

## بررسی تجربی تأثیر کورس بال‌زنی یک بال‌زن بر تولید نیروی پیشران آن در پرواز ایستا

زهرا سادات علوی<sup>1</sup>، سجاد محمودی<sup>2</sup>، حسین حسن‌پور<sup>3</sup>، محمدحسن جوارشکیان<sup>4</sup>

1 و 2- دانشگاه فردوسی مشهد

3- دانشگاه آزاد قزوین

### چکیده

در این مقاله، تأثیر کورس بال‌زنی یا همان ماکزیمم زاویه‌ی بال‌زنی یک پرنده‌ی بال‌زن آزمایشگاهی، بر عملکرد آیرودینامیکی آن از نظر تولید نیروی پیشران و توان مصرفی در پرواز ایستا، به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این هدف، یک مکانیزم بال‌زن با بال پوسته‌ای انعطاف‌پذیر و یک سامانه‌ی اندازه‌گیری نیروی پیشران و توان مصرفی طراحی و ساخته شده است. مکانیزم‌های بال‌زنی که تا کنون مورد استفاده قرار گرفته‌اند، قابلیت تغییر کورس بال‌زنی را ندارند، در حالی که مکانیزم طراحی شده با استفاده از یک سیستم لنگ و لغزنده، این قابلیت را برای این سری آزمایش‌ها فراهم کرده است. در این آزمایش‌ها، در گستره‌ای از فرکانس‌ها و کورس‌های بال‌زنی، نیروی پیشران تولیدشده و توان مصرف شده برای دو نمونه بال با جنس پوسته‌ی متفاوت اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان نیروی پیشران و توان مصرفی، با زیاد شدن فرکانس، در تمام آزمایش‌ها، افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش کورس بال‌زنی، مشاهده می‌شود که در حالت کلی، میزان نیروی پیشران تولیدی توسط بال‌زن، افزایش می‌یابد. اما این افزایش نیروی پیشران با زیاد شدن کورس بال‌زنی برای دو پوسته‌ی بال مختلف با یکدیگر متفاوت است به طوری که مقدار نیروی پیشران تولیدی برای بال منعطف‌تر در کورس‌های بال‌زنی کمتر، بیشتر از بال دیگر است اما این روند در کورس‌های بال‌زنی بالاتر، معکوس می‌شود. علاوه بر این دیده می‌شود که با وجود اثر متفاوت کورس بال‌زنی و جنس پوسته‌ی بال، توان مصرفی یک روند ثابت دارد و در تمام آزمایش‌ها برای بال منعطف‌تر، با فاصله‌ی تقریباً ثابتی کمتر از بال دیگر است.

**واژه‌های کلیدی:** بال‌زن - کورس بال‌زنی - پرواز ایستا - نیروی پیشران

### مقدمه

بال‌زن‌ها، گونه‌ای از وسایل پرنده هستند که مانند پرنده‌گان به کمک بال - هایی انعطاف‌پذیر و مکانیزمی که حرکت بال زدن را فراهم می‌نماید، نیروهای آیرودینامیکی لازم برای پرواز خود را تولید می‌کنند. منبع اصلی تولید نیروهای آیرودینامیکی در پرنده‌گان، حرکت نوسانی بال‌هاست که به طور کلی شامل انتقال و دوران با دو درجه آزادی حرکت و یا بیشتر است. به واسطه‌ی این حرکت‌ها، دنباله‌ی جریان تشکیل شده که آن نیز به صورت نیروهای آیرودینامیکی پیشران و غیره ظاهر می‌شود. حوزه‌ی وسایل پرنده در جریان‌های با رینولدز پایین، بال‌زن‌ها به دلیل قابلیت مانورپذیری بالا، بازده پیشرانشی بالا و نیز توان حرکت ایستا با صرف نرخ انرژی مصرفی حداقل، در میان سایر انواع، اخیراً بیشتر مورد

بررسی و استفاده قرار گرفته‌اند. ابعاد کوچک، قابلیت مانور بالا، سرعت پایین و شباهت بال‌زن‌ها به پرنده‌گان کاربردهای متنوعی را برای آنها متصور کرده است. کسب و ارسال اطلاعات از محیط‌های غیر قابل دسترسی، کارگذاری سنسور، دنبال کردن اشیاء خاص، نفوذ به داخل ساختمان‌ها و اماکن مسکونی، پرواز در ارتفاع‌های بالای زمین با جو رقیق برای اهداف هواشناسی، شرکت در عملیات نجات، رفتن به اماکن خطرناک و ... از جمله کاربردهای پیشنهادی برای بال‌زن‌ها می‌باشند.

ویلسون و ورلی در سال 2007 [1]، هو و همکارانش در سال 2008 [2]، ویدیهیاری و یون در سال 2009 [3]، یافنگ و همکارانش در سال 2010 [4] با آزمایش بال‌زن‌های خود در تونل باد، به بررسی تأثیر سرعت باد و فرکانس بال‌زنی بر روی تولید نیروی برآ و پیشرانش بال‌زن در عملکرد آیرودینامیکی آن‌ها پرداختند.

ابراهیمی و همکارانش در سال‌های 2009 [5] و 2010 [6] برای مطالعه‌ی تجربی نیروهای ناپایای برآ و پیشران تولید شده از یک سامانه‌ی بال‌زن و حسگرهای اندازه‌گیری نیرو و توان مصرفی استفاده کردند که توسط آن، نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی ناپایدار، مصرف توان و سرعت زاویه‌ای حرکت بال‌زنی را در فرکانس‌های بال‌زنی مختلف و برای بال‌های متفاوت (از نظر انعطاف‌پذیری) در پرواز کروز با سرعت‌های باد متفاوت و ایستا (hovering) یا بدون باد اندازه‌گیری شد.

در آزمایش‌های تجربی و تحقیقاتی که تا به امروز انجام شده است، تغییر کورس بال‌زنی به صورت تخصصی در حوزه‌های دیگر مانند انعطاف-پذیری انجام نشده است. لذا در این پژوهش، با توجه به همین موضوع، چیدمانی آزمایشگاهی شامل مکانیزم بال‌زن با قابلیت تغییر کورس بال‌زنی و حسگر نیرو برای اندازه‌گیری نیروی ناپایای پیشران تولیدشده در حرکت بال‌زدن در حالت ایستا و در فرکانس‌های بال‌زنی مختلف طراحی و ساخته شده است تا بتوان اثر کورس بال‌زدن یک بال‌زن را همزمان با تغییر انعطاف‌پذیری پوسته‌ی آن بررسی کرد.

### چیدمان آزمایش

مکانیزم بال‌زن اصلی‌ترین قسمت این دستگاه است که عمل بال‌زدن را ایجاد می‌کند. در این دستگاه، برای ایجاد حرکت بال‌زنی و نیز قابلیت تغییر کورس بال‌زنی، یک مکانیزم تبدیل حرکت دورانی به خطی به جهت به حرکت درآوردن بال توسط سیستم لنگ طراحی شده است. در سامانه‌ی لنگ طراحی شده بر روی دیسک لنگ یک شیار قرار داده شده که محور لنگ با یک قید در داخل شیار می‌لغزد و مقدار فاصله‌ی محور لنگ از محور شافت مدور که در وسط دیسک قرار دارد میزان کورس لنگ را تعیین می‌کند. میزان کورس به وجود آمده توسط سامانه‌ی لنگ از طریق یک لینک به یک محور منتقل می‌شود که بر روی آن دو بازوی بال قرار گرفته است و میله محور توسط یک شیار راهنما هدایت می‌شود تا بازوهای

1- کارشناسی ارشد هوافضا

2- کارشناسی ارشد هوافضا، 09357708716، sajadmahmoudi@yahoo.com

3- کارشناسی ارشد مکترونیک

4- دانشیار مکانیک

بال از محور خود خارج نشوند. نمای سه بعدی مکانیزم طراحی شده در شکل 1 ارائه شده است.

مکانیزم شرح داده شده برای حرکت و کنترل فرکانس بال زنی به یک سروو موتور DC متصل می شود. سروو موتور DC نصب شده (به مدل BLD10-R-42BL105L2 از شرکت مونز)، قابلیت تنظیم دور موتور و یا فرکانس بال زنی را تا 5 هرتز از طریق نرم افزار مخصوص (Utility SCL)، دارد. جریان و ولتاژ مصرفی این موتور نیز از طریق همان نرم افزار قابل ثبت و استفاده است. برای اندازه گیری نیروی پیشران تولید شده توسط حرکت بال زنی، از یک لودسل یک محوره (STC Lasoux نوع S) در جهت نیروی پیشران (در حالت استاتیکی خالص نیرو در جهت برآ صفر است و نیازی به اندازه گیری آن نیست)، استفاده می شود. چیدمان بال زن و حسگر نیرو رو در شکل 2 مشاهده می کنید.

دقت این لودسل 0/05 درصد بیشترین میزان قابل اندازه گیری توسط آن (100 نیوتون) است. لودسل به صورت استاتیکی با استفاده از اوزان مشخصی کالیبره می شود و فاکتورهای کالیبراسیون اندازه گیری شده برای تبدیل سیگنال های ولتاژ نسبی به نیرو استفاده می شود. داده های خروجی از لودسل (نیروی پیشران اندازه گیری شده) بعد از عبور از تقویت کننده یا آمپلی فایر (به مدل DN-AM100 از شرکت داسل) توسط کارت اخذ دیتا (PCI-1710HG از شرکت Advantech) به کامپیوتر منتقل و توسط شبیه ساز طراحی شده در سیمولینک نرم افزار متلب ثبت می شود. از آنجایی که نتایج نیروی پیشران تولیدی به دلیل نوع حرکت بال زنی نوسانی هستند، باید داده های ثبت شده در نرم افزار، میانگین گیری شوند که برای این کار، بعد از هر داده برداری با حدود بیش از 500 نمونه در ثانیه و حذف اغتشاشات اضافی ناشی از دوران موتور و حرکت بال زنی به کمک فیلتر پایین گذر مرتبه سوم، برای میانگین گیری از تابع تبدیل فوریه موجود در نرم افزار متلب استفاده می شود.

#### بال های مورد بررسی

مطالعه ای اثر کورس بال زنی بر تولید نیروی پیشران در پرواز ایستا، با دو بال با جنس پوسته ای مختلف از نظر انعطاف پذیری مورد ارزیابی قرار گرفت. لذا دو نمونه بال با ابعاد و مساحت یکسان (ارائه شده در جدول 1) اما با مشخصات جنس پوسته ای متفاوت به صورتی که در جدول 2 آمده است، ساخته شد. جنس پوسته ای این بال ها از پلاستیک، و اسکلت بندی آن ها از یک اسپار (Spar) اصلی در لبه ی جلویی بال، یک اسپار فرعی در لبه ی عمودی بال و 2 ریب (Rib) میانی، تشکیل شده است. نمای این بال ها را در شکل 3 مشاهده می کنید.

جدول 1- مشخصات ابعادی بال های A و B

نسبت منظری	مساحت (m <sup>2</sup> )	D (cm)	C (cm)	B (cm)	A (cm)
2/18	0/0309	15	13	26	7/8

جدول 2- مشخصات پوسته و اسکلت بندی بال های A و B

بال	پوسته بال		اسکلت بندی بال	
	جنس	ضخامت (mm)	جنس	قطر (mm)
بال A	پلاستیک	0/03	کربن	2
بال B	پلاستیک	0/09	کربن	2

#### نتایج

داده های حاصل از اندازه گیری نیروی پیشران بر حسب فرکانس بال زنی برای بال های A و B در 4 کورس بال زنی 40، 50، 60 و 70 درجه به طور جداگانه در شکل های 4 و 5 نشان داده شده است. در تمام آزمایش ها، زاویه حمله برای تمام بال ها برابر صفر و کورس بال زنی به صورت متقارن تنظیم شده است. همان طور که انتظار می رود، میزان نیروی پیشران با بالا رفتن فرکانس و کورس بال زنی تقریباً با یک تابع درجه 2 در حال زیاد شدن است. اما برای مقایسه ای تأثیر کورس بال زنی و انعطاف پذیری پوسته ای بال به طور همزمان بر نیروی پیشران تولیدی و توان مصرفی، نمودارهای دیگری تهیه شده است که در ادامه شرح داده می شود.

در شکل های 6، 7، 8 و 9 نیروی پیشران تولیدی به ترتیب برای کورس های بال زنی 40 تا 70 درجه به صورت مجزا رسم شده است. در کورس بال زنی 40 درجه (شکل 6) میزان نیروی پیشران تولیدی برای بال A بیشتر از بال B است. در کورس بال زنی 50 درجه (شکل 7)، تفاوت مقدار نیروی پیشران تولیدی دو بال کمتر می شود اما هم چنان نیروی پیشران بال A بیشتر از بال B است. در شکل 8 دیده می شود که مقدار نیروی پیشران بال A کمتر از بال B می شود. و همین روند در کورس بال زنی 70 درجه نیز تکرار می شود. این نشان می دهد که بال A در کورس های بال زنی 40 و 50 درجه توانسته است از بال B در تولید نیروی پیشران موفق تر عمل کند در حالیکه در کورس های بال زنی 60 و 70 درجه، بال B که انعطاف پذیری کمتری نسبت به بال A دارد، عملکرد بهتری داشته است. لذا می توان نتیجه گرفت که بال های انعطاف پذیر در کورس های بال زنی پایین تا حدود 50 درجه عملکرد آیرودینامیکی بهتری دارند و برای کورس های بال زنی بالاتر، بال با انعطاف پذیری کمتر، مناسب تر است.

شکل های 10، 11، 12 و 13، رفتار تغییرات توان مصرفی نسبت به فرکانس بال زنی را برای کورس های بال زنی 40 تا 70 درجه نشان می دهند. همان طور که انتظار می رود، میزان توان مصرفی به ازای فرکانس بال زنی تقریباً با یک تابع درجه 2 در تمام آزمایش ها افزایش می یابد. ولی همان طور که در مجموعه ای نمودارهای توان مصرفی پیداست، برخلاف روند تغییرات نیروی پیشران در کورس های بال زنی کم و زیاد، در تمام شکل ها میزان توان مصرفی بال A کمتر از بال B می باشد.

#### نتیجه گیری و جمع بندی

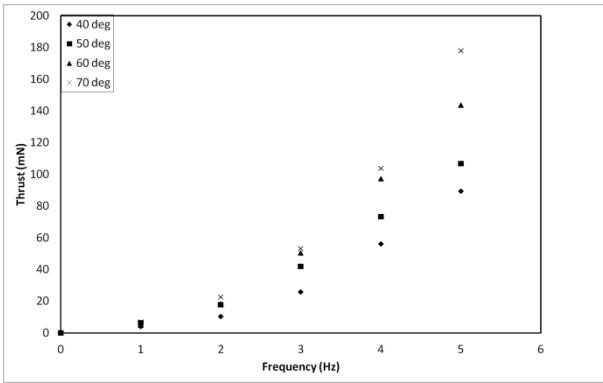
در این پژوهش، تأثیر همزمان کورس بال زنی و انعطاف پذیری بال، در حرکت بال زنی ایستا، به کمک بررسی عملکرد آیرودینامیکی آن تحقیق شده است. لذا یک چیدمان آزمایشگاهی شامل یک مکانیزم بال زن با قابلیت تغییر کورس یا همان ماکزیمم زاویه ای بال زنی و حسگر نیرو برای اندازه گیری نیروی پیشران تولیدی بال زن در فرکانس های بال زنی مختلف ساخته شده است. سپس 2 بال با جنس پوسته ای بال مختلف مورد تحقیق قرار گرفتند. از مهم ترین نتایج این پژوهش می توان به این موارد اشاره کرد: 1- مقدار توان مصرفی در تمام فرکانس ها و کورس های بال زنی برای بال با انعطاف پذیری بیشتر، مینیمم است. 2- هر دو پارامتر نیروی پیشران تولیدی و توان مصرفی بال زن با زیاد شدن فرکانس بال زنی تقریباً با یک تابع درجه 2، افزایش می یابند. 3- نرخ تولید نیروی پیشران با افزایش فرکانس بال زنی، افزایش می یابد. 4- نیروی پیشران تولید شده توسط بال A (انعطاف پذیرتر) در کورس های بال زنی 40 و 50 درجه بیشتر از بال B و درز کورس های بال زنی 60 و 70 درجه کمتر از بال B است. 5- بال های انعطاف پذیر در کورس های بال زنی پایین تا حدود 50 درجه عملکرد

آیرودینامیکی بهتری دارند ولی برای کورس‌های بال‌زنی بالاتر، بال با انعطاف‌پذیری کمتر، مناسب‌تر است.

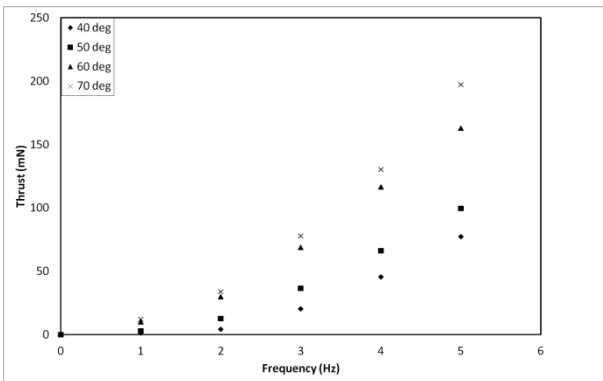
### تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از جناب آقای دکتر عباس ابراهیمی برای حمایت‌های همه‌جانبه‌شان از این تحقیقات، اعلام می‌دارند.

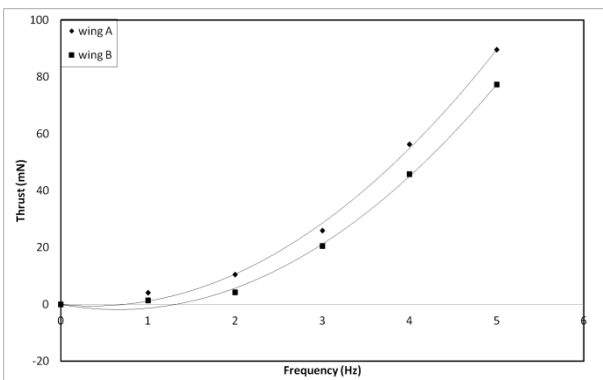
### شکل‌ها و نمودارها



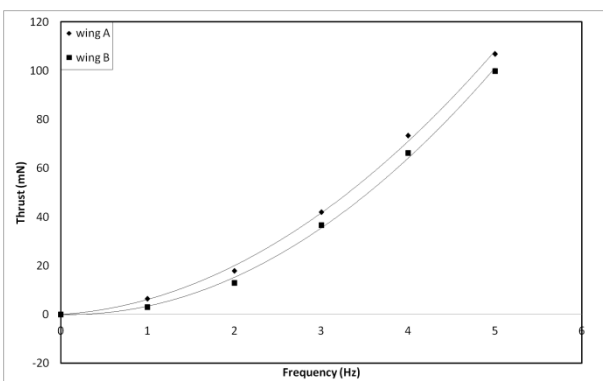
شکل 4- نمودار نیروی پیشرانش بر حسب فرکانس بال‌زنی برای بال A در کورس-های بال‌زنی 40، 50، 60 و 70 درجه



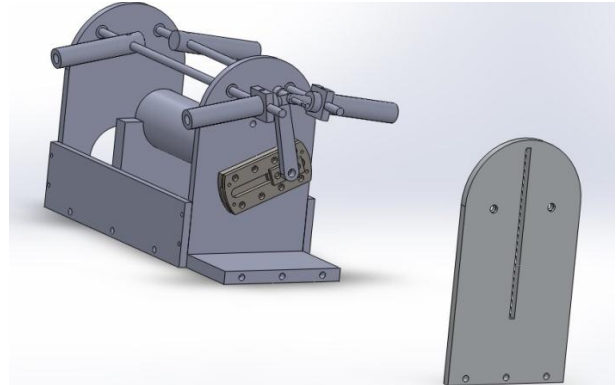
شکل 5- نمودار نیروی پیشرانش بر حسب فرکانس بال‌زنی برای بال B در کورس-های بال‌زنی 40، 50، 60 و 70 درجه



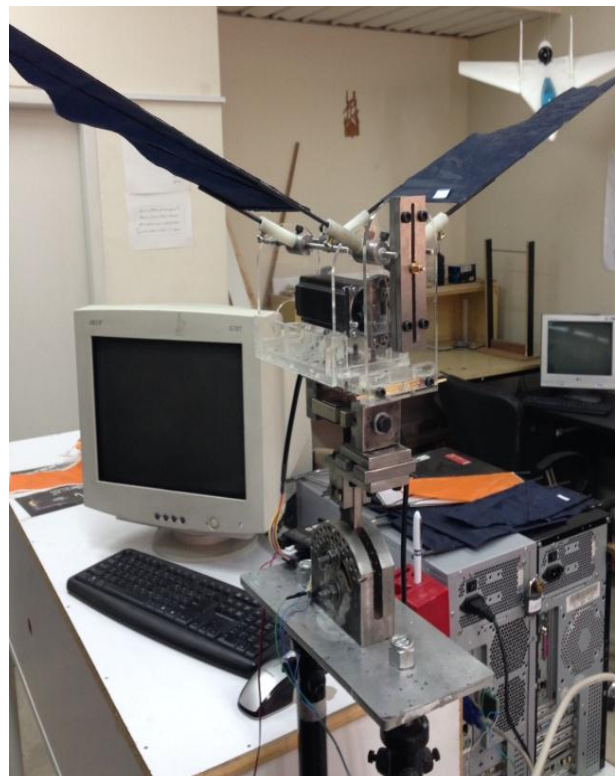
شکل 6- نمودار نیروی پیشرانش بر حسب فرکانس بال‌زنی برای کورس بال‌زنی 40 درجه



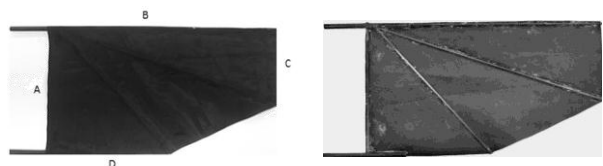
شکل 7- نمودار نیروی پیشرانش بر حسب فرکانس بال‌زنی برای کورس بال‌زنی 50 درجه



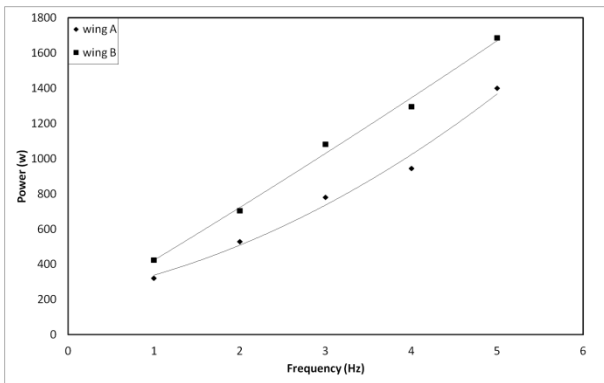
شکل 1- مکانیزم بال‌زنی با طراحی قابلیت تغییر کورس بال‌زنی



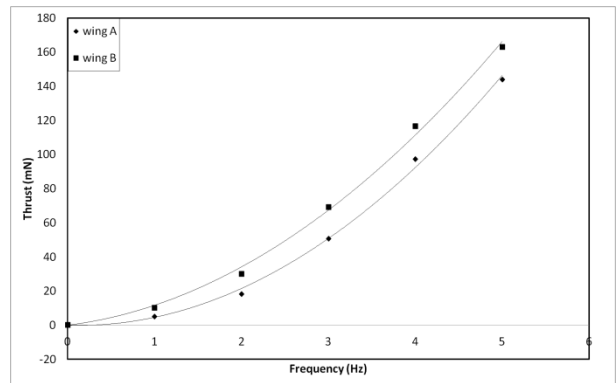
شکل 2- چیدمان بال‌زن و حسگر نیرو



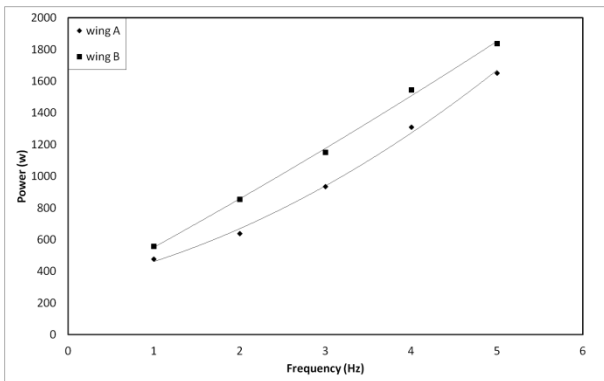
شکل 3- نمای کلی بال پوسته‌ای انعطاف‌پذیر طراحی شده



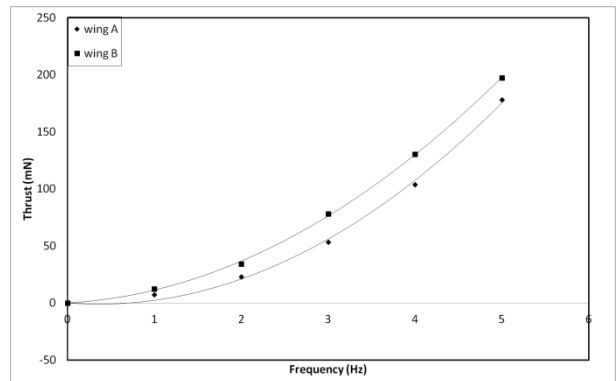
شکل 12- نمودار توان مصرفی بر حسب فرکانس بال‌زنی برای کورس بال‌زنی 60 درجه



شکل 8- نمودار نیروی پیشران بر حسب فرکانس بال‌زنی برای کورس بال‌زنی 60 درجه



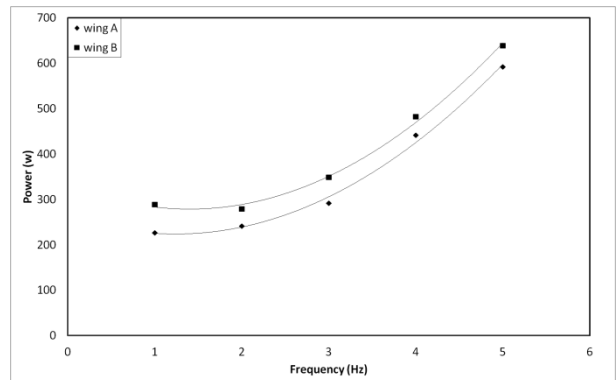
شکل 13- نمودار توان مصرفی بر حسب فرکانس بال‌زنی برای کورس بال‌زنی 70 درجه



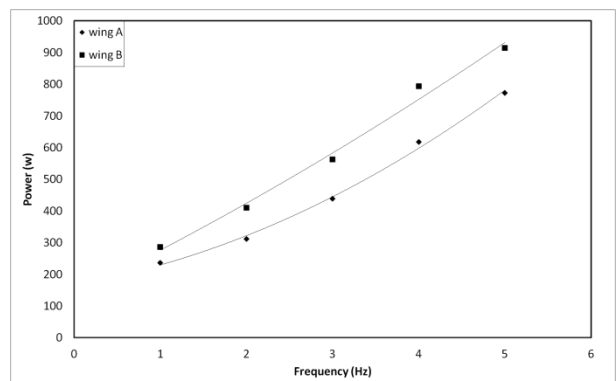
شکل 9- نمودار نیروی پیشران بر حسب فرکانس بال‌زنی برای کورس بال‌زنی 70 درجه

### مراجع

1. Wilson, Nicholas L., and Wereley, Norman. (2007). Experimental Investigation of Flapping Wing Performance in Hover. *48th structural dynamics and materials conference*
2. Hu, Hui, et al. (2008). An Experimental Study of Flexible Membrane Wings in Flapping Flight. *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Jan. 5 – 8, 2008, Orlando, Florida.
3. Widhiarini, S., and Yoon, K. J. 2009, Development of the Flight Performance of a 15 cm Flapping wing Air Vehicle.
4. Yafeng, Zhang, et Al. 2010. Lift and Thrust Characteristics Of The Flapping Wing Micro Air Vehicle. *27TH International Congress of the Aeronautical Sciences*.
5. ابراهیمی، عباس و همکاران، 1388. مطالعه‌ی تجربی نیروهای ناپایای برآ و پیشران تولید شده در حرکت بال زدن. *دوازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه صنعتی نوشیروان بابل، اردیبهشت 1388*.
6. Mazaheri, K., and Ebrahimi, A. (2009). Experimental study on interaction of aerodynamics with flexible wings of flapping vehicles in hovering and cruise flight. *Arch Appl Mech* (2010) 80: 1255–1269.



شکل 10- نمودار توان مصرفی بر حسب فرکانس بال‌زنی برای کورس بال‌زنی 40 درجه



شکل 11- نمودار توان مصرفی بر حسب فرکانس بال‌زنی برای کورس بال‌زنی 50 درجه