

عنوان: تحلیل عددی ویژگی های آیرودینامیکی هواپیمای بال زن

دکتر روح اله خوشحوا^۱، محمد کردامیری^۲، عطیه مانیان^۳

۱-استادیار مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران mahdi.khoshkhoo@gmail.com

۲- کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران kordamirimohammad1@gmail.com

۳- کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران Ateeyehmanian@gmail.com

چکیده:

پهپادها به دلیل قابلیت‌های منحصربه‌فرد در زمینه‌های نظامی و غیر نظامی مورد استفاده و توجه زیادی قرار دارند. پرنده بالزن جزء جدیدترین پهپادهای در حال توسعه است که در آن بال به طور همزمان وظیفه ایجاد نیروی برآ و پیشران را به عهده دارد. هدف از این مقاله، شبیه‌سازی مدل سه بعدی یک اورنیتوپتر با نرم‌افزار انسیس فلوئنت، با در نظر گرفتن سرعت‌های مختلف پرواز، زوایه حمله‌های مختلف بال، فرکانس‌های مختلف بال‌زنی و همچنین دامنه بال‌زنی متفاوت و زوایه‌های مختلف نصب دم است که به تحلیل و بررسی تاثیر این پارامترهای هندسی و کنترلی بر میزان نیروهای آیرودینامیکی لیفت و درگ پرداخته شده است. در این مقاله، ابتدا حرکت پیچ و پلانچ یک بالواره با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد اعتبار سنجی قرار گرفته است، سپس با در نظر گرفتن جریان تراکم ناپذیر، سه‌بعدی و ناپایا، از معادلات ناویر استوکس و مدل توربولانسی SST $k - \omega$ برای محاسبه مقادیر نیروهای آیرودینامیکی و تاثیر پارامترهای کنترلی بر روی مدل پرنده بالزن طراحی شده، استفاده گردیده است. در پایان نتایج در شرایط مختلف پرواز و تحت تاثیر پارامترهای کنترلی استخراج و مقایسه می‌گردد.

کلمات کلیدی: پهپاد، پرنده بالزن، حرکت پیچ و پلانچ، بالواره

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، هواپیماهای بدون سرنشین به دلیل قابلیت‌های منحصر به فرد، مورد توجه زیادی قرار گرفته اند. پرنده‌های بدون سرنشین در گذشته‌ای نه چندان دور صرفاً کاربردهای نظامی داشته اند، اما امروزه این نوع پرنده برای عموم مردم در دسترس قرار گرفته و همچنین از قابلیت‌های این نوع پرنده در جهت مصارف غیر نظامی استفاده می‌شود و می‌توان عنوان کرد که رفته رفته بر زندگی روزمره مردم تاثیر مستقیم خواهد داشت. پرنده هدایت پذیر از دور به اختصار پهپاد، به علت نبود مرجعی واحد در تعریف گروه بندی، می‌توان به گونه‌های مختلفی اعم از وابسته به ابعاد و اندازه، نوع بال و چگونگی پرواز بال زن، بال ثابت، بال دوار، عمود پرواز و نوع عملیات (تهاجمی، جاسوسی، گشت زنی، تصویربرداری) دسته بندی کرد. در دسته بندی پهپادها از نظر بال ثابت و بال زن بودن، به پهپادهای بال زن به اصطلاح اورنیتوپتر می‌گویند. UAV^۱ نام جامع برای پرنده‌های بدون سرنشین می‌باشد، برای تمایز و درک بهتر از دو اصطلاح رایج دیگر یعنی پرنده هایی در ابعاد کوچک MAV^۲ و پرنده هایی با ابعاد بسیار کوچک و به اصطلاح نانو NAV^۳ در نوشته های علمی مورد

^۱ unmanned aerial vehicle (پهپاد)^۲ Micro Aerial Vehicles^۳ Nano Aerial Vehicles

استفاده قرار می‌گیرد. در توضیح این دو اصطلاح، آژانس پروژه‌های پیشرفته دفاعی (دارپا)^۱ MAV، را به عنوان هواپیمایی با ابعادی حدود ۱۵ سانتیمتر و جرم حدود ۱۰۰ گرم و همچنین مداومت پروازی ۲ ساعت و NAV را با اندازه کمتر از ۱۰ سانتیمتر و جرمی کمتر از ۱۰ گرم بیان می‌کند. عمدتاً MAV و UAV برای ارتفاع کم و نظارت بر مکان‌های خطرناک یا نقشه برداری استفاده می‌شوند. این نوع هواپیماهای بدون سرنشین کنترل شونده را می‌توان در مواردی که حضور یک انسان غیرممکن و خطرناک باشد، مورد استفاده قرار داد.

۲. تئوری و پیشینه تحقیق:

در دهه ۹۰ میلادی، آژانس تحقیقات پیشرفته دفاعی برای نخستین بار مفهوم MAV را تعریف و ارائه نمود.^[۱] MAV به دلیل داشتن پتانسیل بالا در زمینه‌های وسیع تاکتیکی، چشم انداز کاربردی منحصر به فردی در حوزه فعالیت‌های نظامی و غیرنظامی دارند و همین دلیل سبب شد تا به تدریج مورد توجه جامعه علمی هوانوردی بین‌المللی قرار گیرد. در نتیجه کشورهای مختلف مدل‌های مختلفی از MAV ها را برای برآورده کردن الزامات مأموریت‌های مختلف توسعه دادند. با توجه به طراحی آیرودینامیکی و اصول پروازی، MAV های فعلی عمدتاً به سه دسته طبقه بندی می‌شوند؛ وسیله نقلیه هوایی میکرو با بال ثابت (FMAV^۲)، وسیله نقلیه هوایی میکرو با بال چرخشی (RMAV^۳) و وسایل نقلیه هوایی میکرو بالزن (BMAV^۴) نیز نامیده می‌شود. از منظر شبیه‌سازی و تشابه هرچه بیشتر ابعاد این پرندگان زیست‌الهام با پرندگان طبیعی، می‌توان این تلاش‌ها را به سه برهه زمانی مختلف تقسیم‌بندی کرد که در اولین مرحله، دارپا طی یک برنامه شش ساله در خلال سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۲ میلادی توانست با ساخت مدل‌هایی همچون Microstar، Black Widow و Kolibri Corporation، با مشخصات فنی حدود ۱۵ سانتی‌متر طول، حدود ۱۰۰ گرم جرم و مداومت پروازی ۲۰ دقیقه، نمایش خوبی را از MAV ها ارائه دهد. اگرچه نتایج بدست آمده در این مرحله از آنچه که دارپا انتظار داشت، ضعیف‌تر بود، اما تجربه فنی و پیش‌زمینه خوبی برای نسل‌های بعدی شد^[۲]. کاستی‌های این مرحله سبب شد تا محققین تمرکز بیشتری روی رفتار پروازی پرندگان و شبیه‌سازی بیشتر به پرندگان داشته باشند. در مرحله دوم بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ میلادی، پرندگانی با ابعاد و جرم کوچک‌تر (۷/۵ سانتی‌متر طول و جرم ۱۰ گرم) و قابلیت پرواز ایستا بود، همچنین محققین به این نتیجه رسیدند که پرواز در رژیم جریان ناپایا و اعداد رینولدز پایین می‌تواند بر کیفیت پروازی این پرندگان نقش بسزایی داشته باشد^[۳]. از نمونه‌های موفق ساخته شده در این دوران، می‌توان به مدل‌هایی همچون MicroBat و Entomopter و همچنین نمونه اولیه مرغ مگس‌خوار اشاره داشت. مرحله سوم، که از سال ۲۰۱۰ میلادی تا به امروز است، محققین برای بالا بردن کیفیت این BMAV ها تلاش می‌کنند. از بهترین دست‌آوردهای این دوره می‌توان به مدل‌هایی همچون Black Horent، که یک هلی‌کوپتر مینیاتوری، ساخته ارتش بریتانیا است، اشاره کرد. این پرنده ۱۰ سانتی‌متر طول و با احتساب باتری، ۱۶ گرم وزن دارد. این پرنده می‌تواند تصاویر و فیلم‌ها را از فاصله ۸۰۰ متری برای اوبراتور خود، ارسال کند. در جدول ۱ سیستم‌های متداول پروازی بال‌زن شرح داده شده است.

جدول ۱- سیستم‌های متداول پروازی بال‌زن

سیستم‌های متداول پروازی بال‌زن	نام پرنده	ابعاد هندسی	ویژگی‌ها	توسط
--------------------------------	-----------	-------------	----------	------

^۱ Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)

^۲ Fixed-wing Micro Air Vehicle

^۳ Rotary-wing Micro Air Vehicle

^۴ Biomimetic Micro Air Vehicle

شرکت آلمانی FESTO در سال ۲۰۱۱	دارای مکانیزم فلیپینگ، از نظر ظاهری مشابه مرغ دریایی، توانایی و کنترل پیچش نوک بال در هنگام بالزنی، دارای سیستم کنترل و پرواز خودکار، شعاع چرخش و مانورپذیری کم	طول بال ۱۹۶ سانتی متر، جرم ۴۵۰ گرم	Smart bird	MAV مشابه پرندگان [۵، ۴]
سال ۲۰۱۰ میلادی دانشگاه کالیفرنیا	تجهیزاتی شامل میکرو کنترل، دوربین، ژيروسکوپ، مازول‌های ارتباطی، کنترل هوشمند قوی و پرواز خودکار	وزن حدود ۱۲ گرم	Bird Best و H2Bird	
شرکت آمریکایی Aero Viroment در سال ۲۰۱۲	بالاترین سطوح پیشرفت هواپیماهای فلیپینگ، این پرنده در حالت پرواز بدون دم می‌تواند ماموریت‌های دشواری مثل پرواز ایستا(هاور) و شناسایی در محیط‌های کوچک نظیر ساختمان را انجام دهد	طول ۱۶ سانتی متر، وزن ۹۰ گرم، مداومت پروازی ۲۰-۱۰ دقیقه همچنین می‌تواند تداخل جریان باد با سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه را در هنگام اوج گرفتن با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه را تحمل کند.	مرغ مگس- خوار [۶]	
دانشگاه دلفت ۲۰۰۵	دارای مکانیزم پرواز قابل تامل و توانایی‌های منحصر به فردی ظاهری مشابه سنجاقک، مجهز به دوربینی برای شناسایی، نسل اول پروازی سنجاقک مانند با دم شکل V	طول بال ۵۰ سانتی متر و وزن ۲۱ گرم	Delfly I	MAV مشابه حشرات [۸، ۷]
۲۰۰۸	برای کنترل موثر، از دم ایستاده در طراحی این پرنده استفاده شده است، پرواز رو به جلو و پرواز در حالت ایستا	حدود ۲۸ سانتی متر طول و ۱۶ گرم وزن	Delfly II	
دانشگاه کالیفرنیا، برکلی ۲۰۱۳	فرکانس فلیپینگ این پرنده می‌تواند تا ۱۱۰ بار بر ثانیه برسد.	وزن پرنده بین ۴۰-۶۰ میلی گرم و طول بال ۳ سانتی متر	کوچکترین ریزربات حشره مانند، RoboBee	
موسسه فناوری کالیفرنیا ۲۰۰۲	داشتن دم عمودی کوچکی که تفاوت‌های آیرودینامیکی بسزایی را در هنگام بررسی گردابه‌های ناشی از لبه حمله در زمان فلیپینگ ایجاد می‌کند. مداومت پروازی ۲۵ دقیقه را ثبت کرد.	۱۰ گرم وزن طول بال ۲۳ سانتی متر	MicroBat اولین پرنده زیست‌الهام خفاش مانند	MAV با اصول پرواز خفاش [۱۰، ۹]
حاصل همکاری محققین دانشگاه ایلینویز (UIUC) و موسسه فناوری کالیفرنیا	بال این پرنده متشکل از یک غشای تقویت شده با فیبرکربن مبتنی بر سیلیکون با ضخامت ۵۶ میکرومتر است.	طول بال ۴۷ سانتی متر وزن ۹۳ گرم	Batbot یا به اختصار B2	

توسعه یک پرنده زیست الهام با الگوگیری از چگونگی پرواز پرندگان، حشرات و خفاش نیاز به مطالعه و تحقیقات بسیار در زمینه چگونگی تعامل نیروهای غیر خطی مانند آیرودینامیک و مکانیزم رفتاری سازه آن دارد. به منظور طراحی نسل جدید سیستم‌های پروازی زیست‌الهام با قابلیت‌های پروازی بهتر، نیاز است تا درک بهتری از چگونگی پرواز پرندگان در طبیعت داشته باشیم. پرندگان در هنگام پرواز، برای تغییر سرعت و ارتفاع از تغییر شکل یا وضعیت بال‌های خود استفاده می‌کنند که این تغییرات، سبب مدل‌های پروازی مختلف مانند گلاید، فلیپینگ و اوج‌گیری و غیره می‌شود. پرواز در حالت گلاید به پارامترهایی نظیر سرعت جریان هوا، چگالی هوا و وزن پرنده بستگی دارد و از طرفی حالت دم می‌تواند میزان لیفت تولیدی و درگ القایی را در سرعت‌های پایین پروازی مورد تاثیر قرار دهد [۱۱] و حتی می‌توان اینگونه عنوان کرد که اجزای تشکیل دهنده سازه پرنده و هندسه‌های مختلف آن از عوامل کلیدی و موثر کاهش درگ در شرایط مختلف پرواز هستند [۱۲]. پرندگان با تغییر زاویه حمله بال در هنگام فلیپینگ، میزان تراست مورد نیاز را برای پرواز رو به جلو تولید می‌کنند. تغییر در شکل بال‌زنی و تغییر هندسه بال در طول پرواز تاثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های آیرودینامیکی پرندگان دارد که سبب می‌شود مباحثی همچون چگونگی تنظیم بال در هنگام فرود یا پرواز در رژیم جریان ناپایا و تعیین سطح آیرودینامیکی بهینه، اهمیت بسیاری پیدا کنند [۱۳].

نیروی تراست حاصل از فلیپینگ عمدتاً ناشی از دلایلی از قبیل:

▪ اثر گردابه‌های دم

طبق نظریه کارمن-برگرز، ارتعاش بال‌ها سبب از بین رفتن گردابه‌های لایه‌مرزی می‌شود و جریان گردابی معکوس کارمن را در خلاف جهت حرکت بال، برای رسیدن به تراست ایجاد می‌کند [۱۴].

▪ مکش لبه حمله

هنگامی که جریان از سر و لبه حمله بال پرنده عبور می‌کند، سرعت جریان محلی افزایش می‌یابد و باعث ایجاد ناحیه‌ای کم فشار می‌شود که همین امر سبب ایجاد مکش نسبی در لبه حمله و متعاقباً ایجاد نیروی تراست می‌شود [۱۵]. مطالعه آیرودینامیک مربوط به این‌گونه پرندگان و حشرات که مکانیزم فلیپینگ دارند، به ویژه در ۲۰ سال اخیر و با توجه به پیشرفت‌های فناوری در ثبت و نمایش چگونگی جریان سیال و همچنین شبیه‌سازی‌های عددی، یک درک عمیق از چگونگی سینماتیک آن به ما می‌دهد. قبل از دهه ۸۰ میلادی، اعتقاد بر این بود که اصل پرواز در پرندگان به مانند هلی‌کوپتر است، بعدتر مشخص شد که تئوری جریان پایا نمی‌تواند مقدار لیفت به نسبت بالا در این مدل پرواز را ارضا کند، بر همین اساس، مطالعه جریان ناپایا اهمیت یافت. اگر بخواهیم مکانیزم‌های تولید لیفت را به طور مختصر عنوان کنیم، می‌توان آن‌ها را به چند دسته زیر تقسیم‌بندی کرد [۱۶، ۱۷]

▪ مکانیزم فلیپینگ

▪ مکانیزم تاخیر در استال

▪ مکانیزم سیرکولاسیون چرخشی

▪ مکانیزم جذب دنباله‌های جریان [۱۸]

برای درک هرچه بیشتر آیرودینامیک پرندگان بیولوژیک، محققین شروع به استفاده از تکنیک‌های تجربی و روش‌های شبیه‌سازی عددی در تحقیقات آیرودینامیکی بر روی سیستم‌های پروازی زیست‌الهام کرده‌اند. تکنیک‌های تجربی می‌توانند پارامترهای پروازی لازم را برای شبیه‌سازی‌های عددی که عمدتاً برای تحقیق بر روی پرندگان بیونیک، ساده شده‌اند را ارائه داده و از این‌رو از اهمیت بسزایی برخوردارند. بنابراین معمولاً در این‌گونه فعالیت‌های محققین، عمدتاً از یک بال متحرک ساده شده برای تقلید فلیپینگ یک سیستم پروازی زیست‌الهام در جهت استخراج نتایج مورد نظر استفاده می‌کنند. با این‌همه، شبیه‌سازی عددی می‌تواند هزینه‌های آزمایش را کاهش داده و در مدت زمان کوتاهی، نتایج آیرودینامیکی را به دست آورند.

[۱۹-۲۱]

۳. نتیجه گیری:

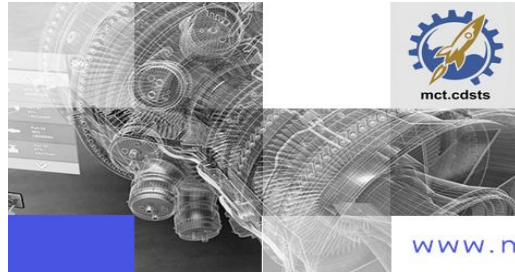
این مقاله، یک مرور ادبیاتی است و بر این اساس، پایگاه های اطلاعاتی Google Scholar، Web of Science مورد جستجو قرار گرفتند. مقالات در بازه ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۱ و با کلید واژه های پرنده بالزن، بالزنی، شبیه سازی عددی، پارامترهای کنترلی، آیرودینامیک ناپایا و ترکیبی از آنها در پایگاه های اطلاعاتی فارسی مانند مگیران جستجو شدند. به منظور بازیابی مرتبط ترین منابع با موضوع، محدودیتی جز نوع منبع در جستجو اعمال نشد؛ منابع مورد جستجو در این تحقیق تنها از نوع مقاله انتخاب شدند. در این مقاله، با شبیه سازی مدل سه بعدی یک اورنیتوپتر با نرم افزار انسیس فلوئنت، با در نظر گرفتن سرعت های مختلف پرواز، زوایه حمله های مختلف بال، فرکانس های مختلف بال زنی و همچنین دامنه بال زنی متفاوت و زوایه های مختلف نصب دم، به تحلیل و بررسی تاثیر این پارامترهای هندسی و کنترلی بر میزان نیروهای آیرودینامیکی لیفت و درگ پرداخته شده است و نمودارهای لازم مربوط به همگرایی، استقلال حل از شبکه و سایر پارامترها بیان می گردد. مدل نهایی این مقاله به صورت شکل ۱ استخراج گردید.



شکل یک- نتایج نهایی شبیه سازی و تحلیل نیروهای آیرودینامیکی و المان های کنترلی روی پرنده بالزن با شرایط مختلف

۴. مراجع

۱. McMichael, J.M., *Micro air vehicles-toward a new dimension in flight*. http://www.arpa.gov/tto/MAV/mav_auvsi.html, 1997.
۲. Keennon, M. and J. Grasmeyer. *Development of two MAVs and vision of the future of MAV design*. in *AIAA International Air and Space Symposium and Exposition: The Next 100 Years*. 2003.



۳. Pines, D., *Challenges facing small scale flight*. PPT downloaded from internet, 2007.
۴. Paranjape, A.A., et al., *A flight mechanics-centric review of bird-scale flapping flight*. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2012. **13**(3): p. 267-281.
۵. Keennon, M., K. Klingebiel, and H. Won. *Development of the nano hummingbird: A tailless flapping wing micro air vehicle*. in *50th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition*. 2012.
۶. Ma, K.Y., et al., *Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot*. Science, 2013. **340**(6132): p. 603-607.
۷. del Estal Herrero, A., et al., *Flow visualization around a flapping-wing micro air vehicle in free flight using large-scale PIV*. Aerospace, 2018. **5**(4): p. 99.
۸. Karásek, M., et al., *A tailless aerial robotic flapper reveals that flies use torque coupling in rapid banked turns*. Science, 2018. **361**(6407): p. 1089-1094.
۹. Ramezani, A., S.-J. Chung, and S. Hutchinson, *A biomimetic robotic platform to study flight specializations of bats*. Science Robotics, 2017. **2**(3): p. eaal2505.
۱۰. Ramezani, A., et al. *Bat Bot (B2), a biologically inspired flying machine*. in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2016. IEEE.
۱۱. Tucker, V.A., *Gliding birds: the effect of variable wing span*. Journal of Experimental Biology, 1987. **133**(1): p. 33-58.
۱۲. Lee, S.Y., G.R. Scott, and W.K. Milsom, *Have wing morphology or flight kinematics evolved for extreme high altitude migration in the bar-headed goose?* Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2008. **148**(4): p. 324-331.
۱۳. Altshuler, D.L., et al., *The biophysics of bird flight: functional relationships integrate aerodynamics, morphology, kinematics, muscles, and sensors*. Canadian Journal of Zoology, 2015. **93**(12): p. 961-975.
۱۴. Tobalske, B.W., *Biomechanics of bird flight*. Journal of Experimental Biology, 2007. **210**(18): p. 3135-3146.
۱۵. Lighthill, M., *Hydromechanics of aquatic animal propulsion*. Annual review of fluid mechanics, 1969. **1**(1): p. 413-446.
۱۶. Sun, M., *Insect flight dynamics: stability and control*. Reviews of Modern Physics, 2014. **86**(2): p. 615-646.
۱۷. Ellington, C.P., *The aerodynamics of hovering insect flight. I. The quasi-steady analysis*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, 1984. **305**(1122): p. 1-15.
۱۸. Sane, S.P., *The aerodynamics of insect flight*. Journal of experimental biology, 2003. **206**(۲۳): p. 4191-4208.
۱۹. Fry, S.N., R. Sayaman, and M.H. Dickinson, *The aerodynamics of hovering flight in Drosophila*. Journal of Experimental Biology, 2005. **208**(12): p. 2303-2318.
۲۰. Altshuler, D.L., et al., *Short-amplitude high-frequency wing strokes determine the aerodynamics of honeybee flight*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005. **102**(50): p. 18213-18218.
۲۱. Bross, M. and D. Rockwell, *Flow structure on a simultaneously pitching and rotating wing*. Journal of fluid mechanics, 201۷. **۷۵۶**. ۴p. 354-383.