

## (علمی - ترویجی)

# بال‌های شکل‌پذیر - طرحی نوین در صنعت هوایی

هدف این مقاله مطالعه و بررسی بال‌های شکل‌پذیر و تأثیر آن‌ها بر وسایل نقلیه هوایی با الگوگیری از شکل بال‌ها و نحوه پرواز پرندگان است. ابتدا، شکل بال‌های پرندگان و نحوه پرواز آن‌ها در موقعیت‌های مختلف بررسی می‌شود. سپس، هفت نوع بال شکل‌پذیر با الگوگیری از شکل بال پرندگان معرفی می‌شود. همچنین، مواد مورد نیاز این بال‌ها که از سال ۲۰۰۰ کشف و ساخته شده‌اند، بیان می‌شود. در انتها، با ذکر دلایلی نتیجه‌گیری می‌شود که میل به داشتن علم این نوع بال‌ها و استفاده از آن‌ها برای دستیابی به فناوری‌های به‌روز در آینده بسیار ضروری است.

واژه‌های کلیدی: بال‌های شکل‌پذیر، وسایل نقلیه هوایی، پرندگان

رضا حربی منفرد<sup>۱\*</sup>، محمد طیبی رهنی<sup>۲\*\*</sup>  
و مسعود زارع<sup>۱\*\*\*</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات  
تهران، دانشکده مکانیک، تهران، ایران، کدپستی:  
۱۳۹۱۸۱۴۴۵۴

۲- دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی  
هوافضا، تهران، ایران

\* دانشجوی دکتری (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

Monfared1368@gmail.com

\*\* استاد

\*\*\* استادیار

## Morphing Wings- A Novel Design in Aviation Industry

*This article aims to study and investigate morphing wings, based on bird's wings, and their effects on air vehicles. This is modeled after shapes of wings and flight of birds throughout the world. First, the shape of bird's wings and their use during different high situation are investigated. Also, seven different kinds of morphing wings, modeled after wings of birds are introduced. Then, the materials of these wings, which have been made since 2000, are elaborated on. Finally, it is resulted that achieving the knowledge and manufacturing of these wings, are very important in the future.*

**Keywords:** Morphing Wings, Air Vehicles, Birds

R. Harbi Monfared<sup>1\*</sup>, M. Taeibi  
Rahni<sup>2\*\*</sup>, and M. Zareh<sup>1\*\*\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Postal Code: 1391814454, Tehran, IRAN

2- Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, IRAN

\*Ph.D. Student (Corresponding Author); Email:

Monfared1368@gmail.com

\*\* Professor

\*\*\*Assistant Professor

## ۱- مقدمه

زمینه‌های مختلف هنر در طول تاریخ تکامل جوامع انسانی، مانند نقاشی‌های دیواری ایام گذشته، نقاشی روی ظروف سفالین، نقش و نگارهای عامیانه و قدیمی، نقش روی قالی‌ها و صنایع دستی زینتی یا زمینه‌های مختلف ادبی، اعم از نثر یا نظم، و همچنین حماسه‌های قهرمانی ملل مختلف، از تاریخ پیدایش انسان روی کره زمین تا به امروز بیان‌گر سابقه بسیار طولانی رابطه انسان و پرندگان است. در حقیقت می‌توان گفت که همواره پرندگان زبان استعاره انسان برای بیان بسیاری از اندیشه‌های وی بوده‌اند. همچنین، مدت‌های مدیدی نقش پیک و وسیله ارتباطی جوامع انسانی را بر عهده داشته‌اند. پرندگان و حیوانات از دیرباز مورد توجه خاص و احترام ایرانیان بوده‌اند، به نحوی که در روزگار هخامنشیان برخی از آنان حتی جنبه تقدس یافته بودند و هنرمندان آن‌ها را به نشانه تقدس روی دیوار کاخ‌ها و معابد با نقش برجسته نقاشی می‌کردند. علاوه بر آن، مجسمه این حیوانات و پرندگان به اصطلاح مقدس را گاه از سنگ، نقره، طلا و مفرغ می‌ساختند و یا تصویر آن‌ها را روی آثار هنری خود نقش می‌کردند. عقاب و شاهین به خاطر بلندپروازی و تیزهوشی و تیزچنگ بودن به صورت تک‌تک و باهم در یک اثر هنری جلوه‌گری می‌کردند و از همه این حیوانات شاهین الهام‌بخش اوج بلندپروازی و پیشرفت آنان بوده است. چون می‌خواسته‌اند در آسمان‌ها سیر کنند و بالی شاهین وار، بلند و قوی داشته باشند که شکست‌ناپذیر باشد. با پیشرفت علوم و پی‌ریزی زیست‌شناسی و توسعه آن که نقش، اهمیت و جایگاه ویژه کلیه مجموعه حیاتی طبیعت و اثرات آن‌ها را بر یکدیگر آشکارتر گردانید، نقش پرندگان در زندگی انسان اهمیت بیشتری پیدا کرد [۱-۲]. انگیزه ارائه این تحقیق، بررسی نحوه پرواز پرندگان و چگونگی تأثیر آن‌ها بر آینده بال‌های هواپیماها و پهپادها است.

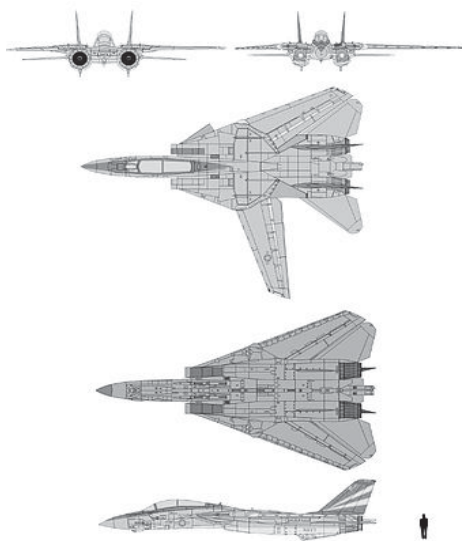
## ۲- نحوه حرکت بال پرندگان

نحوه پرواز و ساختمان بال پرندگان به چگونگی زندگی و سیستم تغذیه و شرایط محیط‌زیست آن‌ها ارتباط دارد. به عنوان مثال، پرندگان خوب پرواز مانند شاهین، عقاب و لاشخور می‌توانند مسافت زیادی را بدون بال‌زدن طی کنند. بنابراین، بال‌های آن‌ها عریض و پهن است. در صورتی که پرندگان بدپرواز، مانند پرندگان قابل شکار از قبیل قرقاول، سیاه‌خروس و کبک برای آن‌که بتوانند سریعاً از محل خطر دور شوند، بال‌هایی کوتاه و تقریباً لب‌گرد دارند. طبیعی است قدرت و مسافت پرواز این پرندگان کم خواهد بود. به‌منظور شناخت نحوه

پرواز و چگونگی عملکرد اندام‌ها در هنگام پرواز مطالعات بسیاری صورت گرفته‌است، ولی هنوز برای فهمیدن دقیق علل اوج‌گیری، سرخوردن روی لایه‌های هوا و به‌طور کلی مکانیزم پرواز در گونه‌های مختلف پرنده بررسی‌های بیش‌تری لازم است. به همین دلیل، بررسی مکانیزم پرواز از موارد مشکل و پیچیده در بررسی شیوه‌های زندگی پرندگان است [۳].

پرواز پرندگان را در شکل ساده آن می‌توان همانند حرکت هواپیما در هوا دانست. بدین معنی که وقتی پرنده بال می‌زند، نیروی مقاومت هوا به زیر بال فشار وارد کرده و پرنده را به بالا می‌کشد. هنگام حرکت به جلو، نیروی مقاومت هوا در جلو و زیر پرنده را به بالا می‌کشد. هنگام حرکت به جلو، نیروی مقاومت هوا که در جلو و زیر بال‌ها وجود دارد، همراه با چرخش خاصی که پرنده به بال‌ها می‌دهد، هوا را با فشار به عقب می‌راند و در نتیجه پرنده به بالا و جلو حرکت می‌کند. اگرچه حالت ظاهری پرندگان دوکی‌شکل و در نتیجه نیروی مقاومت هوا در جلو پرنده بسیار کم است، اما تفاوت هواپیما با پرنده در این است که در هواپیما بال‌ها ثابت بوده تنها کناره‌های آن متحرک است، ولی در پرندگان بال‌ها به بالا و پایین و عقب حرکت می‌کنند یعنی بال تغییر شکل پیدا می‌کند [۴]. جالب توجه این که اگر جریان‌های عمودی هوا به سمت بال‌ادارای حرکت و سرعت باشند، کمک زیادی در بردن پرنده به مسیرهای طولانی بدون از دست‌دادن انرژی برای بال‌زدن می‌کند. این‌گونه جریان‌های هوایی در محدوده گرمایی حاصل از تابش خورشید و اغلب روی دریا اتفاق می‌افتد و بعضی از پرندگان دریایی مانند مرغان طوفان، هنگام مهاجرت از این جریان‌های هوایی حداکثر استفاده را می‌برند. به عبارت دیگر، پرواز با شکوه و بی‌تقلای پرندگان دریایی، قوش‌ها، عقاب‌ها و کرس‌ها ناشی از کارایی آیرودینامیکی پرندگان و پدیده‌های هواشناختی است. توضیح این امر بدین صورت است که در آغاز پرنده با بال‌زدن شدید خود را تا ارتفاع حدود ۳۰ متر بالا می‌برد. در این ارتفاع، ضمن چرخیدن در دایره‌هایی به «بال باز روی» یا صفیدن (صف به معنی گستردن هر دو بال و سکون بال به هنگام پریدن آمده است [۵]) ادامه می‌دهد و در هر دایره به‌تناوب قسمت‌هایی از مسیر را بال می‌زند و قسمت‌های بزرگ‌تری را بدون بال‌زدن «می‌سرد» که در پرواز هواپیما این حالت کروز نام دارد. پرندگان بالاترین درجه حرارت بدن را در بین همه حیوانات دارند که به همراه یک سیستم هضم مؤثر و گردش سریع به پرنده این امکان را می‌دهد تا به‌سرعت از مقدار غیرمنتظره زیادی از غذای خوراکی استفاده کند. مالتر (و همکاران [۶] تخمین زده‌اند که یک مگس طلایی تنها در حدود پنجاه گرم وزن خود را طی یک پرواز از طریق اقیانوس از لبرادور به بخش مرکزی آمریکای جنوبی از دست می‌دهد. اگر یک هواپیمای کوچک می‌توانست با همان کارایی کار کند، چهار لیتر

و پرتاب آن‌ها طراحی شده است، اما به دلیل ناتوانی آن‌ها در مانورهای سریع به عنوان هواپیماهای جنگنده کاربرد ندارد. از طرف دیگر، هواپیماهای اف-۱۴ و اف-۱۸ دارای طول بال کوچک‌تری بوده که عمدتاً به عنوان هواپیماهای جنگنده استفاده می‌شود. در این هواپیماها بال‌ها برای پرواز با سرعت مافوق صوت به عقب جابه‌جا می‌شوند (شکل ۲). این کار باعث راندمان بالاتر و کنترل بهتر پرواز در سرعت‌های بالا می‌شود. این بال‌ها بیشتر به عنوان بال‌های شکل‌پذیر معروف هستند. بیشتر هواپیماهای بمب‌افکن توسط چنین هواپیماهایی حمایت می‌شوند. یک نظریه جدید طراحی برای هواپیماهای نظامی مطرح شده است که ویژگی بمب‌افکن و جنگنده بودن را داشته باشد که به هواپیما اجازه استفاده در هر دو مأموریت را بدهد. بنابراین، از این طریق نیاز به بال‌های شکل‌پذیر پدید آمده است [۸].



شکل (۱): هواپیمای اف-۱۴ [۹].



شکل (۲): هواپیماهای بمب‌افکن بی-۵۲ [۱۰].

سوخت برای پرواز تقریباً ۲۵۰ کیلومتر کافی بود [۲, ۷]. این در حالی است که در حالت عادی با این میزان سوخت یک هواپیمای کوچک تنها می‌تواند ۳۰ کیلومتر پرواز کند. بنابراین، نحوه شکل‌پذیری بال‌های پرندگان تأثیر قابل توجهی بر عملکرد پرواز آن‌ها دارد.

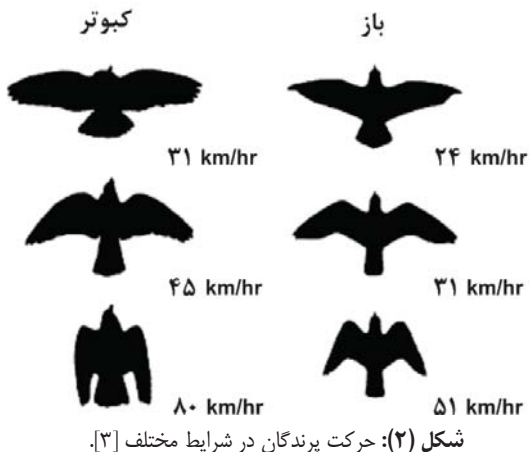
### ۳- بال‌های شکل‌پذیر

در سال ۱۹۰۳ برادران رایت اولین پرواز را انجام دادند. ایده پرواز بدون فلاپ از همان سال‌ها مورد بررسی قرار گرفت. این توانایی، کنترل بهتر هواپیما را فراهم کرد. سپس، درک توانایی چرخش بال‌ها منجر به مانور بیشتری برای بهبود عملکرد شد [۸]. کنترل پرواز یک پرنده، به طور کامل به مفهوم و درک بال‌های شکل‌پذیر<sup>۲</sup> آن بستگی دارد. اگرچه پرواز با پیچش بال‌ها بسیار مشکل‌تر از استفاده از فلاپ‌ها است. همچنین، برآ و پایداری پرواز به بال‌های محکمی احتیاج دارد. به طور کلی با پیشرفت هواپیماها، فلاپ‌ها نیز توسعه پیدا کرده و جزء تجهیزات اصلی هواپیماها شدند. با ظهور مواد هوشمند<sup>۳</sup> ایده بال‌های تغییر شکل‌پذیر دوباره صنعت هوابی را مجذوب خود کرد. مواد هوشمند، مصالحی هستند که با عملکردی هوشمندانه در مقابل تغییرات محیط می‌توانند مانند موجودات زنده خود را با شرایط محیطی منطبق سازند. برخی از این مواد، هر نوع خدشه و خرابی در ساختار خود را پیش‌بینی کرده و نقایص خود را برطرف می‌سازند. به همین دلیل، در اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی، تلاش‌های زیادی برای استفاده مواد هوشمند برای پیچش و کنترل ایرفویل انجام شد. این مجموعه تلاش‌ها و به‌کارگیری مواد هوشمند، منتج به تغییر خط متوسط خمیدگی ایرفویل شد که باعث پیدایش فناوری بال‌های شکل‌پذیر یا بال‌های هوشمند<sup>۴</sup> شدند. البته همان‌طور که در ادامه اشاره خواهد شد، قبل از این هم بال‌هایی با این نام‌ها در صنایع هوابی، مانند هواپیمای جنگنده اف-۱۴<sup>۵</sup> (ساخته شده در سال ۱۹۷۰) به‌کار برده می‌شد. اما همان‌طور که در شکل ۱ قابل مشاهده است، این بال‌های این هواپیماها فقط در سرعت‌های بالا جمع شده و خود این بال تغییر شکل پیدا نمی‌کند. بعد از دهه ۱۹۸۰ و از اوایل دهه ۱۹۹۰، منظور از به‌کارگیری بال‌های شکل‌پذیر استفاده از مواد هوشمند در این بال‌ها بود [۸].

تاریخ نشان داده است که بیشتر هواپیماهای نظامی، تنها برای انجام یک نوع مأموریت طراحی شده‌اند. به عنوان مثال، هواپیماهای بمب‌افکن بی-۵۲<sup>۶</sup> (شکل ۲) دارای بال با طول زیاد و برای مأموریت‌ها در مدت طولانی برای حمل بمب‌ها

2. Morphing Wings
3. Smart Materials
4. Smart Wings
5. F-14 Tomcat
6. Boeing B-52 Stratofortress

(علمی-ترویجی)  
رضا حربی منفرد، محمد طیبی رهنی و مسعود زارع



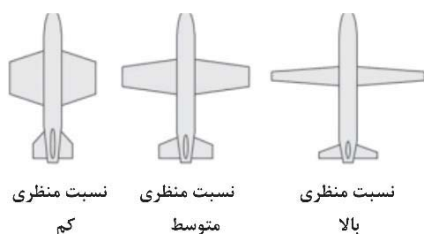
همان‌طور که گفته شد یکی از موضوعات مهم در این حوزه، ترکیب مأموریت‌ها می‌باشد. با توجه به نیاز روزافزون به دخالت هواپیماهای بدون سرنشین در عرصه نظامی و غیرنظامی به دلیل کارایی بالا و صرفه اقتصادی و انسانی، هواپیماهای بدون سرنشین مختلف در طیف وسیعی از مأموریت‌ها به کار گرفته می‌شوند. این امر منجر به سکوی پرتابی برای استفاده از مواد هوشمند در ساخت وسایل نقلیه جنگی بدون سرنشین با بال‌های شکل‌پذیر شده است. این طرح بال با الگوبرداری از پرندگان انجام شده است که در هنگام پرواز با توجه به شرایط طرح بال خود را عوض می‌کنند (شکل ۳). همچنین، در جدول ۱ به روند مطالعه بال‌های تغییر شکل‌پذیر در گذر زمان پرداخته شده است. در این جدول تحقیقاتی که به سطح آمادگی فنی<sup>۷</sup> رسیده‌اند، بررسی شده است.

جدول (۱): تحقیقات پیرامون بال‌های تغییر شکل‌پذیر در گذر زمان.

سال	اطلاعات	ایده	آزمایش تونل باد	آزمایش پرواز	مرجع
۱۹۰۳	پروانه موتور برادران رایت	تغییر شکل پیش‌پیشی بال		✓	[۱۱]
۱۹۲۰	بال با تغییر خط متوسط خمیدگی	تغییر خط متوسط خمیدگی	✓		[۹]
۱۹۷۹-۱۹۸۹	ادغام فناوری پیشرفته هواپیماهای جنگنده	تغییر خط متوسط خمیدگی و جابه‌جایی بال	✓	✓	[۱۰]
۱۹۹۵-۱۹۹۹	برنامه بال هوشمند (فاز ۱)	تغییر خط متوسط خمیدگی	✓		[۱۲]
۱۹۹۶-۲۰۰۱	بال آبروالاستیک	تغییر خط متوسط خمیدگی	✓	✓	[۱۳]
۱۹۹۷-۲۰۰۱	برنامه بال هوشمند (فاز ۱)	تغییر خط متوسط خمیدگی	✓		[۱۴]
۱۹۹۹	هیدروفویل	تغییر خط متوسط خمیدگی	✓		[۱۵]
۲۰۰۱	بال سازگار با مأموریت	تغییر خط متوسط خمیدگی	✓		[۱۶]
۲۰۰۳-۲۰۰۶	بال Z شکل	بال تاشونده	✓		[۱۷]
۲۰۰۳-۲۰۰۶	ایده بال خفشی کل	جابه‌جایی بال	✓		[۱۸]
۲۰۰۳	ایرفویل با مواد حافظه‌دار	تغییر طول متوسط خمیدگی در قسمت‌های گوناگون بال	✓		[۱۹]
۲۰۰۴	بال‌های تلسکوپی	تغییر شکل طول بال	✓	✓	[۲۰]
۲۰۰۵	بال با تغییر شکل توسط پر یا خارج شدن باد	تغییر شکل پیش‌پیشی و طول متوسط خمیدگی	✓	✓	[۲۱]
۲۰۰۷	بال تلسکوپی پنوماتیک	تغییر طول بال	✓		[۲۲]
۲۰۰۸	ایرفویل تغییر شکل‌پذیر با مواد حافظه‌دار	تغییر خط متوسط خمیدگی			[۲۳]
۲۰۰۸	ایرفویل تغییر شکل‌پذیر با مواد کامپوزیتی	تغییر پیش‌پیشی بال			[۲۴]
۲۰۰۸	تغییر شکل دم بال	بال تاشونده			[۲۵]
۲۰۰۹	بال تغییر شکل‌پذیر با محرک مواد حافظه‌دار	تغییر خط متوسط خمیدگی			[۲۶]
۲۰۱۰	بال تغییر شکل‌پذیر پیش‌پیشی	تغییر شکل پیش‌پیشی بال			[۲۷]
۲۰۱۱	بال تغییر شکل‌پذیر گسترده	تغییر شکل طول بال	✓		[۲۸]
۲۰۱۲	بال تاشونده	تغییر طول بال			[۲۹]
۲۰۱۳	تغییر شکل بال مانند خفاش	تا شدن بال			[۳۰]
۲۰۱۴	بال با لبه جلویی تطبیق‌پذیر	تغییر طول متوسط خمیدگی			[۳۱]
۲۰۱۵	بال تغییر شکل‌پذیر با تغییر طول بال	تغییر شکل طول بال	✓		[۳۲]
۲۰۱۶	تغییر شکل قسمت پیش‌پیشی بال	تغییر شکل پیش‌پیشی بال	✓		[۳۳]
۲۰۱۶	تغییر شکل نوک بال	تغییر طول متوسط خمیدگی			[۳۴]
۲۰۱۷	میکرو وسیله آبی	تغییر پیش‌پیشی بال		✓	[۳۵]

7. Technology Readiness Level (TRL)

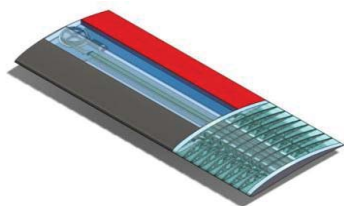
گرفته است. البته، تغییر شکل طول وتر قبلا تر از این برای پروانه بالگردها مورد استفاده قرار گرفته است [۳۶].



شکل (۵): نسبت منظری در هواپیما [۳۶].

### ۳-۲- تغییر شکل طول بال

همان‌طور که گفته شد، یکی از پارامترهای تغییر بال شکل‌پذیر طول بال است. مطابق شکل ۶ با تغییر طول بال و یافتن اندازه بهینه آن در شرایط مختلف هواپیما برای مأموریت‌های گوناگون کاربرد خواهد داشت. این کار فواید زیادی از جمله افزایش پایداری (مدت‌زمان پرواز خودکار<sup>۴</sup>) هواپیما، کاهش فاصله بلند شدن<sup>۵</sup> و فرود<sup>۶</sup> و کنترل مانور هواپیما را دارد. هواپیماهای با بال‌های شکل‌پذیر متقارن به کمک تغییر طول، با افزایش طول بال در زمان پرواز خودکار<sup>۷</sup> می‌تواند باعث افزایش زمان پرواز<sup>۸</sup> و پایداری شود. همچنین، منجر به افزایش بهره‌وری سوخت و زمان پرواز می‌شود. برای یک هواپیما با مأموریت جنگی، طول بال زیاد، قدرت مانور و سرعت خودکار هواپیما را پایین می‌آورد. این نوع بال‌های شکل‌پذیر با تغییر طول بال و در نتیجه تغییر نسبت منظری امکان استفاده از هواپیما در شرایط مختلف را می‌دهد. به عنوان مثال، نیاز به افزایش زمان پرواز و پایداری، این بال‌ها قادر به ارائه مکانیزم کنترل با مانور بهتر است [۳۶]. شکل ۷ تأثیر افزایش طول بال بر دیگر پارامترها را نشان می‌دهد.



شکل (۶): ایرفویل با طول بال تغییر شکل‌پذیر [۳۶].

### ۳-۱- انواع بال‌های شکل‌پذیر

شکل‌پذیری به توانایی یک بال مشخص گفته می‌شود که قادر به تغییر هندسه خود در طول پرواز است. چنین بال‌هایی، هواپیماها را قادر می‌سازد تا در مأموریت‌ها با شرایط گوناگون تطبیق پیدا کرده و پرواز کند و در شرایط پروازی دارای عملکرد بهتری باشد. براساس مطالعات صورت‌گرفته، پارامترهای هندسی مختلفی در این گونه بال‌ها دخیل هستند که در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این بخش به تأثیرگذاری آن‌ها پرداخته می‌شود [۳۶].



شکل (۴): نمایش بال‌های شکل‌پذیر [۳۶].

تغییر قسمت بالایی بال<sup>۱</sup>، شامل سه پارامتر است که به سه عنوان طول بال، طول وتر بال و جلو و عقب رفتن بال<sup>۲</sup> شناخته می‌شود. هر یک از این پارامترها، برای تشکیل بال‌های تغییر شکل‌پذیر، می‌تواند فعال شود. ایده تغییر شکل‌پذیری توسط تغییر طول بال و جلو و عقب رفتن بال منوط به تغییر اندازه نسبت منظری<sup>۳</sup> (نسبت طول بال به طول وتر) است (شکل ۵). مقدار نسبت منظری یک پارامتر مهم برای عملکرد نسبت برآ به پسای بال است. همچنین، بالا بردن نسبت منظری مدت زمان پرواز یک هواپیما را افزایش می‌دهد. تغییر شکل طول بال و عقب و جلو رفتن آن به‌طور قابل توجهی برای کاربردهای نظامی به‌خصوص هواپیماهای بدون سرنشین که نیاز به مأموریت‌های چندمنظوره دارد، مورد استفاده قرار

1. Wing Planform
2. Sweep Wing
3. Aspect Ratio
4. Endurance
5. Take-Off
6. Landing
7. Cruise Flight
8. Flight Range



### ۳-۴- جابه‌جایی بال

مطابق شکل‌های ۱۱-۱۰ جابه‌جایی متغیر بال باعث بهبود عملکرد آئرودینامیکی و نسبت برآ به پسا می‌شود. باید توجه داشت شکل ۱۱ توسط نرم‌افزار سالیدورکس<sup>۱۰</sup> ترسیم شده است. ایده بال شکل‌پذیر با قابلیت جابه‌جایی<sup>۱۱</sup>، براساس زاویه بال در طول پرواز است. به‌طور معمول، برای کاهش پسا در سرعت‌های بالا با کاهش نسبت منطری بال، زاویه بال تغییر می‌کند. مطالعات قبل نشان می‌دهد که بال با جابه‌جایی در زمان بلند شدن، صعود و فرود مناسب است. اما مطالعات جدید مزایای دیگری نیز برای این‌گونه بال‌ها به‌دست آورده‌اند. بنابراین، این بال‌ها وقتی به عقب جابه‌جا می‌شود، هواپیماها را قادر به استفاده در مأموریت‌های گوناگون با عملکرد مفید مانند سرعت پایین در زمان بلند شدن و فرود و داشتن سرعت زیاد خودکار می‌شود. این بال‌ها در هواپیماهای نظامی برای رسیدن سریع‌تر به سرعت مافوق صوت خودکار<sup>۱۲</sup>، زمان طولانی‌تر برای نزدیک ماندن به هدف برای هواپیماهای جنگی<sup>۱۳</sup> و سرعت دش<sup>۱۴</sup> استفاده می‌شود. بال‌های شکل‌پذیر با قابلیت جابه‌جایی برای هواپیماهای جنگی در مأموریت‌های با سرعت کم، زیاد و دش کاربرد است. همچنین، این بال‌ها باعث مانورپذیری بالای هواپیما می‌شود [۳۶، ۳۹]. در شکل ۱۲ به جمع‌بندی این بخش پرداخته شده است. در این شکل پارامترهای متأثر از سه تغییر شکل ذکر شده بال بیان می‌شود. باید توجه داشت که ممکن است یک تغییر باعث افزایش یا کاهش و یا بهبود یا بدتر کردن یک پارامتر شود.



شکل (۱۰): تغییر مکان بال شکل‌پذیر [۳۷].



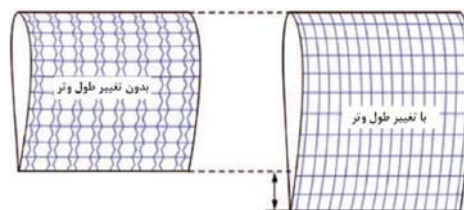
شکل (۱۱): تغییر مکان بال شکل‌پذیر در پهپاد شاهد-۱۲۹.



شکل (۷): تأثیر افزایش طول بال.

### ۳-۳- تغییر شکل وتر بال

ایده تغییر شکل وتر<sup>۱۵</sup> ایرفویل از طویل شدن آن به‌دست می‌آید (شکل ۸). به‌طور معمول، در هواپیماهای مرسوم طول وتر را توسط فلاپ‌ها گسترش می‌دهند (شکل ۹). این کار باعث ایجاد یک فاصله با بال و تشکیل یک سطح ناهموار می‌شود. بال شکل‌پذیر با تغییر طول وتر با حذف فاصله و تشکیل سطوح هموار، منجر به کاهش نیروی پسا می‌شود. آزمایش‌ها نشان داده است که بال‌های شکل‌پذیر با تغییر طول وتر باعث بهبود عملکرد آئرودینامیکی در رابطه با ضریب برآ و نسبت برآ به پسا می‌شود. همچنین، این بال‌ها توانایی کنترل بهتر هواپیما در حالت چرخشی و به عنوان یک جایگزین برای آرلئون را دارد [۳۶-۳۷].



شکل (۸): تغییر طول وتر ایرفویل شکل‌پذیر [۳۶].

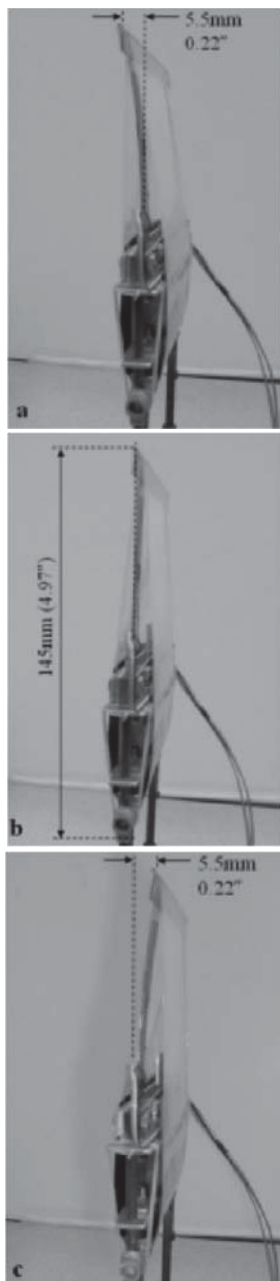


شکل (۹): فلاپ‌ها در یک هواپیما [۳۸].

9. Chord Morphing
10. Solidworks
11. Variable Wing Sweep Morphing
12. Supersonic Cruising Speed
13. Loiter Time
14. Dash Speed

### ۳-۶- جابه‌جایی وتر بال

با جابه‌جایی وتر، بال دارای سطح هموارتر و نیز تطبیق‌پذیری بهتری در شرایط پروازی مختلف خواهد داشت. همچنین، در محور رول تأثیرگذار است. این بال باعث کاهش توان مصرفی هواپیما می‌شود [۴۲]. شکل ۱۴، نحوه عملکرد این بال را نمایش می‌دهد. در شکل ۱۵ این نوع بال در یک پهپاد توسط نرم‌افزار سالدورکس ترسیم شده است.



شکل (۱۴): جابه‌جایی وتر بال [۴۲].



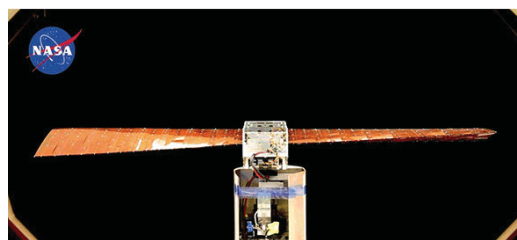
### جابه‌جایی بال



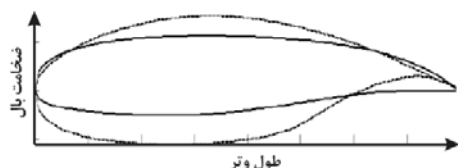
شکل (۱۲): پارامترهای متأثر از سه تغییر شکل ذکر شده بال.

### ۳-۵- تغییر شکل پیچشی بال

همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، تغییر شکل پیچشی بال برای کنترل هواپیما در محورهای رول یاو و پیچ تأثیرگذار است. مکانیزم کنترل این نوع بال به صورت تجربی و عددی با مکانیزم کنترل بال‌های مرسوم مقایسه شده است. نتایج نشان داد که بال تغییر شکل پیچشی دارای راندمان بهتری از لحاظ آنرویدینامیک و نسبت برآ به پسا است [۳۶، ۴۰].



شکل (۱۳): تغییر شکل پیچشی بال [۴۱].



شکل (۱۷): تنظیم ایرفویل [۴۲].



شکل (۱۵): جابه‌جایی وتر بال در پهپاد [۴۲].

### ۳-۹- تغییر شکل پیوسته (کلی)

تا اینجا تقسیم‌بندی بال‌های تغییر شکل‌پذیر به صورت مجزا بوده است. اما مسأله مهم این است که بال علاوه بر تغییر در قسمت‌های ذکر شده به صورت پیوسته در تمامی قسمت‌ها نیز تغییر شکل دهد [۴۳]. شکل ۱۸ نشان‌دهنده این موضوع است. همچنین، جدول ۲ تفاوت‌های آن‌ها را از لحاظ عملکرد نشان می‌دهد.



تغییر شکل مجزا



تغییر شکل پیوسته (کلی)

شکل (۱۸): تنظیم ایرفویل [۴۳].

### ۳-۷- تغییر شکل طول بال ناشی از خمش

تغییر شکل طول بال ناشی از خمش، قادر به افزایش عملکرد هواپیما و کنترل مناسب پرواز است. این بال‌ها باعث افزایش قدرت مانور هواپیما، کاهش پسای اعمال شده و بهبود شرایط استال می‌شود. این نوع از بال‌های شکل‌پذیر جزء کم‌کاربردترین آن‌ها است [۴۲]. در شکل ۱۶ تغییر شکل طول بال ناشی از خمش در یک پهپاد توسط نرم‌افزار سالیدورکس ترسیم شده و نحوه عملکرد آن را نمایش می‌دهد.



شکل (۱۶): تغییر شکل طول بال ناشی از خمش در پهپاد [۴۲].

### ۳-۸- تنظیم ایرفویل (تغییرات خط متوسط خمیدگی و ضخامت)

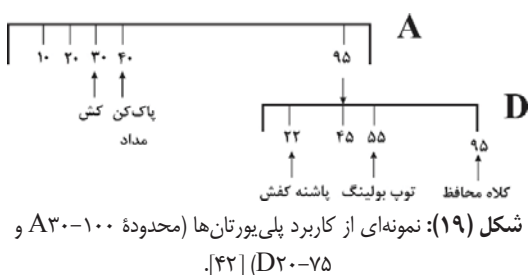
تنظیم ایرفویل به تغییرات خط متوسط خمیدگی و ضخامت آن مربوط است (شکل ۱۷). خط متوسط خمیدگی بیان‌گر تأثیر منحنی یا شکل ایرفویل در عملکرد آئرودینامیکی است. تغییر شکل این خط درون ایرفویل توسط تعدادی محرک<sup>۱۵</sup> صورت می‌گیرد. خط متوسط خمیدگی در بعضی قسمت‌های ویژه مانند لبه جلویی، لبه عقبی و یا به صورت تغییر شکل کل بال می‌تواند تغییر شکل دهد. توسط کنترل شکل خط متوسط خمیدگی می‌توان نسبت برآ به پسا را در شرایط مختلف پرواز بهبود بخشید. همچنین، همانند این خط تغییر ضخامت نیز باعث بهبود نسبت برآ به پسا در شرایط گوناگون پروازی می‌شود [۴۲].



موج‌دار کششی (استرچ)<sup>۲۳</sup>، ملنند اسپندکس<sup>۲۴</sup> است [۴۴]. در بخش‌های بعدی به بررسی این مواد پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱- مواد پلی‌یورتان

مواد پلی‌یورتان در اواخر دهه ۱۹۳۰ توسط اوتیس بایر<sup>۲۵</sup> اختراع شد. مطابق اطلاعات شرکت بانکر<sup>۲۶</sup>، پلی‌یورتان‌ها به عنوان جایگزینی برای مواد لاستیکی در طول جنگ جهانی دوم اختراع شد. بعد از سال‌ها کار مهندسی، انواع مختلفی از پلی‌یورتان‌ها برای کاربردهای گوناگون کشف و تولید شد. این مواد به دلیل خاصیت الاستیسیته و هم‌زمان دارا بودن سختی و دوام یک فلز بسیار محبوب است. به دلیل اینکه پلی‌یورتان یک ماده مصنوعی است، انواع مختلفی از فرمول‌های شیمیایی برای آن وجود دارد که قابلیت ساخت انواع آن با سختی‌های گوناگون را می‌دهد [۴۴]. کاربردهای پلی‌یورتان‌ها را با سختی‌های مختلف توسط دستگاه سختی سنجی<sup>۲۷</sup> مواد الاستیک و پلاستیک نشان می‌دهد. فواید دیگر پلی‌یورتان‌ها توانایی مقاومت در برابر ساییدگی و تحمل فشار است. همچنین، این مواد مقاوم در برابر روغن، حلال‌ها، چربی‌ها گریس و بنزین هستند. پلی‌یورتان‌ها با توجه به فرمول‌های شیمیایی مختلف قادر به طراحی خاص برای هر نوع بارگذاری است. به دلیل اینکه هوایماها در معرض شرایط آب و هوایی مختلف قرار دارند، مواد پوسته بدنه باید در برابر المان‌های هوایی مقاوم باشند. پلی‌یورتان‌ها در برابر اکسیژن، اوزون و نور خورشید مقاوم هستند [۴۳]. در شکل ۱۹ به چند نمونه از کاربرد این مواد برحسب سختی اشاره شده است.



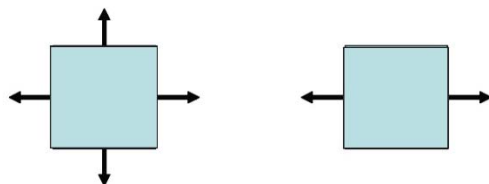
جدول (۲): تحقیقات پیرامون بال‌های تغییر شکل‌پذیر در گذر زمان.

تغییر شکل مجزا	تغییر شکل پیوسته (کلی)
عملکرد منفرد	قابلیت با عملکردهای گوناگون
تطبیق‌پذیری محلی در هوایما	توزیع تطبیق‌پذیری کلی در هوایما
جلوگیری از اتصال بین محورهای هوایما	قابلیت کوپلینگ محورهای هوایما

#### ۴- مواد سازنده بال‌های شکل‌پذیر

اگرچه مهندسان بال‌های شکل‌پذیر مختلفی را طراحی کرده‌اند، اما تحقیقات محدودی پیرامون مواد سازنده این بال‌ها صورت گرفته است. بعد از بررسی توانایی بال‌های شکل‌پذیر، مهندسان در دانشگاه ایالتی و موسسه پلی‌تکنیک ویرجینیا<sup>۱۶</sup> معیاری برای مواد قابل استفاده در این بال‌ها تعیین کردند. مطابق این تحقیقات این بال باید کشسان<sup>۱۷</sup>، شکل‌پذیر، قابلیت برگشت به حالت اولیه بالا<sup>۱۸</sup>، مقاوم به تغییر شرایط هوایی، مقاوم در برابر ساییدگی و مواد شیمیایی و دارای سختی کافی در برابر نیروهای آئرودینامیکی باشد [۴۴]. پیشرفت‌های مهندسی در زمینه پلیمرها منجر به پیدایش مواد با دوام، شکل‌پذیر، کشسان و دارای درصد بالای بازگشت به حالت اولیه شده است. به دلیل همین پیشرفت‌ها مواد مختلفی قابلیت استفاده در قسمت‌های گوناگون بال‌های شکل‌پذیر را دارد. یکی از این گونه مواد، پلی‌یورتان<sup>۱۹</sup> است. این ماده یک نوع از مواد مصنوعی است که با توجه به کاربرد، قابلیت ترکیب با مواد شیمیایی دیگر با ویژگی‌ها گوناگون را دارد. یک ماده‌ای که ویژگی‌هایی شبیه به پلی‌یورتان را دارد، کوپولیتسرها<sup>۲۰</sup> هستند. دیگر مواد محتمل برای استفاده، مواد حافظه‌دار<sup>۲۱</sup> می‌باشند. این مواد دمای انتقال را بالا برده تا خواص آن تغییر کنند. دمای انتقال به عنوان دمای انتقال شیشه‌آشناخته می‌شود. ماده در دمای کمتر از دمای انتقال شیشه صلب بوده و اگر دما بیش‌تر شود، به صورت یک لاستیک شکل‌پذیر عمل می‌کند. آخرین نوع از مواد قابل استفاده، مواد

16. Virginia Polytechnic Institute and State University
17. Elastic
18. High Recovery
19. Polyurethane
20. Copolymers
21. Memory Materials
22. Glass Transition Temperature
23. Stretchable Woven Materials
24. Spandex
25. Otis Bayer
26. Bunker
27. Shore Durometer



شکل (۲۰): تغییر شکل ماده استرچ [۴۲].

به‌طور کلی هر بال تغییر شکل‌پذیر می‌بایست به وزن اضافه شده ناشی از استفاده از عملگرها غلبه کند. در مقایسه با هواپیماهای مافوق صوت، هواپیماهای کوچک با سرعت پایین به تغییرات سریع بال برای واکنش به تغییرات سریع خواص آیرودینامیکی نیاز دارند. به عبارتی ماده‌ای لازم است تا در عین حال که مقاوم است، شکل‌پذیر نیز باشد. این نکته نشان‌دهنده مشکل توسعه هواپیماهای تغییر شکل‌پذیر کوچک با سرعت پایین است که نتیجه وزن بیش‌تر می‌باشد. برای حل این چالش، هر طراحی مفهومی موفق برای هواپیماهای کوچک با سرعت پایین تغییر شکل‌پذیر می‌بایست خصوصیات زیر را داشته باشد:

- تحمل تغییرات هندسه بزرگ،
- استفاده از مواد هوشمند<sup>۲۸</sup> (مواد حافظه‌دار) و
- استفاده از عمل‌گرهای حافظه‌دار برای تغییر شکل بال جهت بارگذاری‌های آیرودینامیکی.

## ۵- نتیجه‌گیری

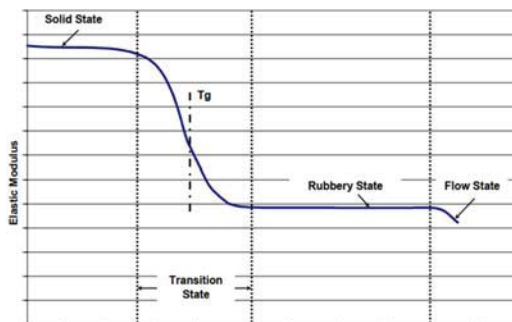
در این مقاله به مطالعه پرواز پرندگان و در نتیجه دلیل اهمیت بال‌های شکل‌پذیر پرداخته شده است. در گذشته، انسان‌ها علاقه زیادی به پرواز داشتند و این عمل را با الگوگیری از نحوه پرواز پرندگان تاحدودی انجام دادند. اما، تغییر شکل بال آن‌ها و تأثیر آنها بر پرواز، با توجه به نبود مواد و فناوری‌های مورد نیاز، مغفول ماند. در سال‌های اخیر، با کشف و ساخت مواد مورد نیاز، مانند مواد حافظه‌دار، امکان انجام این مهم میسر شده است. در این مقاله، ابتدا به نحوه پرواز و شکل بال پرندگان در حین پرواز پرداخته شده است. سپس، هفت نوع حرکت بال شکل‌پذیر با الگوگیری از تغییر شکل بال‌های پرندگان معرفی شده است. همچنین، مواد لازم جهت ساخت روکش و محرک‌های این بال‌ها بیان شده است. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان برای آینده این حدس را بیان کرد که هرچه شکل و نحوه پرواز وسایل نقلیه هوایی، مخصوصاً پهپادها، به سمت الگوگیری از پرندگان بیشتر باشد، عملکرد مناسب‌تری از لحاظ مصرف سوخت، مداومت پروازی، مانورپذیری و غیره خواهیم داشت.

## ۴-۲- کوپولیسترها

ساختار مولکولی این مواد اجازه تغییرات ماده از نظر سختی را می‌دهد. ویژگی‌های این مواد شبیه پلی‌یورتان‌ها است، با این تفاوت که این مواد ترموپلاستیک<sup>۲۸</sup> بوده و قابلیت انجام فرایند با خواص مکانیکی و هم‌زمان لاستیکی را دارا هستند. از کاربردهای این ماده در بازار می‌توان به وسایل ورزشی، اسباب‌بازی‌ها و غیره اشاره کرد [۴۴].

## ۴-۳- مواد حافظه‌دار

مواد حافظه‌دار، موادی هستند که در شرایط خاصی از دما و کشش تغییر شکل داده و سپس توسط محرک‌های حرارتی یا الکتریکی به دلیل قابلیت ذخیره انرژی به شکل اولیه برمی‌گردند. شکل ۲۰ بیان‌گر تغییر شکل این ماده با تغییرات دما است. در دمای کمتر از دمای انتقال شیشه، این ماده مانند یک جسم جامد رفتار می‌کند. بعد از ناحیه انتقال رفتار این ماده به صورت لاستیکی تغییر می‌یابد. اگر حرارت بیش‌تری داده شود، ماده حافظه‌دار قابلیت برگشت به حالت اولیه خود را از دست داده و به صورت جریان سیال رفتار می‌کند. با توجه به تحقیقات انجام شده، دمای انتقال مواد حافظه‌دار حدود ۸۵ درجه سانتی‌گراد است. باید توجه داشت که تمامی پلیمرها دارای دمای انتقال شیشه هستند اما همه آن‌ها اثر حافظه شکل را نشان نمی‌دهند [۴۲].



شکل (۲۰): تغییر شکل مواد حافظه‌دار با تغییرات دما [۴۲].

## ۴-۴- مواد استرچ

این مواد به دلیل خاصیت الاستیسیته بالا و قابلیت برگشت به حالت اولیه شناخته شده هستند. به دلیل همین خواص، این ماده برای بال‌های شکل‌پذیر مناسب است. این ماده مطابق شکل ۲۱ قابل کشیده شدن در دو طرف و یا در تمامی جهات را دارد [۴۲].

28. Thermoplastic

29. Smart Materials

## مراجع

- [1] Rabati, H., *Tarikh Az Yeksoo*, Pasargad, Tehran, Iran, 1985 (In Persian).
- [2] Arianpour, A., *Farhang Englishi be Earsi*, Amirkabir, Tehran, Iran, 1942 (In Persian).
- [3] Scott, D., Moravej Hamedani, H., Adhami Mir Hoseini, A., *Parandegan*, Department of Environment Islamic Republic of Iran, Iran. Tehran, 1976 (In Persian).
- [4] Firouz, E., *Haiat Vahsh Iran*, Markaz Nashr Daneshgahi, Tehran, Iran, 2015 (In Persian).
- [5] Moen, M., *Farhang Farsi Moein*, AmirKabir, Tehran, Iran, 1990 (In Persian).
- [6] Mullens, B.A., "Horse Flies and Deer Flies (Tabanidae)", in *Medical and Veterinary Entomology*, ed: Elsevier, pp. 327-343, 2019.
- [7] Mansouri, J., "An Analysis of the Population of Migratory and Aquatic Birds", *Journal of Environmental Studies*, Vol. 12. No. 12, pp. 123-150, 1982 (In Persian).
- [8] Pendleton, E., "How Active Aeroelastic Aings Are a Return to Aviation's Beginning and a Small Step to Future Bird-like Wings", *Japan Society of Aeronautical and Space Sciences Aircraft Symposium*, Sendai, Japan, 2000.
- [9] Parker, H.F., "The Parker Variable Camber Wing", National Advisory Committee for Aeronautics, Report No. 77, Washington D.C., USA, 1920.
- [10] Powers, S., Webb, L., Friend, E., and Okos, W., "Flight Test Results from a Supercritical Mission Adaptive Wing with Smooth Variable Camber", *The 28th National Heat Transfer Conference*, San Diego, CA, USA, 1992.
- [11] Pendleton, E., "How Active Aeroelastic Wings Are a Return to Aviation's Beginning and a Small Step to Future Bird-like Wings", *Japan Society of Aeronautical and Space Sciences Aircraft Symposium*, Sendai, Japan, 2000.
- [12] Jardine, A.P., Bartley-Cho, J.D., and Flanagan, J.S., "Improved Design and Performance of the SMA Torque Tube for the Darpa Smart Wing Program", *SPIE, Smart Structures and Materials: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, San Diego, California, USA, 1999.
- [13] Pendleton, E.W., Bessette, D., Field, P.B., Miller, G.D., and Griffin, K.E., "Active Aeroelastic Wing Flight Research Program: Technical Program and Model Analytical Development", *Aircraft*, Vol. 37, pp. 554-561, 2000.
- [14] Martin, C.A., Hallam, B.J., Flanagan, J.S., and Bartley-Cho, J.D., "Design, Fabrication, and Testing of Scaled Wind Tunnel Model for the Smart Wing Phase 2 Program", *SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, California, USA, 2002.
- [15] Lagoudas D.C., Garner L.J., Rediniotis O.K., and Wilson N., *Modeling and Experiments of the Hysteretic Response of an Active Hydrofoil Actuated by SMA Line Actuators*, Springer, Dordrecht, Netherlands, 1999.
- [16] Kota, S., Osborne Jr, R., Ervin, G., Maric, D., Flick, P., and Paul, D., "Mission Adaptive Compliant Wing-design, Fabrication and Flight Test. Rto Applied Vehicle Technology Panel (AVT) Symposium", *RTO MP-AVT-168*, Evora, Portugal, 2009.
- [17] Love, M., Zink, S., Stroud, R., Bye, D., and Chase, C., "Impact of Actuation Concepts on Morphing Aircraft Structures", *The 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*, Palm Springs, California, USA, 2004.
- [18] Bowman, J., Sanders, B., Cannon, B., Kudva, J., Joshi, S., and Weisshaar, T., "Development of Next Generation Morphing Aircraft Structures", *The 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, 2007.
- [19] Strelec, J.K., Lagoudas, D.C., Khan, M.A., and Yen, J., "Design and Implementation of a Shape Memory Alloy Actuated Reconfigurable Airfoil", *Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 14, pp. 257-273, 2003.
- [20] Mason, W., Robertshaw, H., and Inman, D., "Recent Experiments in Aerospace and Design Engineering Education", *The 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, USA, 2004.
- [21] Jacob, J.D., Simpson, A., and Smith, S., "Design and Flight Testing of Inflatable Wings with Wing Warping", *SAE Technical Paper 0148-7191*, 2005.
- [22] Samuel, J.B. and Pines, D.J., "Design and Testing of a Pneumatic Telescopic Wing for Unmanned Aerial Vehicles", *Aircraft*, Vol. 44, pp. 1088-1099, 2007.
- [23] Supekar, A.H., "Design, Analysis and Development of a Morphable Wing Structure for Unmanned Aerial Vehicle Performance Augmentation", *M.Sc. Thesis*, Departement of Mechanical Engineering, University of Texas at Arlington, Texas, USA, 2007.
- [24] Diaconu, C.G., Weaver, P.M., and Mattioni, F., "Concepts for Morphing Airfoil Sections Using Bi-stable Laminated Composite Structures", *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, pp. 689-701, 2008.
- [25] Ursache, N.M., Melin, T., Isikveren, A.T., and Friswell, M.I., "Technology Integration for Active Poly-morphing Winglets Development", *ASME 2008 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, Ellicott City, Maryland, USA, 2008.
- [26] Icardi, U. and Ferrero, L., "Preliminary Study of an Adaptive Wing with Shape Memory Alloy Torsion Actuators", *Materials & Design*, Vol. 30, pp. 4200-4210, 2009.
- [27] Vos, R., Gurdal, Z., and Abdalla, M., "Mechanism for Warp-controlled Twist of a Morphing Wing", *Aircraft*, Vol. 47, pp. 450-457, 2010.
- [28] Vocke, R.D., Kothera, C.S., Woods, B.K., and Wereley, N.M., "Development and Testing of a Span-extending Morphing Wing", *Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, pp. 879-890, 2011.
- [29] Wang, I., Gibbs, S.C., and Dowell, E.H., "Aeroelastic Model of Multisegmented Folding Wings: Theory and Experiment", *Aircraft*, Vol. 49, pp. 911-921, 2012.

- [30] Colorado, J., Barrientos, A., Rossi, C., and Parra, C., "Inertial Attitude Control of a Bat-like Morphing-Wing Air Vehicle", *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 8, p. 016001, 2012.
- [31] Tong, X., Ge, W., Sun, C., and Liu, X., "Topology Optimization of Compliant Adaptive Wing Leading Edge with Composite Materials", *Chinese J. Aeronautics*, Vol. 27, pp. 1488-1494, 2014.
- [32] Tarabi, A., Ghasemloo, S., and Mani, M., "Experimental Investigation of a Variable-span Morphing Wing Model for an Unmanned Aerial Vehicle", *The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 38, pp. 1833-1841, 2016.
- [33] Rodrigue, H., Cho, S., Han, M.-W., Bhandari, B., Shim, J.-E., and Ahn, S.-H., "Effect of Twist Morphing Wing Segment on Aerodynamic Performance of UAV", *Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, pp. 229-236, 2016.
- [34] Gabor, O.S., Koreanschi, A., Botez, R.M., Mamou, M., and Mebarki, Y., "Numerical Simulation and Wind Tunnel Tests Investigation and Validation of a Morphing Wing-tip Demonstrator Aerodynamic Performance", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 53, pp. 136-153, 2016.
- [35] Siddall, R., Ortega Ancel, A., and Kovač, M., "Wind and Water Tunnel Testing of a Morphing Aquatic Micro Air Vehicle", *Interface Focus*, Vol. 7, p. 20160085, 2017.
- [36] Béguin, B. and Breitsamter, C., "Effects of Membrane Pre-stress on the Aerodynamic Characteristics of an Elasto-flexible Morphing Wing", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 37, pp. 138-150, 2014.
- [37] Galantai, V.P., "Design and Analysis of Morphing Wing for Unmanned Aerial Vehicles", *M.Sc. Thesis*, Department of Mechanical and Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada, 2012.
- [38] Ismail, N., Zulkifli, A., Basri, M.H., Talib, R., and Yusoff, H., "Lift Performance of a Twist Morphing Wing", *J. Teknologi*, Vol. 75, pp. 31-35, 2015.
- [39] Fahy, F. and Thompson, D., *Fundamentals of Sound and Vibration*, CRC Press, London, 2016.
- [40] Weisshaar, T.A., "Morphing Aircraft Technology- New Shapes for Aircraft Design", *Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-141*, Neuilly-sur-Seine, France, RTO, 2006.
- [41] Wing Twist Morphing. Available: <http://news.mit.edu/2016/morphing-airplane-wing-design-1103>, 2020.
- [42] Dimino, I., Lecce, L., and Pecora, R., "Morphing Wing Technologies: Large Commercial Aircraft and Civil Helicopters", *Butterworth-Heinemann*, Oxford, 2017.
- [43] Ajaj, R.M., Beaverstock, C.S., Friswell, and M.I., "Morphing Aircraft: The Need for a New Design Philosophy", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 49, pp. 154-166, 2016.
- [44] Kikuta, M.T., "Mechanical Properties of Candidate Materials for Morphing Wings", *M.Sc. Thesis*, Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, 2003.