology: Tubercles of humpback whale. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2021;235(16):2359-77.
- [18] Inada Y, Takatsuki R, Mori M, Yamamoto T, Yoshida Y. Sound and Impact Attenuation Effects of Small Projections Inspired by Dorsal Ridge Tubercles in Finless Porpoises. *Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms*. 2023;10(1):9-16.
- [19] Asghar A, Perez RE, Jansen PW, Allan W. Application of leading-edge tubercles to enhance propeller performance. *AIAA Journal*. 2020;58(11):4659-71.
- [20] Sridhar S, Joseph J, Radhakrishnan J. Implementation of tubercles on vertical axis wind turbines (VAWTs): An aerodynamic perspective. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;52:102109.
- [21] Ke W, Hashem I, Zhang W, Zhu B. Influence of leading-edge tubercles on the aerodynamic performance of a horizontal-axis wind turbine: A numerical study. *Energy*. 2022;239:122186.
- [22] Wei Y, Qian Y, Bian S, Xu F, Kong D. Experimental study of the performance of a propeller with trailing-edge serrations. *Acoustics Australia*. 2021;49:305-16.
- [23] Lan T, Li G, Zhang M, editors. Calculation method of aerodynamic performance of small propeller with serrated trailing edge. *Journal of Physics: Conference Series*; 2020: IOP Publishing.
- [24] Ning Z, Wlezien RW, Hu H, editors. An experimental study on small UAV propellers with serrated trailing edges. 47th AIAA fluid dynamics conference; 2017.