مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1396، دوره 17، شماره 4، ص‌ص 161-167

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

Downloaded from mme.modares.ac.ir at 15:03 IRDT on Sunday May 13th 2018

بررسی تاثیر ابعاد کامپوزیت و دمای قالب بر روی دوپایداری کامپوزیت‌های شیشه/ پی-وی‌سی

یوسف افتاده[1]، محمد گلزار[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-111، m.golzar@modars.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 دی 1395

پذیرش: 18 اسفند 1395

ارائه در سایت: 23 فروردین 1396

کلید واژگان:

کامپوزیت دوپایدار

ابعاد کامپوزیت

دمای قالب

الیاف شیشه

پی‌وی‌سی

چکیده

در این پژوهش ورق‌های کامپوزیتی دوپایدار مربعی شکل با لایه چینی نامتقارن، جهت بررسی اثرات روش ساخت مورد آزمایش و مطالعه قرار گرفت. کامپوزیت‌های دوپایدار از جنس زمینه گرمانرم پی‌وی‌سی و الیاف شیشه تولید شده و اثر دو فاکتور ابعاد کامپوزیت و دمای قالب مطابق طراحی آزمایش در 3 سطح، بررسی گردید. پارامتر حداکثر ارتفاع دوپایدار به‌عنوان خروجی آزمایش انتخاب شد. نتایج حاصل از تحلیل واریانسی نشان می‌دهد که ابعاد کامپوزیت بیشترین تأثیر را بر روی ارتفاع دوپایداری دارد و تأثیر فاکتور دمای قالب بر روی ارتفاع دوپایداری ناچیز است. همچنین مشخص شد، هر چه ابعاد کامپوزیت بزرگ‌تر و دمای قالب کمتر باشد ارتفاع دوپایداری بیشتر خواهد بود. بعد از انجام آزمایش‌های تجربی، ورق‌های دوپایدار کامپوزیتی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شده و نتایج کار شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه گردید. نتایج این مقایسه نشان داد که شبیه‌سازی همواره ارتفاع دوپایداری بیشتری را نسبت به نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کند و مقدار اختلاف نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی در همه موارد کمتر از 10 درصد بوده است.

The investigation of the effects of Dimension's and Mold's Temperature on Bistability of PVC/Glass Fiber composites

Yusef Oftadeh, Mohammad Golzar*

Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, m.golzar@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 03 January 2017

Accepted 08 March 2017

Available Online 12 April 2017

Keywords:

bistable composite

composites dimensions

mold temperature

Fiber Glass

PVC

ABSTRACT

In this research, in order to study effects of fabrication method the square-shaped bistable composites laminates with asymmetric layers were prepared and investigated. Different kinds of bistable composite laminates were fabricated by thermoplastic PVC and glass fibers and the effects of composites laminate dimensions and mold temperature were investigated. The maximum height of the bistable composite laminate is selected as the output of experiments. The results derived from ANOVA analysis showed that the dimensions of the laminates have the highest effects on bistability height and the effects of mold temperature are very low. It was also determined that with the larger dimensions of composite laminates and lower mold's temperature, the heights of bistability were higher. Also, these bistable composite laminates were simulated in ABAQUS and the simulation results were compared with the experimental results. The results indicated that simulation method anticipated the higher bistability height rather than the experimental results and the difference between these results is less than 10% in all specimens.

1- مقدمه

امروزه به‌دلیل خواص ذاتی فناوری مورفینگ، مطالعات گسترده‌ای بر روی سازه‌های مورفینگ برای استفاده در صنایع مختلفی از جمله صنایع هوا و فضا صورت گرفته است. مورفینگ در لغت به معنی تغییر شکل از حالتی به حالت دیگر بدون شکست یا گسیختگی است. در علوم مهندسی، مورفینگ به سازه‌های اطلاق می‌شود که قادرند شکل و هندسه خود را با توجه به شرایط مختلف تغییر دهند و از این طریق باعث بهبود عملکرد سازه‌ها شوند.

یکی از مهم‌ترین کاربردهای صفحه‌های کامپوزیتی به‌کارگیری آن‌ها در سازه‌های مورفینگ است. سازه‌های کامپوزیتی دوپایا به خاطر داشتن دو حالت پایدار و نسبت استحکام به وزن بالا می‌توانند جایگزین مطلوبی برای طرح‌های مرسوم در سازه‌های مورفینگ باشد [2,1].

کامپوزیت‌های تک جهته دارای ضریب انبساط حرارتی متفاوت در راستای طولی و عرضی هستند و این اختلاف ضریب انبساط حرارتی باعث شده تا کامپوزیت‌های تک جهته با لایه چینی نامتقارن همانند بای‌متال‌ها در اثر حرارت انحنا پیداکرده و تبدیل به کامپوزیت‌های دوپایدار شوند. درواقع تنش پسماند به وجود آمده در کامپوزیت به دلیل اختلاف ضریب انبساط

Please cite this article using:

Y. Oftadeh, M. Golzar, The investigation of the effects of Dimension's and Mold's Temperature on Bistability of PVC/Glass Fiber composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 161-167, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Archive of SID

www.SID.ir

Downloaded from mme.modares.ac.ir at 15:03 IRDT on Sunday May 13th 2018

حرارتی در راستای طولی و عرضی، باعث ایجاد حالت‌های پایدار ورق در دمای محیط مانند "شکل 1" می‌شود.

پژوهش‌های بسیاری بر روی دوپایداری کامپوزیت‌ها صورت گرفته است. مطالعات هایر [3] بر روی خانواده‌های متعددی از ورقه‌های متقاطع نشان داد که تئوری کلاسیک ورقه‌های برای پیش‌بینی رفتار یک صفحه مربعی [0/90] تحت بار حرارتی ΔT با نتایج تجربی در تناقض است.

تئوری کلاسیک ورقه‌ها[1] برای ورق مربعی [0/90] همواره یک‌شکل زین‌اسبی[2] را پیش‌بینی می‌کند این در حالی بود که هایر در نتایج تجربی خود به‌جای شکل زین اسبی، شکل استوانه‌ای مشاهده نمود. به‌علاوه، این ورقه‌های دارای خاصیت دوپایداری بودند که با اعمال نیرویی از یک حالت‌پایا به حالت‌پایای دیگر منتقل می‌شدند. متعاقباً، برای توضیح خاصیت دوپایداری، هاماموتو و هایر [4] هندسه غیرخطی فون-کارمان را در تئوری کلاسیک ورقه‌ها وارد نمودند. دستگاه معادلات غیرخطی به‌دست‌آمده به روش حداقل نمودن انرژی پتانسیل کل ورق به روش ریلی-ریتز حل‌شده و میدان جابه‌جایی به دست آمد. درواقع، هایر علاقه بسیاری نسبت به این زمینه ایجاد نمود و در سال‌های بعدی پژوهشگران متعددی در جهت بهبود تئوری وی تلاش نمودند. در ادامه به تعدادی از این بررسی‌ها اشاره می‌شود.

گیگلیوتی و همکاران [5] رفتار ورق‌های [0/90] تحت بارهای حرارتی را با آباکوس شبیه‌سازی کرده و با مدل رایلی ریتز مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ایجاد عیوبی مانند عدم تقارن در ضخامت باعث از بین رفتن نقطه دوشاخه شدن می‌شود. گیگلیوتی و همکاران [6] ایجاد و گسترش تنش‌های پسماند در ورق تخت نامتقارن [0/90] را پایش نمودند. گیدینگز و همکاران [7] از نرم‌افزار تحلیل المان محدود انسیس برای پیش‌بینی دقیق شکل پخت شده کامپوزیت‌های دوپایا با لحاظ تأثیر عیوب ساخت مانند نقاط غنی از رزین و تغییرات در ضخامت هر لایه استفاده نمودند. توفیق و همکاران [8] با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس، نسبت طول به ضخامت کامپوزیت‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند و مشاهده نمودند در نسبت‌های بالا طول به ضخامت، دو حالت پایدار استوانه‌ای و در نسبت‌های کم شکل زین اسبی تشکیل می‌شود. موره و همکاران [9] در دانشگاه صنعتی اصفهان، ویژگی‌های پایداری و پاسخ حرارتی یک صفحه کامپوزیتی دوپایا را با ترکیب نامتقارن مختلف در نظر گرفتند. برای تعیین پاسخ ورقه‌ها از روش المان محدود غیرخطی استفاده گردید. توجه روی خواص مکانیکی وابسته به حرارت از جمله ضرایب انبساط حرارتی معطوف شد. موره و همکاران [10] رابطه غیرخطی دما انحنا را برای لمینیت‌های کامپوزیتی نامتقارن با روش رایلی- ریتز مطالعه کردند. برامپتون و همکاران [11] حساسیت لمینیت‌های دوپایا به خواص ماده، هندسه و شرایط محیطی را مطالعه کردند. مصطفوی و همکاران [12] توانستند برای کامپوزیت با هندسه موج سینوسی مدلی ارائه دهند و آن را با نتایج تجربی مقایسه کنند.

مطالعات محدودی تاکنون بر روی استفاده از زمینه‌های گرمانرم در کامپوزیت‌های دوپایدار صورت گرفته و این در حالی است که کامپوزیت‌ها با زمینه گرمانرم بنا به مزایایی از قبیل مقاومت به ضربه بالا، قابلیت شکل‌دهی مجدد، چقرمگی شکست[3] بالا، قابلیت بازیابی مجدد و زمان نگهداری بالا که در مقایسه با کامپوزیت‌های زمینه گرماسخت دارند بیشتر مورد توجه است [14,13]. صلبیت و آغشته سازی ضعیف مواد گرمانرم به‌دلیل ویسکوزیته بالا آن‌ها، استفاده از مواد گرمانرم را در مقایسه با مواد گرماسخت کاهش داده است [15]. گرمانرم پی‌وی‌سی با خواص مکانیکی و فیزیکی عالی و مزایای اقتصادی بالا کاربرد زیادی در صنایع مختلف دارد [16]. از جمله خواص عالی پی‌وی‌سی می‌توان به هزینه تولید پایین، عمر بالا، مقاومت به سایش خوب، مقاومت به شرایط محیطی بد اشاره کرد که باعث افزایش استفاده از پی‌وی‌سی شده است [17]. پی‌وی‌سی به خاطر عامل قطبی خود موجب می‌شود تا اتصال مناسبی بین زمینه و الیاف برقرار شود و در نتیجه کامپوزیت‌های مستحکم‌تری را نسبت به دیگر گرمانرم‌ها تولید می‌نماید.

گرمانرم‌ها معمولاً به دودسته، نیمه کریستالی یا آمورف طبقه‌بندی می‌شوند که پی‌وی‌سی به‌عنوان یک ماده گرمانرم جز دسته آمورف یا بی‌شکل محسوب می‌شود. گرمانرم‌های آمورف دارای نقطه ذوب مشخصی نیستند و با حرارت دهی نرم شده و قابلیت شکل‌پذیری را به خود می‌گیرند. به خاطر همین دلایل است که استفاده از پی‌وی‌سی در ساخت کامپوزیت قابل توجیه است. با توجه به پژوهش‌های انجام شده و نبود تحقیقات علمی روی کامپوزیت‌های زمینه گرمانرم دوپایدار، در این مقاله سعی شده تا با استفاده از گرمانرم پی‌وی‌سی، کامپوزیت‌های دوپایدار ساخته شود و فاکتورهای چون ابعاد کامپوزیت و دمای قالب موردمطالعه و بررسی قرار گیرد. در ادامه نتایج حاصل از کارهای تجربی با نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس مورد مقایسه قرار گرفتند تا اثر شرایط تولید، بر دوپایداری کامپوزیت‌های زمینه گرمانرم بررسی شود.

2- مواد و تولید نمونه‌ها

برای تولید کامپوزیت‌های دوپایدار زمینه گرمانرم، الیاف شیشه تک جهته به‌عنوان تقویت‌کننده انتخاب گردید. الیاف شیشه مورد مصرف از نوع گرید E و چگالی سطحی 240 گرم بر مترمربع بوده است. برای فاز زمینه نیز از فیلم‌های گرمانرم پی‌وی‌سی به ضخامت 0.15 میلی‌متر و با دمای انتقال شیشه‌ای 80℃ و دمای تخریب 230℃ در شرایط جو (هوای آزاد)، استفاده شده است.

برای تولید ورق‌های کامپوزیتی از فرایند انباشت لایه‌ها[4] به همراه پرس گرم استفاده شد. فرایند انباشت لایه‌ها به این صورت بوده که 2 لایه الیاف شیشه با لایه چینی نامتقارن [0/90] به‌طور متناوب بین 3 لایه فیلم پی‌وی‌سی در زیر پرس گرم تحت‌فشار و حرارت قرار می‌گرفتند. حرارت باعث نرم شدن زمینه پی‌وی‌سی و در نتیجه نفوذ آن به داخل الیاف شیشه شده و ورق‌های کامپوزیتی یکپارچه باضخامت 1 میلی‌متر را تولید می‌کند. برای

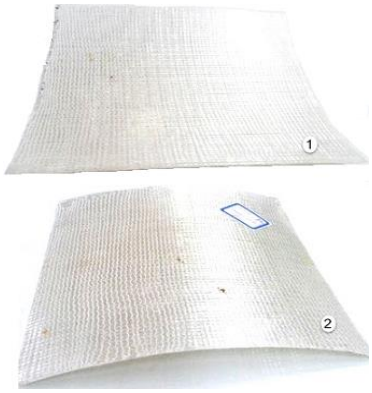

Fig. 1 Bistable composite with the laminate code [0/90]

شکل 1 کامپوزیت‌های دوپایدار با لایه چینی [0/90]

[1] laminate
[2] Saddle shape
[3] Fracture toughness
[4] Film Stacking

www.SID.ir
Archive of SID

Downloaded from mme.modares.ac.ir at 15:03 IRDT on Sunday May 13th 2018

جلوگیری از تماس پی‌وی‌سی با پرس گرم، کامپوزیت داخل یک عایق تفلونی قرار داده شده تا از چسبیدن پی‌وی‌سی به پرس گرم جلوگیری کند در "شکل 2" فرآیند تولید نمونه‌ها نشان داده شده است. برای مشاهده روش تنظیم دما مرجع [18] توصیه می‌شود.

روند انجام آزمایش بدین‌صورت است که ابتدا دمای پرس تا دمای مدنظر بالا رفته، سپس نمونه‌ها زیر پرس گرم قرار داده‌شده و فشار اعمال می‌گردد. نمونه‌ها به مدت 10 دقیقه در زیر حرارت و فشار پرس گرم قرار داشته و سپس از زیر پرس گرم خارج‌شده و در هوای آزاد سرد می‌شدند.

3- طراحی آزمایش

امروزه طراحی آزمایش به‌طور وسیعی در زمینه‌های مختلف مهندسی برای اصلاح و افزایش عملکرد فرایند استفاده می‌شود. شناخت کافی نسبت به پارامترهای مورد بررسی در آزمایش یکی از نیازهای اساسی برای شروع طراحی آزمایش است.

در این پژوهش از روش طراحی آزمایش فاکتوریل کامل به خاطر ارزیابی تمامی حالت‌ها آزمایش استفاده شد. دو فاکتور مهم برای کامپوزیت‌های دوپایدار با زمینه گرمانرم و الیاف شیشه، پارامترهای ابعاد کامپوزیت (طول و عرض) و دمای قالب می‌باشند که به‌عنوان ورودی کار انتخاب شدند و حداکثر ارتفاع دوپایدار کامپوزیت موردبررسی قرار گرفت. فاکتورهای ابعاد کامپوزیت و دمای قالب در 3 سطح مطابق جدول 1 مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. به‌منظور بالا بردن دقت آزمایش‌ها و حذف خطای احتمالی، تمامی آزمایش‌ها به‌صورت تصادفی انجام شد. در کل 9 آزمایش به‌منظور بررسی اثر پارامترها بر روی دوپایداری کامپوزیت‌ها صورت گرفت.

4- اندازه‌گیری ارتفاع دوپایداری

جهت اندازه‌گیری ارتفاع دوپایداری کامپوزیت‌ها از دستگاهی که در "شکل 3" نشان داده شده استفاده گردید. روش کار بدین‌صورت بود که ورقه‌های کامپوزیت را به دیواره دستگاه چسبانده و سپس به کمک یک پراب، بر روی کاغذ ایزومتریک نقاطی قرار می‌دادیم. با فرض مرکز مختصاتی در کاغذ ایزومتریک می‌توان مختصات نقاط را به‌دست آورده و انحنای کامپوزیت دوپایدار را محاسبه کرد.

5- شبیه‌سازی

همراه با توسعه سریع نرم‌افزارها و کامپیوترها، کاربرد شبیه‌سازی‌های عددی در تحلیل‌ها و طراحی‌های مهندسی بسیار گسترده شده است. نظر به پیچیده بودن تحلیل بسیاری از فرایندهای مهندسی با روش‌های تحلیلی، روش‌های عددی مختلفی مانند المان محدود برای حل این مسائل پیشنهاد شده است. انجام آزمایش‌های تجربی جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر دوپایداری کامپوزیت‌ها، مستلزم صرف هزینه و وقت زیاد است. هرچند آزمایش‌های تجربی، جهت به‌دست آوردن یک دید کلی در مورد رفتار ماده مطلوب است ولی می‌توان با شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزارهای المان محدود از صرف وقت و هزینه زیاد جلوگیری کرده و نتایج بهتری از نظر کمی و کیفی به دست آورد. برای شبیه‌سازی کامپوزیت‌های دوپایدار پی‌وی‌سی/ شیشه از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده گردید.

به‌منظور بررسی نتایج به‌دست آمده، ورقی با مشخصات هندسی و مکانیکی مشابه جدول 2 در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شده است. برای حل مسئله از شبکه‌بندی خودکار و المان پوسته مربعی چهار نقطه‌ای استفاده شده است که هر نقطه آن شش درجه آزادی (سه درجه جابجایی و سه درجه آزادی چرخش) دارد. همچنین گزینه مربوط به غیرخطی بودن تغییرات هندسه برای بررسی جابجایی‌های بزرگ مورد استفاده قرار گرفته است. در پایان از تحلیل استاتیک عمومی و تعریف گام‌های زیر، حالت‌های پایدار به‌دست آمده‌اند:

- در گام اول با توجه به یکسان بودن ضخامت لایه‌ها و همچنین طول و عرض ورق، برای آن‌که ورق پس از ایجاد تنش‌های پسماند وارد یکی از حالت‌های پایدار گردد اندازه طول و عرض ورق را باکمی اختلاف (به اندازه 0.01mm) در نظر می‌گیریم. در غیر این صورت ورق به حالت زین اسبی تغییر شکل خواهد داد و حالت دوپایداری تشکیل نخواهد شد.
- در گام دوم، جهت رفتن به حالت پایدار دوم چهارگوشه مدل را مقید کرده و سپس به نقطه وسط کامپوزیت مقداری نیرو داده می‌شود تا به حالت دوم دوپایدار تغییر شکل دهد.

ساخت قطعات با انحنای موردنظر، موضوع پژوهش‌های بعدی است ولی این کار نیاز به به‌کارگیری ابزارهای کافی محاسباتی دارد تا بتوان از انحنای دوپایداری به ابعاد و لایه چینی اولیه دست یافت. اصولاً تئوری کلاسیک لامینت نمی‌تواند دوپایداری را محاسبه کند. برای این منظور مقاله‌ای درباره به مقاله [12] ارجاع داده می‌شود.

6- نتایج و بحث

بعد از ساخت نمونه‌های کامپوزیت دوپایدار با زمینه پی‌وی‌سی و الیاف شیشه مطابق طراحی آزمایش، ارتفاع دوپایداری هر یک از نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و در جدول 3 مقادیر هر یک آورده شده است.

آنالیز واریانس طراحی آزمایش که اثرات ابعاد کامپوزیت و دمای قالب را بررسی می‌کند در جدول 4 نشان داده شده است. طراحی آزمایش و آنالیز واریانس با استفاده از نرم‌افزار مینی تب[1] 17 صورت گرفته است. برای به

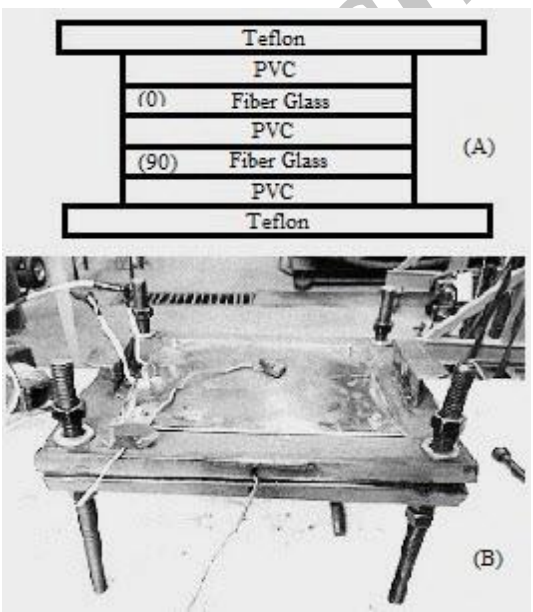

Fig.2 (A) Schematic of the film stacking procedure, (B) Hot Press

شکل 2 (A) شماتیک انباشت لایه‌ها (B) پرس گرم

[1] Minitab17

www.SID.ir

Downloaded from mme.modares.ac.ir at 15:03 IRDT on Sunday May 13th 2018

جدول 1 طراحی آزمایش فاکتوریل کامل

Table.1 Full Factorial design experiment

فاکتور	سطوح		
	سطح 1	سطح 2	سطح 3
ابعاد کامپوزیت (cm×cm)	15×15	20×20	25×25
دمای قالب (°C)	190	200	210

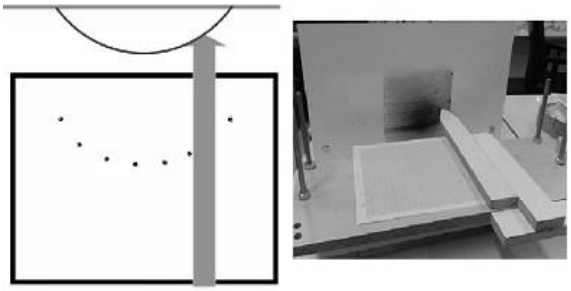

Fig.3 Schematic of measuring methods

شکل 3 شماتیک روش اندازه‌گیری

دست آوردن درصد تأثیر هریک از عامل‌ها، حداقل مربعات هریک از عامل‌ها را بر مجموع مربعات تقسیم کرده و در 100 ضرب می‌شود. "شکل 4"، درصد تأثیرگذاری هریک از پارامترهای اصلی بر میزان ارتفاع دوپایداری کامپوزیت را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از "شکل 4" پیداست تأثیر ابعاد کامپوزیت بسیار بیشتر از تأثیر دمای قالب در ناحیه انتخاب شده است. طوری که تأثیر ابعاد کامپوزیت 97.5% و تأثیر دمای قالب فقط 2% برآورد می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده مهم بودن فاکتور ابعاد کامپوزیت نسبت به فاکتور دمای قالب در ناحیه انتخاب شده است. دلیل چنین اختلاف فاحشی در تأثیرگذاری ابعاد کامپوزیت نسبت به دمای قالب بدین خاطر است که سطوح انتخاب شده برای ابعاد کامپوزیت کاملاً تأثیرگذار بوده و اختلاف ارتفاع دوپایداری در آن‌ها زیاد می‌باشد در واقع ارتفاع دوپایداری در یک دمای ثابت برای نمونه‌های 15×15، 20×20 و 25×25 اختلاف فاحشی باهم داشته و باعث تأثیرگذاری زیاد ابعاد کامپوزیت می‌شود.

این در حالی است که اختلاف ارتفاع دوپایداری برای یک ابعاد ثابت با دماهای متغیر 190°C، 200°C و 210°C زیاد نبوده و باعث کاهش تأثیرگذاری فاکتور دمای قالب می‌شود. تأثیرگذاری کم دمای قالب دلیل بر انتخاب نادرست ناحیه بررسی دما قالب نبوده چرا که در دماهای بالاتر از محدوده انتخاب شده پی‌وی‌سی تجزیه شده و در دماهای پایین اتصالی بین الیاف شیشه و پی‌وی‌سی برقرار نمی‌شود. در واقع می‌توان گفت برای بررسی دمای قالب نمی‌توان هر ناحیه دلخواه را انتخاب نمود چراکه ناحیه انتخاب شده باید شرایط آزمایش را ارضا کند و بدین خاطر آزمایش‌ها فقط در آن ناحیه دمایی صورت گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش ابعاد کامپوزیت، ارتفاع دوپایداری افزایش می‌یابد و این افزایش ارتفاع دوپایداری با افزایش ابعاد کامپوزیت کاملاً مشخص و زیاد است. همچنین داده‌ها مشخص می‌کنند که دما تأثیر عکسی بر روی ارتفاع دوپایداری داشته و باعث کاهش آن می‌شود. درواقع با افزایش دما قالب، ارتفاع دوپایداری کاهش می‌یابد اما این کاهش ارتفاع زیاد نبود و دمای قالب تأثیر کمی بر روی ارتفاع دوپایداری دارد. در "شکل 5" کامپوزیت‌های ساخته شده در محدوده دمایی نشان داده شده است.

جدول 2 مشخصات کامپوزیت پی‌وی‌سی/ شیشه[19]

Table.2 Properties of PVC/Glass Fiber composites

مشخصه	مقدار
مدول کشسان طولی (GPa)	19
مدول کشسان طولی (GPa)	1.7
مدول برشی (MPa)	630
ضریب انبساط حرارتی طولی (1/°C)	6E-6
ضریب انبساط حرارتی عرضی (/°C)	4.2E-5
ضریب پواسون	0.35
ضخامت هر لایه (mm)	0.5
چینش	[0/90]

جدول 3 نحوه و نتایج آزمایش‌های انجام شده

Table.3 Methods and results of experiments

دمای قالب (°C)	ابعاد کامپوزیت	مقدار ارتفاع (mm)
190	15×15	13
190	20×20	21.8
190	25×25	34.2
200	15×15	12.4
200	20×20	20.6
200	25×25	31.8
210	15×15	12.2
210	20×20	18.6
210	25×25	30.2

جدول 4 آنالیز واریانس طراحی آزمایش

Table.4 ANOVA Design of experiments

عامل	مجموع مربعات	مقدار P	مقدار F	سهم تأثیر (٪)
ابعاد	581	0.000	369.04	97.5
دمای قالب	12	0.049	5.95	2
خطا	3	-	-	0.5
کل	596	-	-	100

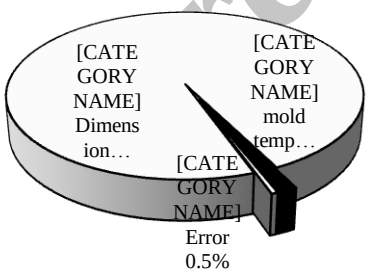

Fig.4 Effects of the experiment factors

شکل 4 تأثیر فاکتورهای طراحی آزمایش

6-1- تأثیر ابعاد کامپوزیت بر روی حداکثر ارتفاع دوپایداری

جهت بررسی تأثیر ابعاد کامپوزیت، اندازه حداکثر ارتفاع دوپایداری در ابعاد مختلف و دمای ثابت مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی ابعاد کامپوزیت، لایه چینی در تمامی موارد به‌صورت [0/90] و نحوه سرد شدن در هوا مدنظر بوده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره‌شده است تأثیر ابعاد کامپوزیت در سه رنج مختلف 15×15، 20×20 و 25×25 سانتی‌متر مربع مورد مطالعه است. در بررسی تأثیر ابعاد کامپوزیت سه حالت مورد بررسی قرار

www.SID.ir

Downloaded from mme.modares.ac.ir at 15:03 IRDT on Sunday May 13th 2018

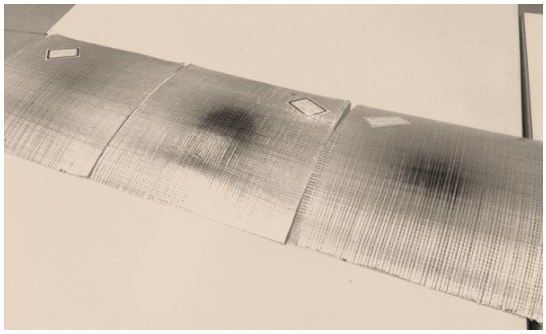

Fig.5 Bistable composite made of PVC/glass fiber at different temperatures

شکل 5 کامپوزیت‌های دوپایدار شیشه/پی‌وی‌سی ساخته شده در دماهای مختلف

گرفته است که عبارت‌اند از:

- تأثیر ابعاد کامپوزیت در دمای 190°C
- تأثیر ابعاد کامپوزیت در دمای 200°C
- تأثیر ابعاد کامپوزیت در دمای 210°C

همان‌طور که از "شکل‌های 8,7,6" برمی‌آید با افزایش ابعاد کامپوزیت حداکثر ارتفاع دوپایداری افزایش پیدا می‌کند. در اندازه 25×25 سانتی‌متر مربع بیشترین ارتفاع دوپایداری و در اندازه 15×15 کمترین ارتفاع دوپایداری مشاهده می‌شود. کاملاً از نتایج مشخص است که افزایش ابعاد در کامپوزیت‌های گرمانرم زمینه پی‌وی‌سی و الیاف شیشه، با پیروی از یک‌روند منظم باعث افزایش ارتفاع دوپایداری می‌شوند.

با فرض میله در نظر گرفتن ورق کامپوزیتی دوپایدار می‌توان از طریق رابطه (1) استفاده کرد و فاکتور ابعاد کامپوزیت را مورد بررسی قرار داد. طبق رابطه (1) با افزایش طول اولیه، تغییرات طول نیز افزایش خواهد یافت. پس درنتیجه باید انتظار داشت که ارتفاع دوپایداری افزایش خواهد یافت.

مطابق "شکل‌های 8,7,6" آزمایش‌های تجربی ثابت می‌کنند که در هر دمای با افزایش ابعاد کامپوزیت ارتفاع دوپایداری افزایش خواهد یافت درواقع ابعاد کامپوزیت همواره در هر دمای از یک قانون ثابت پیروی می‌کنند که در آن هر چه ابعاد بزرگ‌تر، ارتفاع دوپایداری بیشتر خواهد بود.

2-6- تأثیر دمای قالب بر روی حداکثر ارتفاع دوپایداری

جهت بررسی تأثیر دمای قالب، اندازه ارتفاع دوپایداری در دماهای مختلف و ابعاد ثابت مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی دمای قالب، لایه چینی در تمامی موارد به‌صورت [0/90] و نحوه سرد شدن در هوا مدنظر بوده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شده است تأثیر دما در سه رنج مختلف 190، 200 و 210 درجه سانتی‌گراد مورد مطالعه است. در بررسی تأثیر دمای قالب سه حالت مورد بررسی قرار گرفته است که عبارت‌اند از:

- تأثیر دمای پخت در ابعاد 15×15(cm×cm)
- تأثیر دمای پخت در ابعاد 20×20(cm×cm)
- تأثیر دمای پخت در ابعاد 25×25(cm×cm)

طبق رابطه (2) و (3) با افزایش دما تغییرات طول نیز با افزایش همراه خواهد بود.

$$\uparrow L \rightarrow \uparrow \Delta L \quad (1)$$

$$\uparrow \Delta T \rightarrow \uparrow \Delta L \quad (2)$$

$$\Delta L = \alpha\, L.\Delta T \quad (3)$$

ولی همان‌طور که از "شکل‌های 11,10,9" برمی‌آید با افزایش دما ارتفاع دوپایداری کاهش پیدا می‌کند و در دمای 190 درجه سانتی‌گراد بیشترین ارتفاع دوپایداری و در دمای 210 درجه سانتی‌گراد کمترین ارتفاع دوپایداری اتفاق می‌افتد. کاملاً از "شکل‌های 11,10,9" مشخص است که با افزایش دما در کامپوزیت‌های گرمانرم زمینه پی‌وی‌سی و الیاف شیشه، با پیروی از یک‌روند منظم باعث کاهش ارتفاع دوپایداری می‌شوند. این امر می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد که به ساختار پی‌وی‌سی مرتبط است در واقع افزایش دما بر روی خواص پی‌وی‌سی تأثیرگذار است. دمای تخریب پی‌وی‌سی 230 درجه سانتی‌گراد می‌باشد در نتیجه باید انتظار داشت که با افزایش دما قالب پی‌وی‌سی سوخته و خواص خود را از دست دهد.

در واقع می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش دما پی‌وی‌سی خواص و کیفیت خود را از دست داده و ارتفاع دوپایداری کمی را از خود در دماهای بالا نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده نیز نشان‌دهنده این امر هستند که تأثیر دما بر روی ارتفاع دوپایداری آن چنان زیاد نیست در واقع اختلاف آن‌چنان زیادی بین ارتفاع دوپایداری در دماها وجود ندارد؛ و این نشان‌دهنده تأثیر کم دما بر روی ارتفاع دوپایداری در یک طول ثابت است.

3-6- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با تجربی

بعد از مدل کردن نمونه و واردکردن خواص ماده و انتخاب نحوه انجام حل مسئله، شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفت. در شبیه‌سازی پارامتر

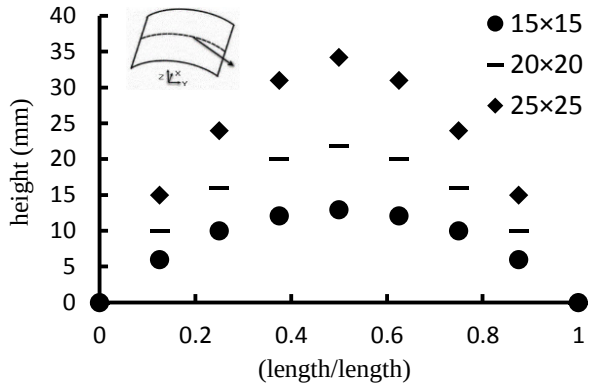

Fig.6 Effects of composite Dimension on out of plane displacement at 190°C Mold Temperature

شکل 6 تأثیر ابعاد کامپوزیت روی ارتفاع دوپایداری در دمای قالب 190°C سلسیوس (پی‌وی‌سی/الیاف شیشه)

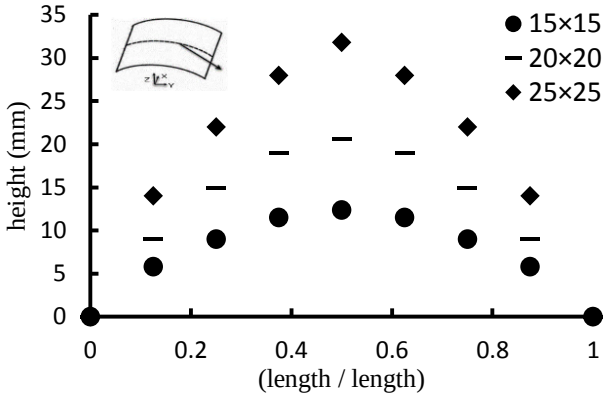

Fig.7 Effects of composite Dimension on out of plane displacement at 200°C Mold Temperature

شکل 7 تأثیر ابعاد کامپوزیت روی حداکثر ارتفاع دوپایداری در دمای قالب 200°C سلسیوس (پی‌وی‌سی/الیاف شیشه)

www.SID.ir

Downloaded from mme.modares.ac.ir at 15:03 IRDT on Sunday May 13th 2018

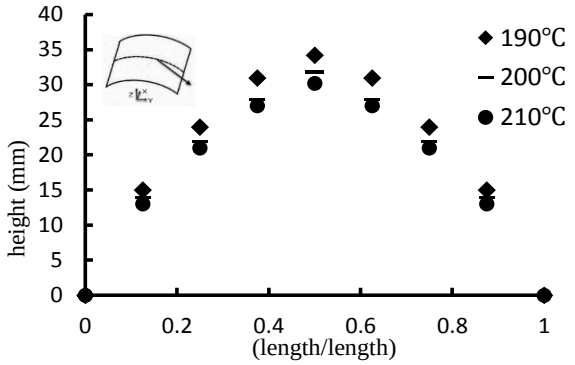

Fig.11 Effects of Mold's Temperature on Out of plane displacement at 25×25 Dimension (PVC/GF)

شکل 11 تأثیر دمای قالب بر روی کامپوزیت 25×25 (پی‌وی‌سی/الیاف شیشه)

ضخامت آن 0.5 میلی‌متر بود وارد گردید. همچنین دما در شبیه‌سازی 190 سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. "شکل 12" نشان‌دهنده شبیه‌سازی کامپوزیت با لایه چینی [0/90] است.

بعد از پایان کار شبیه‌سازی جهت مدل کردن انحنای دوپایداری، داده‌ها از نرم‌افزار آباکوس استخراج گردید و در نرم‌افزار اکسل بازخوانی شده و انحنای حاصل را به‌صورت منحنی رسم گردید. "شکل 13" نشان‌دهنده مقایسه نتایج شبیه‌سازی انحنای کامپوزیت با نتایج نمونه‌های تجربی در ابعاد مختلف است. لازم به ذکر است که انحنا در هر دو طرف یعنی حول X و Y یکسان بوده و یکی از آن‌ها رسم شده است.

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از کار تجربی در ابعاد مختلف کامپوزیت دوپایدار پی‌وی‌سی/ شیشه نشان‌دهنده خطای 10 درصدی برای همه ابعاد هست. طوری که همیشه شبیه‌سازی به‌اندازه 10 درصد، ارتفاع

Fig.12 Simulation of the bistable composites 1)Steady state around the longitudinal axis 2) Steady state around the transverse axis

شکل 12 شبیه‌سازی کامپوزیت دوپایدار 1) حالت دوپایدار حول محور طولی 2) حالت دوپایدار حول محور افقی

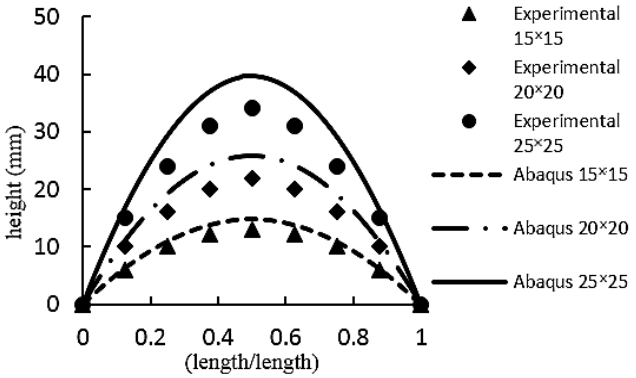

Fig.13 Compare the simulation and experimental results of Effect of Dimension factors at 190C Mold's Temperature

شکل 13 مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی تأثیر فاکتور ابعاد در دمای قالب 190C

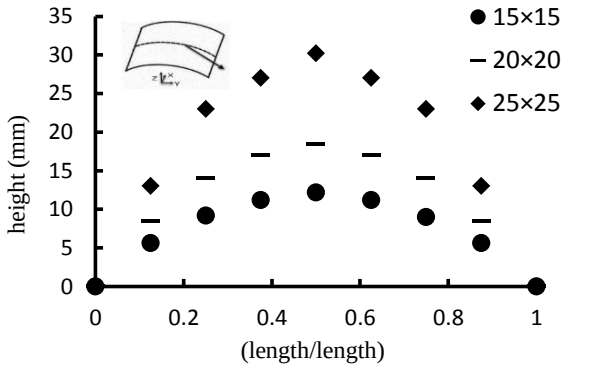

Fig.8 Effects of composite Dimension on out of plane displacement at 210°C Mold Temperature

شکل 8 تأثیر ابعاد کامپوزیت روی حداکثر ارتفاع دوپایداری در دمای قالب 210°C سلسیوس (پی‌وی‌سی/الیاف شیشه)

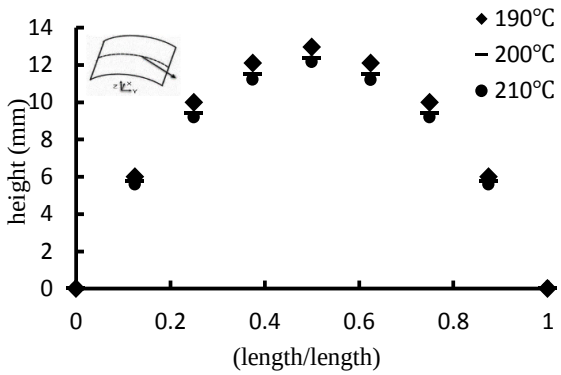

Fig.9 Effects of Mold Temperature on Out of plane displacement at 15×15 Dimension (PVC/GF)

شکل 9 تأثیر دمای قالب بر روی کامپوزیت 15×15 (پی‌وی‌سی/الیاف شیشه)

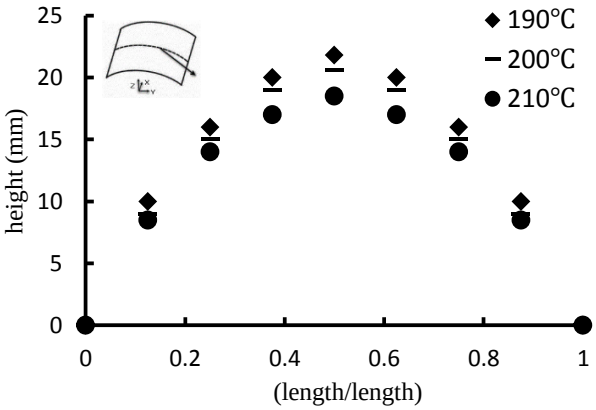

Fig.10 Effects of Mold's Temperature on Out of plane displacement at 20×20 Dimension (PVC/GF)

شکل 10 تأثیر دمای قالب بر روی کامپوزیت 20×20 (پی‌وی‌سی/الیاف شیشه)

ابعاد کامپوزیت فقط مورد مطالعه واقع شد؛ که شبیه‌سازی برای ابعاد مختلف عبارت بوده‌اند از:

- ابعاد کامپوزیت 15×15(cm×cm)
- ابعاد کامپوزیت 20×20(cm×cm)
- ابعاد کامپوزیت 25×25(cm×cm)

ضخامت کامپوزیت در شبیه‌سازی مطابق باضخامت نمونه تجربی که

www.SID.ir

Downloaded from mme.modares.ac.ir at 15:03 IRDT on Sunday May 13th 2018

بزرگ‌تری را پیش‌بینی می‌کند.

دلیل اختلاف نتایج تجربی و شبیه‌سازی را می‌توان به خاطر اثرات ساخت و اختلاف در خواص مواد در نظر گرفت. چرا که در واقعیت با افزایش دما پی‌وی‌سی دچار افت خواص شده درحالی‌که در شبیه‌سازی چنین رفتار مدل نشده است.

7- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بررسی تأثیر پارامترهای مانند ابعاد کامپوزیت و دمای قالب دوپایداری کامپوزیت‌ها و تأثیر این پارامترها بر روی ارتفاع دوپایداری و انحنا مورد مطالعه قرار گرفت. سپس جهت سنجش صحت نتایج تجربی حل عددی مسئله نیز صورت گرفت. برای این منظور از نرم‌افزار المان محدود آباکوس جهت شبیه‌سازی و حل عددی کامپوزیت‌های دوپایدار استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و حل عددی مقایسه و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش به قرار زیر است:

- نمونه‌های آزمایشی نشان‌دهنده ایجاد کامپوزیت‌های دوپایدار با استفاده از زمینه‌های گرمانرم پی‌وی‌سی و الیاف شیشه است.
- نتایج حاصل از بررسی ابعاد کامپوزیت در اندازه‌های مختلف نشان دهنده تأثیرگذاری بالای این پارامتر بر روی ارتفاع و انحنا دوپایداری است. همچنین این نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ابعاد کامپوزیت، ارتفاع دوپایداری افزایش می‌یابد.
- دمای قالب یکی از عوامل ساختی بسیار مهمی است که مطالعه دقیق آن در زمینه‌های گرمانرم ضروری است دلیل این امر به خاطر وابستگی خواص گرمانرم‌ها به حرارت است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان‌دهنده ایجاد دوپایداری در یک محدوده دمای مشخص است. در دماهای پایین به سبب عدم اتصال مناسب بین الیاف و زمینه و در دماهای بالا به خاطر سوختن پلیمر، کامپوزیت‌های دوپایدار ایجاد نمی‌شوند. همچنین نتایج حاصل از بررسی دمای قالب در رنج‌های مشخص شده حاکی از آن است که با افزایش دما مقدار ارتفاع دوپایداری به‌صورت ناچیز در حال کاهش است.
- مقایسه نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی کامپوزیت‌های دوپایدار گرمانرم با الیاف شیشه در نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهد که همواره شبیه‌سازی، ارتفاع دوپایداری بزرگ‌تری نسبت به نمونه‌های تجربی نشان می‌دهد. مقدار اختلاف نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی در تمامی شبیه‌سازی‌ها کمتر از 10% است. یکی از دلایل کم بودن ارتفاع در نمونه‌های ساخته شده نگهداری نمونه‌ها در دمای بالا و تخریب بخشی از لایه‌هاست.

8- مراجع

[1] S. Daynes, P. M. Weaver, Stiffness tailoring using prestress in adaptive composite structures, *Composite Structures*, Vol. 106, No. 1, pp. 282-287, 2013.

[2] I. K. Kuder, A. F. Arrieta, W. E. Raither, P. Ermanni, Variable stiffness material and structural concepts for morphing applications, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 63, No. 1, pp. 33-55, 2013.

[3] M. W. Hyer, Some observations on the cured shape of thin unsymmetric laminates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 15, No. 2, pp. 175-194, 1981.

[4] H. Akira, M. Hye, Non-linear temperature-curvature relationships for unsymmetric graphite-epoxy laminates, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 23, No. 7, pp. 919-935, 1987.

[5] M. Gigliotti, M. R. Wisnom, K. D. Potter, Loss of bifurcation and multiple shapes of thin [0/90] unsymmetric composite plates subject to thermal stress, *Composites Science and Technology*, Vol. 64, No. 1, pp. 109-128, 2004.

[6] M. Gigliotti, M. Wisnom, K. Potter, Development of curvature during the cure of AS4/8552 [0/90] unsymmetric composite plates, *Composites Science and Technology*, Vol. 63, No. 2, pp. 187-197, 2003.

[7] P. F. Giddings, C. R. Bowen, A. I. Salo, H. A. Kim, A. Ive, Bistable composite laminates: effects of laminate composition on cured shape and response to thermal load, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 9, pp. 2220-2225, 2010.

[8] S. Tawfik, X. Tan, S. Ozbay, E. Armanios, Anticlastic stability modeling for cross-ply composites, *Journal of Composite Materials*, Vol. 41, No. 11, pp. 1325-1338, 2007.

[9] M. Moore, S. Ziaei-Rad, H. Salehi, Thermal response and stability characteristics of bistable composite laminates by considering temperature dependent material properties and resin layers, *Applied Composite Materials*, Vol. 20, No. 1, pp. 87-106, 2013.

[10] M. Moore, S. Ziaei-Rad, A. Firouzian-Nejad, 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*, Vol. 48, No. 9, pp. 1071-1089, 2014.

[11] C. J. Brampton, D. N. Betts, C. R. Bowen, H. A. Kim, Sensitivity of bistable laminates to uncertainties in material properties, geometry and environmental conditions, *Composite Structures*, Vol. 102, No. 1, pp. 276-286, 2013.

[12] S. Mostafavi, M. Golzar, A. Alibeigloo, On the thermally induced multistability of connected curved composite plates, *Composite Structures*, Vol. 139, No. 1, pp. 210-219, 2016.

[13] W. Wu, L. Xie, B. Jiang, G. Ziegmann, Simultaneous binding and toughening concept for textile reinforced pCBT composites: Manufacturing and flexural properties, *Composite Structures*, Vol. 105, No. 1, pp. 279-287, 2013.

[14] S.-F. Hwang, K.-J. Hwang, Stamp forming of locally heated thermoplastic composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 33, No. 5, pp. 669-676, 2002.

[15] H. Parton, I. Verpoest, In situ polymerization of thermoplastic composites based on cyclic oligomers, *Polymer Composites*, Vol. 26, No. 1, pp. 60-65, 2005.

[16] K. Endo, Synthesis and structure of poly (vinyl chloride), *Progress in Polymer science*, Vol. 27, No. 10, pp. 2021-2054, 2002.

[17] R. Wirawan, S. Sapuan, R. Yunus, K. Abdan, Properties of sugarcane bagasse/poly (vinyl chloride) composites after various treatments, *Journal of Composite Materials*, Vol. 45, No. 16, pp. 1667-1674, 2011.

[18] V. Zal, H. Moslemi Naeini, A. R. Bahramian, H. Abdollahi, A. H. Behravesh, Investigation of the effect of processing temperature on the elastic and viscoelastic properties of PVC/fiberglass composite laminates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 9-16, 2015. (in Persian)

[19] Y.Oftadeh, *Investigation of the effect manufacturing parameters of the asymmetric laminate composite on its bistable operation*, MS degree Thesis, faculty of mechanical engineering, Tarbiat modares, Tarbiat modares Publications, 2016.

Archive of SID

www.SID.ir