



## طراحی و تحلیل آیرودینامیکی یک بال شکل پذیر به همراه عملگر آلیاژ حافظه دار

حمید بصائری<sup>1</sup>، محمدرضا ذاکرزاده<sup>2</sup>، عقیل یوسفی کما<sup>3\*</sup>، سید سعید محتسبی<sup>3</sup>

1- کارشناسی ارشد، مرکز سیستم‌ها و فناوری‌های پیشرفته (CAST)، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران  
 2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران  
 3- استاد، مرکز سیستم‌ها و فناوری‌های پیشرفته (CAST)، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران  
 \* تهران، صندوق پستی 11155-4563، aykoma@ut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

هدف از انجام این تحقیق، طراحی و مدل‌سازی یک بال شکل‌پذیر است که بتواند عملکرد پروازی وسایل نقلیه هوایی را بهبود بخشد. چالش‌های بسیاری در خصوص توسعه‌ی این قبیل بال‌ها وجود دارد. یکی از این چالش‌ها، انتخاب و یا طراحی مکانیزم تحریک برای تغییر شکل بال است. از آنجایی که این بال‌ها باید به‌اندازه‌ی کافی سبک باشند تا بتوانند در شرایط پروازی عملکرد خوبی از خود به نمایش بگذارند، لذا لازم است از مکانیزم‌های تحریک مناسبی در طراحی آن‌ها استفاده شود. از طرفی، مواد هوشمند و علی‌الخصوص آلیاژهای حافظه‌دار، به‌عنوان دسته‌ای از مواد هوشمند، برای این کاربرد بسیار مناسب می‌باشند. لذا در این پژوهش از این مواد برای مکانیزم تحریک بهره گرفته شده است. برای نیل به این هدف، یک مکانیزم جدید به‌منظور به‌کارگیری در بال شکل‌پذیر توسعه داده شده است. مکانیزم ارائه شده به‌منظور استفاده در بال طراحی و ساخته می‌شود. این مکانیزم قابلیت ایجاد دو حرکت گال و سوئیپ را به بال می‌دهد. همچنین ملاحظات لازم در خصوص طراحی بال با استفاده از مکانیزم پیشنهادی ارائه گردیده است. تحلیل‌های سیالاتی نشان می‌دهند عملکرد بال تغییر شکل یافته نسبت به بال تغییر شکل نیافته در رژیم‌های پروازی خاصی بهبود می‌یابد.

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 27 آبان 1393  
 پذیرش: 18 بهمن 1393  
 ارائه در سایت: 15 فروردین 1394  
 کلید واژگان:  
 بال شکل‌پذیر  
 مواد هوشمند  
 آلیاژ حافظه‌دار  
 طراحی  
 تحلیل آیرودینامیکی

## Design and Aerodynamic Analysis of a Morphing Wing with Shape Memory Alloy Actuator

Hamid Basaeri, Mohammad Reza Zakerzadeh, Aghil Yousefi-Koma\*, Seyed Saeid Mohtasebi

Center of Advanced Systems and Technologies (CAST), School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran  
 \* P.O.B. 11155-4563 Tehran, Iran, aykoma@ut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 18 November 2014  
 Accepted 07 February 2015  
 Available Online 04 April 2015

### Keywords:

Morphing Wing  
 Smart Materials  
 Shape Memory Alloy  
 Design  
 Aerodynamic Analysis

### ABSTRACT

The scope of the current investigation incorporates the entire process involved in design and development of a Shape Memory Alloy (SMA) actuated wing intended to fulfill morphing missions. At the design step, a two Degree-of-Freedom (DOF) mechanism is designed that is appropriate for morphing wing applications. The mechanism is developed in such a way that it can undergo two different DOF, i.e. gull and sweep, so that the wing can have maneuvers that are more efficient. Smart materials are commonly selected as the actuators due to their suitable thermo-mechanical characteristics. Shape Memory Alloy (SMA) actuators are capable of providing more efficient mechanisms in comparison to the conventional actuators due to their large force/stroke generation, smaller size with high capabilities in limited spaces, and lower weight. As SMA wires have nonlinear hysteresis behavior, their modeling should be implemented in a meticulous way. In this work, after proposing a two DOF morphing wing, an aerodynamic analysis of the whole wing for unmorphed and morphed wings is presented. The results show that the performance of the morphed wing in special flight regimes is improved.

پرنده‌گان و حشرات، نمونه‌های بارزی از به‌کارگیری این فناوری در طبیعت هستند [2].

پرنده‌گان این قابلیت را دارند که در شرایط مختلف پروازی شکل بال خود را تغییر داده و هندسه‌ی بال را با شرایط موجود تطبیق دهند. استفاده از این ویژگی در پرنده‌گان، بهبود عملکرد پروازی را در رژیم‌های مختلفی همچون اوج گرفتن، تغییر جهت پرواز و تغییر سرعت به همراه خواهد داشت. یک سازه‌ی مورفینگ باید شکل و هندسه‌ی خود را به‌گونه‌ای تغییر دهد که بتواند در برابر نیروهای اعمالی بهترین عملکرد را داشته باشد. دست‌یابی به حالت

### 1- مقدمه

واژه‌ی مورفینگ<sup>1</sup> به‌معنای تغییر شکل از حالتی به حالت دیگر بدون گسستگی است. در علوم مهندسی و صنایع، مورفینگ به سازه‌هایی گفته می‌شود که می‌توانند شکل و هندسه‌ی خود را با توجه به شرایط مختلف پرواز تغییر دهند و از این طریق سبب بهبود عملکرد سازه‌ها شوند [1]. ایده‌ی استفاده از فناوری مورفینگ، همچون بسیاری از فناوری‌های دیگر ریشه در طبیعت دارد. در طبیعت می‌توان نمونه‌های بسیاری از این نوع سازه‌ها را مشاهده کرد. بال

1- Morphing

Please cite this article using:

H. Basaeri, M.R. Zakerzadeh, A. Yousefi-Koma, S.S. Mohtasebi, Design and Aerodynamic Analysis of a Morphing Wing with Shape Memory Alloy Actuator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 60-70, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

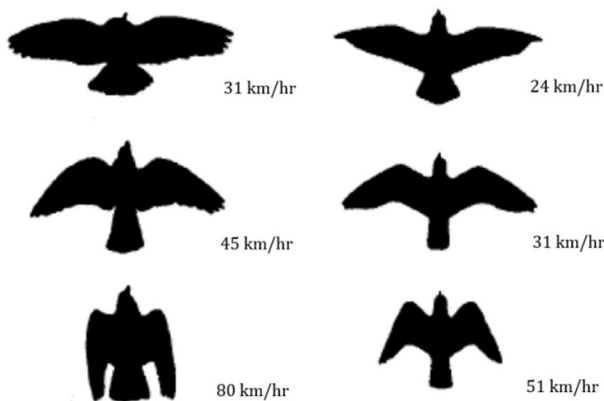
نخواهد کرد. در برخی مراجع دیگر، همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده، برخی حالات پایه برای تغییر شکل بال ارائه شده است. این حالات به دو دسته کلی داخل صفحه<sup>5</sup> (بال) و خارج صفحه<sup>6</sup> (بال) تقسیم می‌شوند.

## 2- پژوهش‌های انجام شده

تحقیقات انجام شده در حوزه‌ی بال‌های شکل‌پذیر در سال‌های اخیر به دو دسته‌ی کلی تقسیم‌بندی می‌شوند. به عبارت دیگر، محققان برای دست‌یابی به یک بال شکل‌پذیر دو راه را پیش گرفته‌اند. مسیر اول که مدنظر این پژوهش نیز است، تحقیق بر روی مکانیزم‌هایی است که می‌توان با استفاده از آن‌ها در بال تغییر شکل ایجاد کرد و با تقسیم بال به چندین قسمت و تکرار این مکانیزم‌ها یک تغییر شکل پیوسته را در بال ایجاد کرد. در طرف دیگر، عده‌ی دیگری از محققان، برای دست‌یابی به بال‌های شکل‌پذیر با استفاده از تغییرات در جنس مواد به‌کار رفته در بال و تحریک آن سعی در تغییر شکل بال به‌صورت پیوسته را دارند.

در سال‌های اخیر تغییر شکل گال<sup>7</sup> به دلیل قابلیت افزایش عملکرد و کنترل پرواز، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. این نوع بال جایگزین سطوح کنترل سنتی شده و توانایی کنترل طول آیرودینامیکی بال را دارد. همچنین چابکی و خصوصیات پروازی یک هواپیمای با عملکرد بالا را بهبود می‌دهد. از طرفی با تغییر توزیع سرعت سبب کاهش نیروی درگ و بهبود خصوصیات استال می‌شود [9]. عبدالرحیم<sup>8</sup> و لیند<sup>9</sup> دینامیک پروازی و خصوصیات یک بال با تغییر شکل گال را روی یک وسیله هوایی کوچک مطالعه کرده‌اند. در این تحقیق انجام شده در دانشگاه فلوریدا، اثرات یک بال شکل‌پذیر الهام یافته از طبیعت مطالعه شده است. این بال از مکانیزم گال به‌منظور تغییر شکل بال بهره گرفته است. همان‌طور که در شکل 3 مشخص است، این وسیله نقلیه کوچک هوایی می‌تواند شکل خود را در وضعیت‌های مختلف تغییر دهد. به‌عبارت دیگر، زاویه‌ی بین قسمت‌های بیرونی و درونی بال در طول پرواز با استفاده از عملگرهای ساده تغییر می‌یابد [10].

شلتون<sup>10</sup> و همکاران مزایای چندین بال‌ه‌ی فعال را برای یک وسیله هوایی بدون سرنشین مطالعه کرده‌اند. آن‌ها از بال‌هایی با قابلیت کنترل فعال استفاده کرده‌اند که می‌تواند عملکرد سرعت پایین و قابلیت مانوردهی وسیله نقلیه هوایی را ارتقا دهد [12].



شکل 1 چگونگی تغییر شکل بال پرنده‌گان در سرعت‌های گوناگون پرواز، راست: کبوتر، چپ: شاهین [7]

بهینه برای تمامی حالت‌های پروازی با استفاده از بال‌هایی با ابعاد ثابت امری غیرممکن است. به همین سبب، پرنده‌گان در حین پرواز با عقب راندن بال‌های خود قادر هستند با کاهش نیروی مقاوم در برابر پرواز، سرعت خود را افزایش دهند. شکل 1 چگونگی تغییرات هندسه‌ی بال پرنده‌گان در سرعت‌های مختلف را نمایش می‌دهد [3,2].

شاید اولین استفاده از واژه‌ی مورفینگ در صنایع هوایی به سال 1974 برمی‌گردد یعنی جایی که حالت اشلی<sup>1</sup> در کتاب خود با نام آنالیزهای مهندسی وسایل پروازی، اولین فصل را مورفولوژی هواپیما نام گذاشت [4]. اکتشافات و یافته‌های اخیر در مکانیک پرواز پرنده‌گان و دیدگاه و بینش نوین نسبت به تقلید از طبیعت، پژوهشگران بسیاری را وادار کرده است تا از سوئی دیگر و با نگاهی تازه‌تر به پرنده‌گان به‌عنوان مدل‌هایی برای هواپیماهای شکل‌پذیر بنگرند. دو برنامه‌ی تحقیقاتی قابل ملاحظه و بلند پروازانه که اثرات بسیار ثمربخشی بر هواپیماهای شکل‌پذیر داشته‌اند، در حدود سال 2000 به‌صورت تقریباً هم‌زمان ظاهر شدند [5]. از این دو پروژه به‌عنوان پیشگامان حوزه‌ی بال و هواپیمای شکل‌پذیر نیز یاد می‌شود. پروژه هواپیمای شکل‌پذیر ناسا<sup>2</sup> یک برنامه‌ی عظیم و هماهنگ بود که در بین سال‌های 1994 تا 2004 انجام شد [6]. در متن پروژه و گزارش‌های منتشر شده، واژه‌ی مورفینگ به‌صورت تطابق مؤثر در چندین نقطه تعریف شده است و می‌تواند رویکردهایی نظیر میکرو، ماکرو، سازه و یا سیال را در برگیرد. ابعاد وسیع این پروژه که علوم و فناوری‌هایی همچون بیوتکنولوژی، نانوتکنولوژی، بیومتریال، سازه‌های تطبیق‌پذیر، کنترل سیال، تقلید از طبیعت، بهینه‌سازی و کنترل را شامل شده بین 80 تا 100 محقق داشته است. پروژه‌ی دوم که یک پروژه مشترک بین شرکت‌های دارپا<sup>3</sup> و لاکهید مارتین<sup>4</sup> بوده، در سال 2002 آغاز و تا سال 2007 ادامه یافته است. سه مشخصه‌ی پاسخ‌دهی، چابکی و پایداری ویژگی‌های یک هواپیمای شکل‌پذیر است که در این پروژه به آن اشاره شده است. منظور از پاسخ‌دهی، قابلیت پاسخ به شرایط بحرانی غیرقابل پیش‌بینی است. همچنین منظور از چابکی، قابلیت تغییر نقش‌های سیستم در مواقع مورد نیاز است. در نهایت پایداری و قابلیت پرواز در سطحی وسیع برای زمانی طولانی تعریف شده است [5].

## 1-1 طبقه‌بندی تغییر شکل‌ها در بال

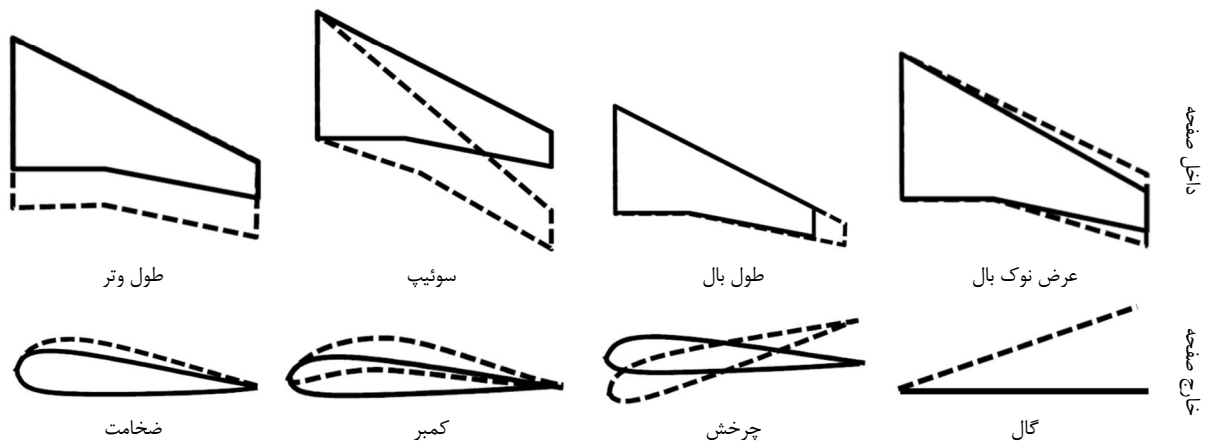
مکانیزم‌های گوناگونی برای تغییر شکل بال ارائه شده است. در مرجع [8]، طراحی‌های مورفینگ بر اساس مکانیزمی که باعث تغییر شکل و اندازه‌ی بال می‌شوند، در سه دسته طبقه‌بندی شده‌اند:

- 1- چرخش قسمت‌هایی از بال و یا کل بال
- 2- مکانیزم‌های تلسکوپی
- 3- افزایش طول در بخش‌هایی از بال و یا کل بال

مفاهیم بال شکل‌پذیر به سه گونه‌ی اصلی شامل تغییر بدنه و بال، تبدیل خارج صفحه‌ی بال، و تنظیم ایرفویل تقسیم می‌شوند. در بخش تغییر بدنه و بال، تکنیک تغییر مساحت بال، مانند تغییر اندازه‌ی طول بال و طول وتر مورد بحث قرار می‌گیرد. روش‌های تغییر زاویه بال و بدنه نیز در شکل‌پذیری بدنه و بال در نظر گرفته می‌شود. در تبدیل خارج از صفحه، تغییرات وتر و خمیدگی بال مدنظر است. برجسته‌ترین روش در این‌گونه، پیچش بال است. در نوع تنظیم ایرفویل طرح‌هایی که پروفیل بال را تغییر می‌دهند مدنظر هستند، (به‌عنوان مثال ضخامت) که خمیدگی قابل‌توجهی را متوجه بال

5- In-plane  
6- Out-of-plane  
7- Gull  
8- Abdulrahim  
9- Lind  
10- Shelton

1- Halt Ashley  
2- NASA  
3- DARPA  
4- Lockheed Martin



شکل 2 حالات پایه برای تغییر شکل بال [11.9]

استفاده از ایده‌ی بال با این قابلیت تغییر شکل ایده‌ی جدیدی نیست و مبدأ آن بعد از جنگ جهانی دوم است. در آن زمان به علت ورود جت‌ها به سامانه‌های هوایی و افزایش سرعت در پرواز، مزایایی پدید آمدند. یکی از این مزایا، استفاده از نسبت کوچک ضخامت به کورد بال و بال‌هایی با نسبت منطقی کوچک به‌عنوان تنها راه کاهش نیروی قابل ملاحظه‌ی درگ در سرعت‌های فروسوتی بالا بوده است [9].

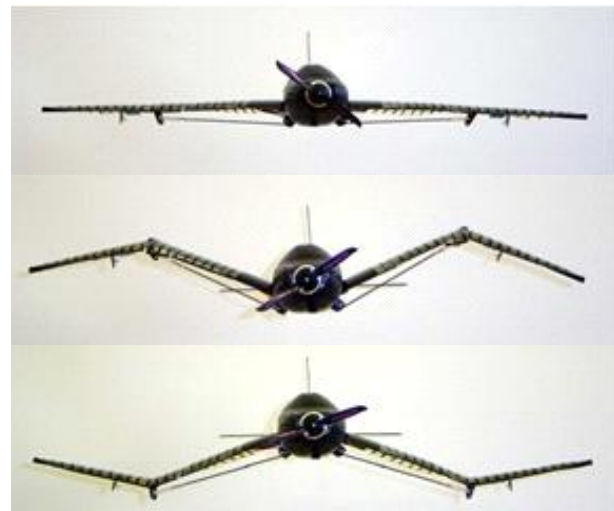
مارمیر<sup>4</sup> و ورلی<sup>5</sup> یک وسیله هوایی بدون سرنشین که بال‌های آن قابلیت سوئیپ داشت را ساخته و در تونل باد مورد آزمایش قرار دادند. یک جفت عملگر مخالف هم در یک بدنه‌ی هواپیمای استوانه‌ای کار گذاشتند و با استفاده از شیرهای سلونوئیدی آن را کنترل کردند. این کار به بال اجازه‌ی تغییر سوئیپ از 0 تا 45 درجه می‌داد [15]. وسایل نقلیه کوچک هوایی در مقیاس میکرو نیز از این حالت تغییر شکل در بال‌های خود بهره گرفته‌اند. هال<sup>6</sup> و همکاران اثر این تغییر شکل در وسیله هوایی کوچک را بررسی کرده‌اند و هدف این تغییر شکل را افزایش حداقل سرعت درگ عنوان کرده‌اند [16].

نیل<sup>7</sup> و همکاران یک مکانیزم برای تغییر شکل سوئیپ فراهم کردند. در این مکانیزم حرکت به‌وسیله‌ی یک مکانیزم با سه میله و عملگرهای خطی و دورانی ایجاد می‌گردد [17]. از عملگرهای الکترومکانیکی برای ایجاد تغییر شکل سوئیپ استفاده شده است.

در این مقاله یک بال جدید توسعه داده می‌شود که دارای دو درجه آزادی باشد. به‌عبارت دیگر بتواند دو وضعیت از مکانیزم‌های تغییر شکل را پوشش دهد. این بال قابلیت تغییر شکل‌های سوئیپ و گال را خواهد داشت. این یک ترکیب قوی خواهد بود چراکه اکثر کارهای انجام‌شده تا به امروز روی یک درجه آزادی برای یک بال و برای یک هدف کار کرده‌اند و در صورت ترکیب این حالات می‌توان به بالی دست یافت که تمامی قابلیت‌های یک بال منسجم و منعطف که پرنده‌گان از آن بهره می‌برند را داشته باشد. از دیگر سو، کارهای کمی روی ترکیب این حالات تغییر شکل صورت پذیرفته است.

### 3- طراحی

در اغلب بال‌های شکل‌پذیر طراحی شده، مکانیزم‌های ایجاد تغییر شکل دارای یک درجه آزادی می‌باشند. در مواردی هم که درجه‌ی آزادی مکانیزم بیش از یک است، مکانیزم دارای پیچیدگی زیادی به‌واسطه‌ی افزایش تعداد المان‌ها



شکل 3 وسیله نقلیه هوایی در حالات مختلف تغییر شکل، بالا: خنثی، وسط: مثبت، پایین: منفی [10]

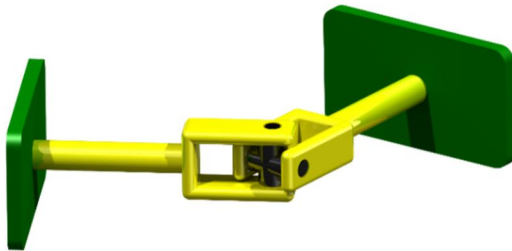
هم‌چنین گزارش شده است که محدوده و زمان مداومت پروازی با استفاده از این بال‌ها تا 40 درصد افزایش داشته است. در سال 2007 نیز ساپکار<sup>1</sup> یک ایده‌ی بال شکل‌پذیر با قابلیت تغییر زاویه گال طراحی کرد [13]. این زاویه با استفاده از یک سرو موتور کنترل می‌شود. در واقع بال طراحی‌شده دارای دو درجه آزادی بوده است و علاوه بر تغییر زاویه گال، طول بال نیز قابل تغییر بوده است.

در طرح دیگری که نتایج آن در اکتبر 2010 توسط باربارینو<sup>2</sup> و همکاران ارائه شده است، از آلیاژهای حافظه‌دار به‌عنوان عملگر بهره گرفته شده است. البته ایده‌ی دیگری که در این طرح به کار گرفته شده، استفاده از خرپا است [14]. این خرپاها از تقویت‌کننده‌هایی تشکیل شده است که اعضای فعال آن‌ها آلیاژ حافظه‌دار می‌باشند. المان‌های الاستیکی پیش کرنش را برای آلیاژ حافظه‌دار فراهم می‌کنند و در نتیجه اجازه‌ی یک تحریک در یک چرخه را می‌دهند. به‌طوری‌که در طول بال از چندین المان خرپا استفاده شده است و به نوعی زاویه گال در بال تغییر می‌کند. در نهایت محققین به یک شکل بهینه برای طول هر یک از اعضای المان‌ها در طول بال دست یافته‌اند. دسته‌ی دیگری از تغییرات بر روی زاویه‌ی سوئیپ<sup>3</sup> اعمال می‌شوند. البته

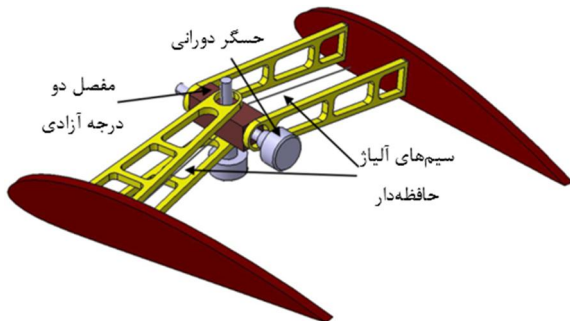
4- Marmier  
5- Wereley  
6- Hall  
7- Neal

1- Supekar  
2- Barbarino  
3- Sweep

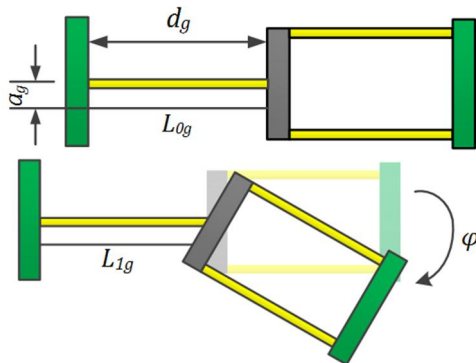
گردیده است و برای بازگرداندن مکانیزم به حالت اولیه بعد از غیرفعال شدن سیم آلیاژ حافظه دار از فنرهای خطی استفاده شده است.



شکل 4 استفاده از مفصل یونیورسال به منظور ایجاد دو درجه آزادی



شکل 5 طراحی اولیه صورت گرفته برای مکانیزم تغییر شکل



شکل 6 طرح مکانیزم با محرک‌های سیم آلیاژ حافظه دار در درجه آزادی گال

### 3-1- بکارگیری سیم آلیاژ حافظه دار

متداول‌ترین شکل عملگرهای خطی آلیاژهای حافظه دار، سیم است. سیم در مدل‌سازی بسیار مورد بحث قرار گرفته و تحلیل‌های تئوری و آزمایش‌های عملی فراوانی بر روی آن و سیستم‌های توسعه یافته با آن انجام شده است. به منظور ایجاد انعطاف‌پذیری بیشتر و کاهش حجم و وزن محرک‌های سیستم، استفاده از آلیاژهای حافظه دار در طراحی مدنظر قرار گرفته است. آلیاژهای حافظه دار در حالی که ابعاد مجموعه توسعه یافته را کوچک می‌کند، امکان ایجاد تغییر شکل بزرگ را، در حالی که نیروی ثابتی اعمال می‌کند، دارا است. این ویژگی‌ها با ارزش به‌طور مؤثر در انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری مکانیزم توسعه یافته نقش دارد.

در این قسمت به منظور درک بهتر از زوایای حرکت مکانیزم یک آنالیز ابعادی روی مکانیزم صورت گرفته است. به عبارت دیگر با توجه به استفاده از سیم‌های آلیاژ حافظه دار به‌عنوان عملگر، نیاز است تا عملکرد آن‌ها در هر کدام از درجات آزادی بررسی شود. به منظور بررسی بهتر مسأله، دو درجه آزادی مکانیزم طراحی شده مطابق شکل 6 و شکل 7 در نظر گرفته شده است.

در این شکل‌ها سیم‌های آلیاژ حافظه دار با برچسب‌های حرف  $L$  مشخص گردیده است. ابعاد مؤثر در نظر گرفته شده در مکانیزم نیز در شکل‌ها آورده

است. ایده‌ی چیدمان محرک‌ها به‌صورت یک مکانیزم موازی برای ایجاد دو یا چند درجه آزادی می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مدنظر قرار گیرد. در صورتی که یک مکانیزم موازی که محرک‌های آلیاژ حافظه دار به‌عنوان عملگرهای خطی در آن استفاده شده است، به‌عنوان مکانیزم حرکت در نظر گرفته شود، حس‌گرهای اندازه‌گیری زاویه نیز باید به‌طور خطی تغییر زاویه را در دو راستا اندازه‌گیری کنند تا با استفاده از سینماتیک معکوس بتوان موقعیت صفحه‌ی متحرک را استخراج نمود.

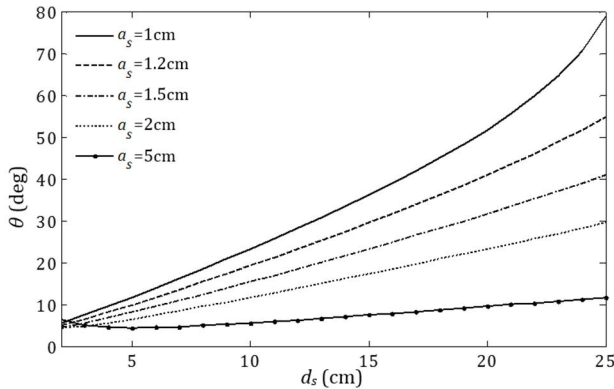
ایده‌ی اصلی برای تغییر شکل در بال به این صورت است که بال به چندین بخش که هر کدام دارای درجات آزادی مشخصی هستند، تقسیم شده و در نهایت با ترکیب این بخش‌ها کل بال بتواند درجات آزادی مشخصی را تجربه کند. در ابتدا ایده‌ی یک مکانیزم برای استفاده در بال شکل‌پذیر توسعه داده می‌شود و پس از آن با استفاده از این مکانیزم کل بال طراحی و تحلیل می‌گردد.

مکانیزم معرفی شده قادر است تا دو درجه آزادی را ایجاد کند. تعداد درجات آزادی کافی و مؤثر مکانیزم را می‌توان با توجه به کاربردهای مربوطه در نظر گرفت. از آنجایی که افزایش درجات آزادی به هر میزان در عمل ممکن نبوده و پیچیدگی مکانیزم را افزایش می‌دهد، لذا مصالحه‌ای در درجات آزادی مکانیزم با توجه به ملاحظات مکترونیکی صورت می‌پذیرد. از طرفی، با استفاده از سیم‌های آلیاژ حافظه دار نمی‌توان تغییر زیادی را در درجه آزادی رول ایجاد کرد. بنابراین، این درجه آزادی حذف شده و مکانیزمی با دو درجه آزادی توسعه داده شده است. یک ایده ارتباط صفحات متحرک مکانیزم به‌وسیله‌ی مفصل کروی است. به‌عنوان مثال یک میله‌ی صلب به یکی از صفحات جوش شده و به صفحه دیگر توسط یک مفصل کروی مرتبط شود. در این مکانیزم موقعیت مکانی صفحات مکانیزم نسبت به هم ثابت بوده و فقط زاویه‌ی آن‌ها نسبت به هم قابل تغییر است. ایده‌ی دیگر استفاده از یک مفصل در میان دو صفحه است. با این کار هم زاویه‌ی صفحات نسبت به یکدیگر تغییر می‌کند و هم موقعیت مکانی صفحات نسبت به هم ثابت نمی‌ماند. این طرح در مقایسه با طرح قبلی فضای کاری بیشتری را در اختیار قرار می‌دهد. در این طرح‌ها، زاویه‌ی صفحات در جهت محور عمود بر هر دو صفحه توسط محرک‌های خطی مشکل است. مشکل دیگری که در استفاده از مفصل‌های کروی وجود دارد این است که ایجاد درجات آزادی مستقل کمی دشوار بوده و درجات آزادی تا حدودی به هم وابسته خواهند بود. این مشکل ممکن است تا جایی باشد که هر حرکت مکانیزم ترکیبی از دو درجه آزادی باشد. از ترکیب ایده‌های بیان‌شده، می‌توان مکانیزمی را پیشنهاد نمود که صفحات آن علاوه بر تغییر زاویه، تغییر مکان نیز داشته باشند و از یک مفصل با دو درجه آزادی در بین صفحات استفاده شود [18].

با استفاده از یک مفصل یونیورسال می‌توان دو درجه آزادی را در مکانیزم ایجاد کرد. تصویری از این ایده در شکل 4 مشاهده می‌شود. در این طرح، صفحه‌ی متحرک نسبت به صفحه‌ی ثابت امکان تغییر زاویه و تغییر موقعیت را در دو جهت دارد. از این دو جهت می‌توان برای تغییرات گال و سوئیچ در بال استفاده کرد. البته به منظور قرارگیری عملگرهای آلیاژ حافظه دار لازم است تا برخی اصلاحات روی مفصل یونیورسال موجود صورت پذیرد.

مطابق شکل 5، در مکانیزم می‌توان از یک مفصل دو درجه آزادی یونیورسال برای اتصال صفحات ایرفویل استفاده کرد. البته همان‌طور که در این شکل مشخص است از یک لینک صلیبی مانند به‌عنوان مفصل یونیورسال بهره گرفته شده است، که این ایده امکان کوپل شدن حس‌گرهای دورانی برای اندازه‌گیری موقعیت مفصل را نیز به‌خوبی فراهم می‌کند. برای تحریک هر درجه آزادی، از یک محرک آلیاژ حافظه دار به‌طور جداگانه استفاده

8 و شکل 9 رسم شده است. لازم به ذکر است، بیشینه مقدار  $\varepsilon$  در حدود پنج درصد پیش بینی گردیده است. در این جا و به منظور بررسی ابعادی، مقدار این پارامتر چهار درصد در نظر گرفته شده است.



شکل 9 میزان انحراف مکانیزم به عنوان تابعی از فاصله صفحات ایرفویل برای فواصل مختلف سیم از محور دوران در تغییر شکل سوئیچ

با انتخاب میزان انحراف به اندازه 20 درجه به عنوان یک انحراف مطلوب، فاصله صفحات از هم و همین طور فاصله عملگرهای آلیاژ حافظه دار از محور دوران به دست می آید. به عبارت دیگر، برای فواصل صفحات به اندازه 10 سانتی متر می توان به نحو مطلوبی به میزان انحراف دلخواه دست یافت.

لازم به ذکر است عملگر آلیاژ حافظه دار که در این تحقیق از آن استفاده شده است، از آلیاژ نیتینول (نیکل - تیتانیوم) ساخته شده است. مکانیزم تغییر شکل بال ارائه شده در این تحقیق با استفاده از سیم عملگر فلکسینول ارائه گردیده است، که توسط شرکت داین آلی<sup>1</sup> ساخته شده است.

عملگرهای آلیاژ حافظه دار در حالت نرمال به صورت یک طرفه عمل می کنند. معمولاً عملگرهای خطی در لحظه ی تحریک که هنگام افزایش دمای آلیاژ حافظه دار و تبدیل فاز آن از مارتنزیت به آستنیت است با کاهش طول و ایجاد نیرو در جهت کاهش طول مواجه می شوند.

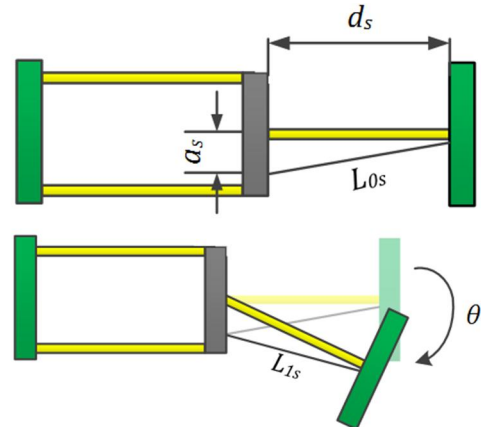
معمولاً در مکانیزم هایی که از این عملگرها به عنوان محرک استفاده می گردد، با توجه به یک طرفه عمل نمودن آن، دو روش در تحریک مورد استفاده قرار می گیرد. در ساختار اول از یک فنر برگرداننده برای برگرداندن مکانیزم به حالت اولیه در زمان غیرفعال بودن آلیاژ حافظه دار استفاده می گردد. در این روش، در مسیر برگشت، مکانیزم غیرفعال بوده و ایجاد نیروی مؤثر امکان پذیر نیست. دیگر ساختار مورد استفاده مکانیزم دیفرانسیلی است که در آن دو محرک آلیاژ حافظه دار در مقابل هم برای موقعیت دهی مکانیزم در هنگام رفت و برگشت مورد استفاده قرار می گیرند.

در مکانیزم توسعه یافته در این پژوهش، از فنر بازگرداننده بهره گرفته شده است. دلیل عدم استفاده از مکانیزم دیفرانسیلی آن است که ایجاد حرکت در مدهای مختلف پروازی فقط در یک راستا نیاز است. به عنوان مثال، انجام تغییرات سوئیچ و گال در راستاهای مخالف چندان مورد توجه نیست.

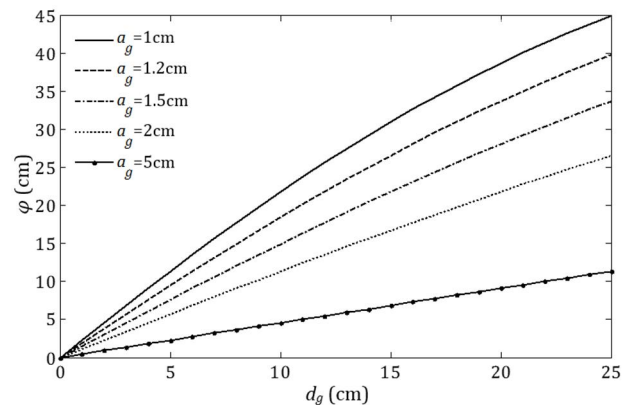
### 3-2- طراحی جزئی مکانیکی

در طراحی مکانیزم تغییر شکل، ایجاد دو درجه آزادی مدنظر قرار گرفته است. البته ایجاد دو درجه آزادی در فضای نسبتاً کم و بدون ایجاد پیچیدگی زیاد می تواند مفید است. لذا همان طور که در قسمت توسعه ایده ذکر گردید،

شده است. در این حالت، اگر هر کدام از سیم ها تحریک شود، طول آن کم شده و باعث ایجاد تغییر زوایای نشان داده شده در مکانیزم می شود.



شکل 7 طرح مکانیزم با محرک های سیم آلیاژ حافظه دار در درجه آزادی سوئیچ



شکل 8 میزان انحراف مکانیزم به عنوان تابعی از فاصله صفحات ایرفویل برای فواصل مختلف سیم از محور دوران در تغییر شکل گال

با در نظر گرفتن کرنش ماکزیمم قابل ایجاد در سیم های آلیاژ حافظه دار و استفاده از روابط هندسی، در هر کدام از درجات آزادی می توان به میزان چرخش مکانیزم به صورت روابط (1) و (2) دست یافت.

$$\tan(\varphi) = \frac{L_{0g}}{a_g} \varepsilon \quad (1)$$

$$\sin(\theta) = \frac{L_{0s}^2}{2a_s d_s} [1 - (1 - \varepsilon)^2] \quad (2)$$

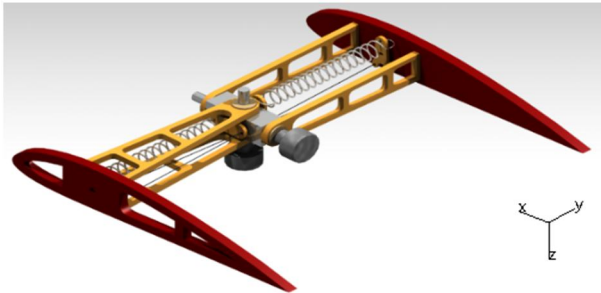
از طرفی، رابطه ی طول اولیه ی سیم و فاصله ی صفحات در هر کدام از درجات آزادی به صورت روابط (3) و (4) است:

$$L_{0g} = d_g \quad (3)$$

$$L_{0s} = \sqrt{d_s^2 + a_s^2} \quad (4)$$

همان طور که در روابط فوق ملاحظه می گردد، مقدار فاصله ی بین صفحات که رابطه ی مستقیمی با طول سیم نیز دارد و فاصله ی سیم از محور دوران، در کرنش نهایی سیم که معرف ماکزیمم انحراف مکانیزم است، تأثیر بسیاری دارد. از آن جا که ازدیاد طول اولیه ی سیم، طول مکانیزم را افزایش داده و کاربرد آن را در یک بال شکل پذیر غیرممکن می کند، لازم است تا بین طول اولیه ی سیم و فاصله ی سیم از محور دوران مصالحه ای برقرار شود. به همین منظور، میزان انحراف مکانیزم در هر کدام از درجات آزادی به عنوان تابعی از فاصله ی صفحات ایرفویل برای چندین فاصله ی سیم از محور دوران در شکل

اینجا ابعاد چندین سانتی متر است، اگرچه می توان این مکانیزم را در ابعاد کوچکتر نیز با استفاده از نتایج و مفاهیم این تحقیق ولی با امکانات و تجهیزات بیشتر توسعه داد. در شکل 12 مدل سه بعدی به همراه چیدمان المان های مختلف در مکانیزم طراحی شده ملاحظه می شود.



شکل 12 مدل سه بعدی به همراه المان های مختلف در مکانیزم تغییر شکل بال

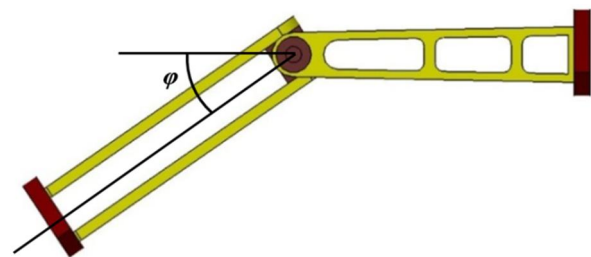
در این مکانیزم، یکی از ایرفویل ها ثابت بوده و صفحه ای ایرفویل دوم نسبت به دیگری قادر است تا دو درجه آزادی را تجربه کند. هر کدام از درجات آزادی به صورت مستقل بر سیستم اعمال می شوند. به عبارت دیگر، در هنگام تحریک یکی از سیم ها برای رسیدن به میزان انحراف مطلوب، انحرافی در درجه آزادی دیگر رخ نمی دهد. از دو فنر نیز برای بازگرداندن مکانیزم به حالت اولیه استفاده شده است که نحوه انتخاب آن ها به صورتی بوده است که پس از ساخت به صورت سعی و خطا و با قرار دادن روی مکانیزم انتخاب گردیده اند. همچنین، از چهار عدد بلبرینگ در محل اتصالات استفاده شده است تا حرکت مکانیزم در هر جهت به خوبی صورت پذیرد.

تحریک محرک های آلیاژ حافظه دار با اعمال ولتاژ بر روی آن ها صورت می پذیرد. لذا باید محرک ها نسبت به هم و بدنه ای مکانیزم عایق باشند. برای اتصال سیم های آلیاژ حافظه دار به مکانیزم از المان هایی به شکل قلاب استفاده شده اند که سیم های آلیاژ حافظه دار می تواند در آن ها مهار شود. این المان ها در طرف دیگر دارای رزوه برای بسته شدن مهره است. برای ایجاد نیروی کافی توسط سیم باید از سیمی با قطر بزرگ استفاده نمود. این کار باعث افزایش زمان پاسخ مکانیزم می گردد، و هر بهبودی در کاهش زمان پاسخ محرک های آلیاژ حافظه دار بر روی عملکرد مکانیزم قویاً اثر می گذارد. به منظور غلبه بر این مشکل طراحی مکانیزم به گونه ای است که سیم آلیاژ حافظه دار به صورت رفت و برگشتی برای تحریک هر درجه آزادی مورد استفاده قرار گرفته است.

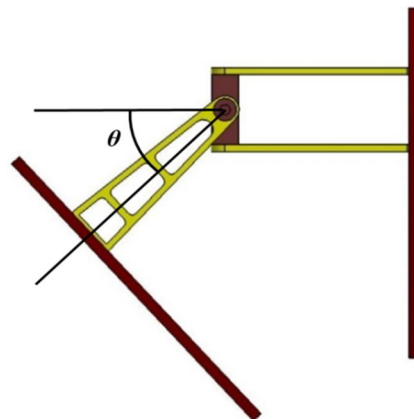
طراحی این مکانیزم به گونه ای صورت گرفته است که با تعویض برخی از المان های مکانیزم امکان ارتقاء و تبدیل به مکانیزم دیگری با پارامترهای هندسی متفاوت موجود است. دو پارامتر مؤثر در هندسه ای مکانیزم که بر روی بازه ای کاری و میزان گشتاور تولیدی توسط مکانیزم مؤثر است یکی فاصله ای صفحات ایرفویل و محل های اتصال محرک ها به صفحات است در شکل 8 و شکل 9 روی اثر آن ها بر میزان انحراف مکانیزم بحث شده است.

از جمله ویژگی های مکانیزم به کار گرفته شده در سیستم بال شکل پذیر، امکان اتصال آن ها به یکدیگر است. در نمونه اولیه ای مکانیزم که در این پژوهش طراحی و ساخته شده است، با توجه به تمرکز تحقیق بر روی عملکرد یک مکانیزم، از ایجاد واسطه های مکانیکی و الکتریکی مربوط به اتصال مکانیزم ها به هم صرف نظر شده است، لیکن بستر موجود مکانیزم امکان اضافه نمودن این واسطه ها را در نمونه های بعدی میسر نموده است.

مکانیزم دو درجه آزادی بیان شده در شکل 10 و شکل 11 طراحی را از ساختار مکانیزم بیان می کند. در مکانیزم مورد نظر، باید زوایای حرکت را به طور دقیق اندازه گیری نمود. لذا می باید سیستم حس گری قابل قبولی را در این مکانیزم تعبیه نمود.



شکل 10 ساختار و نحوه عملکرد مکانیزم طراحی شده در حرکت گال



شکل 11 ساختار و نحوه عملکرد مکانیزم طراحی شده در حرکت سوئیچ

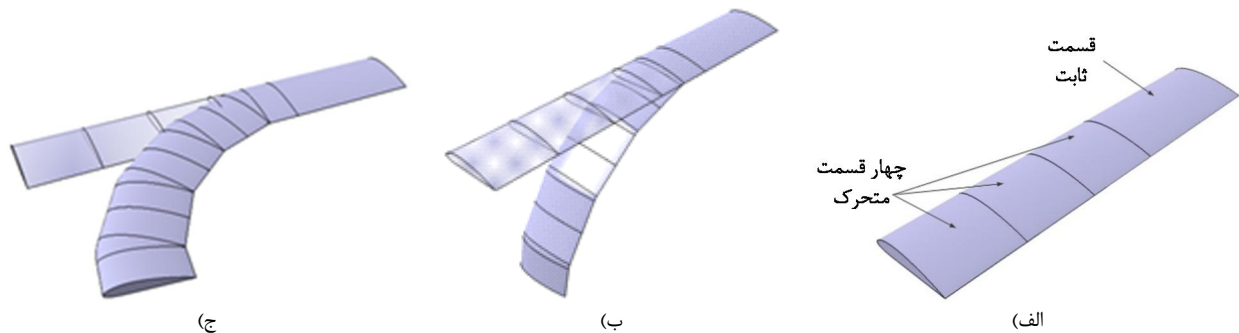
با در نظر گرفتن مسأله ای حس گری مکانیزم، پتانسیومتر یا انکودر می تواند برای اندازه گیری چرخش صفحات مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به محدود بودن چرخش صفحات متحرک، استفاده از پتانسیومتر گزینه ای مناسب تری است. با ملاحظه ای موارد فوق، مکانیزم تغییر شکل بال به شرح زیر توسعه یافته است. در این مکانیزم، دو صفحه ای ایرفویل مانند با یک مفصل که در وسط آن ها قرار دارد، به هم متصل می شوند. به هر یک از ایرفویل ها به منظور افزایش استحکام دو صفحه از جنس فایبرگلاس اتصال داده شده است. حرکات مکانیزم را می توان در جهات رول، یاو و پیچ در نظر گرفت. جهات پیچ و یاو جهات نشان داده شده در شکل 10 و شکل 11 با جهات  $\theta$  و  $\varphi$  است و جهت رول جهتی است که محور آن عمود بر محور جهات  $\varphi$  و  $\theta$  (عمود بر صفحه) در این شکل است. همچنین ایجاد حرکت رول از طریق محرک های خطی در ترکیب با حرکات پیچ و یاو مشکل بوده و تغییرات زیادی نیز در مکانیزم ایجاد نمی کند. لذا جهات حرکت پیچ و یاو به عنوان دو درجه آزادی مکانیزم در نظر گرفته شده و با استفاده از یک لینک صلیبی در طراحی مکانیزم، حرکت در جهت رول محدود گردیده است. علاوه بر این، همان طور که در طراحی ملاحظه می گردد، با لحاظ کردن لینک صلیبی و ورق های فایبرگلاس در مکانیزم، پتانسیومترها را می توان به طور مناسب با مفصل کوپل نمود [19].

تحریک مکانیزم بدین گونه است که با تحریک محرک های خطی آلیاژ حافظه دار، زوایای ایرفویل متحرک در جهات پیچ و یاو تغییر و کنترل می شود. با توجه به ظرفیت مناسب محرک های آلیاژ حافظه دار در ایجاد نیروی زیاد در ابعاد کم، هدف اصلی، ایجاد یک مکانیزم تغییر شکل بال پر قدرت با ابعاد کوچک است. لازم به ذکر است که لفظ کوچک بودن در

## 4- ویژگی‌های مکانیزم

جدول 1 ارائه گردیده است. این ویژگی‌ها به دو قسمت مکانیکی و الکتریکی تقسیم‌بندی گردیده است.

ویژگی‌های کمی مکانیزم توسعه یافته به منظور ایجاد تغییر شکل در بال در



شکل 13 موقعیت قسمت‌های قابل حرکت در بال مورد نظر (الف) بال بدون تغییر شکل، (ب) تغییر شکل گال در بال، (ج) تغییر شکل سوئیپ در بال

نیز با تعویض قطعات واسط از جنس فایبرگلاس قابل تغییر است. این ویژگی‌ها تطبیق پذیری زیادی در هندسه‌ی مکانیزم برای استفاده در کاربردهای بیشتر را فراهم می‌کند.

درجات آزادی ایجاد شده در مکانیزم تغییر شکل با تعبیه‌ی یاتاقان‌های دورانی در مفاصل آن محقق گردیده است. اگرچه این کار تعداد المان‌های مکانیزم را کمی افزایش داده است، لیکن مفصلی قوی با ظرفیت تحمل نیروی زیاد در مکانیزم به وجود آمده است. علاوه بر این، با این کار ارتباط حس‌گر موقعیت که دارای شافت دورانی است نیز تسهیل شده است.

## 5- توسعه مکانیزم

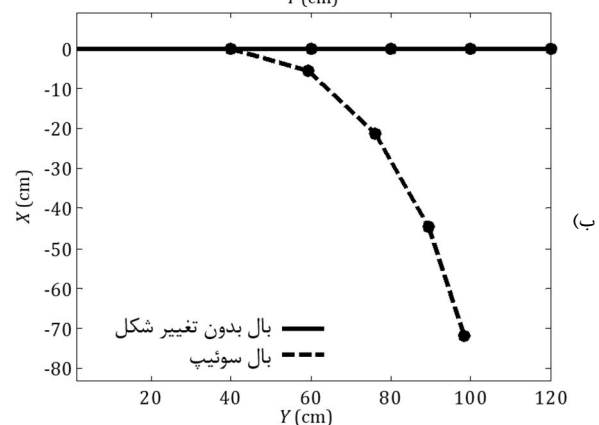
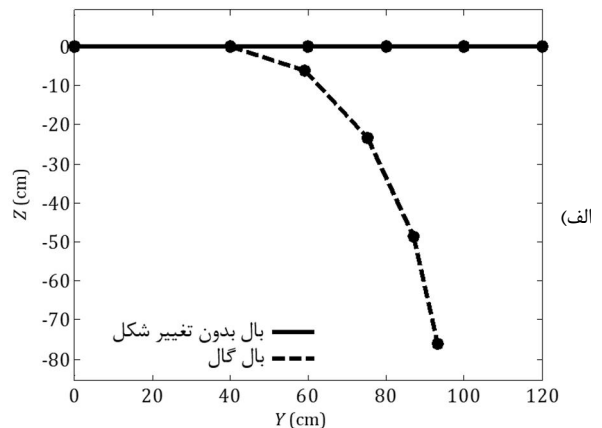
این مکانیزم به گونه‌ای طراحی و ساخته شده است که بتوان به راحتی از آن در یک بال شکل پذیر استفاده کرد. با توجه به درجات آزادی و میزان تغییر شکل طراحی شده که توسط هر کدام از قسمت‌های بال می‌توان به آن دست یافت (حدود 18 درجه در هر دو جهت)، پیش‌بینی شده است که چهار عدد از این بخش‌ها برای استفاده در یک بال به منظور دست‌یابی به تغییر شکل‌های بزرگ کافی باشد. همان‌گونه که در شکل 13 نشان داده شده است، ابتدای بال به صورت ثابت فرض شده است که هیچ تغییر شکلی نخواهد داشت و پس از آن چهار قسمت قابل حرکت به بخش ثابت متصل شده‌اند و به بال اجازه‌ی تغییر شکل در دو راستا را می‌دهند. به این نکته باید توجه داشت که طول هر کدام از این بخش‌ها 20 سانتی‌متر بوده و طول کل بال با استفاده از چهار بخش متحرک 1/2 متر خواهد بود.

با در نظر گرفتن مقادیر تغییر شکل بیشینه برای هر کدام از درجات آزادی، شکل کلی بال در دو حالت تغییر شکل نیافته و تغییر شکل یافته به صورت شکل 14 خواهد بود.

## 6- تحلیل‌های آیرودینامیکی

پس از طراحی بال شکل پذیر پیشنهادی، لازم است تا رفتار کل بال مورد ارزیابی قرار گیرد. هر تغییری در هر کدام از مکانیزم‌ها، روی عملکرد آیرودینامیکی بال تأثیرگذار خواهد بود و در این قسمت به این تأثیرات پرداخته شده است. به همین منظور، تحلیل‌های سیالاتی روی بال صورت پذیرفته است.

برای بررسی جریان روی بال شکل پذیر ابتدا لازم است تا مدل‌های هر کدام از بال‌ها (تغییر شکل یافته و نیافته) برای ورود به نرم‌افزار آماده شوند. از نرم‌افزار فلونت به منظور انجام تحلیل‌های سیالاتی استفاده گردیده است. تحلیل با استفاده از معادلات نویر-استوکس سه بعدی بوده و حل به صورت



شکل 14 وضعیت‌های اولیه و تغییر شکل یافته. (الف) گال، (ب) سوئیپ

جدول 1 ویژگی‌های مکانیزم تغییر شکل بال

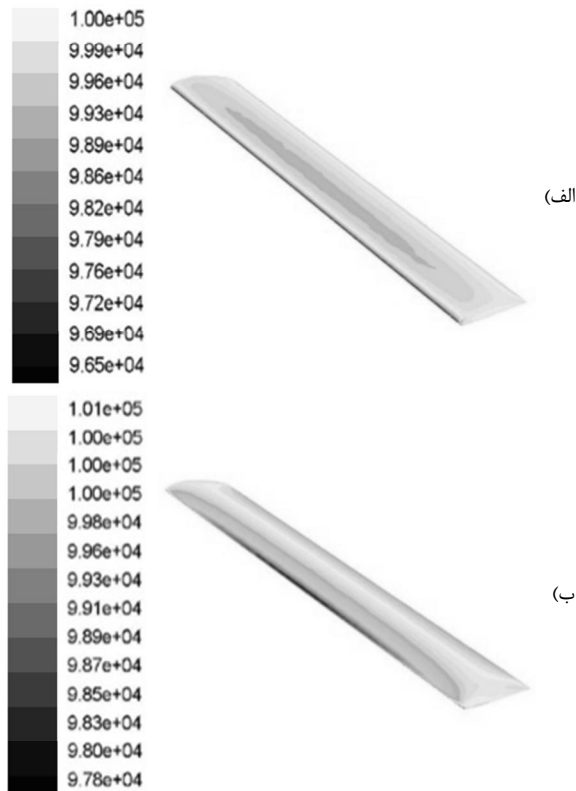
مقطعی از بال	شکل کلی	ویژگی‌های مکانیکی
دو	درجات آزادی	
$20 \times 20 \times 4$ سانتی‌متر	ابعاد	
210 گرم	جرم	
سیم آلیاژ حافظه دار	محرک	ویژگی‌های الکتریکی
پتانسیومتر	حسگر	

طراحی مکانیزم تغییر شکل خود به صورتی انجام شده است که با تعویض برخی از المان‌های مکانیزم می‌توان پارامترهای هندسی آن را عوض نمود. به عنوان مثال دو صفحه‌ی اصلی ایرفویل در مکانیزم به راحتی با باز نمودن دو مهره، قابل دمونتاز و تعویض هستند. به همین ترتیب فاصله‌ی میان صفحات



(ب)

شکل 15 خطوط جریان روی سطح بال تغییر شکل نیافته، الف) زاویه حمله صفر درجه، ب) زاویه حمله 15 درجه



شکل 16 توزیع فشار برحسب پاسکال روی سطح بال تغییر شکل نیافته، الف) زاویه حمله صفر درجه، ب) زاویه حمله 15 درجه

این بال مشابه حالت تغییر شکل نیافته تحت دو شرایط پروازی مورد تحلیل قرار گرفته است. براساس نتایج حاصله، مشاهده شده است که در مقایسه با بال تغییر شکل نیافته در زوایای حمله کوچک، تغییر زاویه‌ی گال باعث نمی‌شود تا بال از تمام جریان هوا برای ایجاد نیروی لیفت در جهت عمودی استفاده کند. دلیل این امر آن است که قسمت‌هایی از بال به صورتی جهت‌گیری شده‌اند که دور از محور عمودی قرار گرفته‌اند. با این وجود، به واسطه‌ی تغییر زاویه‌ی گال، اثر ورتکس‌ها در لبه‌های بال کاهش یافته است. شکل 17 که نشان دهنده‌ی کاهش در نیروی درگ است. در مواقعی که زاویه حمله بزرگ باشد، این اثرات تقویت شده و با مقایسه‌ی بال تغییر شکل یافته‌ی گال با بال تغییر شکل نیافته نیز می‌توان به آن‌ها دست یافت. ورتکس‌هایی که در بال تغییر شکل نیافته حضور داشته‌اند، در این بال تا حد قابل ملاحظه‌ای از بین رفته‌اند.

توزیع فشار روی سطوح بال شکل 18 نیز تفسیر شفاف‌ی از کاهش سطوح لیفت به واسطه‌ی تغییر شکل ارائه می‌دهد. برای بال با تغییر زاویه‌ی گال، فقط یک قسمت کوچک نزدیک ریشه‌ی بال بیشترین لیفت را تولید می‌کند و تولید نیروی لیفت تا لبه‌ی بال کاهش می‌یابد. این مسأله، استفاده‌ی نامؤثر از

پایا انجام یافته است. همچنین نوع حل گر برپایه فشار انتخاب گردیده است و برای مدل‌سازی جریان ویسکوز از مدل توربولانسی کی- $\epsilon$  استاندارد استفاده گردیده است. در تمامی این تحلیل‌ها به منظور کاهش زمان محاسبات و استفاده از تقارن بال، از یک بال استفاده شده و نتایج برای پرنده‌ای که دو بال دارد قابل تعمیم خواهد بود.

در ابتدا بال تغییر شکل نیافته مورد تحلیل قرار گرفته تا مجموعه‌ای از پارامترهای آیرودینامیکی پایه به دست آید که قابل مقایسه با نتایج حاصل از بال‌های تغییر شکل یافته باشد. این بال تحت دو شرایط جریانی مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است. یکی محیطی با سرعت کروز بالا و با سرعت هوای 56 متر بر ثانیه و زاویه حمله‌ی صفر درجه، و دیگری یک صعود سریع با سرعت هوای 35 متر بر ثانیه و زاویه حمله‌ی 15 درجه.

با توجه به نتایج حاصل از این تحلیل‌ها، مشاهده شده است که در سرعت‌های بالا و زوایای حمله‌ی کوچک، بال تغییر شکل نیافته در تولید نیروی لیفت بسیار مؤثر عمل می‌کند. این بدان معنی است که بال در این حالت نیروی لیفتی با حداقل مقدار انرژی هدر رفته از جریان هوا تولید می‌کند. همان‌طور که در شکل 15 قابل مشاهده است، خطوط جریان روی بال اغتشاشات بسیار کوچکی به جز در لبه‌های بال دارند که نشان دهنده‌ی تولید مؤثر نیروی لیفت است. با این وجود، در زوایای حمله‌ی بالاتر جریان به صورت بیشتری از هم جدا شده و ورتکس‌های بیشتری روی لبه‌های بال قابل مشاهده است که نشان دهنده‌ی کاهش بازدهی تولید نیروی لیفت است. توزیع فشار روی این بال تغییر شکل نیافته نیز بیانگر این موضوع است که این بال قابلیت خوبی در ایجاد نیروی لیفت دارد. همان‌طور که در شکل 16 دیده می‌شوند، در زوایای حمله‌ی کوچک این بال توزیع یکنواختی از فشار را روی سطح خود نشان می‌دهد، و این بدان معنی است که قسمت بزرگی از بال در سطح لیفت سهیم است. در زوایای حمله‌ی بالاتر، توزیع فشار بال همچنان یکنواخت است، اگرچه بخش زیادی از نیروی لیفت در یک‌چهارم کورد بال تولید می‌شود.

پس از ایجاد مجموعه‌ای از پارامترهای اولیه، بال تغییر شکل یافته در حالت گال تحت شرایط جریانی مشابه مورد بررسی قرار گرفته است. در این وضعیت تغییر شکل، هر چهار مکانیزم تغییر شکل نسبت به یکدیگر حرکت کرده و باعث خم شدن کل بال می‌شوند. اگرچه درجه‌ی خمیدگی بال توسط هر کدام از چهار مکانیزم قابل کنترل بوده است، تأثیر بیشترین تغییر شکل قابل حصول دیده شده است تا نتایج آن با نتایج حاصل از بال بدون تغییر شکل مقایسه شود. پس از این مقایسه می‌توان به درک قابل قبولی از اثر درجات کمتر تغییر شکل نیز دست یافت. بنابراین، هر چهار مکانیزم قابل حرکت به اندازه‌ی 20 درجه دچار تغییر زاویه شده‌اند.



(الف)





شکل 18 توزیع فشار بر حسب پاسکال روی سطح بال تغییر شکل یافته گال، الف) زاویه حمله صفر درجه، ب) زاویه حمله 15 درجه



شکل 19 خطوط جریان روی سطح بال تغییر شکل یافته سوئیپ، الف) زاویه حمله صفر درجه، ب) زاویه حمله 15 درجه

همان طور که از این تصاویر قابل مشاهده است و به مانند بال تغییر شکل یافته در حالت گال، این بال نیز در تولید نیروی لیفت از تمامی سطح‌هایش به صورت مؤثر عمل نمی‌کند و اکثر نیروی لیفت در ریشه‌ی بال تولید می‌شود. همچنین، به دلیل وجود جریان توسعه یافته از ریشه تا نوک بال، بال دچار یک هدر رفت اضافی لیفت و کاهش بازدهی می‌شود. در نهایت، وجود ورتکس‌های بزرگ در لبه‌ی بال در زوایای کوچک حمله پیشنهاد می‌کند که این بال برای وضعیت‌های کروز به مانند بال تغییر شکل نیافته مؤثر نیست. اگرچه، وجود این جریان حاکی از این موضوع است که این تغییر شکل بال، گشتاورهای پیچشی به وجود می‌آورد که برای مانوردهی بسیار مفید است. این پدیده در قسمت بعد به صورت کمی مورد بحث قرار می‌گیرد.

#### 7- مزیت‌های آیرودینامیکی

تحلیل‌های انجام شده در قسمت قبل یک تصویر از جریان هوا روی بال و یک وسیله به منظور مقایسه‌ی کیفی بین وضعیت‌های مختلف تغییر شکل ارائه می‌دهد. اگرچه، می‌توان با توجه به نتایج عددی حاصل شده به مقایسه‌ی کمی نیز پرداخت. در تحلیل‌های انجام شده در این بخش، خصوصیات آیرودینامیکی زیر استخراج شده‌اند:

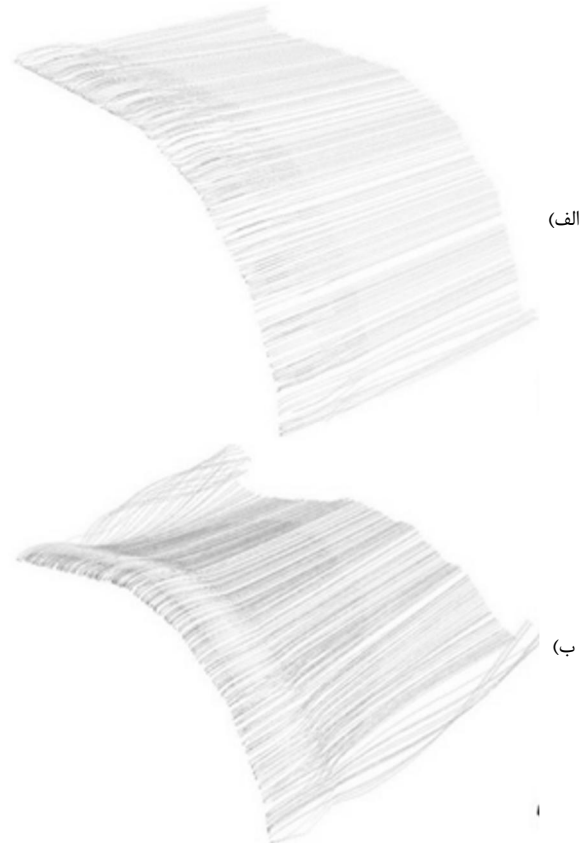
- نیروی میانگین در راستای Z (نیروی لیفت)
- نیروی میانگین در راستای Y (نیروی درگ)
- ممان میانگین حول محور Y (ممان رول)

این نتایج در جدول 2 به صورت خلاصه آورده شده‌اند. با توجه به نتایج حاصل شده،

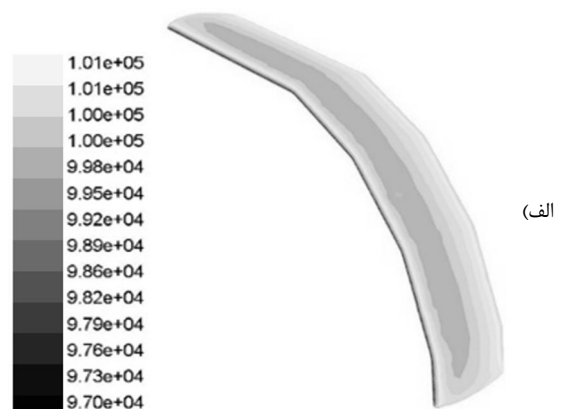
تمامی سطوح در دسترس برای تولید لیفت را نشان می‌دهد، اگرچه کمی از نیروی درگ کاسته شده است.

بال شکل پذیر پیشنهادی علاوه بر تغییر شکل گال، قادر به تغییر شکل سوئیپ نیز هست. این تغییر شکل نیز توسط تغییرات زاویه در هرکدام از چهار مکانیزم حاصل می‌شود. در این قسمت نیز تغییر شکل بیشینه‌ی بال مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

همانند تحلیل‌های قبلی، بال تغییر شکل یافته در حالت سوئیپ تحت دو شرایط پروازی مورد بررسی قرار گرفته است و خطوط جریان و توزیع فشار از این تحلیل‌ها در شکل 19 و شکل 20 نشان داده شده‌اند.



شکل 17 خطوط جریان روی سطح بال تغییر شکل یافته گال، الف) زاویه حمله صفر درجه، ب) زاویه حمله 15 درجه



الف)

جالبی فراهم می‌کنند. از آن‌جا که هر دو تغییر شکل در شرایط پروازی مختلف، کاهشی در لیفت ایجاد می‌کنند، تغییر شکل ناهمسان یک سمت بال نسبت به سمت دیگر به طور قابل‌ملاحظه‌ای قابلیت مانوردهی را ارتقا می‌دهد. بال سوئیپ در شرایط کروز بیشترین کاهش را در ممان‌های رول ایجاد کرده که منجر به سریع‌ترین نرخ رول از میان همه‌ی شرایط تغییر شکل مشاهده شده می‌شود. بنابراین، تغییر شکل ناهمسان بال در حالت سوئیپ می‌تواند به‌منظور مانورهای سریع به کار گرفته شود. زاویه‌ی تغییر شکل می‌تواند تنظیم شود تا نرخ‌های رول دلخواه به دست آیند.

### 8- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مکانیزم با محرک‌های آلیاژ حافظه‌دار به‌منظور استفاده در بال شکل‌پذیر توسعه داده شد. استفاده از محرک‌های آلیاژ حافظه‌دار علاوه بر کاهش وزن سیستم و حجم محرک‌ها، کمک زیادی به انعطاف‌پذیری مکانیزم کرده است. مکانیزم توسعه‌یافته عملکرد خود را در توسعه‌ی یک بال شکل‌پذیر که دارای دو درجه آزادی است، نشان داد. توسعه‌پذیری مکانیزم در افزایش ظرفیت ایجاد تغییر شکل، باعث گردید که این مکانیزم قابلیت استفاده در کاربرد موردنظر را پیدا کند. بال توسعه داده شده قادر است تا در صورت لزوم دو درجه آزادی را داشته باشد تا عملکرد پروازی بهبود یابد. به همین منظور، برخی تحلیل‌های سیالاتی و آیرودینامیکی بر روی بال انجام شد و مزیت استفاده از تغییر شکل‌ها در دو شرایط مختلف پروازی با یکدیگر شرح داده شد.

تحلیل‌های آیرودینامیکی نشان می‌دهند که وضعیت‌های تغییر شکل طراحی شده در رژیم‌های مختلف و متغیر پروازی می‌توانند مفید باشند. از آن‌جا که برای شرایط کروز با سرعت بالا، نسبت لیفت به درگ در بال بدون تغییر شکل افت شدیدی پیدا کرده است، استفاده از این بال در این شرایط به دلیل عدم بازدهی در تولید نیروی لیفت با کمترین درگ نامناسب است. اگرچه، در محیط‌هایی با سرعت کم و زاویه حمله بالا، مانند زمان‌های نشست و برخاست، این بال بدون تغییر شکل از برخی تلفات جدی رنج می‌برد و به‌شدت نامؤثر است. در این شرایط، بال گال حدود 36% بهبود در نسبت لیفت به درگ به همراه دارد که منجر به کاهش مصرف سوخت نیز خواهد شد. بال سوئیپ نیز می‌تواند در این شرایط به کار گرفته شود تا نسبت  $L/D$  را در مقایسه با بال بدون تغییر شکل بهبود بخشد. اگرچه، مزیت اصلی و اساسی بال سوئیپ در کنترل مانورپذیری در شرایط سرعت بالا و زاویه حمله‌ی کوچک می‌تواند دیده شود. در چنین شرایطی، بال سوئیپ کمترین ممان رول را در بین تمامی حالات در نظر گرفته شده برای تحلیل ایجاد می‌کند.

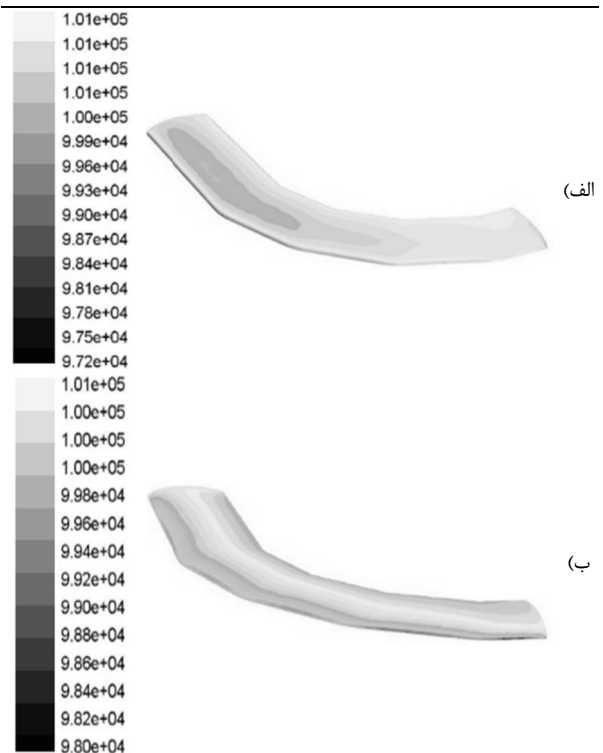
### 9- مراجع

- [1] C. Thill, J. Etches, I. Bond, K. Potter, P. Weaver, Morphing skins, *The Aeronautical Journal*, Vol. 112, No. 1129, pp. 117-139, 2008.
- [2] P. Ghabezi, M. Golzar, M. Ansari, Morphing Technology, *Mechanical Engineering Magazin*, Vol. 79, pp. 13-23, 2010. (In persian)
- [3] P. Ghabezi, M. Golzar, Mechanical Behavior of Quasi-sinusoidal Corrugated Composite sheets, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 379-389, 2012. (In Persian)
- [4] H. Ashley, *Engineering analysis of flight vehicles*: Courier Dover Publications, 1992.
- [5] J. Valasek, *Morphing aerospace vehicles and structures*: John Wiley & Sons, 2012.
- [6] R. W. Wlezien, G. C. Horner, A. R. McGowan, S. L. Padula, M. A. Scott, R. J. Silcox, J. O. Simpson, *The Aircraft Morphing Program*, 1998.

می‌توان مشاهده کرد که بیشترین میزان نسبت لیفت به درگ ( $L/D$ ) در زوایای حمله‌ی کوچک در بال بدون تغییر شکل تولید می‌شود و بیشترین نیروی لیفت در زوایای حمله‌ی بزرگ در بال بدون تغییر شکل تولید می‌شود. باین‌وجود، در زوایای حمله‌ی بالا حتی با تولید نیروی لیفت بالا، بال بدون تغییر شکل از حدود 50% کاهش در نسبت لیفت به درگ رنج می‌برد و بسیار ناکارآمد است.

جدول 2 خصوصیات آیرودینامیکی بال شکل‌پذیر

$L/D$	ممان رول (نیوتن بر متر)		سرعت (متر بر ثانیه)		زاویه حمله (درجه)	تغییر شکل
	ممان رول (نیوتن بر متر)	درگ (نیوتن)	نیروی لیفت (نیوتن)	نیروی درگ (نیوتن)		
23/24	161/50	7/20	167/33	56	15	بال بدون تغییر شکل
8/66	283/53	33/90	293/78	35	15	بال گال
19/05	106/30	7/31	139/31	56	15	بال سوئیپ
11/80	172/71	17/97	212/03	35	15	بال سوئیپ
14/07	103/64	8/48	119/35	56	15	بال سوئیپ
10/12	196	23/68	239/64	35	15	بال سوئیپ



شکل 20 توزیع فشار برحسب پاسکال روی سطح بال تغییر شکل یافته سوئیپ، الف) زاویه حمله 15 درجه، ب) زاویه حمله 0 درجه

از آن‌جا که نسبت لیفت به درگ معمولاً بیانگر سوخت مصرفی، عملکرد پروازی و مسافت پروازی است [20]، می‌توان مشاهده کرد که بال بدون تغییر شکل بهترین انتخاب برای رژیم‌های پروازی با زاویه حمله‌ی بالا نیست. در این شرایط، معمولاً در حالت نشست و برخاست، دو بال شکل‌پذیر زمینه‌ی مؤثرتری برای تولید لیفت فراهم می‌کنند. تغییر شکل گال در بال حدود 36% بهبود در نسبت  $L/D$  ایجاد کرده و فقط کاهش اندکی در کل لیفت تولیدی به همراه دارد. تغییر شکل سوئیپ در بال نیز بهبودهای نسبی در نسبت  $L/D$  در مقایسه با بال بدون تغییر شکل ایجاد می‌کند. اگرچه در زوایای حمله‌ی کوچک، هر دو تغییر شکل در بال در مقایسه با بال بدون تغییر شکل مزیتی ایجاد نمی‌کنند، در واقع برای خصوصیات آیرودینامیکی در این زوایای حمله مناسب نمی‌باشند.

زمانی که مانورپذیری مدنظر قرار گیرد، بال‌های شکل‌پذیر امکان‌های

- [14] S. Barbarino, W. G. Dettmer, M. I. Friswell, Morphing Trailing Edges with Shape Memory Alloy Rods, in *Proceeding of, 21<sup>st</sup> International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST)*. Vol. 4. No. 6, 2010.
- [15] P. de Marmier, N. Wereley, Morphing wings of a small scale UAV using inflatable actuators for sweep control, in *Proceeding of, the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC on Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Collection of Technical Papers*. Vol. 5, 2003.
- [16] J. Hall, K. Mohseni, D. Lawrence, P. Geuzaine, Investigation of variable wing-sweep for applications in micro air vehicles, *Infotech Aerospace, Arlington, Virginia, AIAA2005-7171*, pp. 26-29, 2005.
- [17] D. A. Neal, M. G. Good, C. O. Johnston, H. H. Robertshaw, W. H. Mason, D. J. Inman, Design and wind-tunnel analysis of a fully adaptive aircraft configuration, *AIAA paper*, Vol. 1727, pp. 2004, 2004.
- [18] H. Basaeri, *Design and Modeling of a Morphing Wing Using Shape Memory Alloys*, Thesis, M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, 2013. (In Persian)
- [19] H. Basaeri, A. Yousefi-Koma, M. R. Zakerzadeh, S. S. Mohtasebi, Experimental study of a bio-inspired robotic morphing wing mechanism actuated by shape memory alloy wires, *Mechatronics*, Vol. 24, No. 8, pp. 1231-1241, 2014.
- [20] A. K. Jha, J. N. Kudva, Morphing aircraft concepts, classifications, and challenges, in *Proceeding of, International Society for Optics and Photonics*, pp. 213-224.
- [7] A. M. Wickenheiser, E. Garcia, M. Waszak, Evaluation of bio-inspired morphing concepts with regard to aircraft dynamics and performance, in *Proceeding of, International Society for Optics and Photonics*, pp. 202-211, 2004.
- [8] Z. Min, V. K. Kien, L. J. Richard, Aircraft morphing wing concepts with radical geometry change, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 188-195, 2010.
- [9] S. Barbarino, O. Bilgen, R. M. Ajaj, M. I. Friswell, D. J. Inman, A review of morphing aircraft, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, No. 9, pp. 823-877, 2011.
- [10] M. Abdulrahim, R. Lind, Flight testing and response characteristics of a variable gull-wing morphing aircraft, *AIAA Paper*, Vol. 5113, pp. 16-19, 2004.
- [11] M. Pleißner, M. Trapani, A. T. Isikveren, M. Hornung, R. M. Ajaj, M. I. Friswell, J. Wittmann, H. Baier, Hierarchical Approach for Conceptual Design of Morphing Devices, in *Proceeding of, 53rd AIAA/ ASME/ ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA*. 2012.
- [12] A. Shelton, A. Tomar, J. Prasad, M. Smith, N. Komerath, Active multiple winglets for improved unmanned-aerial-vehicle performance, *Journal of aircraft*, Vol. 43, No. 1, pp. 110-116, 2006.
- [13] A. H. Supekar, *Design, analysis and development of a morphable wing structure for unmanned aerial vehicle performance augmentation*. ProQuest, 2007.