

"یادداشت مهندسی"

پیاده‌سازی رفتار فنر آلیاژ حافظه‌دار در یک سازوکار به‌عنوان عملگر

پیچشی برای تغییر موقعیت بالک موشک

صادق قربان‌حسینی ^۱	علیرضا مطهری ^۲	سیدعلی توکلی‌صبور ^۳	مسعود حیدری ^۴	بهنام حیدری ^۵
^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.	^۲ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران	^۳ پژوهشگاه باقرالعلوم (ع)، تهران، ایران	^۴ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه امیرکبیر تهران، تهران، ایران	^۵ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۷)

چکیده

آلیاژهای حافظه‌دار شکل گروهی از مواد هوشمند هستند، که به علت ویژگی‌های منحصر به فرد دارای کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف نظیر هوافضا، رباتیک، علوم پزشکی و غیره هستند. امروزه بهبود عملکرد پروازی وسایل نقلیه هوایی با استفاده از بال شکل‌پذیر به شدت مورد توجه محققین قرار گرفته است. تغییر وضعیت بال با توجه به فشار هوای روی بال و سرعت حرکت در حین پرواز به عنوان یک موضوع بسیار مهم در این زمینه شناخته می‌شود. برای این کار می‌توان از سازوکارهای تحریک استفاده کرد تا در عین سبک بودن، بال بتواند در شرایط پروازی عملکرد بهینه از خود نمایش دهد. آلیاژهای حافظه‌دار به علت وزن کم و ویژگی‌های خاص ترمومکانیکی مناسب، به عنوان عملگر در سازوکارهای مناسب برای این کار بسیار مفید هستند. در این پژوهش جزئیات یک سازوکار که در آن از فنرهای آلیاژ حافظه‌دار شکل، به عنوان عملگر استفاده شده است، برای ایجاد پیچش بالک یک وسیله نقلیه هوایی حول محور گذرنده از بالک در حین پرواز طراحی و ارایه شده است. برای این کار ابتدا به مطالعه رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکل پرداخته شده است. سپس با بررسی معادلات ساختاری این مواد، مدلی برای رفتار فنرهای آلیاژ حافظه‌دار شکل ارایه شده است. سپس با پیاده‌سازی این مدل در نرم‌افزار متلب، رفتار فنرهای مورد استفاده در سازوکار پیشنهادی مورد تحلیل قرار گرفته است. سپس با استفاده از نتایج این پیاده‌سازی اجزای مورد استفاده در سازوکار طراحی شده و ابعاد و ضریب اطمینان طراحی هر یک از آن‌ها ارایه شده است.

واژه‌های کلیدی: بال شکل‌پذیر، فنر آلیاژ حافظه‌دار، مدل ساختاری، طراحی سازوکار، عملگر پیچشی

Implementation of Shape Memory Alloy Spring Behavior in a Mechanism as a Torsional Actuator for Position Changing of Rocket Wing

S. Ghorbanhosseini ¹	A. Motahari ²	S. A. Tavakoli-Saboor ³	A. Heidari ⁴	B. Heidari ⁵
¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran	² Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University-Saveh Branch, Saveh, Iran	³ Bagher-al-ooloom Institute, Tehran, Iran	⁴ Aerospace Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran	⁵ Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(Received: 26/August/2019; Accepted: 27/January/2020)

ABSTRACT

Shape memory alloys are a group of intelligent materials, which due to their unique characteristics have various applications in different industries such as aerospace, robotics, medical sciences and

^۱ - دانشجوی دکترا: s.ghorbanhosseini68@gmail.com^۲ - استادیار (نویسنده پاسخگو): a.motahari@iau-saveh.ac.ir^۳ - پژوهشگر: sats1400@gmail.com^۴ - دانشجوی دکترا: heidarimasoud@aut.ac.ir^۵ - دانشجوی دکترا: b.heidari@me.iut.ac.ir

so on. Nowadays, improving the performance of air vehicles has received much attention from researchers. Wing form change during flight due to the air pressure is a very important issue in this field. Excitation mechanisms can be used to change the wing form during flight. Therefore, the wing can perform optimally in-flight conditions. Shape memory alloy actuators are very useful in excitation mechanisms because of their low weight and appropriate thermomechanical properties. In this study, the details of a mechanism in which shape memory alloy springs are used as torsion actuators to provide the wing twisting around the axis of the vehicle's body, are designed and presented. For this purpose, first the behavior of shape memory alloys has been studied. Then, by examining the constitutive equations of these materials, a model for the shape memory alloy springs is presented. Next, by implementing this model in MATLAB software, the shape memory alloy spring's behavior is analyzed in the proposed mechanism. Then, by using the results of this implementation, the components used in the mechanism are designed geometrically and the safety factor of each component is calculated.

Keywords: Morphing wing, Shape memory alloy spring, Constitutive model, Mechanism design, Torsion actuator

۱- مقدمه

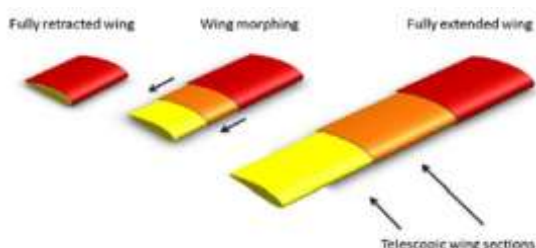
خاصیت کلیدی آلیاژهای حافظه‌دار که منجر به وجود ویژگی‌های منحصربه‌فرد در آن‌ها شده، وقوع تبدیل فاز مارتنزیتی در این‌گونه مواد است. آلیاژهای حافظه‌دار دارای دو فاز پایدار آستنیت و مارتنزیت هستند. این مواد در دماهای بالا به صورت آستنیت که یک ساختار کریستالی متقارن با انرژی بالا است موجود بوده، اما در دماهای پایین به صورت مارتنزیت با انرژی کم که تقارن ساختار آن کمتر از آستنیت است می‌باشند. شیوه متداولی که در تغییر این فاز به مارتنزیت وجود دارد استحاله مارتنزیتی در طی سرد کردن است. هنگام این تغییر فاز ناشی از سرد کردن، شبکه بلوری تقارن خود را از دست داده و به ساختار تک صفحه‌ای تبدیل می‌شود.

آلیاژهای حافظه‌دار شکل گروهی از مواد هوشمند هستند، که به علت برخورداری از ویژگی‌های خاص دارای کاربردهای متنوعی در صنعت هوافضا، رباتیک، علوم پزشکی و غیره هستند. مهم‌ترین ویژگی این آلیاژها که به خاطر آن شهرت دارند آن است که چنانچه تا دمای خاصی حرارت ببینند می‌توانند کرنش‌های ماندگار ایجاد شده در اثر بارگذاری را آزاد کرده و شکل اولیه خود را به دست آورند. خاصیت حافظه‌داری برای اولین بار توسط یک فیزیک‌دان سوئدی به نام آرن اولاندر [۱] بر روی آلیاژ طلا-کادمیوم کشف شد. سپس گرینگر و مورادیان [۲] متوجه تشکیل و ناپدید شدن فاز مارتنزیت در اثر کاهش و افزایش دما در آلیاژ مس-روی شدند. حدود یک دهه بعد، پدیده حافظه‌داری مبتنی بر رفتار ترموالاستیک فاز مارتنزیت توسط کورماجوف و چنگ و رید گزارش شد. در حقیقت نقطه عطف در تاریخچه آلیاژهای حافظه‌دار به کشف بولر و همکارانش مربوط می‌شود. آن‌ها در حالی که در آزمایشگاه توپخانه نیروی دریایی، در حال بررسی مقاومت به حرارت و خوردگی آلیاژ نیکل-تیتانیوم بودند، به طور اتفاقی متوجه پدیده حافظه‌داری آن شدند و از همین رو این آلیاژ به نایتینول که مخفف عبارت نیکل تیتانیوم آزمایشگاه توپخانه نیروی دریایی در زبان انگلیسی است، شهرت یافته است [۳-۴].

شکل ۱ این استحاله را با جزئیات بیشتر نشان می‌دهد. در تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت در اثر سرد شدن، درجه حرارت آغاز تشکیل مارتنزیت M_s و درجه حرارت پایان تشکیل این فاز M_f نام دارد. این استحاله برگشت‌پذیر بوده و با گرم کردن مارتنزیت می‌توان به فاز آستنیت دست یافت. در این صورت دمای آغاز تشکیل آستنیت را A_s و دمای پایان تشکیل آن را A_f می‌نامند. این چهار درجه حرارت از خواص مهم این آلیاژها بوده که بسته به شرایط مختلف، از جمله درصد ترکیب عناصر و عملیات‌های ساخت و پس از ساخت جسم، مقادیر متفاوتی می‌توانند داشته باشند.

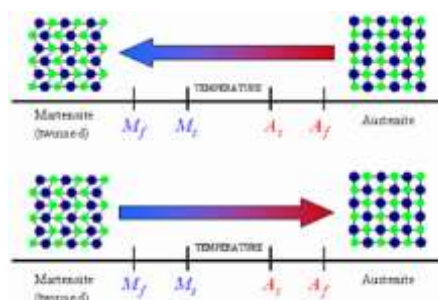
این‌جا استفاده شود، فضای اشغال شده و وزن کل را می‌توان تا حد زیادی کاهش داد. ایجاد تغییر شکل در بال وسیله نقلیه هوایی همواره به‌عنوان یک مسئله مهم مورد توجه محققین صنعت هوا-فضا مورد توجه قرار داشته است. در ادامه به برخی از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه پرداخته خواهد شد.

یک روش تغییر طول برای دستیابی به تغییر شکل بال، استفاده از سازوکارهای تلسکوپی است. برای این کار، بال به چندین قسمت تقسیم می‌شود و سطح مقطع بال به سمت نوک بال کوچک می‌شود. به این صورت، این قسمت‌ها داخل یکدیگر می‌لغزند تا طول بال را تغییر دهند. بلوندیو و همکاران [۶] نیز با استفاده از عملگرهای پنوماتیک طول بال را تغییر داده‌اند. در این کار، بال به سه قسمت تقسیم شده است که هر کدام از آن‌ها مطابق شکل ۲ می‌تواند در داخل بخش دیگر به صورت کامل جمع شود. برای دستیابی به تغییرات زیاد، که تا ۱۱۴ درصد گزارش شده است، سه عملگر تلسکوپی استفاده شده است.



شکل (۲): طرح بال تلسکوپی [۶].

روش دیگر برای ایجاد تغییر شکل جهت تغییر طول بال استفاده از سازوکارهای قیچی مانند است. بهارتی و همکاران [۷] یک پلتفرم را که با استفاده از سازوکارهای قیچی مانند توسط موتور DC تحریک می‌شود، مورد آزمایش قرار دادند. در این پژوهش زاویه میدان دید بال تغییر یافته و بر این اساس طول بال نیز دستخوش تغییر شده است. این تغییر در طول بال ۵۵ درصد گزارش شده است. اما وزن این بال به دلیل استفاده از سرو موتورها و اجزای انتقال نیرو، سنگین بوده و مناسب نیست. ویگینز و همکاران [۸]، یک سازوکار یک درجه آزادی را توسعه داده‌اند که به بال قابلیت تغییر شکل از وضعیت صفحه‌ای به وضعیت غیر صفحه‌ای را می‌دهد. پس از شرح تجزیه و تحلیل‌های آیرودینامیکی بال، به منظور تعیین نیروهای آیرودینامیکی، تحلیل‌های سازه‌ای

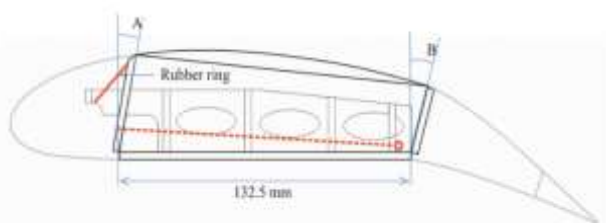


شکل (۱): نحوه تغییر ساختار بلوری فازها در اثر اعمال حرارت به یک آلیاژ حافظه‌دار [۵].

المان‌های آلیاژ حافظه‌دار به فرم‌های مختلفی در عملگرها و حسگرها مورد استفاده قرار می‌گیرند و در بعضی از فرم‌ها مانند سیم‌ها، میله‌ها، فنرهای پیچشی و فنرهای ماریچ کاربرد بیشتری در کارهای مکانیکی دارند. قابل ذکر است که آلیاژهای حافظه‌دار به فرم سیم، به علت در دسترس بودن، هزینه ارزان برای ساخت و سهولت مدل‌سازی پرکاربردترین آن‌ها هستند ولی میزان اندک کرنش قابل برگشت در آن‌ها یک عیب بزرگ محسوب می‌شود و در زمینه‌هایی که به میزان کرنش قابل برگشت زیادی در فضای کاری کم نیاز است، فنرها به‌عنوان یکی از پرکاربردترین المان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، به عبارتی فنرهای حافظه‌دار به‌علت توانایی‌شان در بازگرداندن مقدار زیادی کورس کار (خاصیت حافظه‌داری) و تغییر شکل ۲۰٪ تا ۱۶۰۰٪ در مقایسه با تغییر شکل ۵٪ برای سیم حافظه‌دار و همچنین داشتن تغییرات بسیار اندک نیرو و تنش در حین افزایش مقدار زیاد کرنش (خاصیت شبه‌الاستیک)، در زمینه‌های بسیاری از جمله صنایع هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

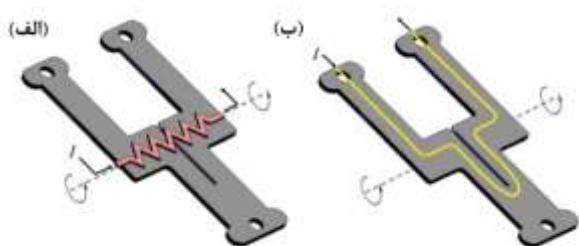
فنرهای حافظه‌دار برای افزایش ویژگی آیرودینامیکی در بال‌های وسایل نقلیه هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در وسایل هوایی طراحی ایرفویل همیشه متناسب با شرایط پرواز است و اگر مقطع ایرفویل را بتوان با تغییر شرایط پرواز عوض کرد، مزایای بسیاری را از جمله بهبود سرعت پرواز، بهبود نسبت لیفت-دراگ، تغییر فضای پوشش پرواز و غیره می‌توان به دست آورد و برای تحقق بخشیدن به تغییر شکل مناسب، عملگر لازم باید درون بال نصب شود، اما فضای داخلی بال به قدری محدود است که سازوکارهای راه‌اندازی مانند موتورهای الکتریکی و سامانه‌های قدرت سیال نمی‌تواند به درستی کار کنند بنابراین اگر مواد هوشمند در

ساخته شده و آزمون فعال‌سازی آلیاژهای حافظه‌دار به منظور امکان‌سنجی سازوکار تغییر شکل روی آن پیاده شده است. همچنین توسط نرم‌افزارهای تجاری شده خصوصیات آیرودینامیکی بال شکل‌پذیر ارزیابی شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است اجزای تشکیل‌دهنده این بال شکل‌پذیر عبارتند از: پوسته بال، تیر نگهدارنده، تقویت کننده، قاب چهارضلعی و سیم آلیاژ حافظه‌دار به عنوان عملگر.



شکل (۴): راست: بال شکل‌پذیر بدون تغییر شکل، چپ: بال شکل‌پذیر با تغییر شکل [۱۰].

پایک و همکارانش [۱۱] یک عملگر آلیاژ حافظه‌دار جدید را برای حرکت پیچشی شبیه‌سازی، طراحی کرده و ساختند. آن‌ها این کار را به منظور استفاده از این عملگر در ربات‌های با ابعاد کوچک و متوسط انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش ورق‌های آلیاژ حافظه‌دار به ضخامت $500 \mu\text{m}$ را جایگزین سیم‌هایی از این جنس کردند و با فعال کردن این عملگرها زاویه‌ی پیچشی معادل 180° با چگالی پیچش بسیار بالا را گزارش کردند.

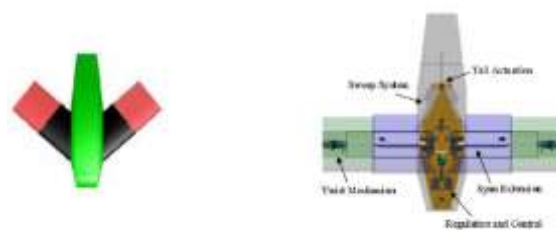


شکل (۵): عملگرهای پیچشی از جنس آلیاژ حافظه‌دار. الف) گرمایش نیکل-کروم، ب) گرمایش ژول [۱۱].

همان‌طور که در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود یک نمونه عملگر آلیاژ حافظه‌دار به شکل Y با ضخامت حدود $500 \mu\text{m}$ با استفاده از برش لیزر از یک ورق نایتینول استخراج شده است. بعد از عملیات تثبیت شکل و عملیات حرارتی بر

سازوکار بررسی شده است. در این طرح از سازوکارهایی به مانند یک اتصال قیچی استفاده شده است و حرکت از یک بخش بال به بخش بعدی منتقل می‌شود. ادعا شده است که این سازوکار به‌گونه‌ای ساخته شده است که با یک ورودی به اولین بخش زنجیره، بخش‌های دیگر می‌توانند به گونه‌ای حرکت کنند تا به مکان‌های مطلوب برسند. همان‌طور که ارائه شد در بیشتر طرح‌های قبل از موتورهای DC به عنوان محرک اولیه استفاده شده است. اما این موتورها به علت بالا بردن وزن وسیله‌ی نقلیه، کارایی آن را کاهش می‌دهند. به همین دلیل امروزه بیشتر محققین تمرکز خود را معطوف به استفاده از موادی نظیر آلیاژهای حافظه‌دار کرده‌اند که بتوانند با وزن بسیار کم تحریکی مشابه موتورهای DC ایجاد کنند. به همین خاطر در بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر از آلیاژهای حافظه‌دار به‌عنوان محرک برای تغییر شکل بال استفاده شده است. در ادامه به معرفی برخی از این پژوهش‌ها پرداخته می‌شود.

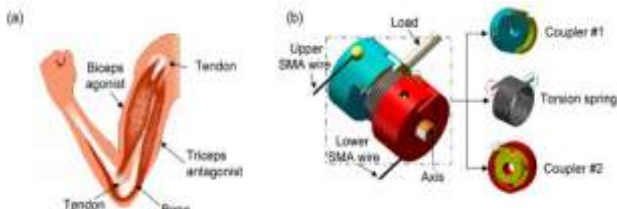
نیل و همکاران [۹] یک سازوکار برای تغییر میدان دید فراهم کردند. در این سازوکار حرکت به‌وسیله یک سازوکار با سه میله و عملگرهای خطی و دورانی ایجاد می‌گردد. تصویر سازوکار طراحی شده توسط آن‌ها که در آن از عملگر الکترومکانیکی استفاده شده است در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل (۳): سازوکار الکترومکانیکی طراحی شده برای تغییر زاویه دید [۹].

به‌منظور تغییر سطح مقطع بال، کانگ و همکاران [۱۰] یک سازوکار تغییر شکل فلپ جدید را با استفاده از عملگرهای هوشمند توسعه دادند. این سازوکار نیاز به تغییر طول پوسته بال نداشت. آن‌ها از سیم آلیاژ حافظه‌دار به عنوان عملگر استفاده کرده‌اند. روش حرارت دهی مقاومتی برای فعال نمودن سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار به کار گرفته شده است. علاوه بر این، محدوده جریان الکتریکی مجاز به‌صورت آزمایشگاهی آزموده شده است. یک بخش از بال

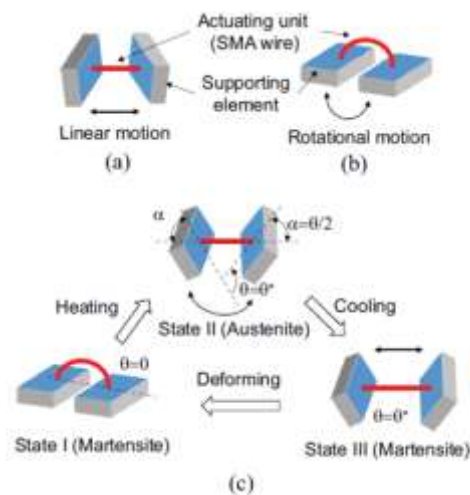
می‌شود وقتی در فاز مارتنزیت قرار داریم از سیم منحنی شده استفاده شده است. سپس با حرارت دادن به سیم تغییر فاز به آستنیت حاصل خواهد شد. در این صورت سیم به حالت اولیه خود یعنی قبل از منحنی شدن باز خواهد گشت. با این برگشت‌پذیری المان‌های حمایت‌کننده تغییر شکل خواهند داد و در نهایت به مرور زمان با سرد شدن سیم شکل حاصله ثابت پیدا خواهد کرد. با این کار می‌توان با تغییر شکل دوباره سیم نایتینول این تغییر زاویه را مجدد مشاهده کرد. ژائو گو و همکارانش [۱۳]، یک عملگر جدید را برای انجام یک حرکت فیزیکی طراحی کردند تا به‌طور همزمان بتوانند زمان پاسخ عملگر و سختی کلی آن را کاهش دهند. آن‌ها برای این کار از دو سیم آلیاژ حافظه‌دار و یک فنر پیچشی از این جنس استفاده کردند. آن‌ها برای پیاده‌سازی این عملگر معادلات حاکم بر مسئله را ارائه کرده، سپس به شبیه‌سازی حرکت عملگر پرداختند و در نهایت با طراحی یک کنترلر PI فرآیند را به‌طور عملی آزمایش کردند. ایشان به بررسی رفتار مفصل آرنج انسان پرداختند و دریافتند که این عملگر بین ماهیچه‌های مختلف (عضله دو سر و ماهیچه سه سر) که از طریق تاندون به استخوان متصل هستند، کار می‌کند. آن‌ها سعی کردند که رفتار باز و بسته شدن این مفصل را از طریق یک سازوکار پیاده‌سازی کنند. همان‌طور که در شکل ۷ نیز پیداست این سازوکار از دو سیم آلیاژ حافظه‌دار مخالف، یک فنر پیچشی و دو متصل‌کننده دایروی ساخته شده است. بار به اتصال کوپلر اول اعمال می‌شود. سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار مانند ماهیچه‌های مصنوعی عمل می‌کنند. و شرایط را برای حرکت دوجبهته عملگر فراهم می‌کنند. فنر پیچشی در درون کوپلر، شبیه تاندون عمل می‌کند.



شکل (۷): طرح‌واره مفصل آرنج و سازوکار طراحی شده بر این اساس [۱۳].

بشیر و همکارانش [۱۴]، به بهینه‌سازی عملکرد آیرودینامیکی بال هوشمند با استفاده از عملگرهای مواد هوشمند پرداختند. آن‌ها مطالعات خود را برای محدوده

روی آن برای فعال کردن آن عملگر دو نوع روش گرمایش به کار گرفته شده و مقایسه شده است. در روش اول از سیمی از جنس نیکل-کروم برای حرارت‌دهی استفاده شده است و در حالت دوم از جریان‌دهی الکتریکی یا همان روش گرمادهی ژول برای این کار استفاده شده است. محققین در این پژوهش به این نتیجه رسیدند که نرخ پاسخ زمانی اثر گرمایشی نیکل-کروم بسیار سریعتر از روش ژول است. در نتیجه عملگر سریعتر فعال شده و سرعت پاسخ بالاتر خواهد رفت. در یک نمونه آزمایشی زمان پاسخ از $3/1\text{ S}$ به $2/5\text{ S}$ ثانیه کاهش یافته است. میزان انرژی مورد نیاز در روش ژول $6/8\text{ W}$ بوده که به روش گرمادهی نیکل-کروم به $3/6\text{ W}$ تقلیل یافته است. شین و همکارانش [۱۲]، نیز عملگری از سیم آلیاژ حافظه‌دار را به عنوان یک ماژول پیچشی برای استفاده در ربات‌های زیستی معرفی کردند. آن‌ها ابتدا یک ماژول را ساختند و به بررسی ویژگی‌های آن پرداختند. سپس با کنار هم قرار دادن چند ماژول به‌صورت سری نتایج کار خود را بهبود بخشیدند. آن‌ها برای این کار از یک سیم نایتینول تغییر شکل‌یافته و دو المان حمایت‌کننده استفاده کردند. همان‌طور که در شکل ۶ نیز مشاهده می‌شود؛ یک سیم از جنس آلیاژ حافظه‌دار اتصال بین دو صفحه را برقرار می‌کند.



شکل (۶): طرح‌واره عملگر بر پایه سیم آلیاژ حافظه‌دار و المان‌های حمایت‌کننده [۱۲].

بنا به شکل اولیه سیم نایتینول می‌توان حرکت خطی یا پیچشی را به‌عنوان خروجی این عملگر معرفی کرد. به‌طور مثال همان‌طور که در بخش C این شکل ۶ مشاهده

معادلات ساختاری پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار متلب برای مدل‌سازی رفتار فنر آلیاژ حافظه‌دار ارایه می‌شود و در مرحله بعد، یک سازوکار با استفاده از این فنر آلیاژ حافظه‌دار به‌منظور پیچش بالک وسیله نقلیه هوایی معرفی خواهد شد و در نهایت با استفاده از معادلات یاد شده، به طراحی سازوکار پیشنهادی، جهت پیچش بالک مورد نظر حول محور گذرنده از آن پرداخته می‌شود. همچنین مشخصات هندسی اجزای مورد استفاده در این سازوکار و ضریب اطمینان طراحی نیز محاسبه خواهد شد.

۲- معادلات ساختاری فنر آلیاژ حافظه‌دار

در این بخش با استفاده از معادلات ساختاری «برینسون» [۱۸]، برای آلیاژهای حافظه‌دار و اصلاحاتی بر روی آن مدلی برای فنرهای حافظه‌دار ارایه می‌شود [۱۹]؛ معادلات «برینسون» برای بررسی رفتار یک بعدی موادی از جنس آلیاژهای حافظه‌دار تحت کشش به کار می‌رود و برای تعمیم آن به رفتار فنرهای حافظه‌دار، از معیار تسلیم فون میزز استفاده شده است و بنابراین، می‌توان نوشت:

$$\gamma = \gamma^{tr} + \gamma^e \quad (1)$$

$$\begin{cases} \gamma^e = \frac{\tau}{G} \\ \gamma^{tr} = \gamma_L \xi_s (\sigma_{eq}) = \gamma_L \xi_s (\sqrt{3}\tau) \end{cases} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\tau}{G(\xi)} + \gamma_L \xi_s (\sqrt{3}\tau, T) \quad (3)$$

که در آن، γ^e و γ^{tr} به ترتیب نشان‌دهنده کرنش برشی الاستیک و کرنش برشی استتال هستند و با در نظر گرفتن معیار تسلیم فون میزز رابطه (۳) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\gamma = \frac{\tau}{G(\xi)} + \sqrt{3}\varepsilon_L \xi_s (\sqrt{3}\tau, T) \quad (4)$$

همان‌طور که در رابطه (۴) مشاهده می‌شود، مدول الاستیک برشی تابعی از کسر حجمی مارتنزیت می‌باشد و به عنوان یک تقریب اولیه می‌توان این تغییرات را به صورت زیر خطی در نظر گرفت:

$$G = G_A + \xi (G_M - G_A) \quad (5)$$

وسعی از پارامترهای ایرفول NACA4412 در نرم‌افزار فلوئنت صورت دادند. ضرایب آیرودینامیکی را در زاویه‌های مختلف حمله برای بال تغییر شکل یافته و بال اولیه به دست آوردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در بال تغییر شکل یافته با تغییر نسبت ابعادی بال، عملکرد آیرودینامیکی آن در زوایای مختلف حمله افزایش می‌یابد. چن و همکارانش [۱۵]، به شناسایی و جبران هیستریزس غیرخطی بال هوشمند که در آن از عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار استفاده شده است، بر اساس مدل گسسته Preisach پرداختند. آن‌ها ابتدا بال هوشمند را بر اساس مدل گسسته یاد شده شبیه‌سازی کردند. آن‌ها با مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها و نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی (اندازه‌گیری تغییر طول بال هوشمند بر مبنای زمان)، نشان دادند که شبیه‌سازی صورت گرفته تطابق خوبی با نتایج آزمون‌های تجربی دارند. در نهایت یک مدل کنترلی شبه خطی برای جبران حلقه هیستریزس یاد شده ارایه کردند. هوی و همکارانش [۱۶] نیز عملکرد آیرودینامیکی وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین را که با استفاده از ساختارهای هوشمند تجهیز شده بود، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با انجام چند سری آزمون‌های تجربی به این نتیجه رسیدند که وسایل نقلیه هوایی تهیه شده با استفاده از ساختارهای هوشمند به نسبت وسایل نقلیه هوایی معمولی، دارای پایداری جانبی بیشتر هستند و همچنین گردابه نوک بال را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهند. صیادی و مصطفوی [۱۷]، الگوریتم کنترلی جدیدی برای تشکیل آرایش هندسی مطلوب توسط گروهی از بالگردهای کوچک بدون سرنشین ارایه دادند. آن‌ها با استفاده از الگوریتم نیوتن-اولر معادلات دینامیکی حاکم بر هر پرنده را استخراج کردند. سپس به منظور کنترل آرایش‌بندی از روش رهبر-پیرو استفاده کردند. آن‌ها همچنین به شبیه‌سازی روابط یاد شده نیز پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که هر روبات متناسب با اطلاعاتی که از بقیه روبات‌ها به دست می‌آورد، عکس‌العمل مناسبی از خود نشان می‌دهد و در موقعیت و جهت‌گیری مناسب نسبت به سایر پرنده‌ها قرار می‌گیرد.

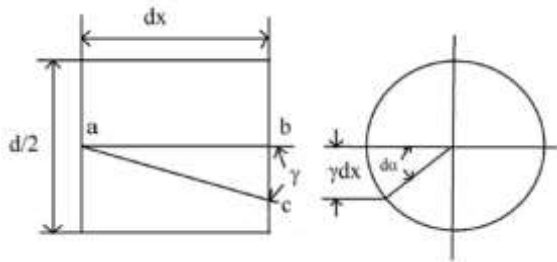
در این بخش برخی سازوکارهای مورد استفاده محققین با استفاده از عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار برای حرکت‌های پیچشی و دیگر حرکت‌ها معرفی شد. در این پژوهش ابتدا

اگر خط ab بر روی سطح سیم به صورت موازی با محور فنر باشد، به هنگام جابجایی فنر، خط ab به میزان γ می‌چرخد و خط ac را اشغال می‌کند و می‌توان نوشت:

$$d\alpha \left(\frac{d}{2} \right) = \gamma_{max} dx \quad (۸)$$

$$d\alpha = \left(\frac{\gamma_{max}}{\frac{d}{2}} \right) dx \quad (۹)$$

$$\alpha = \int_0^{\pi DN} \left(\frac{\gamma_{max}}{\frac{d}{2}} \right) dx = \pi DN \left(\frac{\gamma_{max}}{\frac{d}{2}} \right) = \frac{\pi DN \gamma_{max}}{\frac{d}{2}} \quad (۱۰)$$



شکل (۹): مقطع عرضی فنر مارپیچ.

حال با توجه به این که نیرو F بازوی گشتاور $\frac{d}{2}$ را دارد و با استفاده از معادله (۹)، جابجایی فنر مارپیچ از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$u = \alpha \frac{D}{2} \quad (۱۱)$$

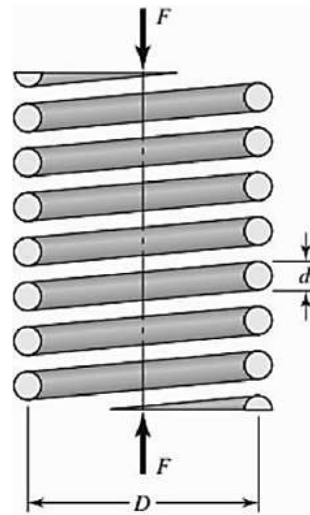
$$u = \left(\frac{D}{2} \right) \left(\frac{\pi DN \gamma_{max}}{\frac{d}{2}} \right) = \frac{\pi D^2 N}{d} \gamma_{max} \quad (۱۲)$$

فندهای مارپیچ حافظه‌دار در ابتدای بارگذاری رفتاری الاستیک‌گونه خواهند داشت و زمانی که تنش در مقطع سیم فنر به مقدار بحرانی شروع استحاله برسد، بخشی از مقطع رفتاری غیر خطی از خود نشان می‌دهد و زمانی که تنش در بخشی از مقطع به مقدار بحرانی پایان استحاله برسد، بخشی از مقطع رفتاری الاستیک‌گونه خواهد داشت که این بخش ممکن است شیبی متفاوت از بخش الاستیک اول داشته باشد و با این فرضیات می‌توان مقطع عرضی سیم

که در آن، G_M و G_A به ترتیب مدول برشی الاستیک در فاز مارتنزیت کامل و آستنیت کامل می‌باشند و برای بررسی تغییرات کسر حجمی مارتنزیت، معادلات سینتیکی «برینسون» به کار برده می‌شود و از عبارت $\sqrt{3}\tau$ به‌عنوان تنش معادل در معادلات سینتیکی کسر حجمی مارتنزیت ناشی از برش استفاده می‌شود.

معادلات تعادل استاتیکی فنر مارپیچ شکل ۸ با قطر D و تعداد حلقه‌های فعال N و قطر سیم d که تحت نیروی F قرار گرفته است عبارت است از:

$$F = \frac{4\pi}{D} \int_0^{\frac{d}{2}} \tau r^2 dr \quad (۶)$$



شکل (۸): فنر مارپیچ.

در جایی که شعاع مقطع عرضی سیم باشد با توجه به سازگاری هندسی، γ یک توزیع خطی در حالت الاستیک، در مقطع عرضی سیم دارد و رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\gamma(r) = \left(\frac{r}{\frac{d}{2}} \right) \gamma_{max} \quad (۷)$$

نکته‌ای که قابل توجه می‌باشد این است که جابجایی فنر مارپیچ در ناحیه‌ی الاستیک می‌تواند با در نظر گرفتن المانی از طول (dx) ، بریده شده از سیم به شعاع $\frac{d}{2}$ محاسبه شود و همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود،

$$\tau_s = \frac{\sigma_s^{cr}}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

$$\gamma = \frac{r \sigma_s^{cr}}{r_s \sqrt{3} G} \quad (16)$$

$$\tau = G(\gamma - \gamma_L \xi_s) = \frac{r \sigma_s^{cr}}{r_s \sqrt{3}} - G \gamma_L \xi_s \quad (17)$$

۲. اگر $r < r_f$ ، $r_s < \frac{d}{2}$ باشند و با استفاده از

معادلات بالا و براساس معادلات سینتیک «برینسون» معادله تنش به صورت زیر خواهد بود:

$$\tau = (G_A + (G_M - G_A) \xi) * \left\{ \gamma - \gamma_L \left(\frac{1 - \xi_{s0}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} (\sigma_{eq} - \sigma_f^{cr}) \right\} + \frac{1 - \xi_{s0}}{2} \right) \right\} \quad (18)$$

$$\xi = \frac{1 - \xi_{s0}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} (\sigma_{eq} - \sigma_f^{cr}) \right\} + \left\{ \frac{1 - \xi_{s0}}{2} + \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1 - \xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) + \Delta_{T\xi} \right\}$$

۳. اگر $r \geq r_f$ باشد می توان برای به دست آوردن معادله تنش در این ناحیه به صورت زیر عمل کرد:

$$\frac{\gamma}{\gamma_f} = \frac{r}{r_f} \quad (19)$$

$$\gamma = \frac{r}{r_f} \gamma_f = \frac{r \tau_f}{r_f G} \quad (20)$$

$$\tau_f = \frac{\sigma_f^{cr}}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

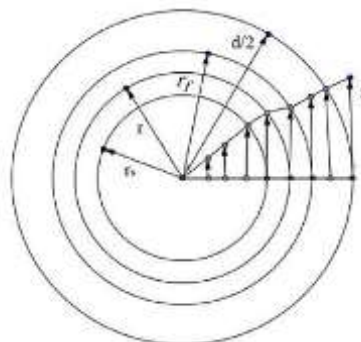
$$\gamma = \frac{r \sigma_f^{cr}}{r_f \sqrt{3} G} \quad (22)$$

$$\tau = G(\gamma - \gamma_L \xi_s) = \frac{r}{r_f} \left(\frac{\sigma_f^{cr}}{\sqrt{3}} - G \gamma_L \xi_s \right) \quad (23)$$

$$= \frac{r}{\sqrt{3} r_f} (\sigma_f^{cr} - \sqrt{3} G \gamma_L \xi_s)$$

۴. اگر $r_s \geq \frac{d}{2}$ باشد، با توجه به روابط استاندارد فنر، تنش به صورت زیر محاسبه می شود:

را به سه قسمت تقسیم کرد که در شکل ۱۰ نشان داده شده است و در ادامه از این تقسیمات در محاسبات عددی استفاده می شود.



شکل (۱۰): مقطع عرضی سیم یک فنر مارپیچ حافظه دار در حین بارگذاری و باربرداری.

۱. ناحیه الاستیک اول که ماده هنوز وارد استحاله نشده است و ماده در فاز اولیه خود قرار دارد و رابطه تنش- کرنش برشی الاستیک خطی در این ناحیه برقرار است ($0 \leq r \leq r_f$).

۲. ناحیه ای که استحاله در آن رخ می دهد و روابط تنش- کرنش برشی غیرخطی در آن برقرار است. این رابطه با استفاده از معادلات ساختاری تعریف می شود و محدود آن عبارتست از: ($r_s < r < r_f$).

۳. ناحیه الاستیک دوم که استحاله پایان یافته است و روابط الاستیک خطی با مدول الاستیک مارتنزیت در این ناحیه برقرار است ($r_f < r$).

در روابط بالا r_f و r_s شعاع بحرانی شروع و پایان استحاله هستند. از آنجایی که دمای داخل بالک، ثابت و کمتر از دمای شروع استحاله آستنیت به مارتنزیت در نظر گرفته می شود براساس روابط اصلاح شده توزیع کسر حجمی مارتنزیت «برینسون» و شکل ۱۰ روابط زیر برای نواحی مختلف در مقطع عرضی سیم به کار می رود:

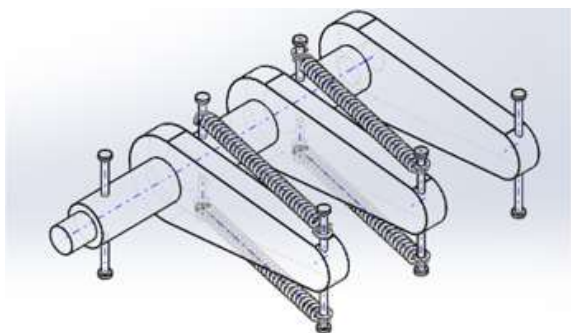
۱. اگر $r_s \leq \frac{d}{2}$ و $r \leq r_s$ باشند:

$$\frac{\gamma}{\gamma_s} = \frac{r}{r_s} \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{r}{r_s} \gamma_s = \frac{r \tau_s}{r_s G} \quad (14)$$

پژوهش ۴۰ درجه در نظر گرفته شده است [۲۰]. برای انجام چنین تغییر شکلی باید یک سازوکار عملی در داخل بالک تعبیه شود تا بتواند بالک را قادر به انجام این تغییر زاویه بکند.

سازوکار پیشنهادی شامل چند صفحه موازی مقطع بالک که لولا شده‌اند، چند محور گذرنده از این مقاطع و چند فنر آلیاژ حافظه‌دار به‌عنوان عملگر می‌باشد. این صفحات مختلف به همراه محورهای گذرنده از آن‌ها سرتاسر درون بالک را می‌پوشانند. اجزای تشکیل‌دهنده این سازوکار در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. مهم‌ترین مزیت سازوکار پیشنهادی را می‌توان جایگزین کردن عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار به جای موتور برای پیچش بالک نام برد. این موضوع سبب کاهش وزن و وسیله نقلیه هوایی و در نتیجه کاهش مصرف سوخت و بهینه‌سازی مصرف انرژی آن در حین حرکت خواهد شد. مزیت دیگر این سازوکار را می‌توان استفاده از فنر آلیاژ حافظه‌دار عنوان کرد. زیرا فنر آلیاژ حافظه‌دار به نسبت سیم این جنس قابلیت بازیابی کرنش به مراتب بیشتری را داراست. در برخی فنرها این مقدار به چند صد درصد نیز می‌رسد.



شکل (۱۲): طرح‌واره سازوکار پیشنهادی.

اولین مقطع بالک از سمت راست به بدنه چسبیده است. یک محور توپر حد فاصل بین هر دو مقطع متوالی را می‌پوشاند تا علاوه بر جلوگیری از حرکت مقاطع، این صفحات را نسبت به هم، هم راستا کند. هم‌چنین این اجازه را به صفحات موازی بالک بدهد تا بالک بتواند حول خط تقارن محور توپر پیچش داشته باشد. محور اول به اولین مقطع از سمت راست متصل شده است. بر روی هر محور، بین هر دو صفحه موازی مقطع بالک، دو زائیده (بالا و پایین) برای اتصال فنرهای حافظه‌دار تعبیه شده است. هم‌چنین

$$u = \frac{8FD^3N}{d^4G} \quad (24)$$

$$\tau_{max} = \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (25)$$

$$u = \frac{\tau_{max} D^2 N \pi}{dG} \quad (26)$$

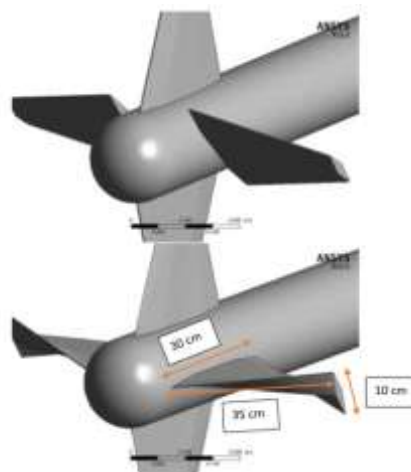
$$\tau_{max} = \frac{Gdu}{\pi d^2 N} \quad (27)$$

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = \frac{r}{\frac{d}{2}} \rightarrow \tau = \frac{r}{d} \tau_{max} \quad (28)$$

$$\tau = \frac{rGdu}{\frac{d}{2} \pi D^2 N} = \frac{2Gur}{\pi D^2 N} \quad (29)$$

۳- سازوکار پیشنهادی جهت پیچش بالک

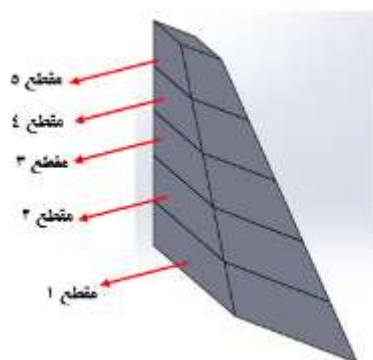
در این قسمت یک سازوکار برای حرکت پیچشی بالک حول محور گذرنده از آن پیشنهاد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود بالک مورد نظر قبل و بعد از حرکت پیچشی همراه با ابعاد آن نمایش داده شده است.



شکل (۱۱): شکل بالا: بالک هوشمند قبل از تغییر شکل، شکل پایین: بالک هوشمند بعد از تغییر شکل.

همان‌طور که در شکل ۱۱ نیز واضح است بالک بعد از تغییر شکل دچار پیچش حول محور خود شده است. این تغییر زاویه که می‌تواند در جهت ساعتگرد یا پادساعتگرد باشد با مطالعه سایر مقالات مشابه در این زمینه، در این

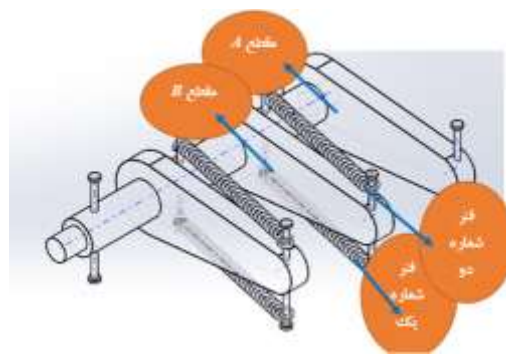
ناشی از توزیع فشار هوا روی بالک در حین حرکت معرفی کرد. و بخش دوم را تعیین نیروی لازم برای پیچش بالک به اندازه زاویه مورد نظر حول محور گذرنده از آن معرفی نمود. برای این کار کل طول بالک، مشابه شکل ۱۴ به ۵ قسمت تقسیم می‌شود. به این ترتیب برای ایجاد چرخشی در حدود ۴۰ درجه، بر اساس رابطه ۳۰ هر قسمت باید در حدود ۸ درجه چرخانده شود تا در نهایت پیچش مد نظر برای بالک ایجاد شود. بر اساس شکل ۱۱ طول کل بالک ۳۵ cm است که با این تقسیم‌بندی طول هر قسمت ۷ cm خواهد بود. اگر نیروی لازم برای بخش اول در هر قسمت F_1 و نیروی لازم برای بخش دوم در هر قسمت F_2 نامیده شود، نیروی کلی لازم برای پیچش هر قسمت F_1+F_2 خواهد بود. اما همان‌طور که در معرفی سازوکار پیشنهادی نیز بدان اشاره شد، از آنجائیکه مقاطع نسبت به هم لولا هستند، قطعاً مقادیر F_2 برای هر قسمت به نسبت F_1 بسیار کم و حتی قابل صرف نظر کردن خواهد بود. در نهایت با توجه به هندسه مسئله در هر مقطع از بالک بر اساس کد پیاده‌سازی شده رفتار فنرهای آلیاژ حافظه‌دار (معادلات نیرو-جابجایی) در نرم‌افزار متلب مقدار نیروی لازم فنر حافظه‌دار جهت پیچش ۸ درجه‌ای آن مقطع، به دست خواهد آمد. به این ترتیب می‌توان مشخصات هندسی فنر حافظه‌دار مورد استفاده در هر قسمت، نظیر طول اولیه فنر، گام فنر، تعداد حلقه فنر، قطر داخلی و خارجی هر حلقه و همچنین مشخصات محور گذرنده از هر قسمت را تعیین کرد. برای این منظور برای محاسبه نیروی F_1 در هر قسمت با داشتن توزیع فشار مقاوم بر روی بالک در حین حرکت در سرعت مشخص، می‌توان یک توزیع خطی برای فشار روی بالک در نظر گرفت و با استفاده از آن نیروی مقاوم در برابر پیچش ۸ درجه‌ای هر قسمت را تعیین کرد.



شکل (۱۴): تقسیم‌بندی طول بالک به پنج مقطع.

این زائیده‌ها بر روی انتهای هر مقطع نیز در بالا و پایین جاگذاری شده است تا سر دیگر فنرها به این نقاط اتصال یابند. هر دو فنر آلیاژ حافظه‌دار یکی از محورهای توپر را که بین دو صفحه موازی قرار گرفته است را به صفحه بعدی در امتداد محور متصل می‌کند. اصلی‌ترین جزء این سازوکار فنرهای آن می‌باشد که محور اتصال بین دو مقطع پشت سر هم را به مقطع بعدی وصل می‌نماید. فنرها در حالت کشیده شده در محل یاد شده قرار داده می‌شوند. سپس با استفاده از اثر گرمایشی ژول و عبور جریان الکتریکی از دو سر فنر حافظه‌دار، فنر کاهش طول داده که این کاهش طول موجب پیچش مقطع مورد نظر خواهد شد. حال اگر فنر پایینی فعال شود مقطع در جهت ساعتگرد خواهد چرخید. در این صورت فنر بالایی کشیده خواهد شد. و سپس با عبور جریان الکتریکی از فنر بالایی جهت چرخش معکوس خواهد شد. از آنجایی که در این سازوکار چندین مقطع در نظر گرفته شده است، با چرخش مقاطع به صورت نسبی خواهد بود و زاویه پیچش هر مقطع نسبت به مقطع قبلی محاسبه خواهد شد. به عبارت دیگر می‌توان گفت زاویه پیچش مقطع آخر که نوک بالک است برابر مجموع زوایای پیچش مقاطع قبلی نسبت به یکدیگر است که در رابطه ۳۰ نیز نمایش داده شده است. به‌طور مثال در شکل ۱۳ فرض می‌شود مقطع اول (مقطع A) به بدنه بالک گیردار شده است و مقطع دوم (مقطع B) نسبت به مقطع اول با فعال شدن فنرهای شماره ۱ و ۲ به ترتیب در جهت ساعتگرد و پادساعتگرد تغییر زاویه خواهد داد.

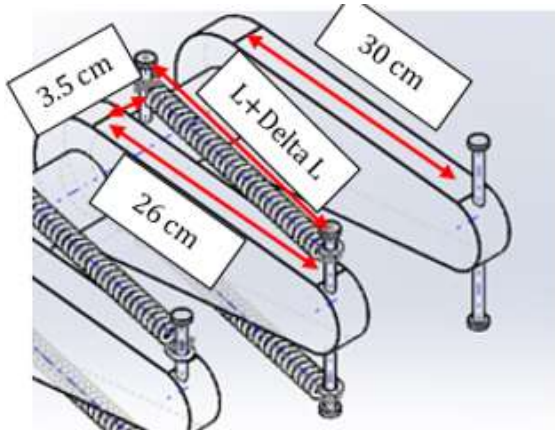
$$\phi_{Total} = \phi_{B/A} + \phi_{C/B} + \phi_{D/C} + \dots \quad (30)$$



شکل (۱۳): شماره‌گذاری اجزای سازوکار.

برای حل مسئله پیش‌رو باید دو بخش مجزا را در نظر گرفت. بخش اول را می‌توان به‌عنوان غلبه بر نیروی مقاوم

می‌توان تغییر طول لازم برای هر فنر آلیاژ حافظه‌دار را به‌دست آورد. در نهایت با استفاده از کد پیاده‌سازی شده در محیط نرم‌افزار متلب میزان نیروی لازم برای این تغییر شکل را یافت.



شکل (۱۶): مشخصات هندسی مقاطع بالک.

شکل ۱۶ مربوط به حالت اولیه فنر آلیاژ حافظه‌دار است. یعنی زمانی که هنوز که عملگر تحریک نشده است و سازوکار غیر فعال است. در این حالت فنر در حالت کشیده قرار دارد یعنی طول آن $L + \Delta L$ است. اما وقتی عملگر تحریک می‌شود قرار است که این مقطع چرخشی معادل ۸ درجه حول محور خود داشته باشد و به طول اولیه خود یعنی L برسد. با توجه به این که ضخامت بالک به صورت خطی از قسمت متصل به بدنه تا انتهای آن به صورت خطی تغییر می‌کند، بنابراین، قطر شفت مورد استفاده در هر مقطع نیز باید متفاوت باشد. در مقطع اول قطر شفت ۲/۶ cm در نظر گرفته شده است (۱/۰ عرض مقطع شماره یک). با استفاده از شکل ۱۷ می‌توان معادلات (۳۱) را جهت دستیابی به مقدار تغییر طول فنر در هر مقطع یافت.

$$\sqrt{\left(\frac{2.6}{2}\right)^2 + \left(\frac{7}{2}\right)^2} = 3.73 \text{ cm}$$

$$L + \Delta L =$$

$$\sqrt{(26)^2 + (3.73)^2} = 26.26 \text{ cm}$$

$$L =$$

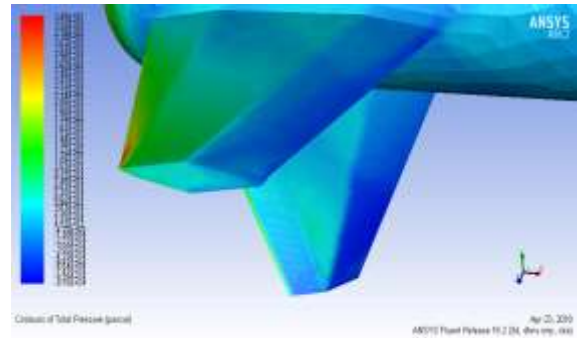
$$\sqrt{(26)^2 + (3.73)^2 - 2(26)(3.73)\cos(82)} = 25.74 \text{ cm}$$

$$\Delta L =$$

$$26.26 - 25.74 = 0.52 \text{ cm} = 5.2 \text{ mm}$$

(۳۱)

پیش از این، بر اساس شبیه‌سازی حرکت موشک در نرم‌افزار Ansys میدان توزیع فشار روی بالک در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. همچنین بر اساس این شبیه‌سازی و بر اساس خروجی‌های نرم‌افزار، مقادیر نیرو و گشتاور مقاوم در برابر حرکت آن در امتدادهای مختلف دستگاه کارترین در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند.



شکل (۱۵): توزیع فشار هوای روی بالک در نرم‌افزار

..ANSYS

جدول (۱): نیرو و گشتاور مقاوم ناشی از فشار هوای روی بالک در امتدادهای مختلف مختصات کارترین بالک.

گشتاور مقاوم روی بالک (N.m)			نیروی مقاوم روی بالک (N)		
M_x	M_y	M_z	F_x	F_y	F_z
۳۵/۲۵	-۲۹۳/۳۵	۲۴/۵۵	۶۸۷/۳۵	۱۵۰/۰۴	۸۸/۴۳

در جدول ۲ مقادیر نیرو و گشتاور مقاوم در برابر پیچش هر قسمت از بالک حول محور گذرنده از آن بر اساس توزیع فشار روی بالک در حین حرکت ارائه شده است.

جدول (۲): نیرو و گشتاور مقاوم ناشی از فشار هوای روی بالک در برابر پیچش هر قسمت حول محور گذرنده از بالک.

مقطع	گشتاور مقاوم (N.m)	نیروی مقاوم (N)
مقطع ۱	۱/۶۷	۱۰/۰۱
مقطع ۲	۳/۳۳	۲۰/۰۲
مقطع ۳	۵/۰۰	۳۰/۰۳
مقطع ۴	۶/۶۷	۴۰/۰۴
مقطع ۵	۸/۳۳	۵۰/۰۵

حال در شکل ۱۶ با توجه به هندسه سازوکار پیشنهادی و هندسه بالک، و میزان جابجایی خطی هر فنر آلیاژ حافظه‌دار بر اساس زاویه پیچش مد نظر برای هر مقطع

جدول (۴): حداقل نیروی هر فنر برای پیچش هر مقطع.

شماره مقطع	حداقل نیروی هر فنر (N)
مقطع ۱	۱۹۰
مقطع ۲	۳۸۲
مقطع ۳	۵۷۳
مقطع ۴	۷۶۴
مقطع ۵	۹۹۵



شکل (۱۷): سمت چپ: قبل از تحریک عملگر، سمت راست: بعد از تحریک عملگر.

به همین ترتیب برای سایر مقاطع نیز می‌توان با توجه به محدودیت‌های هندسی یاد شده، قطر شفت انتخابی و میزان تغییر طول فنر آلیاژ حافظه‌دار را در هر مقطع تعیین کرد. این مقادیر در جدول ۳ نمایش داده شده‌اند.

جدول (۳): قطر شفت و تغییر طول لازم فنر در هر مقطع.

مقطع	قطر شفت (mm)	تغییر طول فنر (mm)
مقطع ۱	۲۶	۵/۲۰
مقطع ۲	۲۲	۱۰/۰۲
مقطع ۳	۱۸	۱۵/۰۰
مقطع ۴	۱۴	۱۹/۷۰
مقطع ۵	۱۰	۲۴/۱۰

در ادامه با داشتن تغییر طول لازم برای هر فنر، می‌توان نیروی لازم در هر فنر را برای مقابله با نیرو و گشتاور مقاوم روی بالک جهت چرخاندن هر مقطع را بر اساس روابط هندسی به‌دست آورد:

$$\beta = \text{Arccos}\left(\frac{1.3}{\sqrt{(26)^2 + (1.3)^2 + (3.5)^2}}\right) = 87^\circ$$

$$F_{\text{Spring}}|_y = F_{\text{Spring}} \cos(\beta) = F_{\text{Spring}} \cos(87^\circ)$$

$$(I) F_{\text{Spring}} \cos(87^\circ) \geq 10N$$

$$\vec{M}_{\text{Spring}} = -|\vec{F}_{\text{Spring}}| \times \left(\frac{26}{\sqrt{(26)^2 + (1.3)^2 + (3.5)^2}} \vec{i} + \frac{1.3}{\sqrt{(26)^2 + (1.3)^2 + (3.5)^2}} \vec{j} + \frac{3.5}{\sqrt{(26)^2 + (1.3)^2 + (3.5)^2}} \vec{k} \right) \times (26\vec{i})$$

$$(II) \left| \vec{M}_{\text{Spring}} \right|_z = \left| \vec{F}_{\text{Spring}} \right| (1.29) \geq 1.7N.m$$

$$(I), (II) \rightarrow F_{\text{Spring}} \geq 190N \quad (32)$$

نیروی لازم فنر برای پیچش هر مقطع در جدول ۴ ارائه شده است:

۴- نتایج و بحث

در معادلات ساختاری فنر آلیاژ حافظه‌دار پارامترهایی نظیر طول اولیه فنر (L)، تعداد حلقه (N)، قطر مفتولی که سیم از آن ساخته می‌شود (d)، قطر هر حلقه فنر (D) و گام فنر (P) موثرند که این پارامترها در فنرهای حافظه‌دار نظیر سایر فنرها از روابط زیر پیروی می‌کنند.

$$\pi D = P$$

$$PN + d = L \quad (33)$$

برای دستیابی به نمودار نیرو-جابجایی هر فنر حافظه‌دار در هر مقطع باید علاوه بر مشخصات هندسی، میزان تغییر طول خطی هر فنر حافظه‌دار برای ایجاد پیچش ۸ درجه‌ای در هر مقطع نیز در محیط نرم‌افزار متلب به عنوان ورودی داده شود تا بر اساس روابط ساختاری پیاده‌سازی شده میزان نیروی فنر بر حسب این جابجایی خطی در قالب یک نمودار تعیین شود. در شکل ۱۸ نمودار نیرو-جابجایی برای فنر حافظه‌دار مقطع شماره یک نمایش داده شده است. جدول ۵ مشخصات هندسی فنر مورد استفاده در مقطع یک را نمایش می‌دهد. مقادیر خواص فیزیکی معرفی شده برای معادلات ساختاری فنر حافظه‌دار نیز در جدول ۶ نمایش داده شده‌اند [۲۱].

جدول (۵): مشخصات هندسی مورد استفاده برای فنر حافظه‌دار مورد استفاده در مقطع یک.

D	۸/۰۳ mm
d	۵/۰۰ mm
N	۱۰/۰۰ mm

ضریب اطمینان فنر حافظه‌دار (n_s) از جنس نایتینول (۰.۵۰/ نیکل-۵۰٪ تیتانیوم) را بر حسب حد تسلیم برشی (S_{sy}) تعیین کرد. برای تعیین ضریب اطمینان مقطع یک می‌توان طبق روابط زیر عمل کرد:

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} = 1348 MPa \quad (34)$$

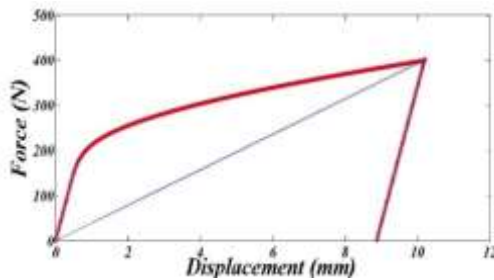
$$0.35S_{ut} \leq S_{sy} \leq 0.52S_{ut} \rightarrow 472 MPa \leq S_{sy} \leq 701 MPa$$

$$C = \frac{D}{d} = \frac{8.03}{5.00} = 1.6 \rightarrow K_B = \frac{4C+2}{4C-3} = 2.47$$

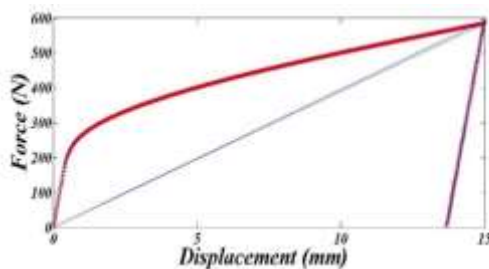
$$\tau_s = 8K_B(1+\xi)F_{max}D / \pi d^3 \rightarrow \tau_s = 100 MPa$$

$$4.72 \leq n_s = \frac{S_{sy}}{\tau_s} \leq 7.01 \rightarrow n_s|_{ave} = 5.86 > 1.2$$

در روابط (۳۴) S_{ut} و A و m و C و K_B و τ_s و ξ به ترتیب حد نهایی استحکام کششی فنر، ثابت فنر مرتبط با جنس، ثابت فنر مرتبط با جنس، نسبت قطر فنر به قطر مفتول مورد نیاز برای ساخت فنر، ضریب انحناء فنر، تنش برشی ایجاد شده در فنر و ملاکی برای ضریب اطمینان نیروی فنر می‌باشند. ثوابت فنر طبق استاندارد [۲۲] به‌دست می‌آیند و ضریب اطمینان نیروی فنر ۱/۱۵ در نظر گرفته شده است. با توجه به مقادیر فوق میزان ضریب اطمینان فنر طراحی شده مقطع یک ۵/۸۶ است که مقدار بسیار قابل قبولی به نظر می‌رسد. در ادامه نمودار نیرو-جابجایی فنر طراحی شده در سایر مقاطع نیز نمایش داده خواهد شد (شکل‌های ۱۹-۲۲). در این نمودارها حداکثر نیروی فنر ایجاد شده در مقاطع ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب برابر ۴۰۳/۶۳، ۵۹۵/۰۰، ۹۱۵/۰۵، ۱۱۲۸/۲۰ نیوتن هستند.



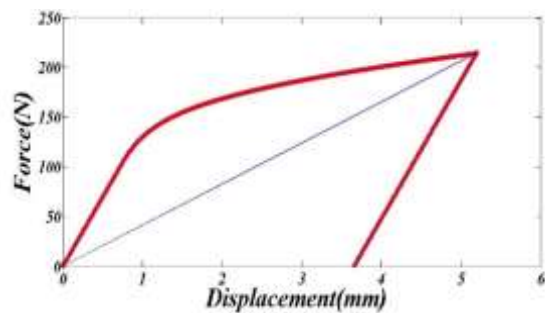
شکل (۱۹): نمودار نیرو-جابجایی فنر حافظه‌دار مقطع دو.



شکل (۲۰): نمودار نیرو-جابجایی فنر حافظه‌دار مقطع سه.

جدول (۶): خواص متالورژیکی فنرهای حافظه‌دار مورد استفاده در سازوکار پیشنهادی [۲۱].

E_M	۲۴۵۲۰ MPa
E_A	۲۸۷۲۰ MPa
C_M	۷/۲۳۰۳ MPa/k
C_A	۴/۳ MPa/k
$L\epsilon$	۰/۰۶۹
A_s	۳۲۲/۱۶ (k)
A_f	۳۳۲/۵۵ (k)
M_s	۲۸۹/۸۷ (k)
M_f	۲۷۴/۴۵ (k)
σ_s^{cr}	۵ (MPa)
σ_f^{cr}	۱۱۶/۷۳ (MPa)
ν	۰/۳۳
ξ_{s0}	۰
ξ_{T0}	۱



شکل (۱۸): نمودار نیرو-جابجایی فنر حافظه‌دار مقطع یک.

همان‌طور که در شکل ۱۸ نیز مشخص است، ابتدا با شروع بارگذاری، ماده در فاز مارتنزیت قرار دارد، مقادیر نیرو بر اثر اعمال تغییر طول ۵/۲ mm فنر (محاسبه‌شده از بخش قبل)، تا مقدار نهایی ۲۱۵/۲۰ N افزایش پیدا کرده است و در حین باربرداری نیز در حدود ۳/۷ mm تغییر طول ماندگار در فنر باقی مانده است. این میزان را می‌توان با گرم کردن فنر تا دمایی بالاتر از دمای نهایی فاز آستنیت بازگردانی کرد. گرم کردن فنر می‌تواند از طریق عبور جریان الکتریکی از آن (اثر ژول) ایجاد شود. برای این‌که میزان اطمینان ایجاد این نیرو در فنر و در نهایت پیچش مقطع بالک حول محور خود حد لازمی را داشته باشد باید ضریب اطمینان فنر طراحی شده تعیین شود. با توجه به اصول طراحی در منابع طراحی اجزای مکانیکی [۲۲] می‌توان

در ادامه در جدول ۸ مشخصات هندسی فنر حافظه‌دار مورد استفاده در هر مقطع ارایه شده است. این مشخصات شامل تعداد حلقه فنر، گام فنر، قطر حلقه فنر، قطر مفتول مورد استفاده جهت ساخت فنر، طول اولیه فنر و میزان کشیدگی هر فنر جهت قرار گرفتن در سازوکار پیشنهادی نمایش داده شده است. همانطور که در بخش قبل نیز بدان اشاره شد در هر مقطع باید دو فنر حافظه‌دار وجود داشته باشد تا بتواند در صورت لزوم چرخش ساعتگرد و پادساعتگرد را ایجاد کند. بنابراین، در هر یک از مقاطع یک تا چهار، دوفنر حافظه‌دار از جنس نایتینول و در مقطع پنج به چهار فنر حافظه‌دار از این جنس با مشخصات ارایه شده در جدول ۸ نیاز است.

جدول (۸): مشخصات هندسی طراحی شده در هر مقطع.

مقطع	N	P(mm)	D(mm)	d(mm)	L(mm)	Delta L(mm)
مقطع ۱	۱۰	۲۵/۲۱	۸/۰۳	۵/۰۰	۲۵۷/۴	۵/۲
مقطع ۲	۱۱	۱۸/۸۴	۶/۰۰	۵/۰۰	۲۱۲/۹	۱۰/۲
مقطع ۳	۸	۲۰/۴۱	۶/۵۰	۵/۴۰	۱۶۸/۶	۱۵/۰
مقطع ۴	۶	۲۰/۴۱	۶/۵۰	۵/۴۰	۱۲۴/۸	۱۹/۷
مقطع ۵	۵	۱۵/۷۳	۵/۰۰	۳/۲۰	۸۱/۹	۲۴/۱

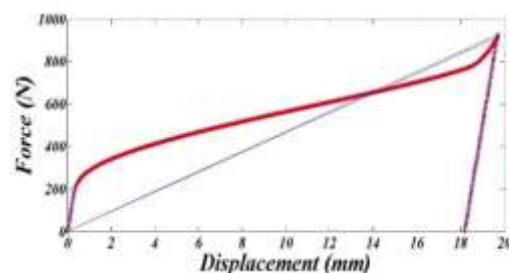
مشخصات محور یا شفت مورد استفاده در هر مقطع در جدول ۹ به نمایش درآمده است.

جدول (۹): مشخصات شفت مورد نیاز در هر مقطع.

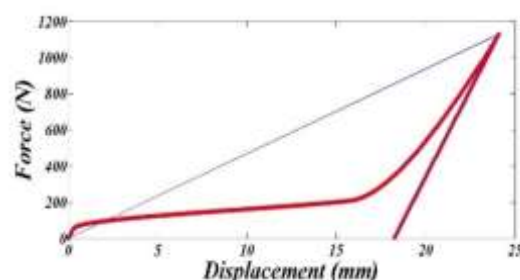
شماره مقطع	D(mm)	L(mm)
مقطع شماره ۱	۲۶	۷۰
مقطع شماره ۲	۲۲	۷۰
مقطع شماره ۳	۱۸	۷۰
مقطع شماره ۴	۱۴	۷۰
مقطع شماره ۵	۱۰	۷۰

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از بحث در رابطه با اهمیت و ضرورت به کارگیری آلیاژهای حافظه‌دار در صنایع هوایی، به مدل‌سازی فنرهای آلیاژ حافظه‌دار بر مبنای روابط ساختاری برینسون پرداخته شد. سپس برای پیش‌بینی پیچش بالک وسیله نقلیه هوایی حول محور گذرنده از خود سازوکاری با استفاده از عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار (فنر) پیشنهاد شد. در نهایت نیز با پیاده‌سازی روابط نیرو-جابجایی فنر آلیاژ حافظه‌دار در نرم‌افزار متلب به طراحی اجزای سازوکار پیشنهادی جهت



شکل (۲۱): نمودار نیرو-جابجایی فنر حافظه‌دار مقطع چهار.



شکل (۲۲): نمودار نیرو-جابجایی فنر حافظه‌دار مقطع پنج.

در جدول ۷ مقادیر ضریب اطمینان طراحی فنر هر حافظه‌دار هر مقطع ارایه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود ضریب اطمینان فنر طراحی شده تمامی مقاطع حاشیه امن بسیار مناسبی دارند. اما متأسفانه مقطه پنجم با وجود این که حداقل نیروی بیشینه لازم جهت برای تولید گشتاور پیچشی مورد نظر بالک در این مقطع را فراهم می‌آورد اما بر اساس تئوری تنش برشی بیشینه، نمی‌تواند محدوده امن تسلیم برشی ماده را ارضا نماید. برای این کار باید مشخصات هندسی فنر مربوط به این مقطع را تغییر داد. اما به علت محدودیت فضای موجود در مقطع پنجم این کار بسیار مشکل به نظر می‌رسد. به همین علت برای رفع این مشکل می‌توان سازوکاری مجزا برای مقطع پنجم در نظر گرفت. اما راه حل مناسبی که به ذهن می‌رسد استفاده از دو فنر حافظه‌دار موازی به صورت همزمان برای چرخش این مقطع است. به نحوی که هر کدام از این دو فنر نیروی لازم برای چرخش مقطع را فراهم آورند. در این صورت نگرانی بابت ضریب اطمینان نیز وجود نخواهد داشت.

جدول (۷): ضریب اطمینان فنر حافظه‌دار در هر مقطع.

مقطع شماره ۱	۵/۸۶
مقطع شماره ۲	۲/۱۰
مقطع شماره ۳	۲/۰۳
مقطع شماره ۴	۱/۳۲
مقطع شماره ۵	< ۱/۰۰

- Health Monitoring. 2007.
- 8 Wiggins, L.D., Stubbs, M.D., Johnston, C.O., Robertshaw, H.H., Reinholtz, C.F., and Inman, D.J. "A design and analysis of a morphing hyper-elliptic cambered span (HECS) wing"; Proc. Int. Conf. Structures, Structural Dynamics & Materials. 2004.
- 9 Neal, D.A., Good, M.G., Johnston, C.O., Robertshaw, H.H., Mason, W.H., and Inman, D.J. "Design and wind-tunnel analysis of a fully adaptive aircraft configuration"; Proc. Int. Conf. Structures, Structural Dynamics & Materials. 2004.
- 10 Kang, W.R., Kim, E.H., Jeong, M.S., Lee, I., and Ahn, S.M. "Morphing wing mechanism using an SMA wire actuator", Int. J. Aeronaut. Space Sci. Vol. 13, No. 1, pp. 58-63, 2012.
- 11 Paik, J.K., Hawkes, E., and Wood, R.J. "A novel low-profile shape memory alloy torsional actuator", Smart Mater. Struct. Vol. 19, No. 12, pp 125014-125023, 2010.
- 12 Shin, B.H., Jang, T., Ryu, B.J., and Kim, Y. A. "modular torsional actuator using shape memory alloy wires", J. Intell. Mater. Syst. Struct. Vol. 27, No. 12, pp 1658-1665, 2016.
- 13 Guo, Z., Pan, Y., Wee, L.B., and Yu, H. "Design and control of a novel compliant differential shape memory alloy actuator", Sens. Actuators, A. Vol. 225, pp 71-80, 2015.
- 14 Bashir, M., Rajendran, P., Sharma, C., and Smrutiranjana, D. "Investigation of Smart Material Actuators & Aerodynamic optimization of Morphing Wing", Mater. Today: Proc. Vol. 5, No 10, pp. 21069-21075, 2018.
- 15 Yuchen, C.H.E.N., Xing, S.H.E.N., Jiefeng, L.I., and Jinjin, C.H.E.N. "Nonlinear hysteresis identification and compensation based on the discrete Preisach model of an aircraft morphing wing device manipulated by an SMA actuator". Chin. J. Aeronaut. Vol. 32, No. 4, pp. 1040-1050, 2019.
- 16 Hui, Z., Zhang, Y., and Chen, G. "Aerodynamic performance investigation on a morphing unmanned aerial vehicle with bio-inspired discrete wing structures", Aerosp. Sci. Technol. Vol. 95, pp. 105419-105429, 2019.
- 17 Sayyaadi, H., Mostafavi, E. "Formation Control of Unmanned Helicopters by Leader-Follower Method", J. Aerosp.
- غلبه بر فشار هوای روی بالک و ایجاد پیچش دلخواه پرداخته شد. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:
- کاهش وزن، مصرف سوخت و بهینه‌سازی مصرف انرژی و وسایل نقلیه هوایی با استفاده از عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار.
 - لزوم اصلاح معادلات ساختاری برینسون برای رسیدن به رفتار واقعی فنرهای آلیاژ حافظه‌دار
 - استفاده از فنر به جای سیم آلیاژ حافظه‌دار به علت قابلیت بازیابی کرنش تا چند صد برابر.
 - ایجاد تغییر شکل بالک در حین پرواز با کمترین میزان انرژی به‌وسیله تحریک عملگرها از طریق اثر ژول.
 - رسیدن به ضریب اطمینان مناسب جهت طراحی سازوکارها با استفاده از فنرهای آلیاژ حافظه‌دار.
- ۶- مراجع**
- 1 Ölander, A. "An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys", Journal of the J. Am. Chem. Soc. Vol. 54, No. 10, pp. 3819-3833, 1932.
 - 2 Greninger, A.B., Mooradian, V.G. "Strain Transformation in metastable beta copper zinc and beta copper-Ti alloys", AIME Trans. Vol. 128, pp. 337-369, 1938.
 - 3 Chang, L.C., Read, T.A. "Behavior of the elastic properties of AuCd", Trans Met Soc AIME. Vol. 191, pp. 47-58, 1951.
 - 4 Kauffman, G., Mayo, I. "The story of Nitinol: the serendipitous discovery of the memory metal and its applications", Chem Educator. Vol. 2, pp. 1-21, 1997.
 - 5 Lagoudas, D.C. "Shape memory alloys: modeling and engineering applications", Springer, New York, 2010.
 - 6 Arrison, L., Birocco, K., Gaylord, C., Herndon, B., Manion, K., and Metheny, M. "AE/ME Morphing Wing Design", Virginia Tech, 2003.
 - 7 Bharti, S., Frecker, M., Lesieutre, G., and Browne, J. "Tendon actuated cellular mechanisms for morphing aircraft wing"; Proc. Int. Conf. Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and

- 21 Heidari, B., Kadkhodaei, M., Barati, M., and Karimzadeh, F. "Fabrication and modeling of shape memory alloy springs", *Smart Mater. Struct.* Vol. 25, No. 12, pp. 125003-125012, 2016.
- 22 Shigley, J.E. "Shigley's mechanical engineering design", Tata McGraw-Hill Education, 2011.
- Mech. Vol. 13, No. 4, pp. 59-96. (In Persian)
- 18 Brinson, L.C., Huang, M.S. "Simplifications and comparisons of shape memory alloy constitutive models", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* Vol. 7, No 1, pp.108-114, 1996.
- 19 Heidari, B., Kadkhodaei, M. "Numerical study of pseudoelastic shape memory alloy helical springs"; *Proc. Int. Conf. Mech Eng. Ahwaz, Iran, 2014.*
- [20] Basaeri, H., Yousefi-Koma, A., Zakerzadeh, M.R., and Mohtasebi, S.S. "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.