

علمی- پژوهشی

## بررسی تجربی و عددی عدم تقارن در صفحات دوپایداری هیبریدی

### برای استفاده در سازه‌های تطبیق‌پذیر

هادی قشوجی برق<sup>۱</sup>مرکز فنی و مهندسی بوئین‌زهره-دانشگاه بین‌المللی  
امام خمینی (ره)، قزوین، ایرانمحمد همایون صدر<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی هوافضا - دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

مهدی فضلی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۹)

#### چکیده

یکی از انواع سازه‌های تطبیق‌پذیر، صفحات مرکب دو یا چند پایداری هستند که با اعمال بارگذاری قادر به تغییرشکل و حفظ، حالت پایداری خود هستند. در این مقاله به بررسی رفتار صفحات مرکب دوپایداری هیبریدی شامل یک‌لایه آلومینیوم در یک طرف آن به‌عنوان روشی جدید برای ایجاد عدم تقارن در دوپایداری و در نتیجه کنترل‌پذیری صفحات دوپایداری پرداخته شده و نتایج مورد ارزیابی تجربی و عددی قرار گرفته است. در همین راستا، تغییرشکل صفحه در دو حالت پایداری و برای دو صفحه با لایه آلومینیوم (هیبریدی) و بدون لایه آلومینیوم، مقایسه شده است. در ادامه، میزان تغییرات انرژی کرنشی با تغییر دمای محیط و مدت‌زمان سرد شدن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، اضافه کردن لایه آلومینیوم می‌تواند ضمن ایجاد بستری برای اتصال عملگرهای پیزوالکتریک، آلیاژهای حافظه‌دار و اعمال تغییرشکل از طریق تغییرات دمایی، در صورت اتصال به صفحات دیگر، منجر به پیوستگی در مرزهای ناپیوسته شده و گزینه‌ای مناسب برای ایجاد تغییرشکل‌های پیوسته در سازه‌های هوافضایی نظیر انعکاس‌دهنده‌های رادیویی و سطوح کنترل پرواز باشند.

**واژه‌های کلیدی:** چندلایه مرکب دوپایداری، سازه‌های تطبیق‌پذیر، صفحه مرکب هیبریدی

## The Experimental and Numerical Investigation of Non-Symmetric Bi-Stability in Hybrid Composite Plates for Application in Adaptive Structures

M. Fazli<sup>1</sup>M. H. Sadr<sup>2</sup>H. Ghashochi-Bargh<sup>3</sup>Amirkabir University of Technology, Aerospace  
Engineering Faculty, Tehran, IranBuein Zahra Higher Education Center of  
Engineering and Technology-Imam Khomeini  
International University, Ghazvin, Iran

(Received: 03/08/2020; Accepted: 27/02/2021)

#### ABSTRACT

Bi-stable or multi-stable composite laminate is one of the adaptive structures that keep their stable states and modify their shapes by load application. This paper investigates the out of plane displacement of bi-stable hybrid composite laminate with an AL layer on one side. Adding the AL layer is a novel approach, introduced to create an asymmetric bi-stability that leads to a better control of the structure and the results are evaluated experimentally and numerically. In this regard, the deformation of plates in two stable states, with and without the AL layer (hybrid) coating have been compared. Also, the strain energy changes with room temperature and cooling time have been investigated. Adding an aluminum layer can create a platform for connecting piezoelectric actuators, memory alloys, and thermal actuators. If these laminates are connected to other symmetric or asymmetric laminates, it is possible to create continuity over the discontinuous borders and decrease the stress concentration. These laminates are suitable devices for continuous modification of the shape of aerospace structures like reflector antennas and flight control surfaces.

**Keywords:** Bi-Stable Composite Laminates, Adaptive Structures, Hybrid Composite Laminate

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری: chamran59@aut.ac.ir<sup>۲</sup> دانشیار (نویسنده پاسخگو): sadr@aut.ac.ir<sup>۳</sup> استادیار: ghashochi@bzeng.ikiu.ac.ir

## ۱- مقدمه

تغییر شکل پذیر به تکامل نرسیده است و نیاز به بررسی بیشتری دارد.

در تحقیقات اولیه برای این منظور، از صفحات فلزی با قابلیت تغییر شکل به همراه عملگرهای متفاوت استفاده شد [۵]. سپس از صفحات مرکب دوپایداری با عملگرهای پیزوالکتریک و آلیاژهای حافظه‌دار به‌عنوان راهکاری برای دستیابی به سازه‌ای تغییر شکل پذیر استفاده گردید [۶]. تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان‌دهنده عملکرد مطلوب صفحات مرکب دو پایداری بود. محققان جهت ایجاد دوپایداری در صفحات مرکب از عدم تقارن در لایه چینی استفاده کرده و با استفاده از اختلاف دمایی کوره و محیط که منجر به بارگذاری دمایی بر صفحه مرکب می‌شود، به تغییر شکل و انحنای حول محورهای گذرنده از راستای الیاف دست یافتند. بررسی‌ها نشان می‌داد، بیشترین میزان جابه‌جایی و انحنای خارج از صفحه در این نوع صفحات با لایه چینی [۰/۹۰] ایجاد می‌شود [۷].

تحقیقات اولیه در مورد صفحات دوپایداری مربوط به بررسی وجود یا عدم وجود تعادل دوپایداری و تشخیص آن با استفاده از روابط تحلیلی و تجربی و بررسی اثر دمایی محیط و نحوه لایه چینی بر شکل نهایی انجام شد [۸]. سپس، بر مبنای روش انرژی، مقدار کمینه انرژی پتانسیل به‌عنوان حالت پایداری شناخته شده و چون در این صفحات دو مقدار کمینه انرژی وجود دارد، به‌عنوان دوپایداری شناخته شدند. در ادامه تحقیقات صورت گرفته، انرژی لازم برای تحریک و فرایند پرش بین حالات پایداری مورد بررسی قرار گرفت [۹].

ویژگی مهم صفحات دو یا چند پایداری، امکان تحریک از طریق بارگذاری استاتیکی یا دینامیک و در نهایت تغییر شکل به حالت دوم پایداری و نیز عدم نیاز به اعمال نیروی مداوم برای حفظ حالات پایداری است [۱۰ و ۱۱]. نکته قابل توجه در این سازه‌ها، حفظ هم‌زمان سختی سازه و تغییر شکل پذیری در حالت‌های پایداری مختلف است. این سازه‌ها بسته به نوع طراحی می‌توانند با اعمال نیروی خارجی یا عملگرهای پیزوالکتریک و آلیاژهای حافظه‌دار، به دو یا چند شکل جدید تغییر کرده و بستری برای تغییر شکل پایدار سازه یا پوسته باشند.

امروزه سازه‌های تغییر شکل پذیر با قابلیت سازگاری با محیط و شرایط عملیاتی، به دلیل سادگی و عملکرد بهتر جایگزین سازه‌های متداول نظیر لولاهای چرخشی در کاربردهای هوافضایی شده‌اند. از جمله مزایای این سازه‌ها، می‌توان به کاهش تعداد قطعات و در نتیجه کاهش پیچیدگی در ساخت و تعمیر و نگهداری، ضمن حفظ سادگی اشاره کرد. به سازه یا پوسته‌ای که قابلیت تغییر شکل با اعمال شرایط کنترل فعال/ غیرفعال، داشته باشد، تغییر شکل پذیر گفته می‌شود [۱ و ۲]. دستیابی به سازه‌های تطبیق پذیر با به‌کارگیری سازه‌های تغییر شکل پذیر، از زمینه‌های مطالعاتی مهم و به‌روز در حوزه مهندسی به‌خصوص سازه‌های هوافضایی می‌باشد. از جمله کاربردهای این سازه‌ها را می‌توان ایجاد تغییر شکل برای افزایش عملکرد آیرودینامیکی و کاهش اثرات محیطی بیان کرد تا در موقعیت‌های مختلف عملیاتی رفتار مورد انتظار را نشان دهند. هواپیماهای آینده نیاز به بال‌هایی دارند که قادر به تغییر شکل خود به شکل‌های مختلف بوده و بتوانند خود را با شرایط خاص هر پرواز تطبیق داده و مصرف سوخت ناشی از دینامیک پروازی غیربهرینه را کاهش دهند. همچنین در آنتن یا انعکاس‌دهنده‌های رادیویی که در ماهواره‌های فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند نیز با اعمال تغییر شکل به انعکاس‌دهنده اولیه می‌توان فرکانس و قطبیت و در نتیجه منطقه پوشش را تغییر داد [۳].

استفاده از سازه‌هایی که بتوانند در عین ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ پایدار، سطحی صاف و پیوسته ایجاد نمایند، اهمیت بسیاری دارد. سازه‌های تطبیق پذیر باتکیه بر کرنش‌های درونی، ضمن آنکه قادر به تغییر شکل هستند، لازم است تا عملکرد مطلوبی در بارهای زیاد، از جمله تحمل و انعطاف‌پذیری در فشارهای آیرودینامیکی و تغییرات دمایی را داشته و امکان تغییر بین اشکال مورد نظر، از طریق مکانیسم عملگرها را داشته باشند. به همین دلیل تعارض بین تطبیق پذیری و سختی در سازه‌های تغییر شکل پذیر یکی از چالش‌های مهم است [۴]. مطالعات ۱۰ سال اخیر نشان می‌دهد که تاکنون در زمینه سازه و مواد همه موضوعات بررسی نشده و تحقیقات در خصوص پوسته‌های

تغییر شکل پیوسته در ملخ بالگرد استفاده و به بررسی عددی و تجربی آن پرداخته شد [۲۲].

باتوجه به کاربرد این صفحات و اثر شرایط محیطی نظیر رطوبت و دمای محیط، محققان به بررسی این اثرات پرداخته و سپس اثر انحنای اولیه در شکل نهائی و نیروی لازم برای تحریک مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۳]. مطالعه دیگری در خصوص حالت‌های تعادل پایداری و نحوه اعمال نیرو برای تحریک و تغییر شکل هندسه‌های دیگر نظیر مستطیل و مثلث و دوزنقه انجام گرفت [۲۴]. سپس به بررسی استفاده از نیروی دینامیکی برای اعمال تحریک پرداخته و اثر بارگذاری دینامیکی به صورت ارتعاشات اجباری یا ناشی از آیروالاستیسیته<sup>۲</sup> مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۵].

در بخش دیگری از تحقیقات، از روش تحلیلی برای بررسی حالت دوپایداری صفحات نامتقارن استفاده شد. به این ترتیب، مقادیر کمینه تابع انرژی پتانسیل به دست آمده و با اعمال نیرو به وسط صفحه، سازه از حالت پایداری اول خارج و به سمت حالت پایداری دوم حرکت می‌کند [۲۶].

مطالعه دیگری توسط محققین در خصوص اتصال این صفحات به صفحات دیگر از یک یا چند طرف و شبیه‌سازی آن با روش‌های تحلیلی و عددی انجام شد که در مقایسه با نتایج تجربی تطابق قابل قبولی داشت و زمینه را برای ادامه تحقیقات کاربردی در خصوص نحوه تغییر شکل و بارگذاری دینامیکی فراهم نمود [۲۷ و ۲۸]. سپس، اتصالات چندگانه با هدف بررسی امکان جای‌دهی این صفحات، مورد بررسی قرار گرفت، به نحوی که چندلایه نامتقارن دوپایداری از طریق یک ناحیه گذار به بخش متقارن متصل شده و ضمن حفظ دوپایداری، هر حالت پایداری سختی متفاوتی داشت [۲۹ و ۳۰].

باتوجه به اینکه بیشتر مطالعات انجام شده در مورد صفحات دوپایداری مرکب با استفاده از هندسه‌های متقارن بود، همچنین به دلیل تقارن هندسی و نوع لایه چینی، نیروی لازم برای تحریک و پرش از یک حالت به حالت دیگر، بسیار نزدیک به هم می‌باشد. با در نظر گرفتن تساوی در میزان نیروی تحریک برای حرکت بین حالات پایداری، از

هر سازه تطبیق‌پذیر متشکل از سازه، پوسته، حسگرها و عملگرها است. یکی از چالش‌های کلیدی در زمینه توسعه سازه‌های تطبیق‌پذیر، بکارگیری پوسته‌های انعطاف‌پذیر است که به صورت یک‌لایه پیوسته بر روی سازه سخت کشیده شده و سطح صاف بیرونی را حفظ می‌کنند [۱۲].

یکی از کاربردهای صفحات و سازه‌های تطبیق‌پذیر استفاده در آنتن‌های رادیویی یا انعکاس‌دهنده‌های فضائی است [۱۳]. در همین راستا تحقیقاتی در خصوص آرایه‌ها و لنزهای تغییر شکل‌پذیر و اثر آن بر فرکانس و قطبیت انجام شده است [۱۴]. این تغییر شکل منجر به افزایش توانائی و کاهش هزینه از طریق چند باند شدن آنتن و تنظیم قطبیت و افزایش سرعت در تغییر فرکانس می‌شود. همچنین تحقیقات بسیاری در خصوص آنتن‌های فضائی با قابلیت بازو بسته شدن صورت گرفته است که صفحات انعکاس‌دهنده بخش مهمی از این تحقیقات است [۱۵ و ۱۶]. در ادامه، تحقیقاتی در حوزه ابزارهای ایجاد تغییر شکل در آنتن‌ها و انعکاس‌دهنده‌های رادیویی انجام و از صفحات دو پایداری مرکب با الیاف شیشه به عنوان پوسته‌ای که دارای قابلیت تغییر شکل است، استفاده و از طریق تغییر شکل انعکاس‌دهنده، فرکانس و قطبیت و شکل انتشار تغییر داده شد [۱۷]. سپس از آلیاژهای حافظه‌دار برای اعمال تحریک به صفحه استفاده شد و میزان جابه‌جایی خارج صفحه، ضرایب انعکاس و الگوی انتشار در دو حالت پایداری اندازه‌گیری و مقایسه شد. در تحقیق دیگری از صفحات دو پایداری برای ایجاد آنتن‌های تغییر شکل‌پذیر با قابلیت قرار گرفتن بر روی مچ دست استفاده شد که به دلیل تغییر شکل‌پذیر بودن می‌تواند کاربردی چندمنظوره در زمینه تلفن‌های همراه داشته باشد [۱۸].

بخش دیگری از تحقیقات انجام شده مربوط به بررسی استفاده از صفحات دوپایداری برای ایجاد تغییر شکل در سازه‌های هوائی است [۱۹]. در همین راستا، محققان به بررسی استفاده از صفحات به عنوان دریچه کنترلی ورودی هوای موتور پرداختند [۲۰]. در تحقیق دیگری اتصال صفحات دوپایداری به یکدیگر برای ایجاد برآزای<sup>۱</sup> پیوسته در لبه فرار بال به صورت عددی و تجربی مطالعه شد [۲۱]. در پژوهشی دیگر از صفحات دو پایداری برای ایجاد

<sup>۲</sup> Aeroelasticity

<sup>۱</sup> Flap

گذشته در خصوص ایجاد عدم تقارن در صفحات دوپایداری با هندسه متقارن انجام شده است. [۳۶].

پیش‌از‌این، از یک نوار بایاس در یک طرف چندلایه دوپایداری مربع شکل استفاده شد [۳۳]، تا با ایجاد تفاوت بین انرژی کرنشی حالات پایداری، میزان انرژی لازم برای تحریک نیز تفاوت پیدا کرده و از تغییر شکل خودکار به‌ویژه در محیط‌های دینامیک و تحریک دمایی، جلوگیری به عمل آید. در این مطالعه از یک رویکرد جدید برای ایجاد عدم تساوی انرژی کرنشی حالات پایداری و در نتیجه عدم تقارن در دوپایداری استفاده شده است که بر مبنای اضافه کردن یک‌لایه آلومینیوم به یک طرف دولایه است. استفاده از لایه آلومینیوم در یک طرف دولایه می‌تواند به‌عنوان بستری برای اعمال تحریک دمایی و اتصال عملگرهای پیزوالکتریک و آلیاژهای حافظه‌دار به چندلایه مورد استفاده قرار گیرد، ضمن آنکه با ایجاد عدم تقارن در دوپایداری و تفاوت در مقادیر انرژی کرنشی هر یک از حالات پایداری، امکان کنترل بهتر این صفحات ویژه از طریق عملگرهای یاد شده فراهم خواهد شد. نوآوری این تحقیق، معرفی یک روش جدید برای ایجاد عدم تقارن در دوپایداری و در نتیجه کنترل بهتر این صفحات است. پیش‌از‌این، برای ایجاد عدم تقارن دو روش معرفی شده است [۳۳]: روش اول؛ ایجاد عدم تقارن در هندسه متقارن (مربع)؛ برای ایجاد عدم تقارن در دوپایداری از یک نوار بایاس در یک طرف چندلایه استفاده شده است که منجر به عدم یکنواختی و پیوستگی سطح در یک طرف چندلایه خواهد شد. ضمن آنکه از این روش نمی‌توان برای شبکه‌ای از صفحات دوپایداری و غیر دوپایداری استفاده نمود. روش دوم؛ ایجاد عدم تقارن در دوپایداری با استفاده از هندسه نامتقارن (دو‌زنقه).

در این مطالعه به بررسی یک روش جدید برای ایجاد عدم تقارن در دوپایداری بر مبنای اضافه کردن لایه آلومینیوم به یک هندسه متقارن (مربع) ضمن ایجاد عدم تقارن در دوپایداری، می‌توان زمینه‌ای برای اتصال عملگرهای پیزوالکتریک و دمایی و آلیاژهای حافظه‌دار ایجاد نمود که در صورت اتصال این صفحات به صفحات دوپایداری مشابه یا متقارن، به‌عنوان یک‌لایه پوشش بر روی عدم پیوستگی در مرزها بوده و منجر به کاهش تمرکز تنش خواهد شد.

این ویژگی در زمینه‌های جذب انرژی از محیط استفاده شده است [۳۱]. از طرفی در مقابل مزیت استحصال انرژی از محیط، این تقارن و تساوی نیروی تحریک منجر به تغییر شکل‌های پی‌درپی و در نتیجه عدم کنترل سازه به‌صورت فعال/ غیرفعال شد. سپس مطالعاتی بر روی صفحات نامتقارن چند پایداری که از اتصال صفحات دوپایداری به صفحات متقارن یا نامتقارن از چهار طرف و به‌صورت شبکه موزائیکی، ایجاد می‌شود، انجام شد و امکان دستیابی به صفحه چند پایداری را بررسی و در نهایت بهترین حالت را که ضمن دو یا چند پایداری قادر به تغییر شکل‌های بزرگ باشند، انتخاب کردند [۳۲ و ۳۳]. مبنای این تحقیقات دو رویکرد متفاوت برای ساخت صفحات دوپایداری نامتقارن بود که بین حالات پایداری آن عدم تقارن وجود داشته باشد. در رویکرد نخست، برای ایجاد عدم تقارن در دوپایداری، به هندسه صفحات پرداخته و میزان انرژی کرنشی لازم برای تغییر حالت پایداری صفحات با هندسه‌های نامتقارن مربعی، مثلثی، و دوزنقه‌ای مقایسه گردید و مشاهده شد که میزان انرژی کرنشی لازم در صفحه دوزنقه‌ای شکل به مراتب بیشتر از هندسه‌های مربع است. در رویکرد دوم؛ برای ایجاد عدم تقارن از نوار (بایاس) در یک طرف صفحه دوپایداری و در مرکز آن برای ایجاد عدم تقارن بین دو حالت پایداری استفاده شد؛ بدین صورت که دولایه نوار با لایه چینی متقارن و پهنای ۱۰ درصد از ابعاد صفحه مربع؛ جهت تغییر میزان انرژی کرنشی سازه در فرایند تحریک از یک حالت به حالت دیگر؛ به یک طرف چندلایه اضافه شد. پس از آن تحقیقات در خصوص شرایط مرزی کاملاً گیردار که از یک طرف صفحه اعمال شده باشد؛ و بررسی وجود یا عدم وجود تعادل پایدار، همچنین نمایش اشکال تعادل پایداری؛ ادامه یافت که هدف از آن بهره‌برداری به‌عنوان سطوح کنترلی به‌خصوص ملخ بالگرد بود [۳۴ و ۳۵].

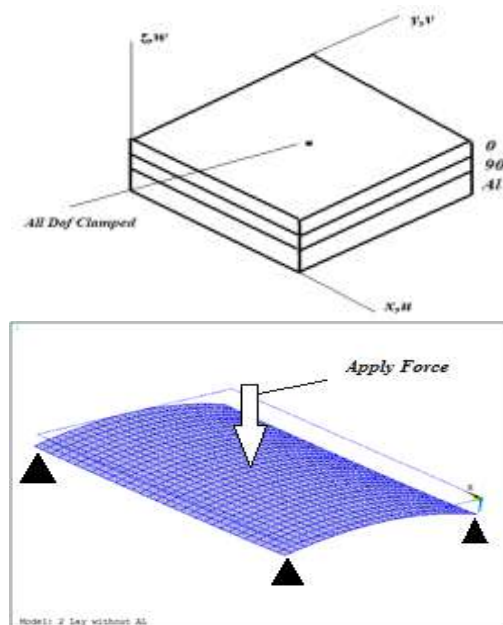
نویسندگان این مقاله به بررسی ایجاد عدم تقارن در صفحات دوپایداری از طریق اضافه کردن لایه آلومینیوم به دولایه پرداخته و اثر وجود لایه آلومینیوم در تغییرات انرژی کرنشی را نشان داده‌اند. همچنین اثر نسبت ابعادی و ضخامت لایه آلومینیوم بر تغییرات انرژی کرنشی مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش، در ادامه تحقیقات

<sup>1</sup> Bias strip

توان تغییرشکل‌های کوچک ناشی از تنش‌های برشی را مشاهده نمود. روابط مربوط به این المان بر مبنای اندازه‌گیری تنش صحیح و کرنش‌های لگاریتمی است. با توجه به مشخصات المان که امکان کرنش غشائی محدود (کشش) را دارد، باین حال تغییرات انحنای به‌زای تغییرات زمانی، به‌صورت کوچک در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است علت انتخاب المان پوسته برای مدل‌سازی این صفحات، نسبت بالای طول به ضخامت در این صفحه است که در مطالعات پیش از این نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

شکل ۲ صفحه هیبریدی دارای دو لایه کربن با زوایای ۰ و ۹۰ و یک لایه آلومینیوم در زیر آن را نشان می‌دهد در این مطالعه فرض بر اتصال کامل<sup>۱</sup> شده که به دلیل عدم مشاهده جدایش بین لایه‌ها در نمونه‌های تجربی بوده است؛ بنابراین از المان تماسی استفاده نشده است. همچنین لایه آلومینیوم شبیه کربن مدل‌سازی شده ولی خواص ایزوتروپ برای آن در نظر گرفته شده است.

بارگذاری صفحه مورد نظر به‌صورت دمایی و ناشی از سرد شدن صفحه از دمای ۸۰°C تا ۲۵°C است. شرایط مرزی در وسط صفحه به‌صورت کاملاً گیردار و لبه‌ها به‌صورت آزاد در نظر گرفته شده است تا ضمن شبیه‌سازی شرایط مرزی با نمونه تجربی، از حرکت صلب صفحه جلوگیری شود.



شکل (۲): نحوه لایه چینی، بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها

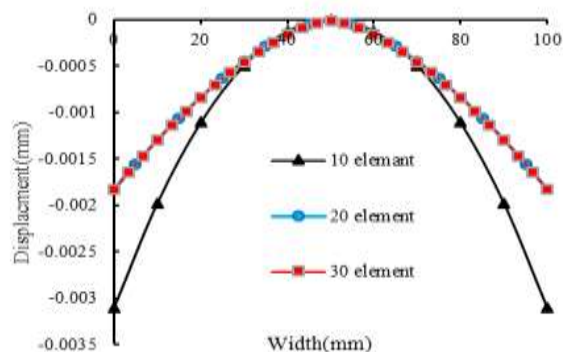
در ادامه پژوهش، اثر وجود لایه آلومینیوم و ضخامت آن بر میزان جابه‌جایی و انرژی کرنشی هر یک از حالات پایداری مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین اثر تغییرات دمایی و زمان بر انرژی کرنشی نشان داده شده است. تحریک صفحات دوپایداری از طریق اعمال دما و استفاده هم‌زمان از عملگرهای هوشمند، به‌عنوان یک روش جدید تغییرشکل و عامل مؤثری برای کاهش انرژی تحریک و بهینه‌سازی تغییرشکل در سازه‌های هوافضایی مورد توجه قرار گرفته است.

### ۱-۱- تعریف عدم تقارن در دوپایداری

در صفحات دوپایداری مرکب؛ چنانچه هر دو حالت پایداری دارای انرژی کرنشی برابر باشند، دو پایداری متقارن است؛ و در مقابل، اگر حالات پایداری دارای مقدار انرژی کرنشی برابر یا نزدیک به هم نباشند، دوپایداری نامتقارن خواهد بود. لازم به ذکر است، تساوی انرژی کرنشی در دو حالت به معنی میزان سختی برابر در دو حالت پایداری نیست [۳۷].

### ۲- شبیه‌سازی عددی به روش المان محدود

برای مدل‌سازی صفحه مربع شکل از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است. برای این منظور دو صفحه مربع شکل به ابعاد ۱۵۰ × ۱۵۰ mm و ۲۰۰ × ۲۰۰ mm در نظر گرفته شده است که پس از مطالعه شبکه‌بندی برای ۱۰، ۲۰، ۳۰ المان در هر ضلع، تعداد ۲۰ المان انتخاب و از ۴۰۰ المان SHELL 181 استفاده شده است (شکل ۱).

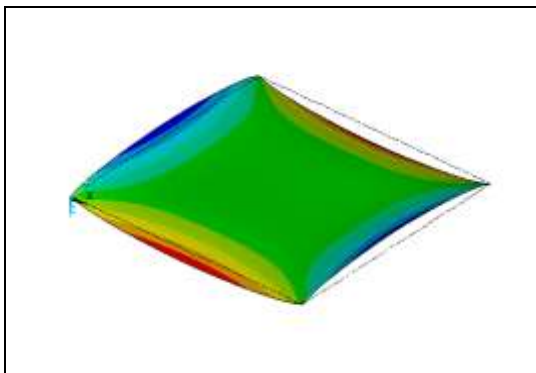


شکل (۱): مطالعه تعداد المان

این المان دارای ۴ گره و هر گره ۶ درجه آزادی داشته که برای مدل‌سازی صفحات لایه‌ای نظیر مواد مرکب مناسب است. مدل‌سازی بر مبنای تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول است که بر مبنای آن توزیع تنش‌های برشی در راستای ضخامت المان، در نظر گرفته شده در نتیجه آن می

<sup>۱</sup> Perfect Bonding

حالت اول برمی‌گردد یا در حالت تعادل ناپایدار باقی می‌ماند که در این صورت مسئله به صورت حل یک پایداری یا حل ناپایدار خواهد بود. شکل ۴ حالت ناپایداری حل را نشان می‌دهد که انحنا در دو راستا وجود دارد. باتوجه به تقارن هندسی شکل مربع در صورت استفاده از روش حل خطی و عدم در نظر گرفتن جابه‌جایی‌های بزرگ، حل عددی به هیچ‌یک از حالات پایداری همگرا نخواهد شد. در حقیقت به دلیل تساوی انرژی پتانسیل دو حالت پایداری امکان پیدا کردن کمینه مقدار آن وجود ندارد. برای رفع این مشکل با ایجاد اغتشاش در هندسه یا مواد تشکیل‌دهنده، حل به یکی از حالات پایداری همگرا خواهد شد. (توضیح بیشتر در بخش ۲-۲ آمده است) در نمونه تجربی حالت میانی بین دو حالت پایداری، حالت ناپایدار است که به دلیل تغییر شکل سریع، امکان دیده شدن آن وجود ندارد.



شکل (۴): صفحه در حالت حل ناپایدار

## ۲-۱- روابط تحلیلی

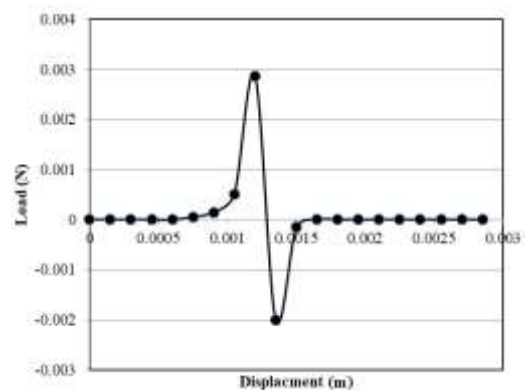
در این بخش روابط مورد استفاده برای تحلیل تغییر شکل این صفحات و چگونگی پیدا کردن دو پایداری در این تحلیل نشان داده شده است. باتوجه به ضخامت ناچیز صفحات در مقایسه با ابعاد صفحه از تئوری مرتبه اول برشی صفحات بهره گرفته شده است. روابط کرنش/ جابه‌جایی بر اساس تئوری فوق به صورت زیر می‌باشند [۳۸]:

$$\begin{aligned}\bar{u}(x, y, z) &= u(x, y) - z\phi_x(x, y) \\ \bar{v}(x, y, z) &= v(x, y) - z\phi_y(x, y) \\ \bar{w}(x, y, z) &= w(x, y)\end{aligned}\quad (1)$$

که در آن،  $x, y, z$  راستای میدان و  $u, v, w$  میزان جابه‌جایی در صفحه میانی و  $\phi_x, \phi_y$  چرخش بردار عمود بر صفحه میانی حول محورهای  $x, y$  است. بر همین مبنا معادلات متشکله به صورت رابطه (۳) می‌باشد [۳۸].

پس از حل مسئله، برای شبیه‌سازی فرایند پرش، بارگذاری به صورت اعمال نیرو بر مرکز صفحه و در نظر گرفتن چهارگوشه صفحه به عنوان تکیه‌گاه ساده، انجام شده است. شکل ۲ نحوه اعمال نیرو و شرایط مرزی را نشان می‌دهد. اعمال نیروی خارجی و تکیه‌گاه‌ها در آزمایش تجربی شبیه به مدل عددی در نظر گرفته شده است. شکل ۲ نیز موقعیت اعمال نیرو و شرایط مرزی در شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد که مشابه بارگذاری اعمال شده در حالت تجربی است. بدین صورت که صفحه مورد بررسی روی سطح مسطح قرار گرفته و با اعمال نیرو به مرکز آن تغییر شکل به حالت دوم رخ خواهد داد. لازم به ذکر است، در این مطالعه سنجش اعمال نیرو برای تحریک فقط به صورت عددی بوده و برای تحریک از نیروی استاتیکی بدون استفاده از مجموعه خاصی استفاده شده است. در واقع هدف از این مطالعه نشان دادن عدم تقارن در دو پایداری است که در بخش تجربی از طریق عدم تساوی جابه‌جایی در دو حالت پایداری نشان داده شده است و باتوجه به دقت نتایج تجربی و عددی در جابه‌جایی خارج صفحه، امکان تعمیم نتایج تجربی و عددی در بخش اعمال نیرو نیز وجود دارد.

شکل ۳ نمودار تغییرات نیرو جابه‌جایی را برای فرایند پرش نشان می‌دهد. پس از تغییر حالت پایداری و قرار گرفتن در حالت دوم پایداری، در مدت زمان یک ثانیه باربرداری صورت گرفته است تا از وقوع حالت دوم پایداری اطمینان حاصل شود.



شکل (۳): نمودار تغییرات نیرو - جابه‌جایی در فرایند پرش در صورتی که حل عددی صحیح نبوده و همگرایی حاصل نشود، در نتیجه صفحه در حالت دوم پایداری نمانده و به

برای پیدا کردن حالت‌های پایداری صفحه هیبرید، لازم است تا رابطه ۶ را کمینه کرد. وجود دو مقدار کمینه نشان‌دهنده وجود دو حالت پایداری و به معنی نقطه دوشاخگی در فرایند سرد شدن است. به این معنی که در یک دمای خاص امکان ایجاد هر دو حالت پایداری برابر خواهد شد.

## ۲-۲- شبیه‌سازی فرایند سرد شدن (پس از پخت)

باتوجه به اینکه فرایند سرد شدن در نمونه‌های تجربی در زمان نسبتاً طولانی رخ می‌دهد، برای حل عددی از الگوریتم استاتیک استفاده شده است. نیروهای اعمال شده به صفحه ناشی از تغییرات دمای ناشی از سرد شدن بوده و نیروی خارجی به صورت مکانیکی به صفحه وارد نشده است بنابراین اثر سرعت و میرایی در این تحلیل در نظر گرفته نمی‌شود. باتوجه به وجود نقطه دوشاخگی در فرایند سرد شدن در یک دمای خاص، امکان همگرایی حل به یکی از حالات پایداری و پیدا کردن آن مشکل است. به همین منظور در تحقیقات گذشته برای جلوگیری از عدم همگرایی و حل عددی ناپایدار، از دو راهکار استفاده شده است؛ در روش اول با ایجاد تغییرات هندسی کوچک در یک ضلع مربع و در نهایت ایجاد اغتشاش هندسی، حل عددی به سمت تعادل پایداری حول ضلع بزرگ‌تر متمایل می‌شود. در روش دوم؛ با اعمال بارگذاری دمایی به صورت دومرحله‌ای، ابتدا حل به یک حالت تعادل پایداری همگرا شده و در مرحله دوم باقیمانده بار دمایی اعمال شده و در نهایت حل به یک حالت تعادل همگرا می‌شود. در این مقاله به دلیل وجود لایه آلومینیوم در یک طرف چندلایه هیبریدی و عدم تقارن در لایه چینی، مقادیر انرژی کرنشی هر یک از حالات پایداری با دیگری تفاوت داشته و حل به یک سمت همگرا خواهد شد که در این صورت نیازی به اعمال روش‌های دیگر برای همگرایی حل نخواهد بود. در خصوص صفحه بدون لایه آلومینیوم نیز از روش دوم برای همگرایی حل استفاده شده است.

## ۳- آزمایش‌های تجربی

در این بخش نحوه انجام آزمایش‌ها تجربی برای صفحه مرکب بدون لایه آلومینیوم و با آلومینیوم بررسی شده است. مشخصات مواد استفاده شده به شرح جداول ۱ و ۲ می‌باشند:

$$\begin{Bmatrix} N_x + N_x^T \\ N_y + N_y^T \\ N_{xy} + N_{xy}^T \\ M_x + M_x^T \\ M_y + M_y^T \\ M_{xy} + M_{xy}^T \\ Q_x + 0 \\ Q_y + 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] & 0 \\ [B] & [D] & 0 \\ 0 & 0 & [A_s] \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \{\varepsilon\} \\ \{\psi\} \\ \{\gamma\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

که در آن  $N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_y, M_{xy}$  نیروها و ممان‌های عمل کننده بر صفحه مرکب بر واحد طول و  $N_x^T, N_y^T, N_{xy}^T, M_x^T, M_y^T, M_{xy}^T$  نیروها و ممان‌های حرارتی بر واحد طول  $Q_x, Q_y$  تنش برشی خارج از صفحه بر واحد طول، و  $\{\varepsilon\}, \{\psi\}, \{\gamma\}$  به ترتیب جابجائی در راستای  $X, Y, Z$  می‌باشند. در نتیجه ضرایب ماتریس‌های سفتی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\bar{Q}_{ij})_k (1, z, z^2) dz, \quad (3)$$

$$i, j = 1, 2, 6$$

ضرایب ماتریس‌های سختی، نیروها و ممان‌های دمایی مؤثر با روابط زیر مشخص می‌شوند:

$$A_{Sii} = L \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\bar{Q}_{ii})_k dz, \quad (4)$$

$$i = 4, 5 \text{ and } L = \frac{5}{6}$$

$$\begin{Bmatrix} N_x^T, M_x^T \\ N_y^T, M_y^T \\ N_{xy}^T, M_{xy}^T \end{Bmatrix} = \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{Bmatrix}_k (\bar{Q}_{ij})_k (1, z) \Delta T dz, i, j = 1, 2, 6$$

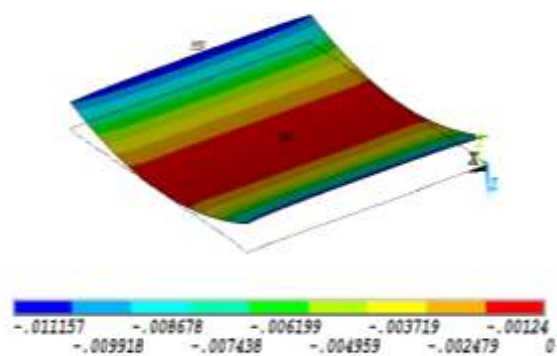
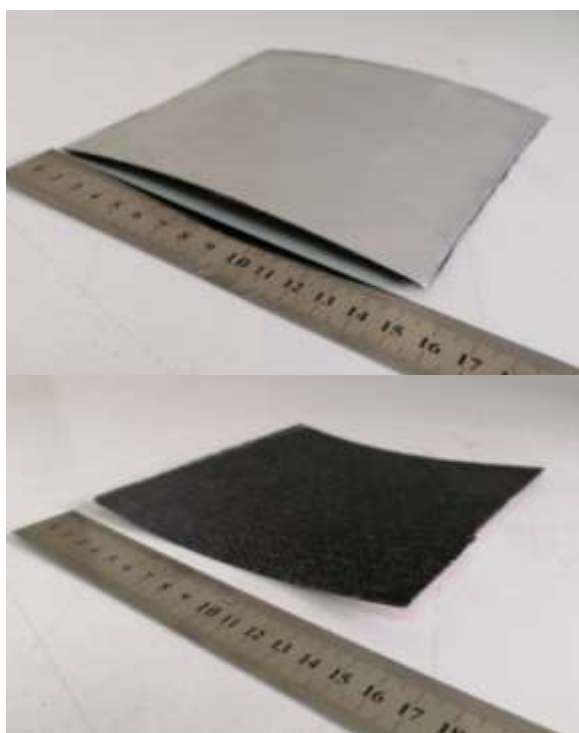
که در آن  $\bar{Q}_{ij}$  ماتریس سختی کاهش یافته انتقال یافته و  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_{xy}$  ضرایب انبساط حرارتی در راستای محورهای اصلی و  $\Delta T$  میزان تغییرات دما می‌باشند. میزان انرژی پتانسیل کل بر واحد حجم به صورت زیر می‌باشد:

$$U_s = \frac{1}{2} \bar{\sigma}^T \bar{\varepsilon} \quad (6)$$



تجربی از دو طرف حول دو محور اصلی با نتایج المان محدود مقایسه شده است. لازم به ذکر است تصاویر نمونه‌های تجربی مربوط به دو طرف صفحه می‌باشد.

شکل ۷ تغییرشکل‌های نمونه تجربی و عددی را برای صفحه بدون لایه آلومینیوم نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که رفتار صفحه بدون آلومینیوم شبیه به رفتار صفحه با آلومینیوم بوده و تفاوت در میزان جابه‌جایی خارج صفحه و انحنا است که در نهایت منجر به تغییر انرژی کرنشی این صفحات با صفحات هیبرید خواهد شد.



شکل (۵): نمونه تجربی و حل المان محدود حالت پایداری اول صفحه مربع با طول ضلع ۱۵۰ mm با یک‌لایه آلومینیوم با ضخامت ۰/۴۶ mm

جدول (۱): خواص و مشخصات لایه مرکب

$E_1$ (GPa)	۱۸۴	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	۱۵۷۰
$E_2$ (GPa)	۱۴/۷	$\alpha_1$ (1/°C)	$-0.085 \times 10^{-6}$
$G_{12}$ (GPa)	۵/۵۸	$\alpha_2$ (1/°C)	$19.34 \times 10^{-6}$
$g_{12}$	۰/۳	ضخامت (mm)	۰/۲

جدول (۲): خواص و مشخصات لایه آلومینیوم

$E$ (GPa)	$\nu$	$\alpha$	ضخامت (mm)
۷۰	۰/۳	$23.6 \times 10^{-6}$	۰/۰۰۰۴۶/۰۱

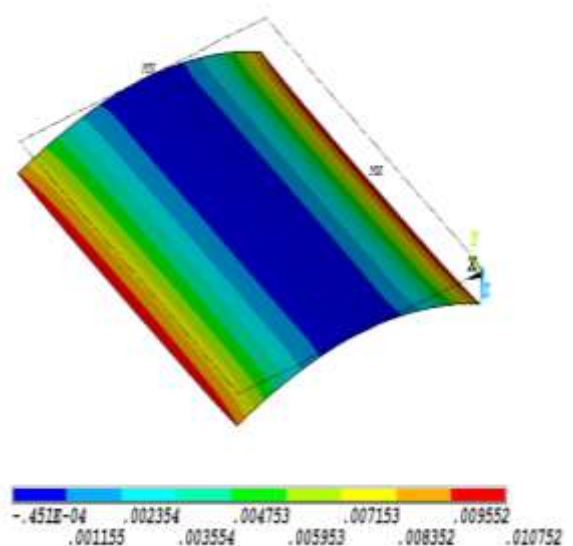
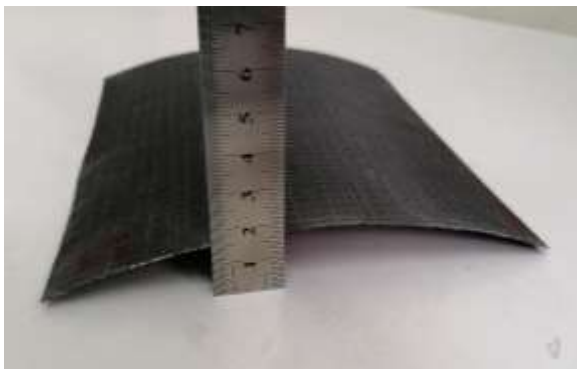
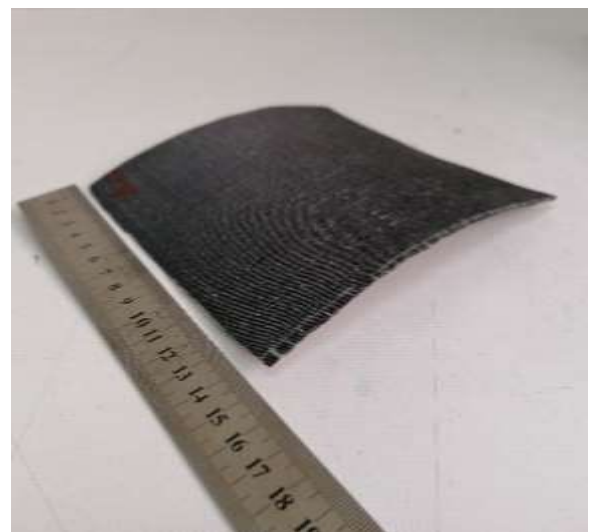
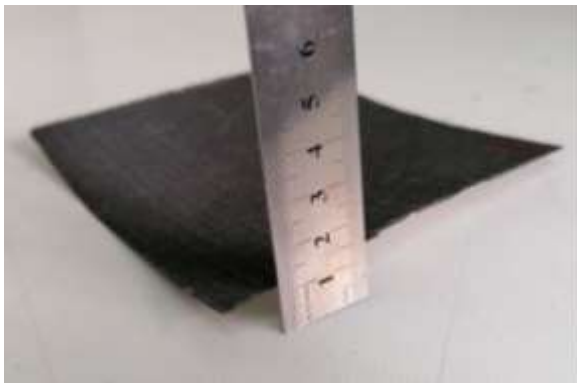
نمونه‌های مورد بررسی با هندسه مربع به طول ضلع ۱۵۰ mm و ۲۰۰ mm انتخاب و از فرایند مکش رزین با فشار ۰/۶ بار در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. همچنین ساخت نمونه‌های مرکب از الیاف کربن ۲۰۰ gr و رزین<sup>۱</sup> و هاردنر<sup>۲</sup> با دمای پخت بالا به کار گرفته شده و به منظور اتصال بهتر لایه آلومینیوم، سطح آن با سمباده نرم خراشیده شده است. در فرایند ساخت پس از آماده‌سازی نمونه در قالب مسطح و تزریق رزین به مدت ۴ ساعت در دمای ۸۰° قرار داده شده و پس از آن در دمای محیط سرد شده است. یکی از مراحل اصلی در فرایند ساخت، فرایند سرد شدن از دمای کوره تا دمای محیط است که در نتیجه تنش‌های پسماند در صفحه، تغییرشکل ایجاد خواهد شد. عدم تقارن ضرایب انبساط دمایی در لایه چینی، منجر به ایجاد تنش در صفحه طی فرایند سرد شدن می‌شود که با کاهش دما تا دمای محیط، و در نتیجه ایجاد انحنا در صفحه، حالت اول پایداری که انرژی کرنشی کمتری دارد، ابتدا تشکیل می‌شود. با اعمال تحریک مکانیکی به وسط صفحه یا لبه‌های خمیده شده در جهت عکس خمیدگی، صفحه به حالت دوم پایداری پرش خواهد کرد. برای اندازه‌گیری جابه‌جایی و تغییرشکل صفحه در حالات اول و دوم پایداری، از نمونه‌ها تصویربرداری شده و سپس در نرم‌افزار به صورت مختصات نمایش داده شده است که در نهایت با نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است.

شکل‌های ۵ و ۶ نتایج آزمایشگاهی و المان محدود برای صفحات مرکب هیبرید را نشان می‌دهند. شکل ۵ مربوط به حالت اول پایداری و شکل ۶ مربوط به حالت پایداری دوم می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرشکل صفحات

<sup>۱</sup> Resin

<sup>۲</sup> Hardener

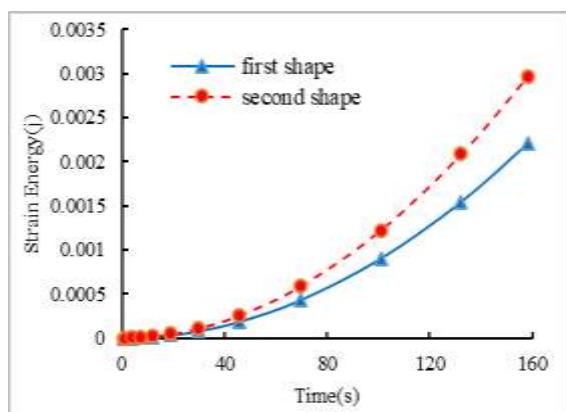




شکل (۷): نمونه تجربی و عددی حالت اول و دوم  
پایداری صفحه مربع بدون لایه آلومینیوم

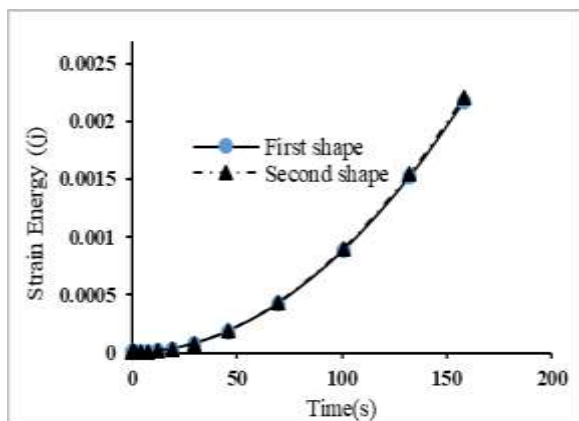
در شکل ۸ جابه‌جایی‌های خارج صفحه برای دو صفحه مرکب با و بدون لایه آلومینیوم و در حالت‌های عددی و آزمایشگاهی باهم مقایسه شده‌اند که

شکل (۶): نمونه تجربی و حل المان محدود حالت پایداری  
دوم صفحه مربع با طول ضلع ۱۵۰ mm با یک‌لایه  
آلومینیوم با ضخامت ۰/۰۴۶ mm



شکل (۹): تغییرات انرژی کرنشی برای دو حالت پایداری صفحه مربع به ابعاد ۲۰۰ mm شامل یک لایه آلومینیوم

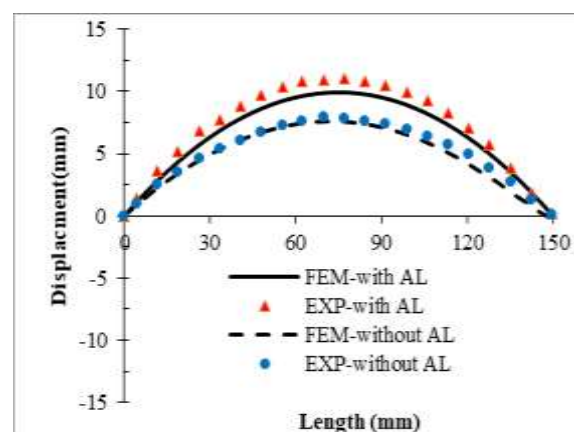
در شکل ۱۰ تغییرات انرژی کرنشی نسبت به زمان برای صفحه بدون لایه آلومینیوم، در فرایند سرد شدن را نشان می‌دهد. با توجه به تقارن هندسی شکل مربع و نوع لایه چینی مقدار انرژی کرنشی در هر دو حالت بسیار نزدیک به هم است. نتایج نشان می‌دهد تفاوت انرژی کرنشی دو حالت پایداری ناشی از وجود لایه آلومینیوم ۲۵ درصد و برای عدم وجود آن در حدود ۲ درصد است و نشان‌دهنده موفقیت در ایجاد عدم تقارن در دو پایداری با این روش می‌باشد.



شکل (۱۰): تغییرات انرژی کرنشی نسبت به زمان برای دو حالت پایداری صفحه مربع به ابعاد ۲۰۰ mm بدون لایه آلومینیوم

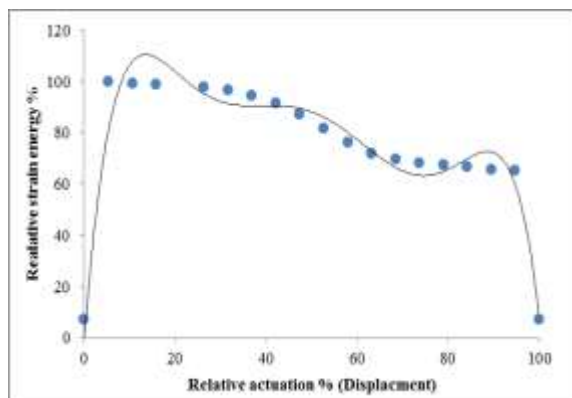
در شکل ۱۱ تغییرات انرژی کرنشی نسبت به دما در طول فرایند سرد شدن تا دمای اتاق نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش دمای صفحه و اختلاف دمای بیشتر با دمای کوره، میزان انرژی کرنشی افزایش می‌یابد. در صورت قرار دهی صفحه در دمای پائین‌تر (فریزر)، روند افزایش انرژی کرنشی

بیشترین مقدار خطای آن ۰.۶٪ بوده و نشان‌دهنده تطابق خوبی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود وجود لایه آلومینیوم منجر به افزایش جابه‌جایی خارج صفحه و در نتیجه انحنای صفحه شده است. با بررسی بیشتر برای درک علت این امر، با اندازه‌گیری وزن نمونه و با در نظر گرفتن وزن لایه آلومینیوم، این نتیجه حاصل شد که به دلیل وجود مقادیر بیشتر رزین در نمونه دارای لایه آلومینیوم که بین لایه فلز و الیاف ماده مرکب قرار گرفته است، مقدار جابه‌جایی در نمونه‌های با لایه آلومینیوم بیشتر است. همچنین به دلیل ایده‌آل بودن فرایند سرد کردن تا دمای اتاق و شرایط تکیه گاهی در حل عددی، مقدار جابه‌جایی خارج صفحه در حل عددی و تجربی با هم متفاوت است.

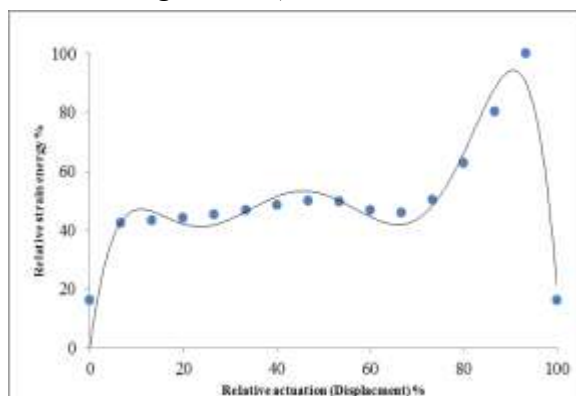


شکل (۸): مقایسه نتایج عددی و تجربی برای تغییر شکل در دو حالت با و بدون آلومینیوم با طول ضلع ۱۵۰ mm

شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات انرژی کرنشی در طی زمان سرد شدن تا رسیدن به دمای اتاق و اشکال نهائی را نشان می‌دهد. در شکل ۹ که مربوط به صفحه دارای لایه آلومینیوم است، تفاوت میزان انرژی کرنشی در دو حالت پایداری قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل وجود لایه آلومینیوم در یک طرف چند لایه، مقدار انرژی کرنشی ناشی از فرایند سرد شدن، در یکی از حالات پایداری بیشتر از دیگری است. این امر نشان‌دهنده عدم تقارن در دو پایداری است.



شکل (۱۲): انرژی کرنش نسبی بر حسب تحریک نسبی برای صفحه بدون آلومینیوم با طول ضلع ۱۵۰ mm

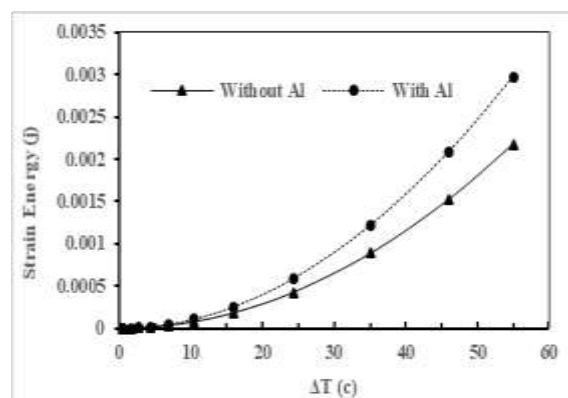


شکل (۱۳): انرژی کرنش نسبی بر حسب تحریک نسبی برای صفحه با آلومینیوم با ضخامت ۰/۰۴۶ mm با طول ضلع ۱۵۰ mm

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر استفاده از یک لایه آلومینیوم در یک طرف صفحه دوپایداری مرکب پرداخته شد. هدف از این مطالعه ایجاد عدم تقارن در صفحات دوپایداری به روش جدید، از طریق اضافه کردن یک لایه آلومینیوم، و در نهایت ایجاد زمینه‌ای برای اتصال ابزارهای کنترلی نظیر پیزوالکتریک و آلیاژهای حافظه‌دار و یا عملگرهای دمایی است. همچنین در صورت اتصال صفحات دوپایداری به بخش‌های دیگر، استفاده از پوشش لایه آلومینیوم بر مرز اتصال بین بخش‌های مجاور و صفحه، منجر به کاهش تمرکز تنش در مرز و پیشگیری از شکست می‌شود. با ایجاد عدم تقارن در دوپایداری؛ ضمن حفظ تقارن هندسی در سازه، می‌توان دو حالت پایداری با انرژی کرنشی متفاوت ایجاد نمود که به دلیل امکان کنترل بهتر حالات پایداری،

ادامه داشته و بر میزان تغییرشکل و انرژی لازم برای تحریک نیز افزوده خواهد شد. این بررسی مویید این مطلب است که در صورت استفاده از مواد با ظرفیت گرمایی بیشتر و محیط با دمای کمتر می‌توان به جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر و انرژی کرنشی بیشتر، دست‌یافت. همچنین با توجه به وجود عملگرهای دمایی که با ایجاد حرارت منجر به تغییرشکل می‌شوند، در صورت استفاده از این نوع عملگرها برای تحریک صفحات دوپایداری، اثر تغییر دما بر میزان انرژی کرنشی و در نتیجه انرژی لازم برای تحریک قابل توجه و بررسی بیشتر خواهد بود.



شکل (۱۱): تغییرات انرژی کرنشی نسبت به دما برای صفحه مربع به ابعاد ۲۰۰ mm، با لایه آلومینیوم و بدون لایه آلومینیوم

در اشکال ۱۲ و ۱۳؛ میزان عدم تقارن در دوپایداری ناشی از اضافه کردن لایه آلومینیوم، از طریق مقدار انرژی کرنشی به دست آمده از حل عددی برای دو صفحه با و بدون لایه آلومینیوم، در طی فرایند پرش و در هر مرحله از تحریک به صورت نسبی، نشان داده شده است. برای این منظور مقدار انرژی کرنشی در هر مرحله از فرایند پرش، نسبت به بیشترین مقدار انرژی نرمالیزه شده است. لازم به ذکر است خطوط پیوسته نشان داده شده در نمودار، بیانگر خط رفتاری مقادیر انرژی کرنشی می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت این دو صفحه در مقادیر انرژی کرنشی ابتدا و انتهای مراحل تحریک، همچنین رفتار کلی تغییرات انرژی کرنشی در هر دو صفحه قابل توجه است.

8. Dano, Marie-Laure, and Michael W. Hyer. "Thermally-induced deformation behavior of unsymmetric laminates." *International journal of solids and structures* 35, No.17, pp. 2101-2120, 1998.
9. Dano, M-L., and Michael W. Hyer. "Snap-through of unsymmetric fiber-reinforced composite laminates." *International journal of solids and structures* 39, No. 1 , pp. 175-198, 2002
10. Tawfik, Samer A., D. Stefan Dancila, and Erian Armanios. "Unsymmetric composite laminates morphing via piezoelectric actuators." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42, No. 7, pp. 748-756, 2011
11. Murugan, Senthil, and M. I. Friswell. "Morphing wing flexible skins with curvilinear fiber composites." *Composite Structures*. Vol. 99, pp. 69-75, 2013.
12. Bubert, Edward Adams. "HIGHLY EXTENSIBLE SKIN FOR A VARIABLE WING-SPAN MORPHING AIRCRAFT UTILIZING PNEUMATIC ARTIFICIAL MUSCLE ACTUATION." PhD diss., 2009.
13. Hiroaki, Tanaka, Hiraku Sakamoto, Akiya Inagaki, Kosei Ishimura, Akihiro Doi, Yusuke Kono, Tomoaki Oyama, Kazuki Watanabe, Yu Oikawa, and Takeshi Kuratomi. "Development of a smart reconfigurable reflector prototype for an extremely high-frequency antenna." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 27, No. 6, pp. 764-773, 2016.
14. Hum SV, Perruisseau-Carrier J. Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review. *IEEE Trans Antennas Propag*, Vol. 62, pp. 183-98, 2014.
15. Washington, Gregory. "Smart aperture antennas." *Smart Materials and Structures* 5, No. 6 , 801, 1996.
16. Freeland RE, Helms rg. deployable antenna structures technologies Robert E. Freeland Richard G. Helms. *Jet Propuls* 2009.
17. Hu, Jianqiang, Shu Lin, and Fuhong Dai. "Pattern reconfigurable antenna based on morphing bistable composite laminates." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 65, no. 5 , pp. 2196-2207. 2017
18. Hu J, Li Y, Dai F. "Multifunctional pattern reconfigurable wrist antenna structures based on bistable composite cylindrical shells for on-body applications. " *ICCM Int Conf Compos Mater*, Augus, pp. 8-10, 2017
19. Pirrera, A., D. Avitabile, and P. M. Weaver. "Bistable plates for morphing structures: a refined analytical approach with high-order polynomials." *International Journal of Solids and Structures* 47, No. 25-26 , pp. 3412-3425. 2010
20. Daynes, S., P. M. Weaver, and J. A. Trevarthen. "A morphing composite air inlet with multiple stable shapes." *Journal of intelligent material systems and structures* 22, No. 9 , pp. 961-973. 2011

ابزار مناسبی برای تغییرشکل در سازه‌هایی نظیر آنتن‌های انعکاس‌دهنده امواج یا سطوح کنترل بال، می‌باشند.

در این تحقیق، نتایج تجربی و عددی میزان جابه‌جایی برای صفحات دوپایداری با و بدون لایه آلومینیوم، با یکدیگر مقایسه شده است. در ادامه انرژی کرنشی صفحات مرکب شامل یک‌لایه آلومینیوم و بدون آن، مورد بررسی قرار گرفته و عدم تقارن در دو پایداری هیبریدی نشان داده شده است. نتایج نشان داد، باتوجه‌به ضخامت کم لایه فلز نسبت به مواد مرکب، تغییرشکل صفحه هیبرید نسبت به صفحه بدون لایه آلومینیوم تغییر چندانی نداشته و اثر لایه آلومینیوم بر میزان جابه‌جایی ناچیز است. نتایج نشان داد که با تغییر دمای محیط، میزان جابه‌جایی و انحنای حالات پایداری و در نتیجه انرژی کرنشی هر حالت تغییر یافته و نشان‌دهنده تاثیر نیروی لازم برای تحریک، از دمای محیط است.

## ۵- مراجع

1. Friswell, M. I., and Inman, D. J., "Morphing concepts for UAVs." In 21st Bristol UAV Systems Conference, pp. 1-13, 2006.
2. Silvestro, B., Bilgen, O., Ajaj, R. M., Friswell, M. I., and J. Inman. D., "A Review of Morphing Aircraft", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol 22, No. 9, pp. 823-877, 2011.
3. Hang, Z., Fang, H., Santer M. J., Yangqing Hou L. L., Wu, K., and Jiang, H., "The Selection and Optimization of the Reconfigurable Shaped Reflector Structure Material", In MATEC Web of Conferences, Vol. 175, p. 01024. EDP Sciences, 2018.
4. Diaconu, C. G., Weaver, P. M., and Filippo M., "Concepts for morphing airfoil sections using bi-stable laminated composite structures", *Thin-Walled Structures* Vol. 46, No. 6, pp. 689-701, 2008.
5. Seffen, K. A., "Mechanical memory metal: a novel material for developing morphing engineering structures", *Scripta materialia* Vol. 55, No. 4, pp. 411-414, 2006.
6. Bowen, C. R., Butler, R., Jervis, R., Kim, H. A., and Salo, A. I. T., "Morphing and shape control using unsymmetrical composites", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* Vol. 18, No. 1 pp. 89-98, 2007.
7. Hyer, M. W., "Some observations on the cured shape of thin unsymmetric laminates", *Journal of Composite Materials* Vol. 15, No. 2 pp. 175-194, 1981.

30. Arrieta, Andres F., Izabela K. Kuder, Tobias Waeber, and Paolo Ermanni. "Variable stiffness characteristics of embeddable multi-stable composites." *Composites Science and Technology* 97 , pp. 12-18, 2014.
31. Harne, Ryan L., and K. W. Wang. "A review of the recent research on vibration energy harvesting via bistable systems." *Smart materials and structures* 22, No. 2 , 023001, 2013.
32. Cui, Yuefeng, and Matthew Santer. "Highly multistable composite surfaces." *Composite Structures* 124 , pp. 44-54, 2015.
33. Cui, Yuefeng, and Matthew Santer. "Characterisation of tessellated bistable composite laminates." *Composite Structures* 137 , pp. 93-104. 2016
34. Arena, Maurizio, Christof Nagel, Rosario Pecora, Oliver Schorsch, and Ignazio Dimino. "Static and Dynamic Performance of a Morphing Trailing Edge Concept with High-Damping Elastomeric Skin." *Aerospace* 6, No. 2 , 22, 2019.
35. Brunetti, Matteo, A. Vincenti, and S. Vidoli. "A class of morphing shell structures satisfying clamped boundary conditions." *International Journal of Solids and Structures* 82 , pp. 47-55, 2016.
36. Fazli M, Sadr M H, Ghashochi H. "Adaptive structures via bistable hybrid composite laminates, Numerical and experimental study. " 27 th ISME conference. Tehran,Iran. (In Persian)
37. Potter, Kevin, Paul Weaver, Akbar Abu Seman, and Sanjay Shah. "Phenomena in the bifurcation of unsymmetric composite plates." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38, No. 1 , pp. 100-106, 2007.
38. Haldar, Ayan, José Reinoso, Eelco Jansen, and Raimund Rolfes. "Thermally induced multistable configurations of variable stiffness composite plates: Semi-analytical and finite element investigation." *Composite Structures* 183, pp. 161-175, 2018.
21. Thornburgh, Robert P., Andrew R. Kreshock, Matthew L. Wilbur, Martin K. Sekula, and Jinwei Shen. "Continuous trailing-edge flaps for primary flight control of a helicopter main rotor." 2014.
22. Wilbur, Matthew L., Mihir P. Mistry, Peter F. Lorber, Robert Blackwell Jr, Silvestro Barbarino, Thomas H. Lawrence, and Uwe TP Arnold. "Rotary wings morphing technologies: state of the art and perspectives." In *Morphing Wing Technologies*, pp. 759-797. Butterworth-Heinemann, 2018.
23. Mostafavi, Sajad, Mohammad Golzar, and Akbar Alibeigloo. "On the thermally induced multistability of connected curved composite plates." *Composite Structures* 139, pp. 210-219. 2016
24. Tawfik, Samer A., D. Stefan Dancila, and Erian Armanios. "Planform effects upon the bistable response of cross-ply composite shells." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42, No. 7 , pp. 825-833. 2011
25. Diaconu, Cezar G., Paul M. Weaver, and Andres F. Arrieta. "Dynamic analysis of bi-stable composite plates." *Journal of Sound and Vibration* 322, No. 4-5 , pp. 987-1004. 2009.
26. Daynes, Stephen, P. M. Weaver, and K. D. Potter. "Aeroelastic study of bistable composite airfoils." *Journal of aircraft* 46, No. 6 , pp. 2169-2174, 2009.
27. Mattioni, F., Paul M. Weaver, and M. I. Friswell. "Multistable composite plates with piecewise variation of lay-up in the planform." *International Journal of Solids and Structures* 46, No. 1 , pp. 151-164, 2009.
28. Gatto, A., F. Mattioni, and M. I. Friswell. "Experimental investigation of bistable winglets to enhance aircraft wing lift takeoff capability." *Journal of Aircraft* 46, No. 2 , pp. 647-655, 2009.
29. Kuder, Izabela K., Andres F. Arrieta, and Paolo Ermanni. "Design space of embeddable variable stiffness bi-stable elements for morphing applications." *Composite Structures* 122 , pp. 445-455. 2015