



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



مشخصات پایداری و حرارتی صفحات کامپوزیتی دوپایداره در ورق‌های لایه‌ای با لایه‌چینی نامتقارن با در نظر گرفتن اثر لایه‌های رزین و وابستگی دمایی

مسیح مر^۱، احمد فیروزیان نژاد^۲، سعید ضیایی راد^۳، عبدالله عیدانی نژاد^۴

۱. گروه مهندسی کشتی سازی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.

۲. گروه مهندسی مکانیک در ارتعاشات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: m.moore@kmsu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۱۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/JMST.2016.14912

چکیده

مهم‌ترین ویژگی سازه‌های دوپایداره این است که این سازه‌ها دارای دو حالت کاملاً پایدار بوده و برای حفظ سازه در هریک از این حالات پایدار نیاز به هیچ‌گونه منبع دائمی انرژی و یا اتصالات مکانیکی نمی‌باشد. صرفاً جهت تغییر شکل از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر باید انرژی مصرف کرد. در این مقاله، مشخصات پایداری و پاسخ حرارتی ورق کامپوزیتی دوپایداره با لایه‌چینی‌های نامتقارن مختلف بررسی و مطالعه شده است. روش اجزاء محدود غیرخطی برای تعیین پاسخ ورق کامپوزیتی نیز به کار رفته است. بدین منظور وابستگی دمایی به خواص مکانیکی ورق‌های لایه‌ای (لمینیت) به‌خصوص بر ضرایب انبساط حرارتی ورق گرافیت/اپوکسی مورد توجه است. همچنین اثر لایه‌های رزین در مشخصات پایداری ورق‌ها بررسی شده است. اثر دما بر شکل نهایی ورق‌های کامپوزیتی پخته شده در دمای 25°C تا 180°C سانتی‌گراد بررسی شده است. نتایج نشان دادند که ضرایب انبساط حرارتی اثر زیادی بر شکل ورق‌های پخت شده دارند. از آنجایی که عدم یکسان بودن ضخامت لایه‌ها در ورق‌های مرکب دوپایداره، که در حقیقت یک نوع نقص ساختاری می‌باشد، تأثیرات به‌سزایی در شکل بعد از پخت ورق، تعیین حالت پایدار اول ورق و همچنین تعیین مقدار نیرویی که باعث پرش ناگهانی بین دو حالت پایدار می‌شود، دارد؛ مشخص کردن ضخامت حقیقی هر لایه و همچنین لایه‌های رزین بین لایه‌ها و روی ورق باعث می‌شود که مدل سازی ما تا حد بیشتری به واقعیت نزدیک شود. از این رو ضخامت حقیقی لایه‌های ورق مرکب و همچنین لایه‌های رزین با استفاده از میکروسکوپ نوری تعیین شده و در مدل سازی‌ها منظور گردیده‌اند. نتایج حاصل از شبیه سازی اجزاء محدود با نتایج تست عملی مقایسه گردیده و سازگاری مناسبی حاصل شده است.

واژگان کلیدی: لمینیت‌های دوپایداره، پدیده پرش ناگهانی، پاسخ حرارتی، ورق گرافیت/اپوکسی، روش اجزاء محدود

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



۱. مقدمه

سازه‌های چند پایداره دسته‌ای از مواد مرکب‌اند که همان‌گونه که از نام آن‌ها مشخص است، دارای چندین وضعیت پایداری متفاوت می‌باشند. ساده‌ترین دسته از سازه‌های چند پایداره، سازه‌های دوپایداره (Bi-stable Structures) (دارای دو حالت پایدار) هستند و مهم‌ترین مزیت این سازه‌ها این است که در دو حالت بدون کرنش و تغییر شکل یافته، کاملاً پایدارند و برای نگهداری سازه در هر یک از حالات پایداری نیاز به صرف هیچگونه انرژی نمی‌باشد. سازه‌های دو پایداره به دو دسته‌ی دو پایداره مرکب (Composite Bi-stable Structures) و سازه‌های دوپایداره ایزوتروپیک (Isotropic Bi-stable Structures) تقسیم می‌شوند.

سازه‌های دوپایداره مرکب، سازه مرکبی است که لایه‌های آن به صورت غیرمقارن اطراف صفحه مرکزی قرار گرفته باشند و تحت اثر بارهای حرارتی و تغییرات دما که قرار می‌گیرند، به علت اختلاف خواص مکانیکی (مدول کشسان، ضریب پواسون، مدول برشی) و همچنین ضریب انبساط حرارتی در لایه‌های گوناگون، تنش‌های پسماند در کل سازه ایجاد می‌شود. این تنش‌های پسماند باعث ایجاد ممان‌های خمشی و پیچشی در سازه و در نهایت جابجایی‌های بزرگ خارج از صفحه در سازه می‌گردند.

سازه‌های دوپایداره ایزوتروپیک، سازه‌هایی هستند که بر خلاف مورد قبل از مواد ایزوتروپیک ساخته شده‌اند و به کمک روش ویژه‌ای که در فرایند ساخت آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، خاصیت دوپایداره پیدا می‌کنند. یک راه ساده برای ایجاد تنش‌های پسماند در سازه‌های ایزوتروپیک و همگن شکل‌دهی آن‌ها در محدوده بعد از تنش تسلیم می‌باشد. برای ایجاد خاصیت دو پایداره در این سازه‌ها، یک ماده الاستیک-کاملاً پلاستیک را در نظر گرفته و با گرم‌کاری و آنیل کردن یک ورق نازک و سپس خمکاری پلاستیک باعث ایجاد تنش‌های پسماند در آن می‌شویم که این تنش‌ها باعث بوجود آمدن ممان‌های خمشی و پیچشی و در نهایت جابه‌جایی‌های خارج صفحه می‌شود.

سازه‌های دو پایداره کاربردهای فراوانی در صنایع و سازه‌های گوناگون دارند، مانند: صنایع هوافضا، سازه‌های مورفینگ (Morphing structures)؛ به سازه‌هایی گفته می‌شود که قابلیت تغییر شکل و خواص سازه‌ای بر اساس مشخصات کاری و در پاسخ به عوامل محیطی و نیروهای اعمالی را دارند، بازتابنده‌ها (Reflectors) در یافت‌کننده‌ها (Antenna)، پنل‌های خورشیدی، صنایع اتمبیل‌سازی و دریایی (ساخت دم‌ربات‌های زیردریایی).

هیر در سال ۱۹۸۱ به انجام تست حرارتی متعددی بر روی صفحات مرکب با چینش غیر مقارن لایه‌ها حول صفحه مرکزی با زوایا [۰/۹۰] پرداخت و مشاهده کرد حالت تغییر شکل یافته ورق با آنچه که تئوری لایه‌ای کلاسیک (Classical Lamination Theory: CLT) پیش بینی می‌کرد متفاوت است. تئوری لایه‌ای کلاسیک به علت خطی در نظر گرفتن کرنش‌ها حالت تغییر شکل یافته ورق را زین اسبی (Saddle shape) پیش بینی می‌کرد در حالی‌که هیر در

آزمایش‌های خود مشاهده کرد، با اعمال بارهای حرارتی، ورق دو شکل استوانه‌ای (Cylindrical shape) کاملاً پایدار خواهد داشت. علاوه بر آن ورق با انجام یک پرش ناگهانی از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر تغییر شکل می‌دهد. در سال‌های ۱۹۸۱ و ۱۹۸۲، هیر با افزودن ترم‌های غیرخطی کرنش به تئوری لایه‌ای کلاسیک و استفاده از اصل کمینه‌سازی انرژی پتانسیل کل (Principle of Minimum Total Potential Energy) و روش ریلی-ریتز (Rayleigh-Ritz) با حدس زدن یک میدان جابجایی مناسب به پیش بینی حالت تغییر شکل یافته ورق‌های مرکب مستطیلی غیرمقارن با چینش [۰n/۹۰n] تحت بارهای حرارتی پرداخت. روش او به تئوری لایه‌ای کلاسیک توسعه یافته شهرت یافت. اختلاف بین نتایج حاصل از تئوری هیر و تست‌های انجام شده باعث شد که در سال ۱۹۸۷، هاماموتو و هیر با استفاده از تئوری هیر به بررسی اثر نقص‌های هندسی و یکسان نبودن ضخامت لایه‌ها در یک صفحه مرکب مستطیلی با چینش [۰n/۹۰n] پرداختند. آن‌ها موفق به بهبود جواب‌های حاصل از تئوری به ویژه در اطراف نقطه دوشاخه‌ای (Bifurcation point) گردیدند.

Hong و Jun در سال ۱۹۹۰ با بهبود میدان جابجایی تئوری هیر و با افزودن تعداد جملات در میدان جابه‌جایی، به بررسی اثر کرنش‌های برشی پسماند در شکل نهایی ورق بعد از فرایند پخت پرداختند. آن‌ها همچنین با استفاده از روش ریلی-ریتز و پیشنهاد یک میدان جابجایی مناسب، شکل نهایی ورق‌های مرکب غیرمقارن با چینش لایه‌ها با هر زاویه دلخواه را مورد مطالعه قرار دادند.

اسلخت و همکاران در سال ۱۹۹۵ با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود مارک (Marc) به مطالعه پرش ناگهانی از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر پرداخته و حالت استوانه‌ای تغییر شکل یافته را شبیه‌سازی کردند ولی بار بحرانی مورد نیاز برای انجام پرش را بدست نیاوردند. آن‌ها همچنین نتایج را با برنامه اجزاء محدودی که خود نوشته بودند مقایسه کردند که نتایج همخوانی خوبی داشت. در سال ۱۹۹۶، لووت نخستین سازه مرکب دوپایداره را به عنوان بازوی مکانیکی جهت حمل وسایل سنگین بازرسی در نیروگاه‌های هسته‌ای طراحی کرد و با بررسی مدل اجزاء محدود و ساخت نمونه آزمایشگاهی اولین نمونه از سازه‌های دوپایداره مرکب را ساخت. دانو و هیر در سال ۱۹۹۸ با حدس زدن میدان‌های کرنش درون صفحه به صورت چند جمله‌ای کامل درجه سه و همچنین بهبود حدس تئوری هیر برای جابجایی‌های خارج از صفحه موفق به توسعه تئوری هیر برای پیش‌بینی شکل نهایی صفحه مرکب با چینش لایه‌ها با زوایای دلخواه بعد از فرایند پخت شدند. تحقیقات آن‌ها نسبت به تحقیق انجام شده توسط جون و هانگ از هزینه محاسباتی کمتری برخوردار بود.

اقبال و همکاران در سال ۲۰۰۰ توسط یک مدل ساده تحلیلی و با استفاده از روش انرژی و طراحی مدل اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس (Abaqus) به بررسی سازه‌های دوپایداره استوانه‌ای مرکب به عنوان لولا در سازه‌های گسترده شونده پرداختند. نقطه ضعف کار آن‌ها این بود که تنها برای نیروهای طولی را در مدل خود در نظر

آورده و نتایج خود را با نتایج بدست آمده از آزمایش مقایسه کردند. گیدینگز و همکاران در سال ۲۰۱۰ با استفاده از روش اجزاء محدود به کمک نرم افزار انسیس پاسخ حرارتی صفحات مرکب دوپایداره با زوایای دلخواه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای نخستین بار ضخامت لایه رزین را در مدل‌سازی خود منظور نموده و میزان تغییر شکل ورق در مرکز آن را بررسی نمودند.

با توجه به توضیحات یاد شده پیشین هدف از این مقاله مطالعه و شبیه‌سازی پاسخ حرارتی و مشخصات پایداری صفحات مرکب دوپایداره با چینش‌های زاویه دار می‌باشد. بدین منظور به بررسی پاسخ حرارتی صفحات مرکب غیرممتقارن با زوایای دلخواه با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود پرداخته شده است. همچنین سه نمونه ورق مرکب با زوایای $[30^\circ/-30^\circ]$ ، $[20^\circ/-20^\circ]$ و $[90^\circ/0^\circ]$ ساخته و نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود با نتایج حاصل از تست عملی مقایسه شده است. همچنین مشخصات پایداری صفحات مرکب مورد بررسی قرار گرفته است. نیروهای لازم جهت تغییر شکل از یک حالت پایدار به حالت دیگر برای سه صفحه مرکب با زوایای $[30^\circ/-30^\circ]$ ، $[20^\circ/-20^\circ]$ و $[90^\circ/0^\circ]$ با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود بدست آمده است. نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از تست‌های عملی مقایسه و همخوانی مناسبی حاصل شده است.

۲. مواد و روش‌ها

تحقیقات بی‌شماری برای پیش‌بینی تحلیلی شکل‌ها و مشخصات ورق‌های کامپوزیتی نامتقارن دوپایداره براساس روش ریلی-ریتز و کمینه‌سازی انرژی پتانسیل با توابع تقریبی چند جمله‌ای صورت گرفته است. یکی از مزایای این روش فراهم‌سازی امکان مطالعه پارامتری مدل مدنظر می‌باشد. این روش دارای یک اشکال بوده، زیرا چنین مدلی فقط برای هندسه‌های ساده مانند مربع یا مستطیل با شرایط مرزی ساده کاربرد دارد. روش تحلیل اجزاء محدود ابزاری مناسب برای مطالعه ورق لایه‌ای کامپوزیتی با هندسه و شرایط مرزی پیچیده می‌باشد. گرچه با در نظر داشتن سختی ماهیت غیرخطی بودن پدیده پرش (حالت اول پایداری و دوم پایداری: Snap-through and snap-back phenomena) در سازه‌های کامپوزیتی نامتقارن تحلیل اجزاء محدودی با محاسبات سنگین نیاز می‌باشد.

با استفاده از اصل معروف جابه‌جایی‌های مجازی می‌توان گفت: اگر یک جسم پیوسته در تعادل باشد، کار مجازی تمامی نیروهای واقعی در اثر جابه‌جایی مجازی صفر است (رابطه ۱) که W_i مجموع کار مجازی، Π مجموع انرژی پتانسیل و V کار نیروهای اعمالی می‌باشد. اصل جابه‌جایی مجازی به صورت مشروح توسط ردی توضیح داده شده است (ردی - ۲۰۰۴).

مجموع انرژی پتانسیل ورق کامپوزیتی بصورت (رابطه ۲) تعریف می‌شود، که در آن $\{E\}$ بردار مجموع کرنش‌ها، $[Q]$ ماتریس سختی، $\{\alpha\}$ بردار ضرایب انبساط حرارتی، ΔT تغییرات دما و V مجموع حجم سازه می‌باشد.

گرفتند و از ممان‌های پیچشی و انحنای پیچشی صرف‌نظر کردند. هوفنباخ و همکاران در سال ۲۰۰۲ با استفاده از مدل اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس و با استفاده از تئوری هیر و با هدف مطالعه تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند ساخت، تحقیقاتی بر روی سازه‌های مرکب دوپایداره انجام دادند آن‌ها دریافته‌اند که تنش‌های پسماند ایجاد شده توسط تغییرات زاویه الیاف در حین فرآیند ساخت می‌تواند به داشتن چند حالت پایدار کمک کند. بنابراین آن‌ها حالت بهینه جهت‌گیری رشته‌ها و همچنین چینش لایه‌ها را در صفحات مرکب برای داشتن چند حالت پایدار بدست آوردند.

گالتلی و گست در سال ۲۰۰۴ با استفاده از روش انرژی و با در نظر گرفتن اثرات ممان‌ها و انحنای پیچشی به بررسی تیوب‌های درزدار مرکب دوپایداره برای دو مدل تیر و پوسته و بدست آوردن محدوده پایداری در آن‌ها پرداختند. آن‌ها اثراتی که اقبال در مطالعه خود در نظر نگرفته بود را در نظر گرفتند و نشان دادند که نتایج آن‌ها از هم‌خوانی بهتری با تئوری برخوردار است. کبادزه و همکاران در سال ۲۰۰۴ با ایجاد تنش‌های پسماند، توسط فرآیند ساخت روش جدیدی برای ساخت پوسته‌های دوپایداره غیر مرکب معرفی نمودند. آن‌ها روش ساخت پوسته‌های دوپایداره ایزوتروپیک را با بررسی پارامترهای گوناگون و تأثیرات آنها بهینه‌سازی کردند. گوده و هوفنباخ در سال ۲۰۰۶، با استفاده از روش ریلی-ریتز به بررسی فرآیند تغییر شکل از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر با استفاده از ماکرو فایبرهای کامپوزیت پیزوالکتریک (MFC) پرداخته و نتایج حاصله را با نتایج تست عملی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با کمک نرم افزار اجزاء محدود انسیس (Ansys) مقایسه کردند. آن‌ها نیروی لازم جهت پرش از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر را که می‌بایست توسط ماکرو فایبرهای کامپوزیت پیزوالکتریک تولید شود را برای ابعاد متفاوت صفحه با چینش‌های گوناگون لایه‌ها بدست آوردند.

توفیق و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی اثرات نسبت اندازه اضلاع و نسبت طول به ضخامت صفحات مستطیلی مرکب غیرممتقارن تحت بارهای حرارتی با استفاده از نرم افزار آباکوس پرداخته و نقاط تعادل پایدار سازه را بدست آوردند. نتایج حاصله را با نتایج تست عملی مقایسه و دریافته‌اند که در نسبت طول به ضخامت کم، حالت تغییر شکل یافته ورق زین‌اسی و در نسبت طول به ضخامت زیاد، حالت تغییر شکل یافته ورق استوانه‌ای است. دیاکونو و همکاران در سال ۲۰۰۹ فرآیند دینامیکی تغییر شکل از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر برای یک صفحه مستطیلی دوپایداره مرکب غیرممتقارن در اثر تحریک حرارتی با استفاده از روش ریلی-ریتز را مدل‌سازی نمودند. آن‌ها همچنین تأثیرات اینرسی و استهلاک در فرآیند تغییر شکل از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر را بدست آوردند.

آریتا و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی و مدل‌سازی رفتار دینامیکی غیرخطی صفحه‌های مرکب دوپایداره در اطراف نقاط تعادل با توجه به رفتار غیرخطی زیر هارمونیک (Subharmonic) آن‌ها پرداختند. در ادامه آن‌ها محدوده‌های گوناگون فرکانس طبیعی سیستم را در فرآیند تغییر شکل از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر بدست

وجود دارد (رابطه ۴). در این پژوهش در نقطه‌ای در وسط ورق نیرویی متمرکز عرضی وارد می‌شود که در آن $F(x,y)$ تابع بار اعمالی و $W(x,y)$ تابع جابه‌جایی بار در نقطه مدنظر بوده و A سطح ورق می‌باشد. نقاط تعادلی مختلفی از ورق با ارضاء معادله ۱ قابل تعیین می‌باشند. با ارضاء معادله ۱ و حل معادلات منتهجه، نقاط تعادلی ورق تعیین می‌شود. نقاط تعادلی ممکن است دارای شکل پایدار یا ناپایدار باشند. جهت دستیابی به شکل‌های پایدار، لازم است که مشتق دوم معادله ۱ را نسبت به نقاط تعادلی بدست آورد و از مثبت بودن آن اطمینان پایدار کرد (هاماموتو و هیر ۱۹۸۷). برای سازه‌های با شرایط مرزی پیچیده، روش اجزاء محدود غیرخطی برای یافتن شکل پایدار پدیده پرش ناگهانی لازم است.

از تئوری معروف ون کارمن (Von Karman) برای تحلیل تغییر شکل‌های بزرگ خارج از صفحه مطابق با جمله‌های غیرخطی در روابط جابه‌جایی - کرنش، که به صورت خلاصه در روابط (۳) نشان داده شده‌اند است، استفاده می‌شود. در این رابطه u_0 ، v_0 و w_0 تغییر مکان نقطه‌ای دلخواه در صفحه میانی ورق به ترتیب در راستاهای x ، y و z ، ϵ_{xx}^0 ، ϵ_{yy}^0 و ϵ_{xy}^0 کرنش‌های غشایی شامل ترم‌های هندسی غیرخطی می‌باشند. تئوری ون کارمن به تفصیل در کتاب مکانیک ورق‌ها و پوسته‌های کامپوزیتی ردی (۲۰۰۴) ارائه شده است. روابط کرنش را جایگزین کرده (یعنی رابطه ۳ را در ۲)، تابع پتانسیل انرژی بدست می‌آید.

وقتی یک ورق کامپوزیتی پخته شده در مکان‌های مختلف آن به شیوه‌های مختلف در معرض نیرو قرار بگیرد، احتمال وقوع ناپایداری

$$\delta W_i = \delta \Pi - \delta V = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\Pi = \int_v \left(\frac{1}{2} \{\epsilon\}^T [Q] \{\epsilon\} - \{\epsilon\}^T [Q] \{\alpha\} \Delta T \right) dv \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\begin{cases} \epsilon_{xx} = \epsilon_{xx}^{(0)} - Z \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} = \frac{\partial u^0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w^0}{\partial x} \right)^2 - Z \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} \\ \epsilon_{yy} = \epsilon_{yy}^{(0)} - Z \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} = \frac{\partial v^0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w^0}{\partial y} \right)^2 - Z \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} \\ \epsilon_{xy} = \epsilon_{xy}^{(0)} - Z \frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u^0}{\partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x} + \frac{\partial w^0}{\partial x} \frac{\partial w^0}{\partial y} \right) - Z \frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$V = \int_A F(x, y) \cdot W(x, y) \cdot dA \quad \text{رابطه (۴)}$$

شیشه‌ای شفاف جاسازی شده است. ارتفاع نقطه میانی ورق را در بازه‌های 10°C سانتی‌گراد به کمک یک ساعت اندازه‌گیری که در کوره جاسازی شده است ثبت گردید. برای بررسی دقت مقادیر ثبت شده بوسیله ساعت اندازه‌گیری و پرهیز از خطا در اندازه‌گیری داده‌هایی که از تغییرات دما به دست می‌آیند، یک خط‌کش آلومینیومی نیز در کور جاسازی شده و به کمک خمیر نسوز جهت ثبت ارتفاع نقطه میانی ورق در بازه حرارتی مورد نظر نگاه‌داری می‌شود (شکل ۱-).

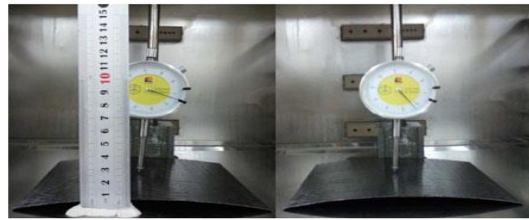
جاسازی ورق، ساعت اندازه‌گیری و خط‌کش درون کوره برای یک نمونه ورق [۹۰/۰] دما افزایش یافته و ارتفاع نقطه میانی ورق در هر بازه دمایی 10°C سانتی‌گراد بین 25°C تا 180°C سانتی‌گراد ثبت شده است. با استفاده از رابطه (۵) انبساط خط‌کش آلومینیومی در اثر افزایش دما نیز محاسبه شده و از طول محاسبه شده کم می‌شود که ΔL تغییر طول خط‌کش، L_1 طول اولیه خط‌کش، ΔT تغییرات دما و $\alpha_A = 23 \times 10^{-6} (\text{C}^{-1})$ ضریب حرارتی آلومینیوم می‌باشد.

جهت اندازه‌گیری مقدار نیرویی که موجب پرش ورق بین دو حالت پایدار می‌شود، نگاه‌دارنده ویژه‌ای ساخته شده که قابلیت تنظیم ارتفاع جهت اعمال شرایط مرزی مورد نظر را داشته باشد. شرایط مرزی باید به گونه‌ای باشد که جابجایی‌های خارج از صفحه، چهارگوشه ورق صفر باشند. جابه‌جایی‌های درون صفحه نقطه میانی ورق نیز صفر

تحقیق عملی (تست نمونه) برای مطالعه شکل ورق پخته شده و بارهای بحرانی که سبب پرش ورق بین دو شکل پایدار مختلف آن می‌شود، در این مقاله صورت گرفته است. به همین منظور چندین نمونه ورق مرکب از جنس گرافیت/اپوکسی T300/5208 با چینش‌های غیر متقارن [۳۰/-۳۰]، [۶۰/-۲۰] و [۹۰/۰] ساخته شد. پس از اتمام فرآیند پخت ورق، نمونه‌ها در ابعاد 150 میلی‌متر در 150 میلی‌متر بریده شد. لازم به تذکر است که به منظور پرهیز از هرگونه اختلاف در مشخصات مواد هر نمونه، لایه‌های یک نمونه از یک پانل یک چته یکسان تهیه شده‌اند. در واقع برای ساخت هر ورق، هر لایه را از پانل‌های مرکب تک‌جهته (Unidirectional) بریده شده، پس از مالیدن رزین اپوکسی نارمکو 5208 (NARMCO 5208)، لایه‌ها با زوایای دلخواه بر روی یکدیگر چیده شده، در یک کیسه خلاء قرار داده و طبق دستورالعمل چرخه پخت رزین نارمکو 5208 عملیات پخت را در یک اتوکلاو (Autoclave) صنعتی انجام می‌شود. پس از اتمام فرآیند پخت، هر صفحه دارای دو حالت استوانه‌ای پایدار خواهد بود، که بین این دو حالت ورق می‌تواند پرش کند. ابتدا حالت‌های پخت ورق کامپوزیتی در دمای اتاق (25°C سانتی‌گراد) ثبت می‌شوند. جهت معین کردن پاسخ ورق در مقابل بارهای حرارتی و تعیین حالت‌های پایداری، ورق در دامنه گسترده‌ای از دماها درون یک کوره خلأ با در

در یک سطح قرار ندارند، یک نگاه‌دارنده ویژه ساخته شد تا بتوان شرایط مرزی مطلوب را در تست‌های عملی بدست آورد (شکل-۲).

باشند. نیرو نیز به نقطه میانی ورق اعمال می‌گردد. از آنجایی که در ورق‌های زاویه‌دار با چینش‌های [۶۰/۳۰] و [۷۰/۲۰] گوشه‌های ورق



شکل ۱. جاسازی ورق، ساعت اندازه‌گیری و خط‌کش درون کوره برای یک نمونه ورق [۹۰/۰]

$$\Delta L = L_1 \alpha_A \Delta T$$

رابطه (۵)



شکل ۲. شیوه قرارگیری نمونه و نگاه‌دارنده در دستگاه اعمال نیرو

الف: به منظور ایجاد تنش‌های پسماند در ورق، ورق تحت تغییر دمایی از ۱۸۰ °C تا ۲۵ °C سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. در این گام تمام درجات آزادی ورق در نقطه میانی آن صفر خواهند بود. در پایان این گام ورق وارد حالت اول پایداری خود خواهد شد.

ب: در گام دوم یک نیروی محرک متمرکز در نقطه میانی ورق اعمال می‌شود. همانند آنچه در شکل نمادین ۴ نشان داده شده است. مقدار این نیرو به آرامی در گام‌های کوچک افزایش می‌یابد تا پدیده پرش ناگهانی رخ دهد و ورق از حالت اول پایدار خود به حالت دوم پرش کند. لازم به ذکر است که در این مرحله برای مشاهده پدیده پرش ناگهانی در شبیه‌سازی اجزاء محدود باید یک ضریب استهلاک مصنوعی به سازه اعمال نمود.

ج: در گام سوم به منظور این که اطمینان حاصل شود که در گام قبل پرش ناگهانی اتفاق افتاده و حالت جدید ورق پایدار است نیروی محرک اعمالی حذف می‌شود در صورتی که شکل جدید ورق پایدار باشد ورق تغییر شکل نخواهد داد. شکل ورق در پایان این مرحله حالت دوم پایداری نامیده می‌شود.

د: در گام چهارم، همانند گام دوم به منظور انجام پرش ناگهانی در جهت عکس یک نیروی محرک متمرکز ولی در جهت عکس نیروی اعمال شده در گام دوم، به ورق اعمال می‌شود. مجدداً مقدار

در این مطالعه، چندین مدل اجزاء محدود با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود برای پیش‌بینی شکل و مشخصات پایداری ورق کامپوزیتی ساخته شده‌اند. برای تحلیل اجزاء محدود، المان‌های پوسته خمیده مضاعف با ۸ گره در هر المان و با انتگرال کاهش یافته استفاده شده است. جهت بهبود دقت تحلیل در هندسه‌هایی با خمیدگی بالا از المان‌های با تابع شکل غیرخطی استفاده می‌شود. رابطه غیرخطی تغییر شکل- کرنش برای در نظر گرفتن جابه‌جایی‌های بزرگ خارج از صفحه استفاده می‌شود. برای ساخت مدل اجزاء محدود با دقت بالا، لایه‌های رزین با ضخامت متفاوت در طی روند ساخت ورق اندازه‌گیری و در محاسبات لحاظ شده است. ضخامت حقیقی لایه‌های ورق مرکب و همچنین لایه‌های رزین با استفاده از میکروسکوپ نوری تعیین شده و در مدل‌سازی‌ها منظور گردیده‌اند. بدین منظور از ضخامت لایه‌های ورق در مقاطع مختلف با استفاده از میکروسکوپ نوری عکس برداری گردید، ضخامت واقعی هر لایه با کمک آنالیز عکس‌ها تعیین شد. سپس مقدار متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده در مدل‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۳، دو نمونه از عکس‌های گرفته شده از مقاطع مختلف یک ورق [۹۰/۰] با بزرگنمایی ۵۰ برابر نشان داده شده است.

روند شبیه‌سازی اجزاء محدود برای تعیین مشخصات پایداری ورق شامل گام‌های زیر می‌شود:

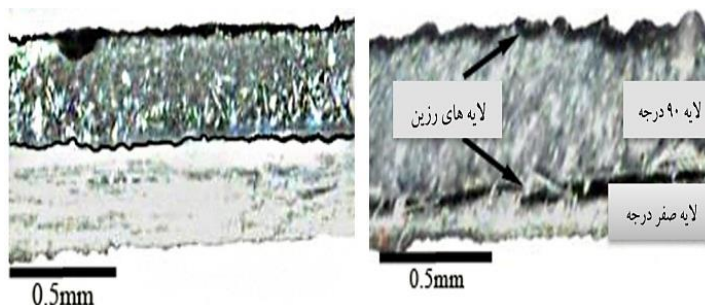
گرچه ابعاد واقعی ورق به دلیل عیوب هندسی متفاوت می‌باشد. در مدل چهار عیوب هندسی ورق در محاسبات لحاظ شده همچنین وابستگی دمایی مواد و وجود لایه‌های رزین نیز در نظر گرفته شده است. لازم به تذکر است که تمامی مدل‌ها تحت یک تغییر دما از 25°C تا 180°C سانتی‌گراد قرار دارند. در مدل دو، ورق دارای لایه رزین نمی‌باشد؛ از این رو ورق به یک حالت زین اسبی همگرا می‌شود. بنابراین برای دستیابی به شکل استوانه‌ای (پایدار) در ورق باید یک نقص مصنوعی در سازه ایجاد کرد. در شبیه‌سازی عددی صورت گرفته است.

در این مقاله، در بازه‌های اول نیروی عمودی کوچکی بر نقاط گوشه ورق جهت بدست آوردن شکل‌های استوانه‌ای اعمال می‌شود. در سایر مدل‌های اجزاء محدود، ضخامت هر لایه با استفاده از میکروسکوپ نوری تعیین می‌شود. مدل یک، سه و چهار بدون هیچ‌گونه نیاز به اعمال بار خارجی یا ایجاد عیب در آن‌ها به حالت استوانه‌ای در می‌آیند. در واقع این امر به دلیل در نظر گرفتن ضخامت واقعی لایه‌ها در این مدل‌ها اتفاق می‌افتد. ورق به حالتی که بیشترین خیز را دارد همگرا شده که مربوط به آن سمت از ورق با بیشترین ضخامت لایه رزین می‌باشد. در مدل یک، سه و چهار در تمامی نمونه‌های ورق، لایه رزین فوقانی از لایه رزین تحتانی ضخیم‌تر می‌باشد. همچنین پس از فرآیند پخت، ورق به حالت اول پایداری که مربوط به لایه رزین فوقانی می‌باشد، همگرا می‌شود (حالت اول پایداری).

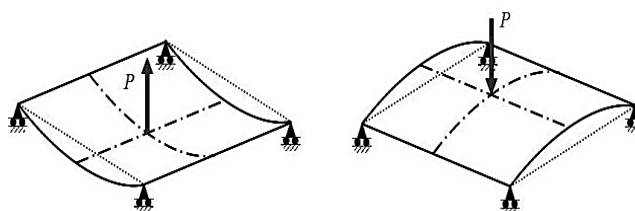
نیرو را به آرامی داده تا پرش ناگهانی در جهت عکس رخ دهد. در این مرحله نیز باید ضریب استهلاک مصنوعی به سازه اعمال گردد. ه: در گام پنجم نیز همانند گام سوم به منظور اطمینان حاصل کردن از اینکه شکل جدید ورق پایدار است، نیروی محرک اعمالی را حذف کرده در صورتی که ورق تغییر شکل ندهد، شکل جدید ورق پایدار خواهد بود.

لازم به تذکر می‌باشد که در گام‌های دو تا پنج شرایط مرزی سیستم تغییر خواهد کرد. در این مراحل همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود چهار گوشه ورق بعد از گام یک در همان نقاط تغییر شکل یافته در راستای Z ثابت می‌شوند و جابه‌جایی‌های خارج از صفحه چهار گوشه ورق بسته خواهد شد. علاوه بر آن جابه‌جایی‌های درون صفحه، در راستاهای X و Y، در نقطه میانی ورق نیز بسته خواهند شد.

برای بررسی تأثیرات وابستگی حرارتی مواد و همچنین لایه‌های رزین چندین مدل الگو مختلف با چینه‌های گوناگون لایه‌ها در نظر گرفته شده است. مشخصات هر یک از مدل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در مدل یک تمامی مشخصات مکانیکی و حرارتی ماده مستقل از دما در نظر گرفته می‌شود ولی لایه‌های رزین لحاظ شده‌اند. در مدل دوم، وابستگی حرارتی در نظر گرفته شده ولی در این مدل، لایه‌های رزین در نظر گرفته نمی‌شود و کل ضخامت ورق به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شود. در مدل سوم، هم وابستگی دمایی و هم وجود لایه‌های رزین در نظر گرفته شده است. ورق‌های مدل‌های یک، دو و سه دارای ابعاد (نامی) 150×150 میلی‌متر می‌باشند.



شکل ۳. دو عکس از مقطع یک ورق [۹۰/۰] با بزرگنمایی ۵۰ برابر



شکل ۴. تصویر نمادین شرایط مرزی ورق جهت مطالعه پدیده پرش

جدول ۱- مشخصات مدل‌های مختلف مورد مطالعه و ضخامت لایه‌های گوناگون ماده مرکب و لایه‌های رزین

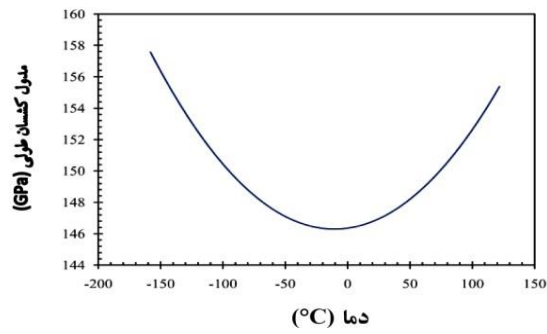
مشخصات مدل‌ها	مدل یک (mm)	مدل دو (mm)	مدل سوم (mm)	مدل چهارم (mm)
لایه رزین	دارد	ندارد	دارد	دارد
وابستگی دمایی مواد	ندارد	دارد	دارد	دارد
عیب هندسی	ندارد	ندارد	ندارد	دارد
ضخامت لایه بالایی رزین	۰/۳۱۷۵	-	۰/۳۱۷۵	۰/۳۱۷۵
لایه‌های ۰، ۲۰- و ۳۰-	۰/۳۵۴۵	۰/۳۶۵	۰/۳۵۴۵	۰/۳۵۴۵
ضخامت لایه میانی رزین	۰/۳۱۲۵	-	۰/۳۱۲۵	۰/۳۱۲۵
لایه‌های ۶۰، ۷۰ و ۹۰	۰/۳۳۱	۰/۳۶۵	۰/۳۳۱	۰/۳۳۱
ضخامت کل ورق	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳
تغییرات دمایی اعمال شده	۱۸۰°C تا ۲۵°C	۱۸۰°C تا ۲۵°C	۱۸۰°C تا ۲۵°C	۱۸۰°C تا ۲۵°C

۱۸۰°C، نتایج آزمایشات هیر برون‌یابی شده‌اند. در شکل‌های زیر مشخصات مکانیکی و ضریب انبساط حرارتی ماده مرکب گرافیت/اپوکسی T300/5208 و رزین اپوکسی نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۵ مشخص است، مدول کشسان طولی هم در دماهای بالا و هم در دماهای پایین بیشتر از مقدار آن در دمای محیط می‌باشند. از آنجایی که مشخصات الیاف تقریباً مستقل از دما می‌باشند، وابستگی دمایی مشخصات ماده مرکب بیشتر به دلیل ماتریس می‌باشد. این نکته حائز اهمیت می‌باشد که برای بدست آوردن مشخصات طولی ماده مرکب از نمونه یک جهت [۰] استفاده شده است. شکل ۶ مدول کشسان عرضی بر حسب دما را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است مقادیر آن در دماهای پایین بیش از مقدار آن در دمای محیط می‌باشد، این امر بدان دلیل است که مشخصات ماده مرکب در این جهت بیشتر تحت تأثیر مشخصات ماتریس می‌باشد. مدول برشی نیز از رابطه ذکر شده در مرجع (هیر- ۱۹۸۳) و تست نمونه [۴۵] بدست آمده است.

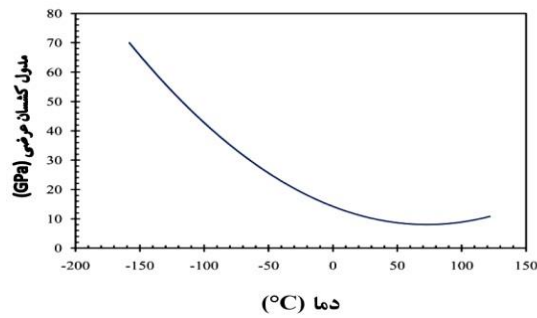
همان‌گونه که از شکل ۷ مشخص است، با افزایش دما مدول برشی کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۸- نشان داده شده است، با افزایش دما ضریب پواسون طولی به صورت خطی کاهش می‌یابد. مهم‌ترین مشخصه ورق‌های مرکب دوپایداره در تعیین شکل ورق پس از فرآیند پخت، ضرایب انبساط حرارتی می‌باشند. هیر در آزمایشات خود از روش‌های نوری برای اندازه‌گیری کرنش‌ها برای تعیین ضریب انبساط حرارتی استفاده کرد که نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ضریب انبساط حرارتی طولی تغییرات غیر خطی قابل ملاحظه‌ای نسبت به دما دارد. و در نهایت در شکل ۱۰ م مشاهده می‌شود که با افزایش دما مدول کشسان رزین اپوکسی کاهش می‌یابد. این نکته قابل ذکر می‌باشد که سایر مشخصات مکانیکی و حرارتی ماده مرکب گرافیت/اپوکسی و رزین نسبت به دما ثابت فرض شده‌اند که مقادیر آن‌ها در جدول ۲ ذکر شده است.

خواص الاستیک و حرارتی گرافیت/اپوکسی T300/5208 در بازه دمایی گسترده‌ای توسط هیر تعیین شده است. هیر و همکارانش در سال ۱۹۸۳ تأثیر تغییرات دما در محدوده (۱۱۶ K) 157°C تا 394K (121°C) را بر ثوابت کشسان، ضرایب انبساط حرارتی و استحکام نهایی گرافیت/اپوکسی T300/5208 به کمک انجام تست‌های متعدد مکانیکی مشخص نمودند. همچنین یوهاس و ایزاکسون در سال ۱۹۸۸ با کمک تست‌های آلتراسونیک و با استفاده از رابطه بین سرعت انتشار امواج صوتی در یک جهت مشخص و ثوابت کشسان ماده، مشخصات مکانیکی ماده مرکب گرافیت/اپوکسی و همچنین رزین اپوکسی را در بازه دمایی 23°C تا 325°C تعیین نمودند.

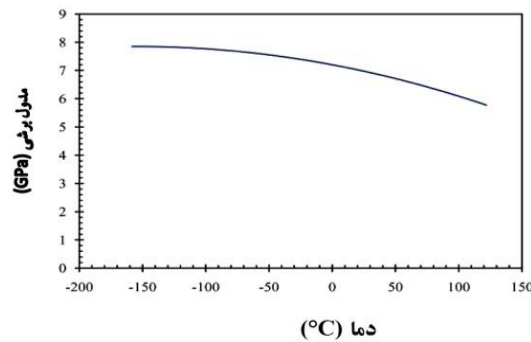
در آزمایشات هیر تعداد زیادی از نمونه‌های یک جهت از جنس گرافیت/اپوکسی T300/5208 با زوایای [0]، [90] و [45] ساخته شده بود. تمامی تست‌های عملی در یک کوره محیطی و با استفاده از یک نگهدارنده ویژه که برای اعمال نیرو درون کوره طراحی شده بود انجام شد. کوره از المان‌های مقاومی برای گرم کردن و همچنین از نیتروژن مایع برای سرد کردن نمونه‌ها در حین آزمایشات استفاده می‌کرد. برای اندازه‌گیری کرنش‌ها از کرنش‌سنج‌های ویژه که با استفاده از چسب‌های مخصوص به نمونه‌ها چسبیده بود استفاده شد. یوهاس نیز همان‌گونه که ذکر شد، با انجام تست‌های آلتراسونیک در دماهای بالا مدول کشسانی رزین اپوکسی را در دماهای مختلف بدست آورد. از آنجایی که تاکنون تحقیقی در مورد تعیین نحوه تابعیت دمایی به طور مشخص رزین اپوکسی 5208 انجام نشده و امکانات انجام تست نیز مهیا نبود، نتایج آزمایشات یوهاس در مورد رزین اپوکسی در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آزمایشات هیر و یوهاس در شکل ۵ تا ۱۰ نشان داده شده است. لازم به تذکر است همان‌گونه که قبلاً ذکر شد بیشترین دمای تست شده در آزمایشات هیر 121°C بود، اما در این پروژه بیشترین دما 180°C می‌باشد. از این‌رو با توجه به نتایج آزمایشات یوهاس در مورد نمونه‌های مرکب گرافیت/اپوکسی، برای پر کردن فاصله بین 121°C تا



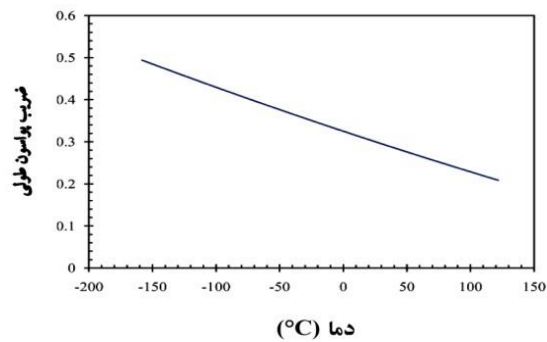
شکل ۵. مدول کشسان طولی بر حسب دما برای ماده مرکب گرافیت/اپوکسی T300/5208



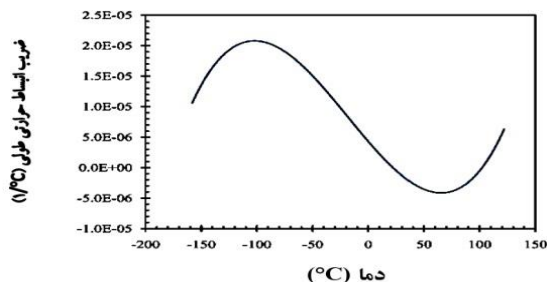
شکل ۶- مدول کشسان عرضی بر حسب دما برای ماده مرکب گرافیت/اپوکسی T300/5208



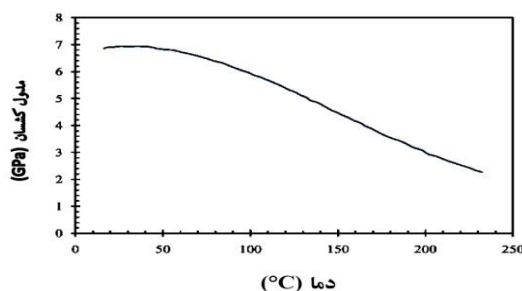
شکل ۷- مدول برشی بر حسب دما برای ماده مرکب گرافیت/اپوکسی T300/5208



شکل ۸- ضریب پواسون طولی بر حسب دما برای ماده مرکب گرافیت - اپوکسی T300/5208



شکل ۹- ضریب انبساط حرارتی طولی بر حسب دما برای ماده مرکب گرافیت- اپوکسی T300/5208



شکل ۱۰- مدول کشسان بر حسب دما برای رزین اپوکسی

جدول ۲- مشخصات مکانیکی و حرارتی مستقل از دما برای ماده مرکب گرافیت- اپوکسی T300/5208 و رزین اپوکسی

مشخصه	مقدار
*مدول برشی عرضی (GPa)	۰/۰۲۲۵
*ضریب پواسون عرضی	۰/۰۱
ضریب انبساط حرارتی عرضی (1/°C)	۲×۱۰^{-۵}
**ضریب پواسون رزین	۰/۳
**ضریب انبساط حرارتی رزین (1/°C)	۶۳×۱۰^{-۶}

* مقدار نشان داده شده از مرجع گیدینگ (۲۰۱۰) ذکر گردیده است.

** مقادیر نشان داده شده از مرجع کاو (۲۰۰۶) ذکر گردیده‌اند.

۳. نتایج

به روش اجزاء محدود و نتایج حاصل از آزمایش حرارتی ورق مرکب با چینش‌های مختلف مقایسه شده‌اند (شکل ۱۲). با توجه به شکل ۱۲ (الف، ب، پ) نتایج حاصل از مدل سه در تمامی حالات سازگاری بهتری با نتایج تست عملی دارد. این روند تغییرات غیرخطی (سازگاری بهتر با تست آزمایشگاهی) به علت در نظر گرفتن وابستگی حرارتی مشخصات مکانیکی و ضرایب انبساط حرارتی به دما می‌باشد که در مدل یک دیده نمی‌شود. در دمای اتاق و برای چینش [۹۰/۰] ورق، نتایج اجزاء محدود مدل سوم دارای ۷/۶ درصد خطا در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد، در حالی که در مدل اول خطا با داده‌های تست ۳۳/۸ درصد مشاهده می‌شود. همچنین برای چینش [۷۰/۲۰] در دمای اتاق خطا بین نتایج

به منظور تست عملی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی اجزاء محدود، جهت بررسی پاسخ حرارتی ورق مرکب و شکل نهایی پس از فرآیند پخت، نمونه‌هایی از جنس گرافیت/اپوکسی T300/5208 با چینش‌های غیرمتقارن [۶۰/۳۰]، [۷۰/۲۰] و [۹۰/۰] (برای مدل یک و سه) ساخته شدند. ارتفاع از نقطه میانی ورق در نتایج زیر با H نشان داده شده است. شکل ۱۱ به صورت نمادین بیشترین ارتفاع ورق را نشان می‌دهد که از شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود بدست می‌آید و با نتایج آزمایش مقایسه می‌گردد.

تغییرات بیشینه ارتفاع، H بر حسب دما برای مدل‌های سه و یک

وارد حالت اول پایداری گردد.

ب: اعمال نیروی حرارتی بر روی ورق و محاسبه حالت اول پایداری (حالت اول)

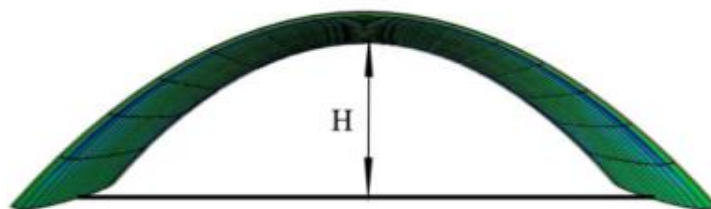
ج: یافتن میزان جابه‌جایی گوشه‌های ورق در حالت اول پایداری
د: برای دستیابی به حالت دوم پایداری، گوشه‌های ورق را به میزان جابه‌جایی در حالت اول پایداری ولی در جهت عکس جابه‌جا کرده، در این شرایط پرش ناگهانی انجام شده و ورق وارد حالت دوم پایداری خواهد شد.

ه: بدست آوردن شکل حالت دوم پایداری (حالت دوم)
اثر مدل‌سازی لایه‌های رزین در دمای اتاق بر روی انحنای ورق در دو حالت پایداری اول و دوم توسط گیدینگز و همکاران در مرجع (گیدینگز - ۲۰۱۰) تشریح شده است ولی آن‌ها مقدار نیروها را معلوم نکردند. بیشینه جابه‌جایی ورق H در هر دو حالت پایداری اول و دوم برای مدل‌های اول، دوم و سوم به ترتیب در جدول ۳ ارائه شده است. این جدول همچنین مقادیر محاسبه شده از تست عملی و درصد خطا در هر مدل را در برمی‌گیرد. همان‌طور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود در مدل دوم به دلیل در نظر گرفتن لایه‌های رزین در محاسبات برای هر دو حالت پایداری مقدار بیشینه تغییر شکل ورق برابر است. این مطلب با نتایج پیش‌بینی شده در روش تحلیل مرجع (گیدینگز - ۲۰۱۰) سازگاری دارد.

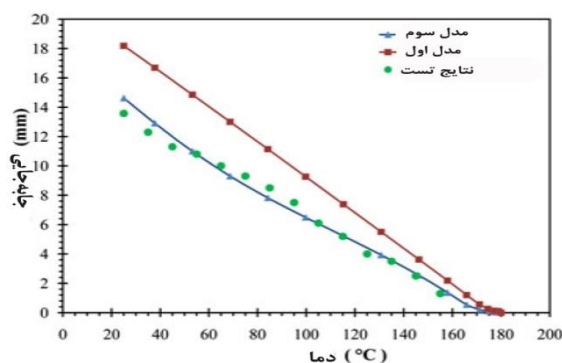
شکل ۱۳ شکل نهایی ورق در حالت اول و دوم پایداری حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود و نمونه ساخته شده با چینی [۶۰/-۳۰] را نشان می‌دهد.

اجزاء محدود مدل سوم و تست عملی حدود ۴/۷ درصد و برای مدل اول تقریباً ۲۸/۸ درصد می‌باشد. در چینی [۶۰/-۳۰] ورق نیز، درصد خطا بین دو حالت تست و شبیه‌سازی اجزاء محدود در مدل سوم ۵/۷ درصد و در مدل اول حدود ۳۰/۹ درصد در دمای اتاق می‌باشد. بنابراین واضح است که با لحاظ کردن وابستگی حرارتی خواص مکانیکی در شبیه‌سازی ورق، پیش‌بینی نتایج اجزاء محدود بهبود یافته و درصد خطا در محاسبه بیشینه ارتفاع ورق H کاهش می‌یابد.

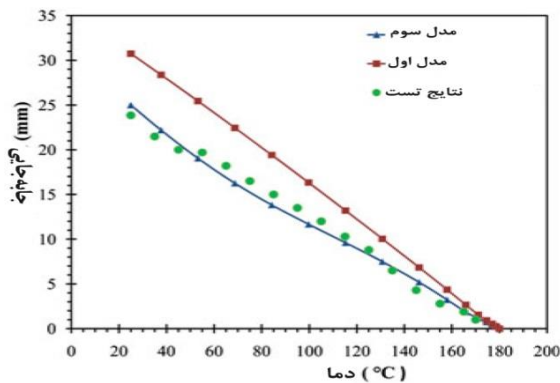
باتوجه به شکل‌های ۵ تا ۱۰ ثوابت الاستیک و انبساط حرارتی ورق نسبت به دما تابعی غیرخطی می‌باشند. از این‌رو پاسخ مدل سوم به نیرو حرارتی که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، رفتاری غیرخطی دارد. گرچه برای مدل اول که در آن وابستگی حرارتی لحاظ نشده است، پاسخ خطی به نیرو حرارتی بدیهی می‌باشد. برای تمامی مدل‌ها جهت مشاهده تمام حالت‌های پایداری ورق به روش اجزاء محدود، یک پرش ناگهانی در ورق برای وارد شدن آن به حالت دوم پایداری لازم است. در طی گام‌های ۲ تا ۴، دما (در دمای اتاق) ثابت می‌ماند و پرش ارزیابی می‌شود. باید توجه داشت که در عمل بدون در نظر گرفتن لایه‌های رزین و بدون هرگونه عیب، مقادیر انحنای ورق در حالت اول و دوم پایداری دارای مقدار مساوی ولی در جهات مختلف می‌باشند. همچنین نیروهای پرش در هر دو حالت مساوی ولی با جهت مخالف می‌باشند. باید به این نکته اشاره کرد که جهت تعیین کردن شکل حالت ورق پخته شده (حالت اول و دوم پایداری)، شرایط مرزی و گام‌های زیر باید بر ورق اعمال شود: الف: برای دستیابی به حالت اول پایداری، تمام شرایط مرزی در نقطه میانی ورق صفر است (مقید در برابر دوران و جابه‌جایی) و ورق تحت تغییر دمایی از ۲۵ °C تا ۱۸۰ °C سانتی‌گراد قرار می‌گیرد تا ورق



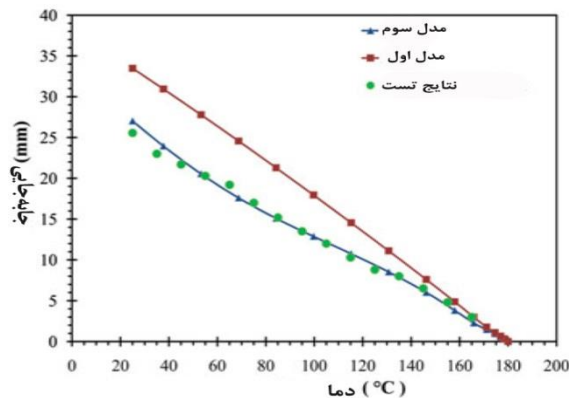
شکل ۱۱. تصویر نمادین بیشترین ارتفاع ورق H



شکل ۱۲. الف: تغییرات ارتفاع نقطه میانی ورق مرکب با چینی [۹۰/۰] بر حسب تغییرات درجه حرارت



شکل ۱۲. ب: تغییرات ارتفاع نقطه میانی ورق مرکب با چینش [۷۰/-۲۰] بر حسب تغییرات درجه حرارت

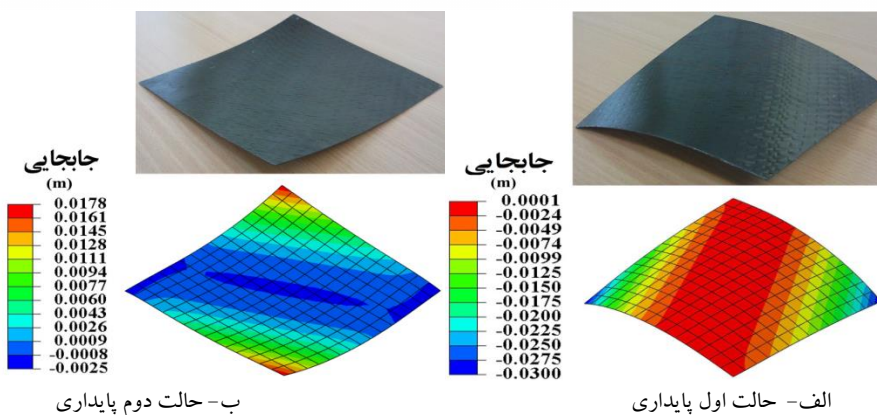


شکل ۱۲- ب: تغییرات ارتفاع نقطه میانی ورق مرکب با چینش [۶۰/-۳۰] بر حسب تغییرات درجه حرارت

جدول ۳ - مقدار بیشینه خیز تیر HI برای دو حالت اول و دوم پایداری ورق با لایه‌چینی‌های مختلف در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد)

ورق دوپایداره	نتایج تست (mm)		مدل اول (mm)		مدل دوم (mm)		مدل سوم (mm)	
	حالت اول پایداری	حالت دوم پایداری	حالت اول پایداری	حالت دوم پایداری	حالت اول پایداری	حالت دوم پایداری	حالت اول پایداری	حالت دوم پایداری
[۰/۹۰]	۱۳.۵۸	۶.۵۸	۱۸.۱۸ (۳۳.۸٪)*	۷.۹۸ (۲۱.۳٪)	۸.۶۳ (۳۱.۱٪)	۸.۶۳ (۳۱.۱٪)	۱۴.۶۲ (۷.۶٪)	۷.۱۷ (۸.۹٪)
[۷۰/-۲۰]	۲۳.۸۶	۱۳.۵	۳۰.۷۴ (۲۸.۸٪)	۱۵.۴ (۱۴.۱۶٪)	۱۵.۸ (۱۷٪)	۱۵.۸ (۱۷٪)	۲۵ (۴.۷٪)	۱۴.۶ (۸.۱٪)
[۶۰/-۳۰]	۲۵.۵۶	۱۶.۹	۳۳.۴۸ (۳۰.۹٪)	۱۸.۸ (۱۱.۲۴٪)	۱۹.۶ (۱۵.۹٪)	۱۹.۶ (۱۵.۹٪)	۲۷.۰۳ (۵.۷٪)	۱۸.۲ (۷.۶٪)

* مقدار نوشته شده در پرانتز درصد خطا می‌باشد.



شکل ۱۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود و تست‌های عملی برای پیش‌بینی حالت اول و دوم پایداری ورق مرکب با چینش [۶۰/-۳۰]

در 5°C سانتی‌گراد اول تغییر دما به چهار گوشه ورق اعمال می‌شود. همچنین در مدل دو به دلیل مدل نکردن رزین مقدار نیروی بحرانی برای تغییر شکل از حالت اول پایداری به حالت دوم که در این مقاله نیروی بحرانی اول نامیده می‌شود و مقدار نیروی بحرانی برای تغییر شکل از حالت دوم پایداری به حالت اول که در این مقاله نیروی بحرانی دوم نامیده می‌شود تقریباً برابر هستند.

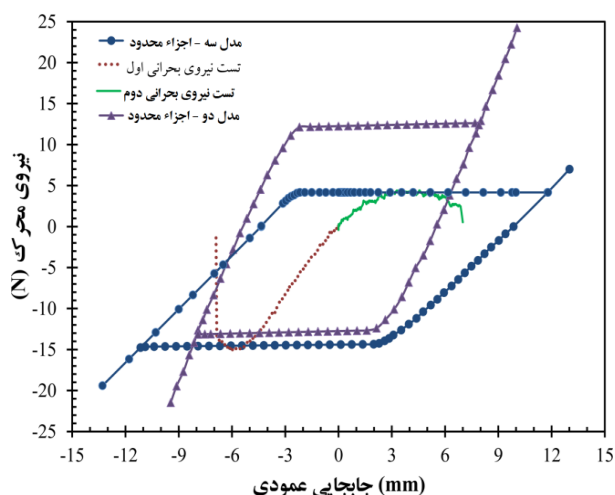
برای مطالعه اثرات رزین در پدیده پرش ناگهانی، نتایج حاصل از تست عملی و شبیه‌سازی اجزاء محدود مدل‌های دو و سه برای سه نمونه $[60/-30]$ ، $[60/-20]$ و $[90/0]$ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ذکر این نکته الزامی است که اندازه‌گیری دقیق مدل ساخته شده $[60/-30]$ نشان می‌دهد که طول اضلاع این نمونه دقیقاً 150 میلی‌متر نمی‌باشد. لذا مدل اجزاء محدود چهار به چهار با در نظر گرفتن این نقص ساخته شده است. سایر مشخصات مدل چهار مانند مدل سه در جدول ۱- هستند. اندازه‌های دقیق نمونه در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که ذکر گردید و در شکل ۱۴-پ، مشخص است به علت برابر نبودن اندازه‌ی اضلاع در نمونه $[60/-30]$ در این نمونه در آزمایش‌های عملی قبل از وقوع پدیده پرش ناگهانی در ورق، ورق پدیده‌ی ناپایداری محلی (Local instability (buckling)) را تجربه خواهد کرد. به منظور شبیه‌سازی این رفتار همان‌گونه که ذکر شد مدل اجزاء محدود چهار در شبیه‌سازی اجزاء محدود ساخته شد. تنها تفاوت این مدل با مدل سه ذکر شده در جدول ۱، در ابعاد اضلاع می‌باشد. ابعاد مدل چهار همانند شکل ۱۵- می‌باشد.

برای بررسی بیشتر پدیده ناپایداری محلی که در شکل ۱۴-پ مشخص است به بررسی اثر برابر نبودن اضلاع در چپش $[60/-30]$ پرداخته شده است. بدین منظور پاسخ مکانیکی ورق را در دو حالت اضلاع برابر، مدل سه و مدل چهار که در آن عدم تساوی اضلاع در نظر گرفته شده در شکل ۱۶- مقایسه شده است.

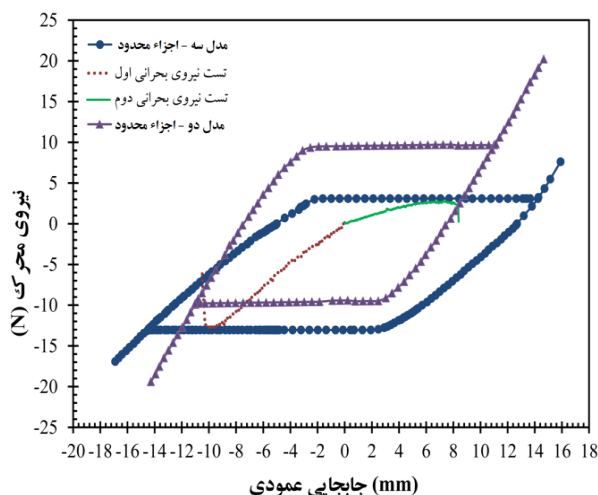
در بخش پدیده پرش (حالت اول و دوم پایداری، اثر مدل‌سازی لایه‌های رزین در اثر نیرو محرک که سبب پرش ناگهانی ورق می‌شود، بررسی شده است. رابطه بین نیرو اعمالی و جابه‌جایی عمودی نقطه میانی ورق مرکب (که در معرض نیروی عمودی است) در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به این شکل به وضوح مشخص است که در مدل‌های سه و چهار که لایه‌های رزین مدل شده‌اند، سازگاری مناسبی با نتایج آزمایش‌های عملی حاصل شده است. در صورتی که در مدل دو که لایه‌های رزین مدل نشده‌اند تفاوت بین نتایج تست و شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود کاملاً واضح است. مقادیر محاسبه شده برای نیروی محرک برای هر دو حالت پرش (نیروی بحرانی اول (Snap-through) و نیروی بحرانی دوم (Snap-back)) و مقادیر درصد خطا در جدول ۴ نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که در بخش‌های قبل،

مشخصات پایداری در ورق در پنج گام توضیح داده شد. همان‌طور که در جدول ۴ و شکل ۱۴ نشان داده شده است، مدل سوم سازگاری بسیار خوبی با نتایج تست دارد و این موضوع اهمیت در نظر گرفتن اثر لایه‌های رزین را نشان می‌دهد. همچنین، مقدار نیروی بحرانی اول بیشتر از مقدار نیروی بحرانی دوم می‌باشد. در واقع نیروی محاسبه شده در پرش از حالت پایداری اول در مدل سوم انحراف کمتری در مقایسه با پرش از حالت پایداری دوم نسبت به نتایج تست دارد؛ دلیل این امر آن است که لایه رزین بالایی ضخامت بیشتری نسبت به لایه رزین پایینی دارد و رزین اپوکسی پس از پخت و در دمای محیط نسبتاً مقاوم می‌باشد و باعث می‌شود که ورق در برابر تغییر شکل از حالت اول پایداری مقاومت بیشتری نسبت به تغییر شکل از حالت دوم پایداری از خود نشان دهد. ذکر این نکته الزامی است که در مدل دو از آنجایی که لایه‌های رزین مدل نشده‌اند، برای آن که در گام اول ورق وارد حالت اول پایداری شود باید نوعی نقص هندسی به ورق اعمال شود. نقص اعمالی به مدل دو در شبیه‌سازی اجزاء محدود نیروی کوچکی است که

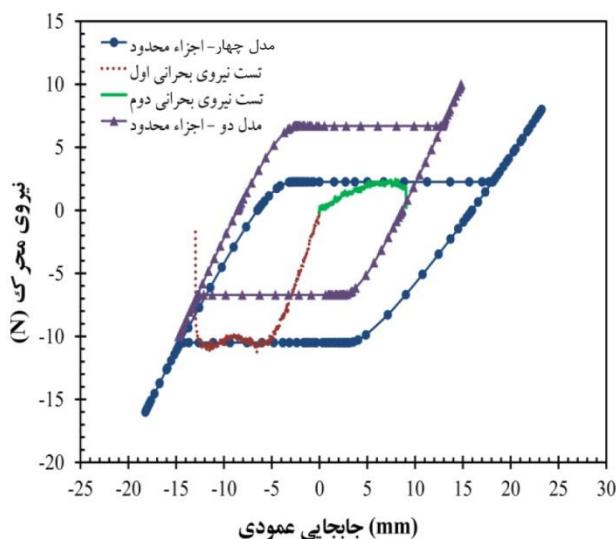


شکل ۱۴- مقایسه مقادیر نیروی بحرانی حاصل از تست و شبیه‌سازی اجزاء محدود، الف- نیروی محرک بر حسب جابه‌جایی عمودی نقطه میانی برای چپش

[۹۰/۰]



شکل ۱۴- مقایسه مقادیر نیروی بحرانی حاصل از تست و شبیه‌سازی اجزاء محدود، ب- نیروی محرک بر حسب جابه‌جایی عمودی نقطه میانی برای چینش [۷۰/-۲۰]

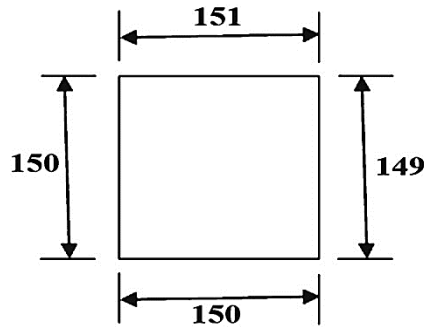


شکل ۱۴- مقایسه مقادیر نیروی بحرانی حاصل از تست و شبیه‌سازی اجزاء محدود، پ- نیروی محرک بر حسب جابه‌جایی عمودی نقطه میانی برای چینش [۶۰/-۳۰]

جدول ۴- نیروهای محرک بر ورق و درصد خطا برای لایه چینی‌های مختلف آن

ورق دوپایداره	نتایج تست (N)		مدل دوم (N)		مدل سوم (N)	
	نیروی بحرانی اول	نیروی بحرانی دوم	نیروی بحرانی اول	نیروی بحرانی دوم	نیروی بحرانی اول	نیروی بحرانی دوم
[۰/۹۰]	-۱۵.۱	۴.۳۹	-۱۲.۳۶ (۱۸.۱۴٪)*	۱۲.۳۶ (۱۸۱.۵٪)	-۱۴.۶۱ (۳.۲٪)	۴.۱۶ (۵.۲٪)
[۷۰/-۲۰]	-۱۲.۳	۲.۶۳	-۹.۶۵ (۲۱.۵٪)	۹.۶۵ (۲۶۶.۹٪)	-۱۳.۰۵ (۶.۱٪)	۳.۱ (۱۷.۹٪)
[۶۰/-۳۰]	-۱۱.۱	۲.۰۸	-۶.۷۱ (۳۹.۵٪)	۶.۷۱ (۲۲۵.۶٪)	-۱۰.۴۹ (۵.۵٪)#	۲.۲۶ (۷.۹٪)#

* مقدار نوشته شده در پرانتز نشان دهنده درصد خطاست.
این مقادیر از مدل چهار بدست آمدند.



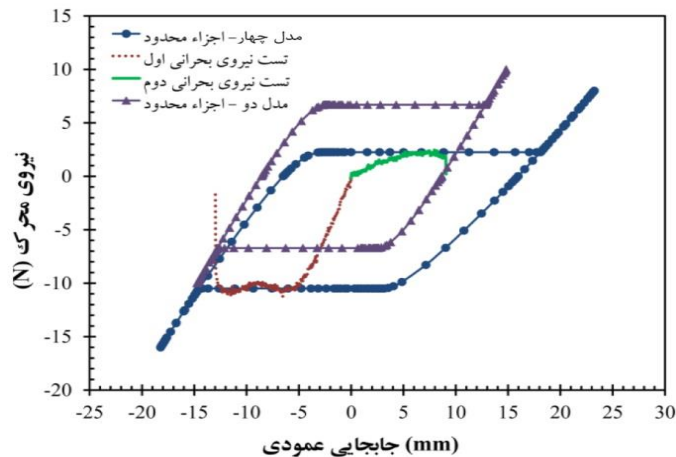
شکل ۱۵- ابعاد دقیق ورق در مدل اجزاء محدود چهار (تمامی ابعاد به میلی متر می‌باشند)

باشد. در این مقاله با استفاده از فرآیند آزمون و خطا در شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود کوچکترین مقدار ممکن برای ضریب استهلاک اعمالی به سیستم بدست آمده است که مقدار آن $0/0001$ می‌باشد. این مقدار در تمام شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که این ضریب در تمامی مدل‌ها یکسان می‌باشد مقدار انرژی اتلافی از سیستم در اثر این ضریب تقریباً برابر می‌باشد. از این رو تنها یک نمودار انرژی اتلافی ناشی از ضریب استهلاک در مقایسه با انرژی کرنشی کل سیستم آورده شده است.

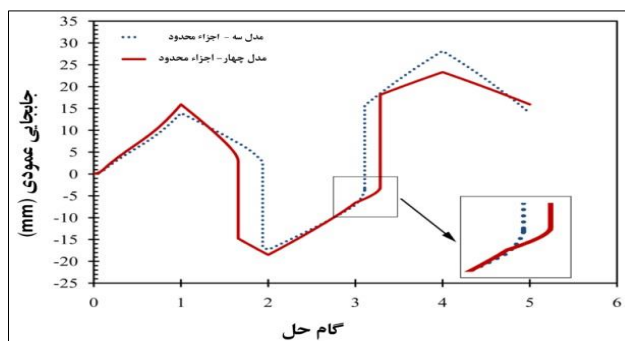
شکل ۱۸ نمودار دو مقایسه انرژی کرنشی کل سیستم و انرژی اتلافی ناشی از ضریب استهلاک فرضی را نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد مقدار انرژی اتلافی ناشی از استهلاک فرضی بسیار کمتر از انرژی کرنشی کل سیستم است.

همان‌گونه که در شکل ۱۶ مشخص است، تفاوت دو مدل در پیش‌بینی نیروی بحرانی اول است، در صورتی که هر دو مدل نیروی بحرانی دوم را برابر پیش‌بینی می‌کنند. این تفاوت به علت اختلاف در ابعاد اضلاع مدل‌ها حاصل شده است. مدل چهار به وضوح سازگاری بیشتری با نتایج تست دارد.

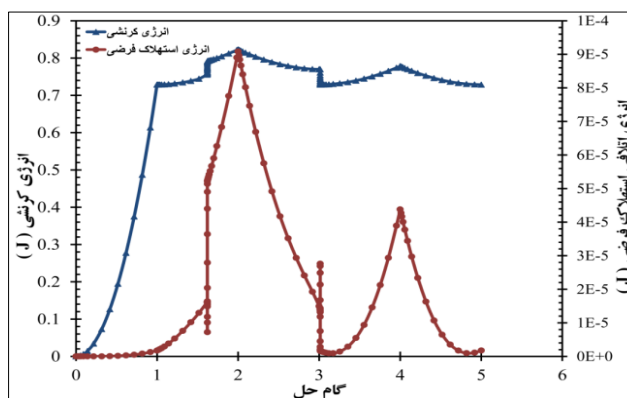
همان‌طور که در شکل ۱۶ نمایان است، در نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود، پدیده ناپایداری محلی قابل تشخیص نیست، ولی اگر نمودار جابجایی عمودی بر حسب گام حل در شبیه‌سازی رسم شود، این پدیده به وضوح قابل مشاهده است. این نمودار در شکل ۱۷ ترسیم شده است. در واقع، شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود در صورتی مورد اطمینان خواهند بود که مقدار انرژی اتلافی در اثر استهلاک فرضی اعمال شده به سیستم در گام‌های حل دو و چهار در مقایسه با انرژی کرنشی کل سیستم ناچیز



شکل ۱۶- مقایسه پاسخ مکانیکی ورق مرکب [۳۰/-۶۰] در دو حالت اضلاع برابر و عدم تساوی اضلاع



شکل ۱۷- جابه‌جایی عمودی نقطه میانی صفحه بر حسب گام‌های حل برای مدل‌های اجزاء محدود دو و سه برای چپش [۳۰-۶۰]



شکل ۱۸- انرژی کرنشی ورق و انرژی اتلافی ناشی از استهلاک فرضی اعمالی به سیستم در روش حل پایدار کننده استاتیک جنرال

شکل ورق این مدل را نسبت به مدل دو که در آن لایه‌های رزین لحاظ نشده است را نشان می‌دهد.

در مدل دو، در صد خطا در محاسبه بیشینه تغییر شکل ورق در حالت دوم پایداری بین ۱۵/۹ تا ۳۱/۱ درصد می‌باشد. بررسی رفتار پرش ناگهانی (در هر دو حالت بحرانی) ورق مرکب نشان داد که مدل‌سازی لایه‌های میانی و بالایی رزین تأثیر زیادی بر مقدار نیروی محرک ورق دارد. علاوه بر این اثر نقص هندسی در ورق نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عیوب هندسی در ورق ممکن است سبب ناپایداری محلی ورق قبل از رفتار پرش در آن شوند.

۵. تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده با شماره قرارداد ۷۰ مورخ ۹۳/۴/۵ از محل اعتبارات ویژه پژوهشی دانشگاه علوم و فنون دریایی می‌باشد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله ورق‌هایی با چپش‌های [۳۰-۶۰]، [۲۰-۷۰] و [۹۰/۰] از ماده مرکب گرافیت/ اپوکسی T300/5208 ساخته شد. هدف اصلی بررسی اثر وابستگی دما به خواص مکانیکی بر شکل‌های پخته شده این ورق‌ها بود. همچنین اثر لایه‌های رزین بر روی نیروهای محرک که منجر پرش ناگهانی ورق می‌شود نیز مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور از روش غیرخطی اجزاء محدود با ساخت چندین مدل استفاده شد. نتایج این روش با تست عملی صحت‌سنجی شده و سازگاری مناسبی بدست آمده است.

لحاظ کردن وابستگی دمایی مواد سازنده ورق مرکب تأثیر به‌سزایی در محاسبات بیشینه ارتفاع ورق در حالت اول پایداری آن دارد. در مدل سوم به دلیل در نظر گرفتن وابستگی دمایی مواد در محاسبات (نسبت به نتایج تست)، مقادیر بیشینه ارتفاع ورق در لایه‌چینی [۹۰/۰] ۲۶/۲ درصد، ۲۴/۱ درصد برای لایه‌چینی [۲۰-۷۰] و [۷۰/۰] ۲۵/۲ درصد برای لایه‌چینی [۳۰-۶۰] در مقایسه با مدل اول که تأثیر وابستگی دمایی در آن دیده نشده است، بهبود یافته است. اندازه‌گیری دقیق ضخامت لایه‌های رزین، به کمک میکروسکوپ نوری نیز سبب بهبود محاسبات بیشینه تغییر شکل ورق در حالت دوم پایداری می‌شود. در مدل سوم اجزاء محدود سوم، در صدهای خطا در بازه ۸/۹-۷/۶ می‌باشد، این مطلب دقت بیشتر محاسبات بیشینه تغییر

References:

- Arrieta, A. F., Neild, S. A. and Wagg, D. J. 2009. Nonlinear dynamic response and modeling of bi-stable composite plate for application to adaptive structures. *Non Dyn.* 58: 259–272.
- Autr, K. K. 2006. *Mechanics of composite materials*, second edition. Tylor and francis press.
- Dano, M. and Hyer, M. W. 1998. Thermally-Induced Deformation Behavior of Unsymmetric Laminates, *Int J Solids Struct.* 35: 2101-2120.
- Daton-Lovett, A. 1996. An extendible member. Patent Cooperation Treaty Application, PCT/GB97/00839.
- Diaconu, C. G., Weaver, P. M. and Arrieta, A. F. 2009. Dynamic analysis of bi-stable composite plate, *J Sound & Vib*, 322: 987–1004.
- Galletly, D. A. and Guest, S. D. 2004. Bistable composite slit tube, I: A beam model. *Int J Solids Struct.*
- Giddings P. F, Bowen, C. R., Salo A. I. T. and Kim, H. A. 2010. Bistable composite laminates: effects of laminate composition on cured-shape and response to thermal load. *Compos Struct.* 92: 2220–2225.
- Gude, M. and Hufenbach, W. 2006. Design of Novel Morphing Structures Based on Bistable Composites with Piezoceramic Actuators, *Mech Compos Mater.* 42(4): 339-346.
- Hamamoto, A. and Hyer, M. W. 1987. Non-linear Temperature-Curvature Relationships for Unsymmetric Graphite-Epoxy Laminates. *Int J Solids Struct.* 23(7): 919-935.
- Hufenbach, W, Gude M. and Kroll, L. 2002. Design of multistable composites for application in adaptive structures. *Compos Sci Technol.* 2201-72.
- Hyer, M. W. 1981. Some observations on the cured shape of thin unsymmetric laminates, *J Compos Mater.* 15: 175-194.
- Hyer, M. W. 1981. Calculations of the Room-temperature Shapes of Unsymmetric Laminates. *J Compos Mater.* 15: 296-310.
- Hyer, M. W. 1982. The Room-Temperature Shapes of Four-Layer Unsymmetric Cross-Ply Laminates, *J Compos Mater.* 16: 318-340.
- Hyer, M. W, Herakovich, T, Milkovich, S. M. J. S. Short, J. r. 1983. Temperature dependence of mechanical and thermal expansion properties of T300/5208 graphite/epoxy. *Compos.* 14: 276–280.
- Iqbal, K., Pellegrino, S. and Daton-Lovett, A. 2000. Bi-stable composite slit tubes. In *Proceedings of IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structure.* Kluwer.
- Jun, W. J. and Hong, C. S. 1990. Effect of Residual Shear Strain on the Cured Shape of Unsymmetric Cross-Ply Thin Laminates. *Compos Sci Technol.* 38(1): 55-67.
- Jun, W. J. and Hong, C. S. 1992. Cured Shape of Unsymmetric Laminates with Arbitrary Lay-Up Angles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites.* 11(12): 1352-1366.
- Kebadze E., Guest S.D., Pellegrino S., Bi-stable prestressed shell structures. *Int J Solids Struct.* 41(2004). 2801–20.
- Reddy, J. N. 2004. *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells.* second edition, CRS press.
- Schlecht, M., Schulte, K. and Hyer, M. W. 1995. Advanced Calculations of the Room-Temperature Shapes of Thin Unsymmetric Composite Laminates, *J Compos Struct*, Vol. 32: 627-633.
- Tawfik, S., Xinyuan, T., Ozbay, S. and Armanios, E. 2007. Anticlastic Stability Modeling for Cross-ply Composites, *J Compos Mater.* 41(11): 1325-1338.
- Yuhas, D. E. and Isaacson, B. 1998. Elevated temperature measurements of elastic constants in polymer composites. The 43rd international SAMPE symposium. Anaheim, California, Article_101405. May 31-June 4.



Stability and thermal characteristic of Bi-Stable Composite Plates in asymmetric angle ply laminates by considering the effects of resin layers and temperature dependency

Masih Moore¹, Ahmad Firouzian-nejad², Saeed Ziaei-Rad², Abdollah Eidany-nejad¹

1. Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran.

2. Department of Mechanical Engineering on Structural Dynamics, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

* Corresponding Author E-mail: m.moore@kmsu.ac.ir

Received: 7 September 2015

Revised: 17 May 2016

Accepted: 17 May 2016

DOI: 10.22113/JMST.2016.14912

Abstract

The interest in bi-stable structures comes from their ability that these structures can have two different stable equilibrium configurations to define a discrete set of stable shapes. The geometrical changes occur with no need to continuously consume power, and mechanical hinges to preserve the structure in each stable shape. In this study, the stability characteristics and thermal response of a bistable composite plate with different asymmetric composition were considered. The non-linear finite element method (FEM) was utilized to determine the response of the laminate. Attention was focused on the temperature dependency of laminate mechanical properties, especially on the thermal expansion coefficients of the composite graphite-epoxy plate. Also the effect of including the resin layers on the stability characteristics of the laminate was investigated. The effect of the temperature on the laminate cured configurations in the range of 25°C to 180°C was examined. The results indicate that the coefficient of thermal expansions has a major effect on the cured shapes. Next, optical microscopy was used to characterize the laminate composition and for the first time the effect of including the resin layers on the actuation loads that causes snapping behavior between two stable shapes was studied. The results obtained from the finite element simulations were compared with experimental results and a good correlation was obtained.

Keywords: Bi-stable laminates, Graphite-epoxy plate, Finite element method, Snap behavior, Thermal response.

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

