

بررسی تجربی و عددی اثر دما بر شکل پایداری و انحنای صفحات دوپایداری نامتقارن هیبریدی

مهدی فضلی¹، محمد همایون صدر^{1*}، هادی قشوجی برق²
1- دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده مهندسی هوافضا
2- مرکز فنی و مهندسی بوئین زهرا
(دریافت مقاله: 1397/11/13 تاریخ پذیرش: 1398/06/11)

چکیده

در این مقاله به بررسی تجربی و عددی اثر دما و تغییرات آن بر شکل هندسی و انحنای صفحات مرکب دوپایداری نامتقارن هیبریدی پرداخته شده است. با اضافه کردن لایه آلومینیوم به یک طرف چند لایه مرکب و ایجاد عدم تقارن در صفحه، روشی جدید برای کنترل پذیری سازه در حالت های مختلف پایداری معرفی شده و در همین راستا، اثر اندازه و وجود و یا عدم وجود لایه آلومینیوم بر شکل پایداری و انحنای صفحات مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، نتایج تجربی با نتایج عددی مقایسه شده است. مقایسه نتایج تجربی و عددی تطابق خوب نتایج را نشان می‌دهند. تحقیقات گسترده ای در خصوص کاربرد سازه‌های تغییر شکل پذیر بر مبنای صفحات دو پایداری در صنعت هوافضا در حال افزایش بوده و استفاده از ساختارهای یکپارچه هوشمند در این سازه‌ها و بویژه در سازه هواپیما باعث عملکرد مطلوب و مانورپذیری بهتر خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: دو پایداری، صفحات نامتقارن هیبریدی، مطالعه عددی و تجربی

Experimental and numerical study of the effect of temperature on the stability shape and curvature of bi-stable hybrid asymmetric plates

M Fazli¹, M.H Sadr¹, H Ghashochi-Bargh²

Abstract

In this paper, an experimental and numerical study of the effect of temperature and its changes on the geometric shape and curvature of bi-stable hybrid asymmetric plates are investigated, and by adding an aluminum layer to composite laminate and creating asymmetry on the plate, a new method for controllability of the structure is introduced in different stability shapes, and the effects of plate size and existence or absence of aluminum layer on the shape of the plate's stability and curvature are investigated. Also, the experimental results are compared with the numerical results. Comparisons of experimental and numerical results show good agreement. Many researches about adaptive structures based on bi-stable plates in aerospace industry are increasing and the use of smart integrated structures in these structures, and especially in the aircraft structure, provide a better performance and better maneuverability of the aerial vehicle.

For verification, the experimental results are compared with numerical results.

Key words: Bi-stability, Hybrid asymmetric plates, Experimental and numerical study

مقدمه

امروزه سازه‌های تطبیق‌پذیر در صنایع مختلف و بویژه در صنعت هوافضا به دلیل عملکرد مطلوب بدون نیاز به تعداد قطعات بیشتر به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته اند. هدف این سازه‌ها ایجاد تغییر شکل از طریق کنترل فعال و غیرفعال است تا بنا بر موقعیت های مختلف

عملیاتی قادر به تغییر شکل باشند. نکته قابل توجه در این سازه‌ها، حفظ هم زمان سختی سازه و شکل پذیری است. به همین منظور صفحات مرکب دو یا چند پایداری به عنوان یک گزینه مطلوب برای دستیابی به این هدف معرفی شده اند. ویژگی بارز صفحات دو یا چندپایداری، عدم نیاز به اعمال نیروی مداوم برای حفظ حالات پایداری

و حفظ یکپارچگی سازه است. یکی از کاربردهای این سازه ها در فلپ های بال هواپیما می باشد، بطوریکه در این حالت به دلیل یکپارچگی سازه و عدم نیاز به مکانیزم های تغییر شکل، وزن سازه و مصرف انرژی به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته و اهمیت موضوع فوق در علوم هوانوردی را نشان می دهد.

تحقیقات گسترده ای توسط محققین در خصوص ویژگی این صفحات و شبیه سازی آن با روش های تحلیلی و عددی انجام شده است که در مقایسه با نتایج تجربی تطابق قابل قبولی داشته و زمینه را برای ادامه تحقیقات فراهم نموده است [1]. بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه با انتخاب هندسه متقارن و ساده مربع انجام شده است که بدلیل تقارن هندسی، نیروی لازم برای تحریک و پرش از یک حالت به حالت دیگر، بسیار نزدیک به هم است [2-3]. این نزدیکی در میزان نیروی تحریک برای حرکت بین حالات پایداری، از طرفی برای کارکرد در زمینه های جذب انرژی از محیط مفید است [4]؛ ولی در زمینه تغییر شکل سازه، این تقارن و تساوی نیروی تحریک منجر به تغییر شکل های پی در پی و در نتیجه عدم کنترل سازه بصورت فعال و یا غیر فعال می شود. در همین راستا و برای دستیابی به صفحات تغییر شکل پذیر و تطبیق پذیر؛ با اتصال این صفحات به صفحه متقارن، ضمن ایجاد تغییر شکل در هر دو راستا، میزان سختی سازه در دو حالت پایداری، متفاوت شد که این نوع اتصال، شرایط مرزی جدیدی برای بخش دوپایداری محسوب می شد [5-7].

در ادامه تحقیقات؛ با اضافه کردن قیود مرزی برای ایجاد سختی نامتقارن، اتصال صفحات دوپایداری از دو طرف به صفحات متقارن مورد بررسی قرار گرفت، ضمن آنکه برای ایجاد پیوستگی در مرز بخش متقارن و نامتقارن نیز از یک ناحیه گذار استفاده شد. در این حالت تفاوت سختی بین حالات پایداری بسته به نسبت ابعاد طولی بخش نامتقارن و ناحیه گذار، تا چندین برابر گزارش شد [8-10]. همچنین، اثر قیود مرزی از طریق جابدهی صفحات نامتقارن در کنار صفحات نامتقارن و صفحات متقارن دیگر، مورد بررسی حالت های مختلف قرار گرفت. هدف از این کار دستیابی به صفحات چندپایداری با سختی متفاوت بود که بتوان در انعکاس دهنده های فضائی مورد استفاده قرار گیرد [11]. برای این منظور و جهت ایجاد صفحات دوپایداری نامتقارن که بین حالات پایداری آن، عدم تقارن وجود داشته باشد، دو رویکرد مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در رویکرد اول، با استفاده از صفحات با هندسه نامتقارن، سه هندسه مربع، مثلث، و دوزنقه مورد بررسی و میزان انرژی کرنشی لازم برای تغییر شکل از یک حالت به حالت دیگر مورد مقایسه قرار گرفت (12). در رویکرد دوم برای ایجاد عدم تقارن از نوارهای بایاس¹ در یک طرف صفحه دوپایداری و در مرکز آن برای ایجاد عدم تقارن بین دو حالت پایداری استفاده شد. در این حالت از دو لایه نوار با لایه چینی

مقارن و پهنای 10 درصد ابعاد صفحه مربع استفاده گردید تا بتوان میزان انرژی کرنشی بین دو حالت پایداری را در فرآیند تحریک از یک حالت به حالت دیگر تغییر داد [12]. این تحقیق، در ادامه تحقیقات گذشته برای ایجاد سازه های تطبیق پذیر مبتنی بر چندپایداری بوده و یک روش جدید برای ایجاد عدم تقارن در دوپایداری ارائه شده است که مینی بر ساختار الیاف-فلز می باشد. به همین منظور از یک لایه نازک فلز آلومینیوم در یک طرف چند لایه نامتقارن بصورت [0/90/AL] استفاده شده تا ضمن ایجاد عدم تقارن در دوپایداری، از مزایای دیگر این نوع لایه چینی که ترکیبی از مواد مرکب و آلومینیوم است، استفاده شود. استفاده از صفحات هیبرید می تواند ضمن حفظ پیوستگی در مرز اتصال بین دو بخش متقارن و نامتقارن، مانع از تاثیر رطوبت بر چند لایه شده و به عنوان بستری برای اعمال تحریک دمائی به چند لایه یا انعکاس امواج مکانیکی مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه، با توجه به تاثیر دما بر شکل و میزان انحنای این صفحات، این اثر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

سازه های چند پایداری سازگار 2:

سازه های چندپایداری با قابلیت سازگاری، می توانند در ازای تحریک بین حالت های پایداری مختلف تغییر شکل هایی بزرگ پیدا کنند. در ساختار این سازه ها از المان هایی با دوپایداری نامتقارن استفاده می گردد (13 و 14). این سازه ها امروزه به دلیل عملکرد بهتر و سادگی، جایگزین سازه های متداول نظیر لولاهای چرخشی شده اند. از جمله مزایای این سازه ها، می توان به کاهش تعداد قطعات و در نتیجه کاهش پیچیدگی در ساخت و تعمیر و نگهداری، ضمن حفظ سادگی اشاره کرد. برای مثال؛ در فضای بیرون از جو که بدلیل ماهیت آن نمی توان از روانکارها برای مکانیزم های متداول استفاده کرد، استفاده از سازه های چند پایداری سازگار بدلیل تمایل به حفظ شکل خود، گزینه مناسبی است. با این حال، ممکن است سازه ی تطبیق پذیر، ساختار خود را از طریق محرک های جابدهی شده در خود تغییر دهد.

عدم تقارن در دوپایداری

در یک سازه دوپایداری، تابع انرژی پتانسیل کل دارای دو مقدار حداقل متمایز از هم، مربوط به دو حالت پایداری است که توسط یک حالت ناپایدار، از هم جدا شده اند. برای تغییر شکل سازه از یک حالت به حالت دیگر، لازم است تا انرژی تحریک لازم به آن اعمال شود. اعمال انرژی منجر به خروج سازه از حالت پایداری و حرکت به سمت حالت ناپایدار می شود که در این حالت سازه تمایل به ادامه تغییر شکل تا رسیدن به حالت دوم پایداری دارد.

اگر هر دو حالت پایداری سازه دارای انرژی کرنشی برابر باشند، دو پایداری متقارن است. در مقابل، اگر حالات پایداری دارای انرژی کرنشی برابر نباشند، دوپایداری نامتقارن خواهد بود. لازم بذکر است، تساوی

سال بیست و یکم، شماره یکم، بهار و

نیروها و ممان های دمائی موثر با رابطه (5) مشخص می شود:

$$\{N^T, M^T\} = L \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \{\alpha\}_k [\bar{Q}]_k (1, z) \Delta T dz \quad (5)$$

که در آن $[\bar{Q}]$ ماتریس سختی کاهش یافته انتقال یافته و بردار ضرایب انبساط حرارتی در راستای محورهای مرجع و ΔT میزان تغییرات دما می باشد. میزان انرژی پتانسیل کل بر واحد حجم با رابطه (6) قابل محاسبه است:

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

پاسخ های دو پایداری صفحه هیبرید با حداقل سازی انرژی پتانسیل بدست می آیند و مقادیر حداقل انرژی کرنشی بیانگر حالات پایداری است.

آزمایش تجربی

مشخصات مواد استفاده شده در این تحقیق به شرح زیر می باشد:

خواص و مشخصات لایه مرکب:

$$E_1 = 184 \text{ GPa}, E_2 = 14.7 \text{ GPa}, G_{12} = 5.58 \text{ GPa}, \\ \nu_{12} = 0.3, \alpha_1 = -0.085 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}, \alpha_2 = 19.34 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}, \\ \rho = 1570 \text{ kg/m}^3, t = 0.2 \text{ mm}$$

خواص و مشخصات لایه آلومینیوم: ضخامت

$$E = 70 \text{ GPa}, \nu = 0.3, \alpha = 23.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}, t = 0.046 - 0.1 \text{ mm}$$

برای ساخت نمونه ها؛ با اندازه 150 میلی متر در 300 میلی متر و 100 میلی متر در 200 میلی متر؛ از روش VIP³ استفاده و از الیاف کربن 200 گرمی ساخت شرکت Sikawrap و رزین و هاردنر با دمای پخت بالا، ساخت شرکت Axson استفاده شده است که مشخصات لایه ها به همراه رزین در بالا آمده است. در این روش پس از لایه چینی و آماده سازی نمونه مورد نظر بر روی قالب، با ایجاد خلاء در بین لایه ها، مخلوط رزین و هاردنر که به ترتیب با نسب 3/10 ترکیب شده اند، تزریق می شود. همچنین در پروسه ساخت با ایجاد زبری سطح در لایه آلومینیومی، امکان اتصال بهتر فراهم و احتمال جدایش لایه آلومینیومی کاهش داده شده است. پس از اتمام فرآیند تزریق که در فشار ثابت 0/6 بار انجام می شود، نمونه در داخل دستگاه اتوکلاو قرار داده شده و تا دمای 80 درجه سانتی گراد به مدت 4 ساعت طبق دستورالعمل شرکت سازنده حرارت می بیند. پس از اتمام فرآیند پخت، نمونه از قالب جدا شده و در دمای محیط خنک می شود. در صورتی که نیاز به اعمال اختلاف دمای بیش تر از 55 تا 60 درجه باشد، می توان نمونه را داخل فریزر قرار داد. در این آزمایش، لایه چینی بخش مربع و متقارن صفحه دوبخشی

انرژی کرنشی در دو حالت به معنی میزان سختی برابر در دو حالت پایداری نیست (5).

فرمول ها و روابط

در این بررسی نتایج آزمایشگاهی حاصله با نتایج عددی، مورد مقایسه قرار گرفته است. جهت این مقایسه و بدلیل ضخامت کم صفحات در مقایسه با ابعاد صفحه از تئوری مرتبه اول برشی استفاده شده است. با توجه به تئوری مرتبه اول برشی صفحات و پوسته ها، رابطه کرنش/جابجائی بصورت رابطه (1) می باشد:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon + z\psi = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_{,x} \\ v_{,y} \\ w_{,x} + \phi_x \\ w_{,y} + \phi_y \\ u_{,y} + u_{,x} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \phi_{x,x} \\ \phi_{y,y} \\ 0 \\ 0 \\ \phi_{x,y} + \phi_{y,x} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

که در رابطه فوق؛ x, y, z راستای میدان، u, v, w میزان جابجائی در صفحه میانی و ϕ_x و ϕ_y دوران صفحه میانی حول محورهای x و y می باشند. بر همین مبنا معادلات تشکیل شده بصورت رابطه (2) است:

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

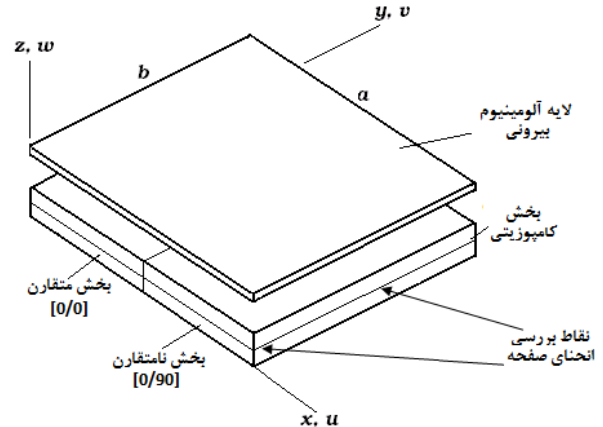
که در آن $N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_y, M_{xy}, Q_x, Q_y$ نیروهای برشی خارج صفحه و $M_x^T, M_y^T, M_{xy}^T, N_x^T, N_y^T, N_{xy}^T$ نیروها و ممان های عمل کننده بر صفحه مرکب بر واحد طول، Q_x و Q_y نتیجه ضرایب ماتریس های سختی بصورت روابط (3) و (4) تعریف می شوند:

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\bar{Q}_{ij})_k (1, z, z^2) dz, \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (3)$$

$$A_{Sij} = L \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\bar{Q}_{ij})_k dz, \quad i = 4, 5 \quad (4)$$

در رابطه فوق، L برابر فاکتور اصلاحی برشی و برابر با $5/6$ می باشد.

بصورت [0/0/AL] و بخش نامتقارن بصورت [0/90/AL] در نظر گرفته شده است. در شکل 1، لایه چینی فوق نشان داده شده است. هدف از اضافه کردن لایه آلومینیوم در این تحقیق، ضمن تغییر در میزان خواص مکانیکی، ایجاد زمینه ای برای:

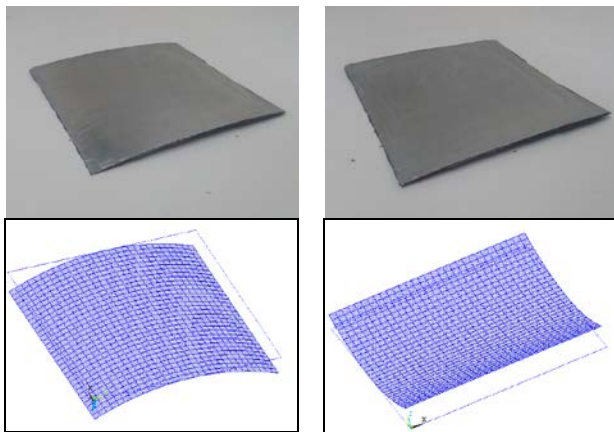


شکل 1 - لایه چینی در نظر گرفته شده جهت آزمایش نمونه ای شامل بخش متقارن و نامتقارن

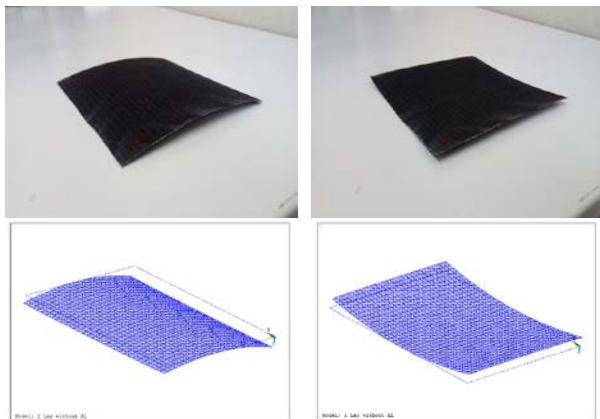
- 1- اتصال ابزار های کنترلی نظیر پیزوالکتریک و آلیاژ های حافظه دار
- 2- پوشش عدم پیوستگی الیاف بین بخش متقارن و نامتقارن و ایجاد پیوستگی بین دو بخش
- 3- خنثی کردن تمرکز تنش در مرز اتصال بخش متقارن و نامتقارن و پیشگیری از شکست
- 4- امکان بهره برداری به عنوان انعکاس دهنده امواج
- 5- ایجاد عدم تقارن در دوپایداری و در نهایت زمینه سازی برای تغییر شکل می باشد.

مدلسازی المان محدود

در این پژوهش برای مدلسازی المان محدود از نرم افزار ANSYS استفاده شده که در خصوص صفحه دو بخشی با ابعاد 100 میلی متر در 200 میلی متر پس از مطالعه شبکه بندی از 800 المان SHELL181 بهره گرفته شده است. برای صفحه بزرگتر نیز اندازه مش ها برابر با صفحه کوچکتر انتخاب شده است. به منظور جلوگیری از حرکت صلب، مرکز صفحه مربع با لایه چینی مرکب متقارن بصورت کاملا گیردار و بقیه شرایط مرزی بصورت آزاد بوده و برای انجام فرآیند پرش بارگذاری بصورت جابجائی بر دو ضلع صفحه اعمال شده است و در نهایت باربرداری صورت گرفته تا از وقوع حالت دوم پایداری اطمینان حاصل شود. در صفحه هیبرید نیز شرایط مرزی و بارگذاری یکسان با صفحه مرکب اعمال شده است. شکل های 2 و 3 نتایج آزمایشگاهی و عددی حالت های پایداری را پس از فرآیند سرد شدن و در دمای اتاق (20 درجه سانتی گراد) در صفحه مرکب با و بدون آلومینیوم نشان می دهند.



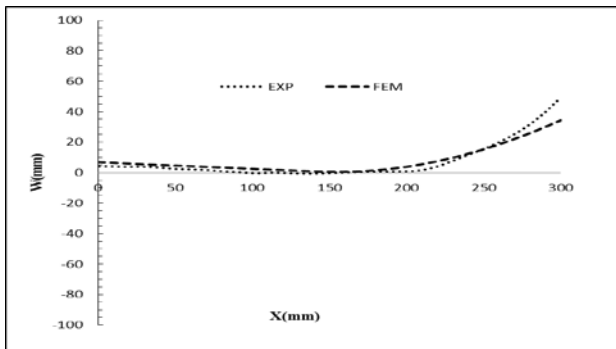
شکل 2 - نمونه تجربی و حل المان محدود صفحه با یک لایه آلومینیوم در دمای (20 درجه سانتی گراد. الف) حالت پایداری اول؛ ب) حالت پایداری دوم.



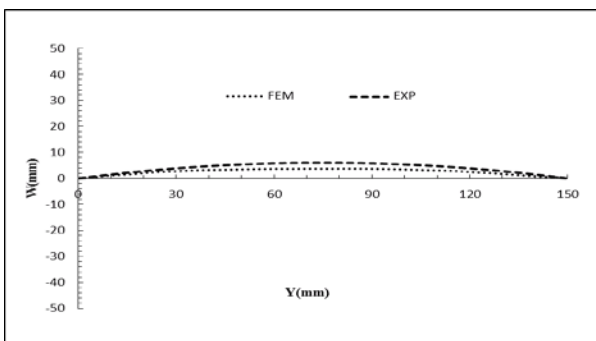
شکل 3 - نمونه تجربی و حل المان محدود صفحه بدون لایه آلومینیوم در دمای (25 درجه سانتی گراد. الف) حالت پایداری اول؛ ب) حالت پایداری دوم.

همان طور که مشاهده می شود، نتایج آزمایشگاهی و عددی تطابق خوبی باهم دارند. شکل 4 اثر وجود آلومینیوم بر میزان تغییر شکل و انحنای صفحه را در دو حالت تجربی و عددی نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود وجود لایه آلومینیوم منجر به ایجاد جابجائی بزرگتر و انحنای بیشتری می شود که بدلیل وجود رزین بیشتر در این حالت است. باتوجه به اثر ماتریس در تغییر شکل های دمائی و این نکته که در این نوع روش ساخت مقدار رزین بیشتری بین لایه الیاف و فلز باقی می ماند، می توان نتیجه گرفت که جابجائی بیشتر در نتیجه وجود رزین بیشتر است. لازم به ذکر است وزن نمونه با آلومینیوم نیز بدون احتساب فلز بیشتر از حالت بدون آلومینیوم است که موبد این مطلب می باشد. برای نشان دادن اثر ابعاد هندسی بر میزان تغییر شکل و انحنای صفحه ای با ابعاد 1/5 برابر صفحه 100

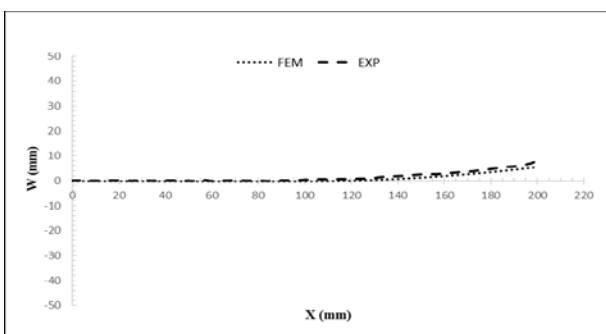
شکل 4- مقایسه نتایج عددی و تجربی برای تغییر شکل حالت پایداری اول در دو حالت با و بدون آلومینیوم در دمای 25 درجه سانتی گراد برای صفحه 150 میلی‌متر در 300 میلی‌متر



شکل 5 - جابجایی طولی صفحه با آلومینیوم در حالت پایداری دوم در دمای 25 درجه سانتی گراد با ابعاد 150 میلی‌متر در 300 میلی‌متر



شکل 6- جابجایی عرضی انتهای بخش نامتقارن صفحه با آلومینیوم در حالت پایداری اول در دمای 25 درجه سانتی گراد با ابعاد 150 میلی‌متر در 300 میلی‌متر



شکل 7- جابجایی طولی صفحه با آلومینیوم در حالت پایداری دوم در دمای 25 درجه سانتی گراد با ابعاد 100 میلی‌متر در 200 میلی‌متر

میلی‌متر در 200 میلی‌متر (صفحه دو لایه با ابعاد 150 میلی‌متر در 300 میلی‌متر) نیز مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است. در اشکال 5 و 6 تغییر شکل صفحه دو بخشی با ابعاد 150 میلی‌متر در 300 میلی‌متر به روش تجربی و عددی در دو حالت پایداری پس از فرآیند سرد شدن و در دمای اتاق (25 درجه سانتی‌گراد) مقایسه شده است. تفاوت میان نتایج عددی و تجربی بدلیل شرایط مرزی ایده آل در حل عددی و نیز خطای ناشی از شرایط تست می‌باشد. با این وجود تطابق خوبی بین نتایج مشاهده می‌شود. اشکال 7 و 8 نیز تغییر شکل طولی و عرضی تجربی و عددی صفحه 100 میلی‌متر در 200 میلی‌متر را پس از فرآیند سرد شدن و در دمای اتاق (20 درجه سانتی‌گراد) نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان جابجایی صفحه بزرگتر بیشتر از صفحه کوچکتر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نتایج حاصله میزان جابجایی در حل عددی کمتر از تجربی است که بدلیل شرایط مرزی ایده‌آل در حل عددی است.

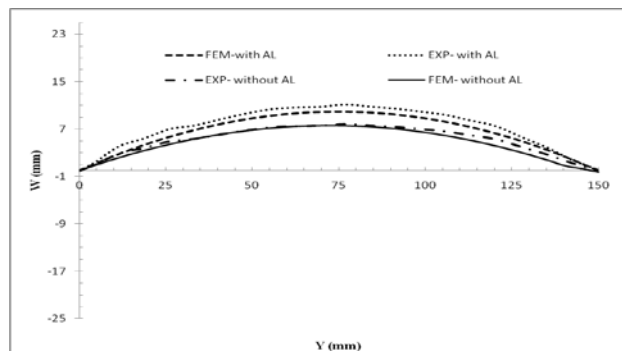
بررسی‌ها نشان می‌دهد چنانچه ضخامت لایه آلومینیوم بیش از 10 درصد ضخامت بخش مرکب باشد، امکان وقوع دوپایداری از بین رفته و صفحه مورد بررسی بصورت یک پایداری خواهد شد.

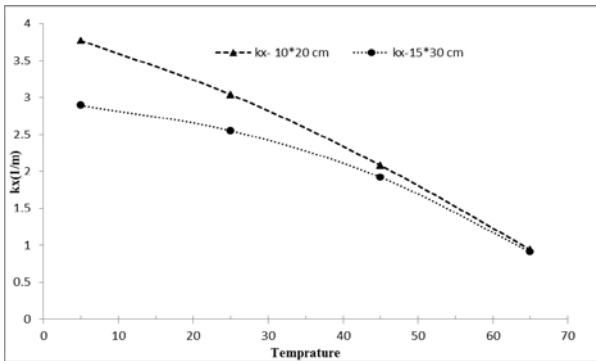
برای آنکه بتوانیم ضمن حفظ دوپایداری، ضخامت چند لایه را افزایش دهیم، می‌توان ابعاد هندسی صفحه را افزایش داد. در این حالت اختلاف انرژی کرنشی بین دو حالت پایداری نیز بیشتر خواهد شد. لذا برای افزایش اختلاف انرژی کرنشی در دو راستا با استفاده از افزایش ضخامت آلومینیوم می‌توان از صفحات بزرگتر استفاده نمود تا ضمن دستیابی به عدم تقارن در دوپایداری، صفحه مورد بررسی به حالت دو پایداری نیز باقی بماند.

بررسی اثر دما بر انحنا

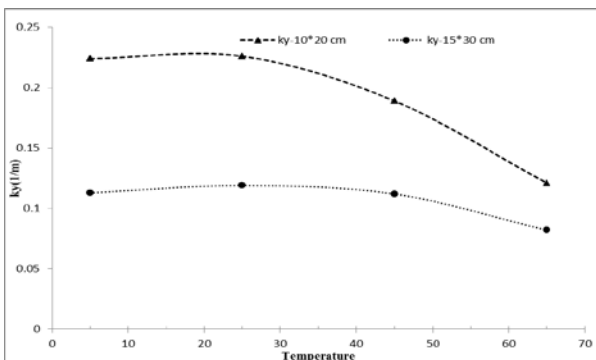
باتوجه به تاثیر دما بر میزان انحنا، در ادامه به بررسی نتایج حاصله برای تغییرات انحنای صفحه بصورت تجربی و عددی پرداخته شده است. برای این منظور میزان انحنا از طریق رابطه (7) در 4 دمای متفاوت محاسبه شده است.

$$K = \frac{\ddot{y}}{(1 + \dot{y}^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

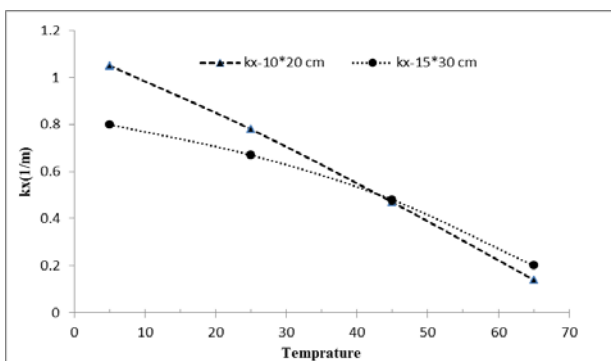




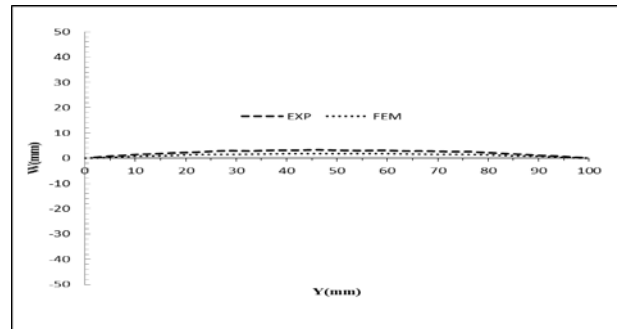
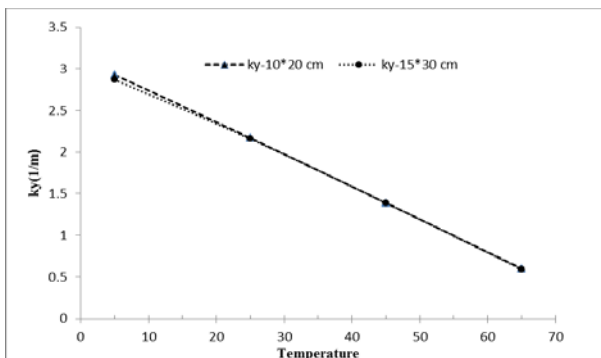
شکل 9- تغییرات k_x با دما در حالت پایداری دوم برای دو نسبت هندسی



شکل 10- تغییرات k_y با دما در حالت پایداری دوم برای دو نسبت هندسی



شکل 11- تغییرات k_x با دما در حالت پایداری اول برای دو نسبت هندسی



شکل 8 - جابجایی عرضی انتهای بخش نامتقارن صفحه با آلومینیوم در حالت پایداری اول در دمای 25 درجه سانتی گراد با ابعاد 100 میلی‌متر در 200 میلی‌متر

اندازه گیری انحنای نمونه های تجربی از طریق تصویر برداری و تحلیل با نرم افزار صورت گرفته است. در شکل های 9 تا 12 میزان انحنای در راستای x و y و برای دو حالت پایداری، برای صفحات با ابعاد 100 میلی‌متر در 200 میلی‌متر و 150 میلی‌متر در 300 میلی‌متر نشان داده شده است. مطابق شکل 1، برای حالت پایداری اول نقطه وسط و برای حالت پایداری دوم نقطه گوشه انتهایی بخش نامتقارن جهت سنجش انحنای صفحه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر یک از حالات پایداری یک راستای انحنای اصلی و یک راستای فرعی وجود دارد که در آن، میزان انحنای بسیار کمتر از انحنای اصلی است. همچنین مشاهده می‌شود، در دمای 65 درجه سانتی‌گراد صفحه دارای انحنای کمتری بوده و با کاهش دما میزان انحنای افزایش می‌یابد. از طرفی مشاهده می‌شود، علی‌رغم افزایش جابجایی در صفحه بزرگتر بدلیل ابعاد بیشتر نسبت به صفحه کوچکتر، میزان انحنای اصلی در آن کمتر از نمونه کوچکتر می‌باشد.

بررسی اثر دما بر انرژی کرنشی

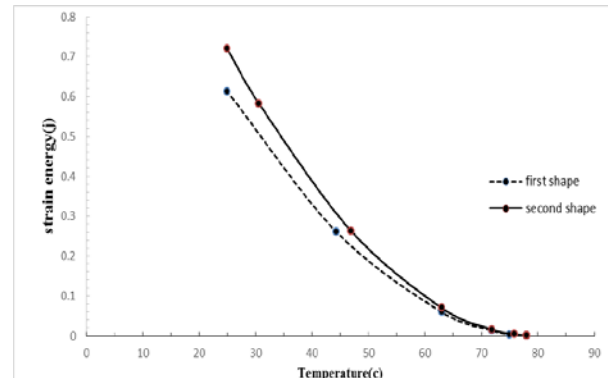
در ادامه بررسی اثر لایه آلومینیوم در یک طرف چند لایه، حداکثر انرژی کرنشی در هر حالت پایداری اندازه گیری شده است. میزان انرژی کرنشی در فرآیند سرد شدن و تغییرات آن، نشان‌دهنده اولویت هر یک از حالات پایداری است. به عبارتی حالت پایداری که میزان انرژی کرنشی کمتری دارد، در انتهای فرآیند سرد شدن دیده خواهد شد.

شکل (13) تغییرات انرژی کرنشی با تغییرات دما برای یک صفحه مربع به ابعاد 150 در 150 میلیمتر و با یک لایه آلومینیوم را در فرآیند سرد شدن از دمای 80 تا 20 درجه سانتی‌گراد و در دو حالت پایداری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بدلیل عدم تقارن هندسی بین حالات پایداری میزان انرژی کرنشی دو حالت متفاوت است. حالت پایداری دوم انرژی کرنشی بیشتری داشته، بنابراین پس از فرآیند سرد شدن اولویت ایجاد شکل حالت پایداری اول است که میزان انرژی کرنشی کمتری دارد.

منابع و مراجع

- [1] Potter, K. D., & Weaver, P. M. (2004). *A concept for the generation of out-of-plane distortion from tailored FRP laminates*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(12), 1353-1361.
- [2] Hyer MW. *Some observations on the cured shape of thin unsymmetric laminates*. *J Compos Mater* 1981;15:175-94.
- [3] Hyer MW. *The room-temperature shapes of four-layer unsymmetric cross-ply laminates*. *J Compos Mater* 1982;16(4):318-40.
- [4] Syta, A., Bowen, C. R., Kim, H. A., Rysak, A., & Litak, G. (2015). *Experimental analysis of the dynamical response of energy harvesting devices based on bistable laminated plates*. *Meccanica*, 50(8), 1961-1970.
- [5] Santer M, Pellegrino S. *Compliant multistable structural elements*. *Int J Solids Struct* 2008;45(24):6190-204.
- [6] Mattioni F, Weaver PM, Potter KD, Friswell MI. *Analysis of thermally induced multistable composite*. *Int J Solids Struct* 2008;45(2):657-75.
- [7] Mattioni F, Weaver PM, Friswell MI. *Multistable composite plates with piecewise variation of lay-up in the planform*. *Int J Solids Struct* 2009;46(1): 151-64.
- [8] Arrieta A, Kuder I, Waeber T, Ermanni P. *Variable stiffness characteristics of embeddable multi-stable composites*. *Compos Sci Technol* 2014;97:12-8.
- [9] Kuder, I. K., Arrieta, A. F., & Ermanni, P. (2015). *Design space of embeddable variable stiffness bi-stable elements for morphing applications*. *Composite Structures*, 122, 445-455.
- [10] Sousa, C. S., Camanho, P. P., & Suleman, A. (2013). *Analysis of multistable variable stiffness composite plates*. *Composite Structures*, 98, 34-46.
- [11] Cui, Y., & Santer, M. (2016). *Characterisation of tessellated bistable composite laminates*. *Composite Structures*, 137, 93-104.
- [12] Cui, Y., & Santer, M. (2015). *Highly multistable composite surfaces*. *Composite Structures*, 124, 44-54.
- [13] Dai F, Li H, Du S. *A multi-stable lattice structure and its snap through behavior among multiple states*. *Compos Struct* 2013;99:56-63.

شکل 12- تغییرات k_y با دما در حالت پایداری اول برای دو نسبت هندسی



شکل 13- تغییرات انرژی کرنشی نسبت به دما در دو حالت پایداری برای صفحه مربع به ابعاد 150 میلی‌متر در 150 میلی‌متر از دمای 80 تا 25 درجه سانتی‌گراد

پی‌نوشت

- 1- Bias
- 2- Compliant multistable structures
- 3- Vacuum Infusion Process

نتیجه‌گیری:

در این مقاله به بررسی اثر استفاده از یک لایه آلومینیوم در یک طرف صفحه دوپایداری پرداخته شده است. هدف از این مطالعه ایجاد عدم تقارن در دوپایداری با یک روش جدید بود که ضمن حفظ تقارن هندسی در سازه دوپایداری، بتوان دو حالت پایداری با انرژی کرنشی متفاوت ایجاد نمود تا روش مناسبی برای تغییر شکل در سازه ایجاد شود. همچنین با اضافه کردن لایه آلومینیوم ضمن پیوستگی اتصال بین بخش متقارن و نامتقارن و کاهش تمرکز تنش در مرز اتصال بخش متقارن و نامتقارن و پیشگیری از شکست، زمینه‌ای برای اتصال ابزارهای کنترلی نظیر پیزوالکتریک و امکان استفاده به عنوان انعکاس دهنده امواج نیز فراهم شود. در این تحقیق رفتار صفحات دوپایداری در حالت با و بدون حضور لایه آلومینیوم مورد بررسی و اثر متغییر هائی نظیر ابعاد بررسی شد. با توجه به ضخامت کم لایه فلز نسبت به مواد مرکب، شکل تغییر شکل، نسبت به حالت بدون لایه آلومینیوم تغییر چندانی نداشته و اثر آن بر میزان جابجائی نشان داده شده است. همچنین میزان انرژی کرنشی صفحه در حالت‌های مختلف بصورت نسبی و مستقیم نشان داده شده که نشان دهنده عدم تقارن در دوپایداری است. در مجموع نتایج تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه شده‌اند که تطابق خوبی باهم دارند. در مجموع می‌توان از صفحات فوق در بال‌های هوشمند با سطح کنترل پیوسته، در انعکاس دهنده‌های فضائی، جاذب‌های انرژی و سایر حوزه‌ها که نیاز به تغییر شکل‌های پیوسته و در راستاهای متفاوت دارند، استفاده کرد.

- [14] Dai F, Li H, Du S. *A multi-stable wavy skin based on bi-stable laminates*. Compos Part A: Appl Sci Manuf 2013;45:102–8.