



Experimental and Numerical Study of Static Behavior of Bi-stable Hybrid Composite Laminates Containing Three Metallic Strips in its Middle Layer

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Firouzian-Nejad A.¹ MSc,

Ghayour M.¹ PhD,

Ziaei-Rad S.^{*1} PhD

How to cite this article

Firouzian-Nejad A, Ghayour M, Ziaei-Rad S. Experimental and Numerical Study of Static Behavior of Bi-stable Hybrid Composite Laminates Containing Three Metallic Strips in its Middle Layer. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(3):721-730.

¹Dynamic System & Mechatronics Department, Mechanical Engineering Faculty, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

*Correspondence

Address: Dynamic System & Mechatronics Department, Mechanical Engineering Faculty, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
Phone: +98 (31) 33915244
Fax: +98 (31) 33912628
szrad@cc.iut.ac.ir

Article History

Received: November 10, 2018

Accepted: July 14, 2019

ePublished: March 01, 2020

ABSTRACT

This study introduces a new lay-ups of bi-stable hybrid composite laminate (BHCL) which consists of 90° unidirectional composite laminas in the upper and lower layers and metallic strips distributed along with the middle layer of 0° unidirectional composite laminas in the middle layer. The static characteristics of the laminates were investigated using the finite element (FE) method and were experimentally validated. The two stable configurations of laminate have identical curvatures with opposite signs. The curvature direction of the proposed BHCLs does not change during snap-through between stable states. This feature will give the engineers more freedom to design morphing structures with desired specifications. The effect of the width, thickness, and material properties of the strips and laminate side length on the static characteristics of the laminate were numerically investigated using the finite element method through Abaqus software. Several BHCLs with different materials, lay-up and dimension were fabricated for verification of the results. The curvatures, out of plane displacement, and the static snap-through load of the laminates were determined experimentally and compared with the results of the finite element method. A good qualitative and quantitative agreement was observed between the FE and the experimental results. The results show that it is possible to adjust residual curvature and load-carrying capability by changing the width, thickness, and material of the strips and laminate geometry.

Keywords Bi-Stable; Hybrid Composite Laminate; Metallic Strips; Major Curvatures; Snap-Through; Finite Element Simulation

CITATION LINKS

[1] Modelling and configuration control of wing-shaped bi-stable piezoelectric composites under aerodynamic ... [2] Analysing thermally induced macro-scale residual stresses in tailored morphing composite ... [3] Control of nonlinear vibration in bi-stable composite plates using fuzzy ... [4] Design and mechanical testing of a variable stiffness morphing trailing edge ... [5] Bistable prestressed symmetric ... [6] Some observations on the cured shape of thin ... [7] SMA-induced snap-through of unsymmetric fiber-reinforced composite ... [8] Active composites based on bistable ... [9] Modelling and testing of the snap-through process of bi-stable cross-ply ... [10] Dynamic responses of cross-ply bi-stable composite laminates with piezoelectric ... [11] Dynamic analysis of bi-stable composite ... [12] A modified shape function for calculating stable configurations and natural frequencies of bi-stable 0/90°T composite ... [13] Vibration analysis of bi-stable composite cross-ply laminates using refined shape ... [14] Dynamics and control of twisting bi-stable ... [15] Thermally-induced deformation behavior of unsymmetric ... [16] The room-temperature shapes of four-layer unsymmetric ... [17] Multistable composite plates with piecewise variation of lay-up in the ... [18] The effect of moisture ingress on through-thickness residual stresses in unsymmetric ... [19] Morphing high-temperature composite plates utilizing thermal ... [20] Thermal Response and Stability Characteristics of Bi-stable Composite Laminates by Considering Temperature Dependent Material ... [21] Temperature-curvature relationships in asymmetric angle ply laminates by considering the effects of resin layers and temperature ... [22] Non-linear analysis of the curved shapes of unsymmetric laminates accounting for ... [23] Curvature tailoring of unsymmetric laminates with an initial ... [24] Analysis of unsymmetric CFRP-metal hybrid laminates for use in ... [25] Characterization of bi-stable pure and hybrid composite laminates-An experimental investigation of the static and dynamic ... [26] Behaviour analysis of a bistable twisting hybrid composite plate with an external metal layer and effecting factors on ... [27] Bi-stable hybrid composite laminates containing metallic strips: an experimental and ... [28] Cured shape and snap-through of bistable twisting ... [29] Bistable hybrid symmetric ...

مطالعه تجربی و عددی رفتار استاتیکی ورق‌های مرکب دوپایای متشکل از سه نوار فلزی در لایه میانی

احمد فیروزیان نژاد MSc

گروه سیستم‌های دینامیکی و مکترونیکی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

مصطفی غیور PhD

گروه سیستم‌های دینامیکی و مکترونیکی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

سعید ضیایی‌راد PhD*

گروه سیستم‌های دینامیکی و مکترونیکی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

در این پژوهش، چینش جدیدی از ورق‌های مرکب هیبریدی دوپایا متشکل از الیاف کربن تک‌جهته با زاویه ۹۰ درجه در قسمت بالایی و پایینی ورق و نوارهای فلزی و الیاف کربن تک‌جهته با زاویه صفر در قسمت میانی معرفی شده است. رفتار استاتیکی ورق با روش اجزای محدود و به‌صورت تجربی، مطالعه و بررسی شده است. این سازه برخلاف ورق‌های مرکب دوپایای معمول دارای دو حالت پایدار مشابه و نیروی پرش یکسان است. راستای انحنای اصلی ورق در هر دو حالت پایدار، یکسان ولی در جهت عکس یکدیگر است و هنگام تغییر شکل بین دو حالت پایدار تغییر نمی‌کند. این ویژگی در ساخت سازه‌های مورفینگ می‌تواند جالب و پرکاربرد باشد. در روش اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس اثر پارامترهای مختلف مانند عرض و خواص مکانیکی نوارها، ضخامت لایه‌ها و طول جانبی بر رفتار استاتیکی ورق مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از روش اجزای محدود، تعدادی ورق با چینش و مشخصات هندسی مختلف ساخته شده است. مقادیر انحنای اصلی، جابجایی خارج از صفحه و نیروی پرش ناگهانی به‌صورت تجربی، اندازه‌گیری و با نتایج روش اجزای محدود مقایسه و سازگاری مناسبی مشاهده شده است. نتایج به‌دست‌آمده، نشان می‌دهد که می‌توان انحنای اصلی و قابلیت تحمل‌پذیری بار این سازه‌ها را بر اساس نوع کاربرد آنها با تغییر پارامترهای طراحی مانند عرض یا جنس نوارها، ضخامت لایه‌ها به میزان دلخواه تغییر داد.

کلیدواژه‌ها: دوپایا، ورق مرکب هیبریدی، نوار فلزی، انحنای اصلی، پرش ناگهانی، شبیه‌سازی اجزای محدود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۲۳

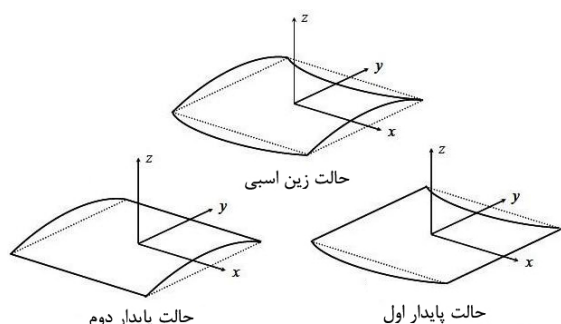
*نویسنده مسئول: szrad@cc.iut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه استفاده از سازه‌های مورفینگ (Morphing) و گسترده‌شونده به‌عنوان راه حلی برای عملکرد بهتر سازه‌های فضایی در نظر گرفته می‌شوند. هندسه و خواص این سازه‌ها با توجه به شرایط محیطی و بار اعمالی، متفاوت بوده و برحسب نیاز تغییر می‌کند[1]. طرح‌های فعلی استفاده‌شده در سازه‌های مورفینگ، معمولاً شامل مجموعه پیچیده‌ای از اجزای مکانیکی به‌هم‌متصل‌شده و محرک‌های مختلف است[2]. سازه‌های مرکب

دوپایا به‌دلیل داشتن دو حالت پایدار، عدم نیاز به هر گونه منبع دایم انرژی برای ماندن در هر کدام از حالت‌های پایدار، نسبت استحکام به وزن بالا و سادگی می‌توانند جایگزین مناسبی برای طرح‌های مرسوم در سازه‌های مورفینگ باشند[3, 4].

روش‌های مختلفی مانند اعمال پیش‌بار مکانیکی به بعضی از لایه‌های الیاف پیش‌آغشته[5] یا اعمال تنش‌های پسماند حرارتی برای ایجاد حالت دوپایا در سازه‌های مرکب وجود دارد. سازه‌های مرکب با چینش غیرممتقارن حول صفحه مرکزی، چنانچه تحت بارهای حرارتی ناشی از تغییرات دما در طول فرآیند پخت قرار گیرند، به علت اختلاف خواص مکانیکی و ضرایب انبساط حرارتی در لایه‌های مختلف، تنش‌های پسماند در آنها ایجاد می‌شود. این تنش‌ها در نهایت حالت‌های پایدار ورق در دمای محیط را ایجاد می‌کند (شکل ۱).



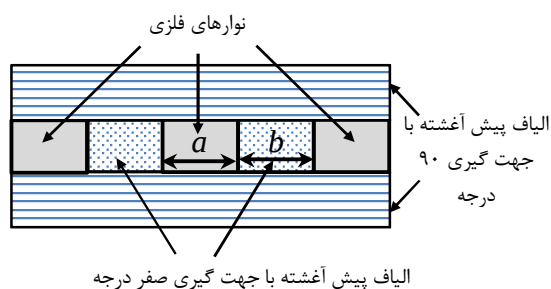
شکل ۱) حالت‌های پایدار ورق دوپایا با چینش $T_{[0^\circ n/90^\circ n]}$ یا $T_{[0^\circ n/90^\circ n/90^\circ n]}$

ورق با چینش $T_{[0^\circ n/90^\circ n]}$ در هر حالت پایدار یک انحنای طولی K_{xx} و یک انحنای عرضی K_{yy} دارد که یکی از آنها مقدار غالب بوده (که انحنای اصلی نامیده می‌شود) و دیگری نزدیک به صفر است. راستای انحنای اصلی در حالت پایدار اول بر راستای انحنای اصلی ورق در حالت پایدار دوم عمود و با علامت عکس است[6]. ورق می‌تواند با اعمال نیرو از طریق بارهای حرارتی، مواد پیزوالکتریک، آلیاژهای حافظه‌دار و ماکروفاایبرهای کامپوزیت پیزوالکتریک، از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر تغییر شکل دهد. این پدیده غیرخطی پرش ناگهانی نامیده می‌شود[7-10]. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه پاسخ استاتیکی، دینامیکی و ارتعاشی سازه‌های مرکب دوپایا انجام شده است[11-14] و محققان بسیاری اثر پارامترهایی چون ابعاد هندسی ورق[15]، ضخامت لایه‌ها[16]، چینش لایه‌ها[17]، جذب رطوبت[18]، گرادیان دما[19]، وابستگی دمایی خواص مکانیکی[20]، لغزش بین لایه‌ها[22] و انحنای اولیه صفحه ابزار[23] را بر رفتار استاتیکی ورق مطالعه نمودند، اما به‌دلیل محدودیت‌هایی چون تغییر راستای انحنا هنگام تغییر شکل بین دو حالت پایدار، ظرفیت تحمل بار کم و متأثر بودن از عوامل محیطی چون رطوبت و دما، همچنان مشکلات زیادی در کاربرد عملی این سازه‌ها مشاهده می‌شود. به‌منظور کاهش اثرات جذب رطوبت، افزایش جابجایی خارج از صفحه و ظرفیت تحمل بار، ورق‌های مرکب هیبریدی دوپایا

برای پرش ناگهانی بررسی شده است. بدین منظور نمونه‌های مختلفی با مشخصات مکانیکی، ابعاد هندسی و چینش‌های متفاوت در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شده است. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود، چندین نمونه ورق مرکب هیبریدی دوپایا ساخته شد و آزمایش‌های تجربی (اندازه‌گیری انحنای ورق و نیروی پرش ناگهانی در حالت استاتیکی) روی آنها انجام شده است.

۲- ورق مرکب هیبریدی دوپایا متشکل از نوار در لایه میانی

در این مقاله چینش جدیدی از ورق‌های مرکب هیبریدی دوپایا معرفی شده است. این چینش در حالت کلی از سه لایه بالایی، میانی و پایینی تشکیل شده است (شکل ۴). جهت‌گیری الیاف تک‌جهته در لایه‌های بالایی و پایینی ۹۰ درجه است. در لایه میانی نیز، نوارها با تعداد دلخواه و فاصله‌های یکسان در بین الیاف تک‌جهته با جهت‌گیری صفر درجه قرار گرفته‌اند. نوارهای فلزی باید از موادی مانند آلومینیوم، مس و فولاد انتخاب شوند که ضریب انبساط حرارتی بزرگ‌تری در قیاس با الیاف کربن تک‌جهته با زاویه صفر دارند. به‌منظور سادگی در بیان چینش و مشخصات هندسی ورق از نام‌گذاری $[90_m/aMat^k - bCF0_n^{k-1}/90_m]_T$ استفاده شده که پارامترهای آن در جدول ۱ شرح داده شده است.



شکل ۴) مقطع عرضی یک ورق مرکب هیبریدی متشکل از ۳ نوار فلزی

جدول ۱) پارامترهای استفاده‌شده در بیان چینش ورق‌های مرکب هیبریدی دوپایا متشکل از نوارهای فلزی

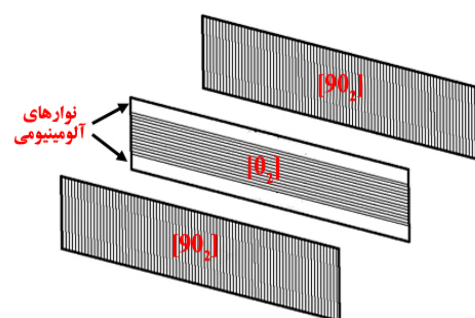
نماد	توضیحات
m	تعداد لایه‌های تک‌جهته ۹۰ درجه در طول ضخامت ورق
n	تعداد لایه‌های تک‌جهته صفر درجه در طول ضخامت ورق
a	عرض نوارهای فلزی
b	عرض نوارهای مرکب تک‌جهته صفر درجه در لایه میانی
k	تعداد نوارهای فلزی در عرض ورق
Mat	مخفف جنس نوار (آلومینیوم AL و فولاد ST)
$CF0$	الیاف کربن تک‌جهته با زاویه صفر درجه

در این نوع چینش پس از سردکردن ورق از دمای پخت به دمای محیط، به‌دلیل اختلاف زیاد ضرایب انبساط حرارتی لایه‌های مرکب صفر درجه و نوارهای فلزی، تنش‌های پسماند حرارتی در ورق ایجاد می‌شود. تنش‌های پسماند به‌گونه‌ای است که نوارهای فلزی تحت کشش و الیاف با جهت‌گیری صفر درجه تحت فشار قرار می‌گیرند.

به‌عنوان جایگزین مناسبی برای ورق‌های مرکب دوپایای معمول پیشنهاد شده است [24-27]. در این راستا، دای و همکاران یک ورق مرکب دوپایای هیبریدی با یک لایه ایزوتروپیک بیرونی را طراحی کردند که برخلاف ورق‌های مرکب معمول با چینش غیرمتقارن و با هیبریدی با یک لایه فلزی درونی، علامت انحنای اصلی در هر دو حالت پایدار یکسان بود. شکل نهایی ورق نیز مطابق شکل ۲ به‌صورت یک شکل سهمی‌وار یکتا و یا دو شکل استوانه‌ای پیچ خورده بود. آنها به‌طور خاص یک ورق با چینش $[0_n/90_m]_T$ را با روش‌های اجزای محدود، تجربی و نظری بررسی و مشاهده کردند. آنها اثرات طول جانبی، ضخامت و ضریب انبساط لایه فلزی را بر انحنای ورق بررسی نمودند [28]. لی و همکاران نوع جدیدی از ورق‌های دوپایای هیبریدی با چینش متقارن متشکل از دو نوار آلومینیومی را طراحی نمودند (شکل ۳). آنها با ارایه یک مدل تحلیلی و معرفی توابع شکل جدید، حالت‌های پایدار ورق را پیش‌بینی و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس و آزمایش‌های تجربی مقایسه نمودند [29].



شکل ۲) حالت‌های پایدار ورق مرکب دوپایا با چینش $[0_n/90_m]_T$ [28]



شکل ۳) چینش ورق مرکب هیبریدی متشکل از دو نوار فلزی

در این مقاله نیز با الهام از کارهای انجام‌شده پیشین، چینش جدیدی از ورق‌های مرکب هیبریدی دوپایا متشکل از سه نوار فلزی در لایه میانی معرفی شد و اثر پارامترهای مختلف مانند خواص مکانیکی (ضریب انبساط حرارتی و مدول کشسانی)، عرض، ضخامت و تعداد نوارهای فلزی و همچنین طول جانبی و ضخامت کلی ورق بر انحنای، بیشینه جابجایی خارج از صفحه و نیروی استاتیکی لازم

انتگرال‌گیری کاهش یافته هستند. همچنین گزینه مربوط به غیرخطی بودن تغییرات هندسه برای بررسی جابجایی‌های بزرگ مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت با استفاده از تحلیل استاتیک و تعریف گام‌های زیر، حالت‌های پایدار ورق به‌دست آمده‌اند:

- در گام اول، دمای اولیه 180°C به ورق اعمال می‌شود، همچنین برای همگرایی به یکی از حالت‌های پایدار، در 5°C ابتدایی کاهش دما (یعنی از 180°C تا 175°C) نیروی کوچکی در جهت مناسب (+Z) یا (-Z) به چهار گوشه ورق اعمال می‌شود.

- در گام دوم، نیروهای کوچک اعمال‌شده در گام نخست برداشته شده و کاهش دما از 175°C تا 25°C ادامه پیدا می‌کند. در پایان این گام، ورق به یکی از حالت‌های پایدار (وابسته به جهت نیروی اعمال‌شده در گام اول) همگرا می‌شود.

لازم به ذکر است که در دو گام بالا، نقطه مرکزی ورق مقید و شرایط مرزی زیر بر آن اعمال شده است:

$$u = v = w = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند پرش ناگهانی می‌بایست ابتدا یکی از حالت‌های پایدار ورق مدل‌سازی شود و پس از آن از گام‌های زیر استفاده شود:

- در گام اول، چهار نیروی متمرکز در راستای خلاف جابجایی خارج از صفحه به چهار گوشه ورق اعمال می‌شود. مقدار این نیرو به‌آرامی در گام‌های کوچک افزایش می‌یابد تا پدیده پرش ناگهانی رخ دهد. در این مرحله برای مشاهده پدیده پرش ناگهانی در نرم‌افزار آباکوس باید یک ضریب استهلاک مصنوعی به سازه اعمال نمود. ضریب اعمالی در این مطالعه برابر 2×10^{-4} در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است بارگذاری انجام‌شده از لحاظ استاتیکی مشابه حالتی است که یک نیروی متمرکز به نقطه میانی ورق اعمال شود، در حالی که جابجایی‌های خارج از صفحه چهار گوشه ورق بسته هستند.

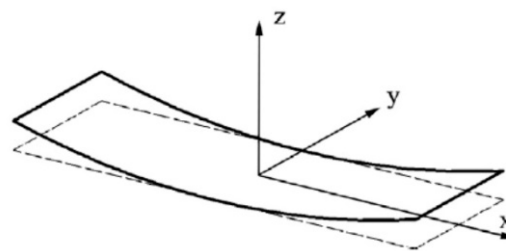
- در گام دوم، به‌منظور اینکه اطمینان حاصل شود که در گام قبل پرش ناگهانی اتفاق افتاده و حالت جدید ورق پایدار است، نیروهای محرک اعمالی را حذف می‌کنیم؛ در صورتی که شکل جدید ورق پایدار باشد، ورق تغییر شکل نخواهد داد. شکل ورق در پایان این مرحله، حالت دوم پایداری نامیده می‌شود.

- در گام سوم، همانند گام اول به‌منظور انجام پرش ناگهانی در جهت عکس، چهار نیروی متمرکز در جهت عکس نیروهای اعمال‌شده در گام اول، به چهار گوشه ورق اعمال می‌شود. مجدداً مقدار نیروها را به‌آرامی افزایش داده تا پرش ناگهانی در جهت عکس رخ دهد. در این مرحله نیز باید ضریب استهلاک مصنوعی به سازه اعمال شود.

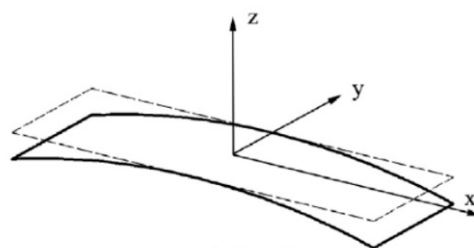
- در گام چهارم نیز همانند گام دوم به‌منظور اطمینان حاصل کردن از اینکه شکل جدید ورق پایدار است، نیروهای اعمالی را حذف کرده و در صورتی که ورق تغییر شکل ندهد، شکل جدید ورق پایدار خواهد بود.

لازم به ذکر است که به‌دلیل تساوی ضخامت لایه‌ها، ورق دو حالت پایدار مشابه با انحناها و نیروی پرش ناگهانی مساوی خواهد بود.

تنش‌های پسماند در نهایت منجر به ایجاد حالت‌های پایدار و جابجایی خارج از صفحه در ورق می‌شود. ورق‌های مرکب هیبریدی دوپایا متشکل از نوار، مشابه ورق‌های مرکب دوپایای معمولی و یا هیبریدی مرسوم (متشکل از یک لایه فلزی یکپارچه در لایه میانی و یا بیرونی) دارای دو شکل پایدار استوانه‌ای است (شکل ۵)؛ با این تفاوت که راستای محور مولد آن در هر دو حالت پایدار یکسان بوده و تنها علامت آن تغییر می‌کند، از این رو حالت‌های پایدار آن قابلیت بیشتری برای استفاده در کاربردهای عملی به‌ویژه بال‌های مورفینگ دارند.



حالت پایدار اول



حالت پایدار دوم

شکل ۵) حالت‌های پایدار ورق مرکب هیبریدی دوپایا متشکل از نوار در لایه میانی

۳- شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس

به‌منظور تسهیل در طراحی مهندسی ورق معرفی‌شده، اثر پارامترهای مختلف مانند خواص مکانیکی (ضریب انبساط حرارتی و مدول کشسانی)، عرض، ضخامت و تعداد نوارهای فلزی و همچنین طول جانبی و ضخامت کلی ورق بر انحناهای اصلی K_{xx} ، بیشینه جابجایی خارج از صفحه W_c و نیروی پرش ناگهانی F_{cr} ورق مربعی متشکل از سه نوار با چینش $[90_m/aMat^3 - bCF0_n^2/90_m]_T$ بررسی شده است. بدین منظور نمونه‌های مختلفی با مشخصات مکانیکی، ابعاد هندسی و چینش‌های مختلف در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شده است.

به‌منظور مقایسه با کارهای انجام‌شده پیشین، جنس لایه‌های مرکب از کربن- اپوکسی $T300/5208$ فرض شده که مشخصات مکانیکی آن در جدول ۲ آرایه شده است. برای حل مساله، شبکه‌بندی 20×20 و در مجموع ۴۰۰ المان انتخاب شده است. المان‌های انتخاب‌شده از نوع پوسته متداول مربعی ۸ نقطه‌ای که هر نقطه آن ۶ درجه آزادی (۳ درجه آزادی جابجایی و ۳ درجه آزادی چرخش) دارند، با

از این رو نتایج به‌دست‌آمده تنها برای حالت‌های پایدار اول آورده شده است.

جدول ۲) مشخصات مکانیکی مواد استفاده شده [20]

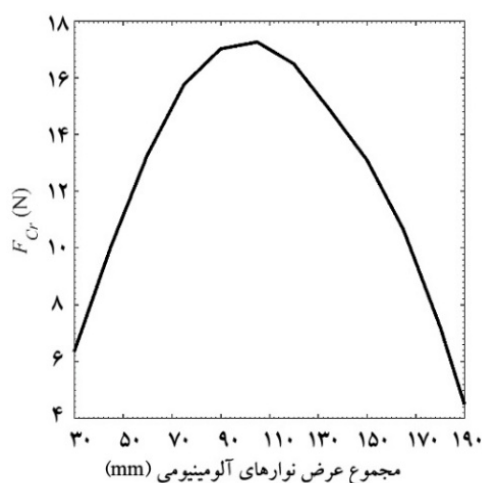
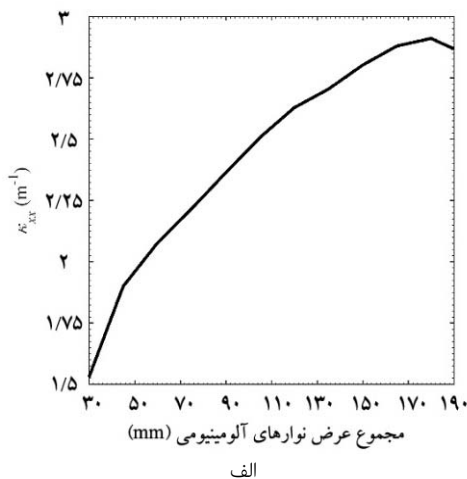
ماده	مشخصه	مقدار
T۳۰۰/۵۲۰۸	مدول کشسان طولی (GPa)	۱۴۶۹۵
	مدول کشسان عرضی (GPa)	۱۰/۷۰۲
	مدول برشی (GPa)	۶/۹۷۷
	ضریب انبساط حرارتی طولی ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$0/028 \times 10^{-6}$
	ضریب انبساط حرارتی عرضی ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$2/760 \times 10^{-6}$
	ضریب پواسون طولی	۰/۳
آلومینیوم ۲۰۲۴	ضریب پواسون عرضی	۰/۲۱۹
	ضخامت هر لایه (mm)	۰/۱۲۵
	مدول کشسان (GPa)	۷۹
فولاد	ضریب پواسون	۰/۳
	ضریب انبساط حرارتی ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$1/88 \times 10^{-6}$
	مدول کشسان (GPa)	۲۰۰
	ضریب پواسون	۰/۳
	ضریب انبساط حرارتی ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$1/7 \times 10^{-6}$

۴- نتایج روش اجزای محدود

۴-۱- اثر عرض کلی نوارها

اثر عرض کلی نوارها بر ورق مربعی با طول جانبی ۲۵۰mm و چینش $[90_2/aAL^3 - \frac{250-3a}{2}CF0_2/90_2]_T$ (با مشخصات مکانیکی ارایه‌شده در جدول ۲) با تغییر عرض نوارهای آلومینیومی a از ۱۰ تا ۷۰ با گام ۵mm، بررسی و نتایج آن در نمودار ۱ نشان داده شده است. در تحلیل انجام‌شده، ضخامت لایه‌ها یکسان و ضخامت کلی برابر ۷۵mm/۰ فرض شده است. چنانچه مجموع عرض نوارهای فلزی صفر یا برابر طول جانبی ورق باشد، بدیهی است که ورق حالت دوپایا نداشته و بعد از فرآیند پخت به‌صورت تخت باقی خواهند ماند.

همان گونه که مشاهده می‌شود، رابطه انحنا طولی و نیروی پرش ناگهانی با مجموع عرض نوارهای فلزی به‌صورت سهموی بوده و با افزایش عرض نوارهای فلزی، ابتدا افزایش و پس از رسیدن به مقدار بیشینه مجدداً کاهش می‌یابد. البته باید در نظر داشت در این سازه‌ها، بیشینه نیروی پرش ناگهانی توأم با بیشینه انحنا اصلی نیست. بیشینه انحنا اصلی ورق برابر $2/9\text{mm}^{-1}$ بوده و به‌ازای مجموع عرض نوار ۱۸۰mm اتفاق می‌افتد، در حالی که بیشینه نیروی پرش ناگهانی و مجموع عرض نوارهای متناظر با آن به‌ترتیب برابر ۱۷/۳N و ۱۰۵mm است. بیشینه نیروی پرش ناگهانی در این سازه‌ها در مقایسه با بیشینه انحنا اصلی به‌ازای مجموع عرض نوارهای کمتری رخ می‌دهد. این رفتار به‌دلیل خواص مکانیکی بهتر الیاف کربن تک‌جهته با زاویه صفر نسبت به نوارهای آلومینیومی است؛ بنابراین کاهش عرض نوارهای آلومینیومی و متعاقباً افزایش عرض نوارهای مرکب با زاویه صفر درجه منجر به افزایش قابلیت تحمل‌پذیری نیرو در این سازه‌ها می‌شود.

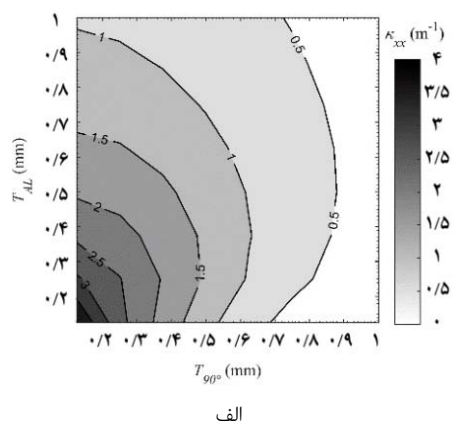


ب
نمودار ۱) اثر مجموع عرض نوارهای آلومینیومی بر انحنا اصلی (الف) و نیروی پرش ناگهانی مرکب هیبریدی متشکل از ۳ نوار آلومینیومی (ب)

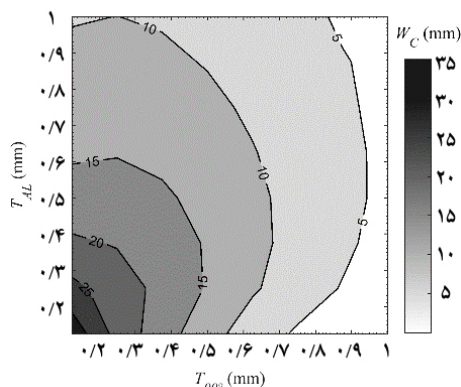
۴-۲- اثر طول جانبی ورق

اثر طول جانبی L بر انحنا اصلی و نیروی پرش ناگهانی ورق مربعی متشکل از سه نوار آلومینیومی $[90_2/\frac{0.48L}{3}AL^3 - \frac{0.52L}{2}CF0_2/90_2]_T$ با تغییر طول جانبی از ۱۰۰ تا ۴۵۰ با گام ۲۵mm شد و نتایج آن در نمودار ۲ نشان داده شده است. در تحلیل انجام‌شده نسبت مجموع عرض نوارهای آلومینیومی به‌کاررفته‌شده به طول جانبی ورق در تمامی نمونه‌ها برابر ۴۸/۰ در نظر گرفته شده است. برخلاف ورق مرکب دوپایای معمول که با افزایش طول جانبی، میزان انحنا به‌صورت مجانبی به مقداری ثابت همگرا می‌شود، در این نوع ورق‌ها با افزایش طول جانبی، مقدار انحنا ابتدا با نرخ بالایی افزایش و پس از رسیدن به مقدار بیشینه $2/7\text{mm}^{-1}$ با نرخ کمتری کاهش می‌یابد. طول جانبی متناظر با بیشینه انحنا در نمونه مورد مطالعه ۱۵۰mm است. نیروی پرش ناگهانی نیز با افزایش طول جانبی ابتدا با نرخ زیادی افزایش و در طول جانبی ۲۷۵mm به مقدار بیشینه ۱۶/۱۴N می‌رسد، سپس با شیب کمتری کاهش و در نهایت به یک مقدار ثابت همگرا می‌شود.

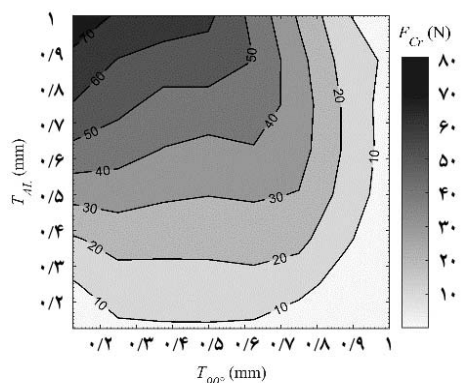
افزایش ضخامت لایه‌های ۹۰ درجه، تغییرات نیروی پرش ناگهانی با تغییرات ضخامت نوارهای آلومینیومی کمتر می‌شود. محدوده ضخامت متناظر با بیشینه انحنای طولی متفاوت از محدوده ضخامت متناظر با بیشینه نیروی پرش ناگهانی است. بیشینه نیروی پرش ناگهانی ۷۵/۶۴ N به ازای $T_{90^\circ}=0/120\text{mm}$ و $T_{AL}=1\text{mm}$ اتفاق می‌افتد، در حالی که بیشینه انحنای طولی و جابجایی خارج از صفحه گوشه ورق به ترتیب برابر $4/03\text{m}^{-1}$ و $33/20\text{mm}$ بوده و به ازای کمترین ضخامت ممکن یعنی $T_{90^\circ}=T_{AL}=0/120\text{mm}$ اتفاق می‌افتد.



الف

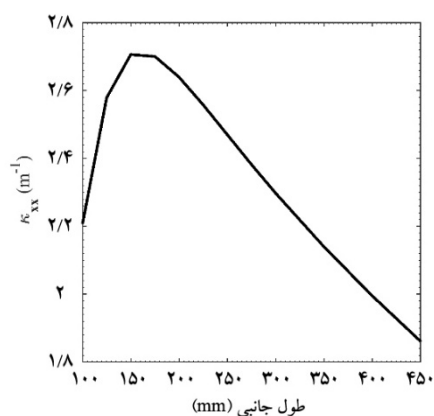


ب

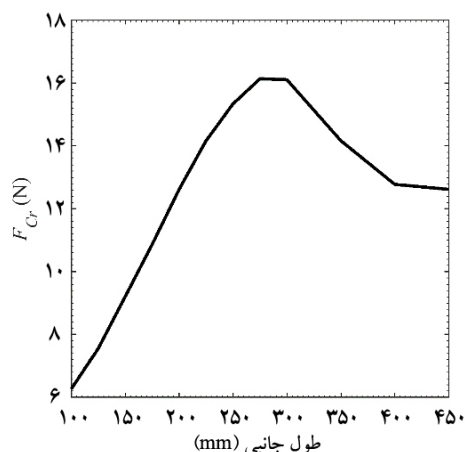


ج

نمودار ۳ اثر ضخامت لایه‌ها بر انحنای اصلی (الف)، بیشینه جابجایی خارج از صفحه (ب) و نیروی پرش ناگهانی ورق (ج)



الف



ب

نمودار ۲ اثر طول جانبی بر انحنای اصلی (الف) و نیروی پرش ناگهانی ورق مرکب هیبریدی متشکل از ۳ نوار آلومینیومی (ب)

۳-۴- اثر ضخامت لایه‌ها

اثر تغییرات ضخامت بر رفتار استاتیکی (انحنای اصلی، بیشینه جابجایی خارج از صفحه و نیروی استاتیکی لازم برای پرش ناگهانی) ورق مربعی با طول جانبی ۲۵۰ mm متشکل از سه نوار آلومینیومی با چینش $[90_n/40AL^3 - 65CF0_m^2/90_n]_T$ بررسی و در نمودار ۳ نشان داده شده است. در عمل، ضخامت ورق با تغییر تعداد لایه‌های مرکب قابل تنظیم است. لذا مطالعه اثر تغییر ضخامت ورق با تغییر تعداد لایه‌های صفر درجه (در لایه میانی) و لایه‌های ۹۰ درجه (در لایه‌های بالایی و پایینی) از ۱ تا ۸ انجام شده است. در تحلیل انجام شده، ضخامت هر لایه مرکب $0/120\text{mm}$ و ضخامت نوارهای آلومینیومی (T_{AL}) برابر با ضخامت کلی نوارهای مرکب صفر درجه (T_{90°) در لایه میانی در نظر گرفته شده است. همان گونه که در نمودارهای ۳-الف و ب مشاهده می‌شود، تغییرات انحنای طولی و جابجایی خارج از صفحه گوشه ورق با ضخامت لایه‌ها مشابه یکدیگر هستند و با کاهش ضخامت لایه‌ها، میزان آنها افزایش می‌یابد؛ البته وابستگی آنها به ضخامت لایه‌های مرکب ۹۰ درجه (T_{90°) بیشتر از ضخامت نوارهای آلومینیومی است. تغییرات نیروی پرش ناگهانی نیز بیشتر وابسته به ضخامت نوارهای آلومینیومی است. اگرچه با

همان گونه که مشاهده می‌شود، تغییرات انحنای طولی با ضریب انبساط حرارتی و مدول کشسانی حالت مجانبی داشته به‌گونه‌ای که برای مدول کشسانی بیشتر از ۷۵GPa، تغییرات انحنای طولی بیشتر وابسته به ضریب انبساط حرارتی است، تغییرات بیشینه جابجایی خارج از صفحه و نیروی پرش ناگهانی مشابه تغییرات انحنای اصلی است و مقدار آنها با افزایش ضریب انبساط حرارتی به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد. بیشینه انحنای طولی ($3/96\text{mm}^{-1}$) و جابجایی خارج از صفحه ($33/2\text{mm}$) به‌ازای $E=160\text{GPa}$ و $\alpha=30 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ و $E=200\text{GPa}$ و $\alpha=30 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ رخ می‌دهد.

۵- آزمون‌های تجربی

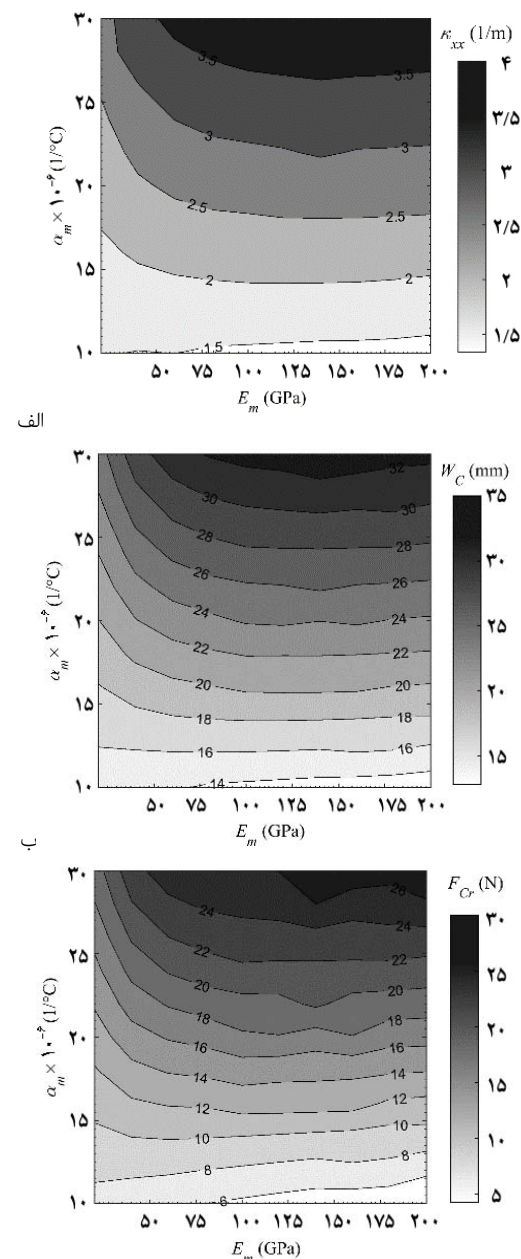
۱-۵ ساخت ورق

نتایج حاصل از روش اجزای محدود با نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی اعتبارسنجی شده‌اند. به همین منظور، چندین نمونه ورق مرکب هیبریدی متشکل از الیاف کربن تک‌جهته پیش‌آغشته $T_{300}/5208$ و نوارهای آلومینیومی ۲۰۲۴ و فولادی با چینش‌های مختلف و مشخصات هندسی مطابق جدول ۳ در آزمایشگاه مواد مرکب دانشگاه بث (Bath) ساخته شده است. برای ساخت ورق، ابتدا لایه‌ها با ابعاد دلخواه از الیاف پیش‌آغشته تک‌جهته یا ورق فلزی بریده شده و پس از آن با آرایش و زوایای دلخواه روی یکدیگر چیده می‌شوند. پس از اتمام فرآیند لایه چینی و آماده‌سازی صفحه ابزار، نمونه‌ها در یک کیسه خلأ از طریق یک پمپ مخصوص تحت خلأ قرار می‌گیرند. پس از تکمیل اقدامات فوق، عملیات پخت رزین، طبق دستورالعمل سازنده رزین در اتوکلاو صنعتی انجام می‌شود (شکل ۶). پس از اتمام فرآیند پخت و سردکردن تا دمای محیط، ورق دارای دو حالت استوانه‌ای پایدار خواهد بود. در شکل ۷، حالت‌های پایدار یک نمونه ورق ساخته‌شده با چینش $[90_2/40AL^3 - 65CF0_2^2/90_2]_T$ نشان داده شده است. نمونه‌های ۱ تا ۳ به‌منظور بررسی اثر طول جانبی ورق، نمونه‌های ۲، ۴ و ۵ به‌منظور بررسی اثر عرض نوارهای آلومینیومی و نمونه‌های ۲، ۶ و ۷ به‌منظور بررسی اثر ضخامت لایه‌ها و نمونه‌های ۲ و ۸ به‌منظور بررسی اثر جنس نوارها ساخته و مطالعه شده‌اند.

جدول (۳) مشخصات ورق‌های ساخته‌شده

نمونه	چینش	طول جانبی (mm)	ضخامت (mm)
۱	$[90_2/24AL^3 - 39CF0_2^2/90_2]_T$	۱۵۰	۰/۷۵
۲	$[90_2/40AL^3 - 65CF0_2^2/90_2]_T$	۲۵۰	۰/۷۵
۳	$[90_2/56AL^3 - 91CF0_2^2/90_2]_T$	۳۵۰	۰/۷۵
۴	$[90_2/20AL^3 - 95CF0_2^2/90_2]_T$	۲۵۰	۰/۷۵
۵	$[90_2/60AL^3 - 35CF0_2^2/90_2]_T$	۲۵۰	۰/۷۵
۶	$[90/40AL^3 - 65CF0_2^2/90]_T$	۲۵۰	۰/۳۷۵
۷	$[90/40AL^3 - 65CF0_4^2/90]_T$	۲۵۰	۰/۷۵
۸	$[90_2/40ST^3 - 65CF0_2^2/90_2]_T$	۲۵۰	۰/۷۵

اثرات ضریب انبساط حرارتی و مدول کشسانی نوار بر رفتار استاتیکی ورق مربعی با طول جانبی ۲۵۰mm و ضخامت کلی ۰/۷۵mm و چینش $[90_2/40mat^3 - 65CF0_2^2/90_2]_T$ متشکل از سه نوار با عرض ۴۰mm بررسی شده است. ضخامت نوارها برابر با ضخامت کلی نوارهای مرکب صفر درجه در لایه میانی در نظر گرفته شده است. در تحلیل انجام‌شده، ضریب انبساط حرارتی از 10×10^{-6} تا $30 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ و مدول کشسانی از ۲۰ تا ۲۰۰ با گام ۲۰GPa تغییر می‌کند که طیف وسیعی از مواد مختلف مانند فولاد، آلومینیوم، برنج، مس و غیره را شامل می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده در نمودار ۴ نشان داده شده است.



نمودار (۴) اثر خواص مکانیکی نوارهای فلزی بر انحنای اصلی (الف)، بیشینه جابجایی خارج از صفحه (ب) و نیروی پرش ناگهانی ورق (ج)

در روش تجربی کمتر از مقادیر به دست آمده از روش اجزای محدود است که می‌تواند ناشی از اثرات جذب رطوبت و یا لغزش بین لایه‌ها باشد که منجر به کاهش جابجایی خارج از صفحه، انحنای ورق و نیروی پرش ناگهانی می‌شود [18]. خطای نسبی بین هر دو روش در درون پیرامون زیر مقادیر روش اجزای محدود ارایه شده است. حداکثر خطای روش اجزای محدود برای جابجایی خارج از صفحه و انحنای اصلی به ترتیب برابر ۱۰ و ۱۰/۹٪ است. همان طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، میزان خطا با افزایش طول جانبی ورق، عرض و ضخامت نوارها افزایش یافته که می‌تواند ناشی از افزایش لغزش بین نوارهای آلومینیومی و لایه‌های مرکب باشد.



ب



الف



د



ج

شکل ۶) فرآیند ساخت ورق‌های مرکب هیبریدی دوپایا متشکل از نوار فلزی؛ (الف) انجام لایه چینی، (ب) قراردادن پوشش‌های جداکننده، (ج) آماده‌سازی کیسه خلأ، (د) قراردادن در دستگاه اتوکلاو

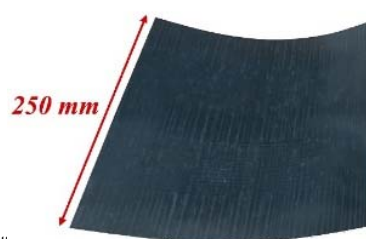


الف



ب

شکل ۸) آزمایش‌های تجربی انجام شده برای اندازه‌گیری جابجایی خارج از صفحه (الف) و نیروی پرش ناگهانی (ب)



الف



ب

شکل ۷) حالت‌های پایدار ورق با چینش $[90_2/40AL^3 - 65CF0_2^2/90_2]_T$ ؛ (الف) حالت پایدار اول و (ب) حالت پایدار دوم

جدول ۴) نتایج حاصل از آزمون تجربی و مقایسه با نتایج حاصل از آباکوس

نمونه	آزمون عملی						اجزای محدود (خطای نسبی)		
	F_{Cr} (N)	K_{xx} (m^{-1})	W_c (mm)	F_{Cr} (N)	K_{xx} (m^{-1})	W_c (mm)	F_{Cr} (N)	K_{xx} (m^{-1})	W_c (mm)
۱	۹/۲۱ (۹/۶)	۲/۷۱ (۷/۵)	۹/۶۷ (۶/۸)	۸/۴	۲/۵۲	۹/۰۵	۹/۲۱ (۹/۶)	۲/۷۱ (۷/۵)	۹/۶۷ (۶/۸)
۲	۱۵/۳۴ (۱۰/۲)	۲/۵۲ (۸/۶)	۲۲/۴۶ (۷/۵)	۱۳/۹۲	۲/۳۲	۲۰/۹	۱۵/۳۴ (۱۰/۲)	۲/۵۲ (۸/۶)	۲۲/۴۶ (۷/۵)
۳	۱۴/۱۷ (۱۱/۶)	۲/۱۴ (۹/۷)	۳۸/۰۵ (۸/۴)	۱۲/۷	۱/۹۵	۳۵/۱	۱۴/۱۷ (۱۱/۶)	۲/۱۴ (۹/۷)	۳۸/۰۵ (۸/۴)
۴	۱۳/۳ (۸/۱)	۲/۰۸ (۷/۸)	۱۹/۶ (۵/۹)	۱۲/۳	۱/۹۳	۱۸/۵	۱۳/۳ (۸/۱)	۲/۰۸ (۷/۸)	۱۹/۶ (۵/۹)
۵	۷/۲۳ (۱۲/۳)	۲/۹۱ (۱۰/۲)	۲۵/۳ (۹)	۶/۴۴	۲/۶۴	۲۳/۲	۷/۲۳ (۱۲/۳)	۲/۹۱ (۱۰/۲)	۲۵/۳ (۹)
۶	۳/۲۳ (۱۰/۲)	۴/۰۳ (۸)	۳۳/۲۵ (۷/۳)	۲/۹۳	۳/۷۳	۳۱	۳/۲۳ (۱۰/۲)	۴/۰۳ (۸)	۳۳/۲۵ (۷/۳)
۷	۳۳/۱ (۱۲/۲)	۱/۹۳ (۹/۶)	۱۷ (۸/۳)	۲۹/۵	۱/۷۶	۱۵/۷	۳۳/۱ (۱۲/۲)	۱/۹۳ (۹/۶)	۱۷ (۸/۳)
۸	۱۲/۷۵ (۱۲/۸)	۲/۳۳ (۱۰/۹)	۲۰/۷۹ (۱۰)	۱۱/۳	۲/۱	۱۸/۹	۱۲/۷۵ (۱۲/۸)	۲/۳۳ (۱۰/۹)	۲۰/۷۹ (۱۰)

۱-۵- اندازه‌گیری جابجایی خارج از صفحه و محاسبه انحنای اصلی

جابجایی خارج از صفحه نمونه‌ها پس از فرآیند پخت با استفاده از دستگاه ارتفاع‌سنج با دقت $\pm 0.1mm$ اندازه‌گیری شده است (شکل ۸- الف) و با استفاده از رابطه $K = \frac{2H_{max}}{H_{max}^2 + c^2/4}$ انحنای اصلی ورق در هر حالت پایدار محاسبه شده است. لازم به ذکر است که با توجه به آنکه در این سازه‌ها، انحنای اصلی دوم نزدیک به صفر و محاسبه آن ممکن است با خطاهای زیادی همراه باشد، لذا در این مقاله این مقدار به صورت تجربی اندازه‌گیری نشده است. جابجایی گوشه ورق و انحنای اصلی اندازه‌گیری شده از روش تجربی در جدول ۴ ارایه و با نتایج روش اجزای محدود مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده از روش تجربی سازگاری مناسبی با نتایج روش اجزای محدود داشته و به خوبی تغییر رفتار استاتیکی ورق را در اثر تغییر طول جانبی ورق، عرض نوارها، ضخامت لایه‌ها و جنس نوارها نشان می‌دهد. مقادیر اندازه‌گیری شده

مقایسه شده است. نتایج، نمایانگر همخوانی خوب بین نتایج حاصل از روش عددی با داده‌های تجربی است. همچنین، انحنای طولی و نیروی پرش ناگهانی در این سازه‌ها با مجموع عرض نوارهای فلزی به‌صورت سهموی بوده و با افزایش عرض نوارهای فلزی، ابتدا افزایش و پس از رسیدن به مقدار بیشینه مجدداً کاهش می‌یابد. در این سازه‌ها برخلاف ورق‌های مرکب دوپایای معمول و یا هیبریدی مرسوم، انحنای اصلی با افزایش طول جانبی به یک مقدار ثابت مجانب نمی‌شود، بلکه بعد از رسیدن به یک مقدار بیشینه مجدداً کاهش می‌یابد. مطالعات انجام‌شده در خصوص بهینه‌سازی رفتار استاتیکی نشان می‌دهد که این سازه‌ها به‌ازای محدوده وسیعی از پارامترهای طراحی، ویژگی دوپایا را دارا هستند. علاوه بر آن، می‌توان بر اساس نوع کاربرد انحنای اصلی یا نیروی پرش ناگهانی را با تغییر پارامترهای طراحی مانند تغییر عرض یا جنس نوارها، ضخامت لایه‌ها به میزان چشمگیری افزایش داد؛ اگرچه در این سازه‌ها بیشینه انحنای اصلی توأم با بیشینه نیروی پرش ناگهانی اتفاق نمی‌افتد.

تشکر و قدردانی: مودی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تأییدیه اخلاقی: نتایج ارائه‌شده، حاصل پژوهش نویسندگان بوده و تاکنون در نشریه یا مجموعه مقالات کنفرانس دیگری چاپ نشده است و در دست بررسی نیست.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با اشخاص و سازمان‌های دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: احمد فیروزیان‌نژاد (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ مصطفی غیور (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ سعید ضیایی‌راد (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵٪)

منابع مالی: از منابع مالی خاصی برای انجام پژوهش حاضر استفاده نشده است.

منابع

- 1- Arrieta AF, Bilgen O, Friswell MI, Ermanni P. Modelling and configuration control of wing-shaped bi-stable piezoelectric composites under aerodynamic loads. *Aerospace Science and Technology*. 2013;29(1):453-461.
- 2- Telford R, Katnam KB, Young TM. Analysing thermally induced macro-scale residual stresses in tailored morphing composite laminates. *Composite Structures*. 2014;117:40-50.
- 3- Firouzian Nejad A, Ziaeirad S, Taki MS. Control of nonlinear vibration in bi-stable composite plates using fuzzy logic. *Journal of Computational Methods in Engineering (Esteghlal)*. 2016;34(2):123-143. [Persian]
- 4- Qing A, Weaver PM, Azarpeyvand M. Design and mechanical testing of a variable stiffness morphing trailing edge flap. *Journal of Intelligent Material Systems Structures*. 2018;29(4):669-683.
- 5- Daynes S, Diaconu CG, Potter KD, Weaver PM. Bistable

۲-۵- اندازه‌گیری نیروی استاتیکی لازم برای پرش ناگهانی

پدیده پرش ناگهانی بین دو حالت پایدار به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت و مقدار نیروی لازم برای تغییر شکل ورق از حالت پایدار اول به حالت پایدار دوم (نیروی بحرانی اول) و برعکس (نیروی بحرانی دوم) اندازه‌گیری شده است. اگرچه باید یادآور شد به‌دلیل یکسان‌بودن ضخامت لایه‌ها، نیروی بحرانی اول و دوم باهم برابر است.

شرایط مرزی باید به‌گونه‌ای باشد که جابجایی‌های خارج از صفحه چهار گوشه ورق و جابجایی‌های درون صفحه نقطه میانی ورق صفر باشند. به‌منظور اعمال نیروی متمرکز به نقطه میانی ورق از دستگاه تست کشش جهانی (UTM) و نیروسنج ۱۰۰N استفاده شده است. شکل ۸-ب، نحوه قرارگیری نمونه و نگه‌دارنده در دستگاه اعمال نیرو را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۴ ارائه شده و با نتایج روش اجزای محدود مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مشابه جابجایی خارج از صفحه و انحنای اصلی، سازگاری مناسبی بین روش‌های اجزای محدود و تجربی برای نیروی پرش ناگهانی وجود دارد. حداکثر خطای روش اجزای محدود برای نیروی پرش ناگهانی برابر ۱۲/۸٪ است که بیشتر از حداکثر خطای محاسبه‌شده برای جابجایی خارج از صفحه و انحنای اصلی است. لازم به ذکر است که پدیده پرش ناگهانی با کاهش نیرو و جابجایی زیاد همراه است. کاهش ناگهانی نیرو به‌دلیل قطع تماس سنبه اعمال نیرو با مرکز ورق در هنگام پرش ناگهانی است. به‌طور کلی، افزایش ضخامت نوارهای آلومینیومی منجر به افزایش نیروی بحرانی و کاهش جابجایی متناظر با آن می‌شود. بنابراین، با افزایش بهینه ضخامت نوارهای فلزی در لایه میانی می‌توان نیروی پرش ناگهانی را به میزان قابل توجهی در قیاس با ورق مرکب دوپایای معمولی افزایش داد.

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

چینش جدیدی از ورق‌های مرکب هیبریدی متشکل از لایه‌های مرکب در بالا و پایین ورق و سه نوار فلزی و مرکب در لایه میانی معرفی شده است. این سازه دارای دو حالت پایدار کاملاً مشابه و نیروی پرش یکسان است؛ با این تفاوت که راستای انحنا در دو حالت پایدار یکسان ولی در جهت عکس است. با توجه به عدم تغییر راستای انحنای اصلی ورق هنگام تغییر شکل بین دو حالت پایدار، این سازه‌ها قابلیت بیشتری برای استفاده در سازه‌های مورفینگ خواهند داشت. ورق معرفی‌شده با روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و اثر پارامترهای مختلف مانند عرض و خواص مکانیکی نوارها، ضخامت لایه‌ها و طول جانبی بر رفتار استاتیکی ورق مورد مطالعه قرار گرفته است.

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از روش اجزای محدود، تعدادی ورق با چینش و مشخصات هندسی مختلف ساخته شده است. مقادیر انحنای اصلی، جابجایی خارج از صفحه و نیروی پرش ناگهانی به‌صورت تجربی اندازه‌گیری و با نتایج روش اجزای محدود

- experimental-numerical analysis. *Composite Structures*. 2014;107:502-511.
- 19- Eckstein E, Pirrera A, Weaver PM. Morphing high-temperature composite plates utilizing thermal gradients. *Composite Structures*. 2013;100:363-372.
- 20- Moore M, Ziaei-Rad S, Salehi H. Thermal Response and Stability Characteristics of Bi-stable Composite Laminates by Considering Temperature Dependent Material Properties and Resin Layers. *Applied Composite Materials*. 2013;20(1):87-106.
- 21- Moore M, Ziaei-Rad S, Firouzian-Nejad A. Temperature-curvature relationships in asymmetric angle ply laminates by considering the effects of resin layers and temperature dependency of material properties. *Journal of Composite Materials*. 2013;48(9):1071-1089.
- 22- Cho M, Roh HY. Non-linear analysis of the curved shapes of unsymmetric laminates accounting for slippage effects. *Composites Science Technology*. 2003;63(15):2265-2275.
- 23- Ryu J, Kong JP, Kim SW, Koh JS, Cho KJ, Cho M. Curvature tailoring of unsymmetric laminates with an initial curvature. *Journal of Composite Materials*. 2012;47(25):3163-3174.
- 24- Daynes S, Weaver PM. Analysis of unsymmetric CFRP-metal hybrid laminates for use in adaptive structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010;41(11):1712-1718.
- 25- Firouzian-Nejad A, Mustapha S, Ziaei-Rad S, Ghayour M. Characterization of bi-stable pure and hybrid composite laminates-An experimental investigation of the static and dynamic responses. *Journal of Composite Materials*. 2018;53(5):653-667.
- 26- Saberi S, Ghayour M, Mirdamadi H. Behaviour analysis of a bistable twisting hybrid composite plate with an external metal layer and effecting factors on stability region. *Moadares Mechanical Engineering*. 2018;17(2):420-426. [Persian]
- 27- Firouzian-Nejad A, Bowen C, Mustapha S, Ghayour M, Ziaei-Rad S. Bi-stable hybrid composite laminates containing metallic strips: an experimental and numerical investigation. *Smart Materials and Structures*. 2019;28(5):1-13.
- 28- Dai F, Li H, Du Sh. Cured shape and snap-through of bistable twisting hybrid $[0/90/\text{metal}]_T$ laminates. *Composites Science and Technology*. 2013;86(24):76-81.
- 29- Li H, Dai F, Weaver PM, Du Sh. Bistable hybrid symmetric laminates. *Composite Structures*. 2014;116:782-792.
- prestressed symmetric laminates. *Journal of Composite Materials*. 2010;44(9):1119-1137.
- 6- Hyer MW. Some observations on the cured shape of thin unsymmetric laminates. *Journal of Composite Materials*. 1981;15(2):175-194.
- 7- Dano ML, Hyer MW. SMA-induced snap-through of unsymmetric fiber-reinforced composite laminates. *International Journal of Solids and Structures*. 2003;40(22):5949-5972.
- 8- Bowen CR, Kim HA, Salo AIT. Active composites based on bistable laminates. *Procedia Engineering*. 2014;75:140-144.
- 9- Cantera MA, Romera JM, Adarraga I, Mujika F. Modelling and testing of the snap-through process of bi-stable cross-ply composites. *Composite Structures*. 2015;120:41-52.
- 10- Taki MS, Tikani R, Ziaei-Rad S, Firouzian-Nejad A. Dynamic responses of cross-ply bi-stable composite laminates with piezoelectric layers [Dissertation]. Isfahan: Isfahan University of Technology; 2016. pp:1003-1018.
- 11- Diaconu CG, Weaver PM, Arrieta AF. Dynamic analysis of bi-stable composite plate. *Journal of Sound and Vibration*. 2009;322(4-5):987-1004.
- 12- Firouzian-Nejad A, Ziaei-Rad S, Moor M. A modified shape function for calculating stable configurations and natural frequencies of bi-stable $0/90]_T$ composite laminates. *Moadares Mechanical Engineering*. 2016;16(4):119-128. [Persian]
- 13- Firouzian-Nejad A, Ziaei-Rad S, Moor M. Vibration analysis of bi-stable composite cross-ply laminates using refined shape functions. *Journal of Composite Materials*. 2017;51(8):1135-1148.
- 14- Arrieta AF, Gemmeren VV, Anderson AJ, Weaver PM. Dynamics and control of twisting bi-stable structures. *Smart Materials and Structures*. 2018;27(2):025006.
- 15- Dano ML, Hyer MW. Thermally-induced deformation behavior of unsymmetric laminates. *International Journal of Solids and Structures*. 1998;35(17):2101-2120.
- 16- Hyer MW. The room-temperature shapes of four-layer unsymmetric cross-ply laminates. *Journal of Composite Materials*. 1982;16(4):318-340.
- 17- Mattioni F, Weaver PM, Friswell MI. Multistable composite plates with piecewise variation of lay-up in the platform. *International Journal of Solids and Structures*. 2009;46(1):151-164.
- 18- Telford R, Katnam KB, Young TM. The effect of moisture ingress on through-thickness residual stresses in unsymmetric composite laminates: A combined