



## مدل سازی اجزاء محدود و بررسی تجربی اثر زاویه الیاف بر رفتار ویسکوالاستیک چندلایه های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف بلند

میلاذ حسین خانی<sup>1</sup>، مجتبی حقیقی یزدی<sup>2\*</sup>، محمود موسوی مشهدی<sup>3</sup>، مجید صفرآبادی<sup>2</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

\* mohaghghi@ut.ac.ir, 1439955961, تهران

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دریافت: 97/02/26

پذیرش: 97/05/18

### کلیدواژگان:

چندلایه کامپوزیتی

ویسکوالاستیک

آزمون رهایی تنش

آزمون تجربی

شبیه سازی عددی

مواد کامپوزیتی با زمینه پلیمری به طور گسترده ای در صنایع حمل و نقل، دریایی، عمرانی، نظامی و هوایی مورد استفاده قرار می گیرند. رزین های مورد استفاده در ساخت چندلایه های کامپوزیتی، خواص وابسته به زمان از خود نشان می دهند، از این رو بررسی خاصیت ویسکوالاستیک در این مواد در بسیاری از کاربردها ضروری به نظر می رسد. در این مقاله بر روی خاصیت ویسکوالاستیک چندلایه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف بلند و وابستگی آن به زاویه الیاف مطالعه صورت می گیرد و یک برنامه تکمیلی برای تعریف ماده ارتوتروپیک با خاصیت ویسکوالاستیک در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس ارائه می گردد. مطالعه به دو روش آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی انجام گرفته که نتایج شبیه سازی عددی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. در روش تجربی خاصیت ویسکوالاستیک با آزمون رهایی تنش در سه زاویه الیاف صفر، 45 و 90 درجه مشخصه سازی شده است. نتایج در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک و عدم ایجاد آن در شبیه سازی آزمون رهایی تنش حاکی از آن است که در نظر نگرفتن این خاصیت در شبیه سازی عددی باعث به وجود آمدن خطا در نتایج شده که میزان این خطا در زاویه الیاف 90 درجه بیشترین و در زاویه الیاف صفر درجه کمترین است. نتایج نشان می دهد که میزان کاهش مدول رهایی تنش در زوایای الیاف صفر، 45 و 90 درجه در مدت زمان 150 دقیقه به ترتیب 5، 16 و 18 درصد مقدار اولیه می باشد.

## Finite element modeling and experimental investigation of the effect of fiber orientation on viscoelastic behavior of composite laminates reinforced with long fibers

Milad Hosseinkhani, Mojtaba Haghighi-Yazdi\*, Mahmoud Mousavi-Mashadi, Majid Safarabadi

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1439955961, Tehran, Iran, mohaghghi@ut.ac.ir

### Keywords

Composite laminate  
Viscoelastic behavior  
Stress relaxation test  
Experimental method  
FEM

### Abstract

Polymer matrix composite materials are widely used in transportation, marine, civil, martial and aero-space industries. Resins used in composite laminates have time-dependent properties making the investigation of this property on composite laminates inevitable. In this paper, the effect of fiber orientation on viscoelastic behavior of composite laminates reinforced with long fibers is studied and a subroutine code is developed for orthotropic materials with viscoelastic behavior in Abaqus. Both experimental and numerical methods are used and the obtained results show good agreement. In experimental tests stress relaxation tests are applied for three fiber orientations of 0, 45 and 90 degree. Results show that ignoring viscoelastic behavior in numerical simulation lead to erroneous, with maximum and minimum values at 90 and 0 degree, respectively. Also results show that decreasing of relaxation modulus in 150 minutes for 0, 45 and 90 degree fiber orientation are 5, 16 and 18 percentage of initial value, respectively.

### Please cite this article using:

Hosseinkhani, M., Haghighi Yazdi, M., Mousavi Mashadi, M., Safarabadi, M., "Finite element modeling and experimental investigation of the effect of fiber orientation on viscoelastic behavior of composite laminates reinforced with long fibers", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 248-254, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

از مزیت‌های مواد کامپوزیتی می‌توان به وزن سبک، مقاومت در برابر خوردگی، استحکام ویژه بالا، عمر خستگی بالا و دارا بودن خاصیت جذب انرژی اشاره کرد. کامپوزیت‌های پایه پلیمری سهم به‌سزایی در صنایع حمل‌ونقل، دریایی، عمرانی، نظامی و هوایی ایفا می‌کنند [1]. به علت پلیمری بودن این دسته از مواد، خواص ویسکوالاستیک (خواص وابسته به زمان و دما) می‌تواند سهم به‌سزایی در رفتار ماده داشته باشد [2]. از این رو تعریف این خاصیت در شبیه‌سازی کامپیوتری مواد کامپوزیتی ضروری به نظر می‌رسد. خلیلی و همکاران [2] بر روی رفتار خزشی کامپوزیت رزین فنولیک تقویت شده با پارچه بافته شده از الیاف بازالت به صورت تجربی بررسی انجام داده‌اند. آن‌ها نمونه‌های خود را در دماهای 100، 150 و 200 درجه سانتی‌گراد تحت دو بارگذاری مکانیکی با مقادیر 3.8 و 6.5 مگاپاسکال تحت آزمایش قرار داده‌اند و پارمترهایی نظیر نرخ کرنش، عمر و مکانیزم گسیختگی را بررسی نموده‌اند.

خزش یکی از اثرات خاصیت ویسکوالاستیک بوده و در قطعات مختلف گذر زمان‌های طولانی باعث ایجاد پدیده خزش در مواد کامپوزیتی می‌گردد. قاسمی و حسین‌پور [3] بر روی خزش و توزیع کرنش‌های خزشی در استوانه جدار ضخیم از جنس شیشه‌وینیل استر مطالعه انجام داده‌اند. استوانه‌ها به صورت متقارن، بلند و با زوایای صفر، 90 و 45 درجه مدل‌سازی شده‌اند. بارگذاری به صورت فشار داخلی و اختلاف درجه حرارت در دماهای متفاوت بوده و در روند حل از تئوری کلاسیک لایه‌ای استفاده شده است. مدل تئوری ویسکوالاستیک بر اساس روابط پراوتل-روس برای چندلایه‌های گوناگون با اختلاف درجه حرارت‌های متفاوت برای مدت 15 سال ترسیم و تحلیل شده است.

درویزه و همکاران [4] بر روی اثرات فاز میانی بر رفتار ویسکوالاستیک غیر خطی کامپوزیت‌های چندفازی زمینه پلیمری مطالعه انجام داده‌اند. المان حجمی نماینده کامپوزیت از سه بخش الیاف، ماتریس و فاز میانی بین الیاف و ماتریس تشکیل شده است و فرض بر اتصال کامل الیاف و ماتریس می‌باشد. برای تعریف مدل ویسکوالاستیک از روابط شیپری استفاده شده است. روش حل به صورت تحلیلی و تجربی بوده که نتایج آن مطابقت مناسبی با یکدیگر دارند. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر فاز میانی در بارگذاری‌های محوری بر روی خواص ویسکوالاستیک کامپوزیت‌ها قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

به دست آوردن ضرایب مربوط به خاصیت ویسکوالاستیک مواد از جمله مسائلی است که در بررسی مواد دارای این خاصیت الزامی است. ابید و همکاران [5] برای به دست آوردن رفتار رهایی‌تنش کامپوزیت‌های پلی-پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه مدلی تحلیلی ارائه کرده که درستی آن را با آزمون‌های تجربی به اثبات رسانده است. در این مدل تحلیل خواص وابسته به زمان جزء ماتریس کامپوزیت و خواص وابسته به زمان تنش برشی محاسبه می‌گردد. الیاف شیشه به صورت خردشده در ماتریس اضافه گردیده و کسر حجمی‌های مختلفی از الیاف خرد شده مورد بررسی قرار گرفته است. مدت زمان آزمون‌های رهایی‌تنش 80 دقیقه می‌باشد. نتایج مدل تحلیلی مطابقت مناسبی با نتایج آزمون‌های تجربی دارند.

نوع بارگذاری یکی دیگر از عواملی است که در مقدار ویسکوالاستیسیته ماده تأثیر گذار است. هانگ و گروهش [6] بر روی تنش وابسته به زمان چندلایه‌های کامپوزیتی متقارن تحت بارگذاری کششی تک‌محوره بررسی

انجام داده‌اند. خواص ویسکوالاستیک به وسیله مدل ماکسول<sup>1</sup> برای لبه آزاد چندلایه کامپوزیتی بیان شده است. معادلات تحلیلی به فرم انتگرالی برای ناحیه ویسکوالاستیک خطی آمده است. نتایج حل تحلیلی به وسیله شبیه‌سازی سه‌بعدی برای لایه‌چینی‌های مختلف چندلایه در نرم‌افزارهای تجاری اعتبارسنجی شده است.

یکی از کاربردهای چندلایه‌های کامپوزیتی استفاده از آن‌ها در صفحات ساندویچی بوده که خواص ویسکوالاستیک در این موارد نیز می‌تواند از اهمیت خاصی برخوردار باشد. گالوی و همکاران [7] از روش تحلیلی مسئله وابسته بودن خصوصیات به زمان را برای یک تیر چندلایه با تکیه‌گاه ساده استفاده کرده‌اند. در معادلات حاکم برای تعریف رفتار ویسکوالاستیک از سری پرونو متشکل از المان‌های ماکسول استفاده شده است. دو لایه از ماده کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه بوده که با ماده پلیمری ویسکوالاستیک به یکدیگر چسبیده‌اند. آنها این مدل را برای دو حالت در نظر گرفته و با یکدیگر مقایسه می‌کنند. اولین حالت با در نظر گرفتن مدول الاستیک معادل برای لایه وسط و حالت دوم با در نظر گرفتن خصوصیات ویسکوالاستیک لایه میانی می‌باشد. پس از مقایسه نتایج این دو حالت و شبیه‌سازی حالات در نرم‌افزارهای عددی دریافتند که در نظر نگرفتن خواص ویسکوالاستیک باعث ایجاد خطا در نتایج شبیه‌سازی نسبت به نتایج تجربی می‌گردد.

بانگ و همکاران [8] بر روی عملکرد ارتعاشی و جذب انرژی صفحات-ساندویچی با هسته هرمی و رویه ترکیبی از الیاف کربن و لایه‌ای با خواص ویسکوالاستیک بررسی انجام داده‌اند. صفحات ساندویچی با ضخامت‌های مختلف لایه ویسکوالاستیک به روش قالب‌گیری با پرس گرم ساخته شده‌اند. برای روند حل یک مدل تحلیلی بر اساس نظریه انرژی کرنشی مودال به منظور استفاده در نرم‌افزار آباکوس ارائه گشته است. چندین حالت آزمون مودال برای به دست آوردن رفتار ارتعاشی و جذب انرژی در دو حالت وجود و نبود لایه ویسکوالاستیک انجام شده است. نتایج مدل‌سازی عددی هم‌خوانی قابل قبولی با نتایج تجربی دارند. در نهایت مشاهده شد که در اثر وجود لایه ویسکوالاستیک ضریب اتلاف چندلایه افزایش چشم‌گیری دارد.

یکی از روش‌های پیش‌بینی و بررسی رفتار ویسکوالاستیک مواد روش-های تئوری می‌باشد. بالکان و همکاران [9] بر روی رفتار دینامیکی صفحات-ساندویچی کامپوزیتی با خواص ویسکوالاستیک تحت اثر بارگذاری انفجاری غیر یکنواخت مطالعه کرده‌اند. در این پژوهش دو روش تئوری و تجربی به کار گرفته شده است. صفحه ساندویچی شامل رویه ساخته شده از کربن/پوکسی و هسته هانی کامب از جنس آرامید می‌باشد. در روش تئوری از تغییر شکل برشی مرتبه اول استفاده شده و به دلیل وجود تغییر شکل‌های بزرگ در اثر بارگذاری انفجاری بخش‌های غیر خطی نیز در معادلات قرار داده شده است. در روش تجربی برای به دست آوردن خواص ویسکوالاستیک کربن/پوکسی از روش آنالیزکننده مکانیکی دینامیکی<sup>2</sup> بهره‌مند شده‌اند. رفتار ویسکوالاستیک در مدل ریاضی از تئوری خطی کلونین-وویت پیروی می‌کند. برای به دست آوردن فشار انفجار در آزمون‌های تجربی از یک مجموعه دستگاه ویژه استفاده شده است.

یکی از عوامل موثر در رفتار ویسکوالاستیک مواد رطوبت می‌باشد. جوشی و همکاران [10] به آنالیز تأثیر پخش رطوبت در تغییر شکل صفحات ساندویچی با رویه کامپوزیتی و هسته فوم پلیمری با خاصیت

<sup>1</sup> Maxwell

<sup>2</sup> DMA

در آزمون های رهایی تنش نمونه آزمایش توسط دستگاه آزمون در کرنش (جابجایی) ثابتی نگه داشته شده که تنش (نیرو) متغیر با زمان به عنوان خروجی آزمون می باشد. بنابراین نیاز به تعیین میزان جابجایی ثابت در آزمون ها می باشد. به همین منظور آزمون کشش برای نمونه های کامپوزیتی در زاویه الیاف صفر، 90 و 45 درجه انجام گرفته تا حد نهایی شکست در حالت کششی برای نمونه ها تعیین گردد. با توجه به حد نهایی شکست در حالت کششی میزان جابجایی ثابت در آزمون رهایی تنش تعیین می گردد که مقدار آن با توجه به دو عامل 0.3 میلی متر انتخاب شده است. اولین دلیل برای انتخاب حد کششی، تعیین ناحیه ویسکوالاستیک خطی می باشد. مواد ویسکوالاستیک بسته به شرایط بارگذاری مکانیکی رفتار خطی یا غیرخطی از خود نشان می دهند. در ناحیه ای که خواص ویسکوالاستیک وابسته به تنش ثابت در آزمون خزش یا کرنش ثابت در آزمون رهایی تنش نباشند ناحیه ویسکوالاستیک خطی بوده، و در صورتی که خواص ویسکوالاستیک وابسته به تنش یا کرنش ثابت شوند ناحیه ویسکوالاستیک، غیرخطی می باشد. مقدار کرنش ثابت در آزمون رهایی تنش کوچک انتخاب می گردد تا از فرارگیری ماده کامپوزیتی در ناحیه ویسکوالاستیک خطی اطمینان حاصل گردد. عامل دیگر که در انتخاب حد کشش در آزمون رهایی تنش موثر است، نیاز به تب<sup>2</sup> گذاری در نمونه های آزمون می باشد. اگر مقدار نیروی حاصل از آزمون رهایی-تنش در محدوده مناسبی قرار گیرد که نمونه آزمون درون فک دستگاه نلغزد، نیازی به تب گذاری و مشکلات پس از آن وجود ندارد و به طور کلی خطای حاصل از نوع اتصال تب با نمونه آزمون حذف می گردد.

در نهایت آزمون های رهایی تنش برای نمونه های کامپوزیتی با زاویه الیاف صفر، 90 و 45 درجه در مدت زمان 150 دقیقه و با نرخ بارگذاری 2 میلی متر بر دقیقه صورت گرفته است. برای هر زاویه الیاف سه نمونه مورد آزمون قرار گرفته است. آزمون ها در دمای محیط صورت گرفته و برای هر زاویه الیاف سه نمونه مورد آزمون قرار گرفته است.



Fig. 1 Composite samples of stress relaxation test

شکل 1 نمونه های کامپوزیتی آزمون رهایی تنش

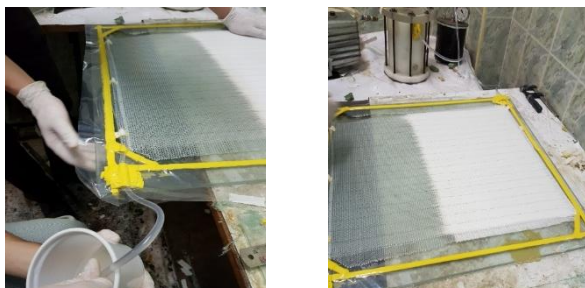


Fig. 2 VIP process for composite samples

شکل 2 روش VIP برای ساخت نمونه های کامپوزیتی

ویسکوالاستیک پرداخته اند. آنها معتقدند که خصوصیات الاستیک و مدول وابسته به زمان در هر بخشی از فوم هسته وابسته به میزان تمرکز رطوبت می باشد. نهایتاً یک آنالیز کوپل شده با در نظر گرفتن رطوبت و تغییر شکل برای سازه های ساندویچی انجام شده است. روش بررسی با استفاده از مدل-سازی عددی بوده که نتایج آن با نتایج داده های تجربی و تحلیلی اعتبارسنجی شده اند. در مدل سازی عددی رویه های کامپوزیتی به صورت الاستیک و هسته فومی وابسته به زمان و رطوبت شبیه سازی شده اند. تأثیرات گسترش رطوبت در مواد الاستیک و ویسکوالاستیک بر روی تنش، کرنش و جابجایی مطالعه شده است.

با توجه به بررسی های صورت گرفته اهمیت خاصیت ویسکوالاستیک در پیش بینی رفتار چندلایه های کامپوزیتی به خصوص کامپوزیت های پایه پلیمری مشاهده گردید. در این مقاله به بررسی تأثیر زاویه الیاف در رفتار ویسکوالاستیک چندلایه های کامپوزیتی تک جهته با زوایای الیاف صفر، 90 و 45 درجه به وسیله دو رویکرد تجربی و عددی پرداخته شده است. درصد کاهش مدول رهایی تنش نیز در هر یک از زوایا بررسی گشته و با یکدیگر مقایسه می گردد. در همین راستا برنامه ای تکمیلی برای نرم افزار آباکوس جهت شبیه سازی ماده ارتوتروپیک با خاصیت ویسکوالاستیک، ارائه شده است. در نهایت نتایج برنامه نویسی و شبیه سازی با نتایج آزمون های تجربی رهایی-تنش اعتبارسنجی شده است.

## 2- آزمون های تجربی

آزمون های تجربی انجام شده در این پژوهش شامل آزمون های رهایی تنش نمونه های کامپوزیتی است که به منظور تعیین رفتار وابسته به زمان نمونه ها انجام شده است. نمونه های کامپوزیتی متشکل از 3 لایه پارچه تک جهته 200 گرمی با زاویه الیاف هم راستا می باشند که در آن از رزین اپوکسی با نام تجاری ML-506 با درصد ترکیب 15 درصد استفاده شده است. کسر حجمی الیاف در نمونه ها حدوداً 50 درصد می باشد. نمونه ها بر اساس استاندارد ASTM D-3039 [11] دارای ابعاد 15×250 میلی متر (شکل 1) با ضخامت 0.8 میلی متر می باشند. تمامی آزمون های انجام شده در این پژوهش توسط دستگاه کشش شرکت سنتام با نام تجاری STM 20 انجام شده است. روش ساخت نمونه های کامپوزیتی با توزیع یکنواخت رزین از طریق خلأ<sup>1</sup> بوده که از روش های ساخت کامپوزیت برای قطعات دقیق و با کیفیت می باشد. از ویژگی های بارز این روش می توان به حذف تقریبی حباب در قطعه و توزیع یکنواخت و همگن رزین در سطح آن اشاره کرد. (شکل 2) در این روش پس از قرارگیری پارچه ها با توجه به چیدمان چندلایه مورد نظر بر روی یک سطح صاف مانند شیشه، با استفاده از پلاستیک و چسب مخصوص سطح قطعه برای ایجاد خلأ آماده می گردد. سپس با استفاده از یک ورودی و یک خروجی که از طریق تکه ای شلنگ سیلیکونی ایجاد می گردد، به کمک خلأ رزین داخل قطعه هدایت می گردد و پس از آغشته کردن قطعه، اضافات آن از سمت دیگر خارج می گردد. در پایان، قطعه به مدت 24 ساعت در همان شرایط خلأ جهت پخت کامل باقی می ماند. به عبارتی پخت قطعه در دمای محیط به مدت 24 ساعت انجام می گیرد. برای ساخت نمونه ها ابتدا یک صفحه کامپوزیتی با ابعاد بزرگتر ساخته شده و در نهایت تمامی نمونه ها با توجه به زاویه الیاف مورد نظر و ابعاد متناسب با استاندارد، با استفاده از اهر عمود برش خورده اند.

<sup>2</sup> Tab

<sup>1</sup> Vacuum infusion process (VIP)

## 3- شبیه سازی عددی

## 3-1- مدل سازی المان محدود

برای شبیه سازی آزمون رهایی تنش از مجموعه نرم افزاری المان محدود Abaqus استفاده شده است. ابعاد چندلایه کامپوزیتی 15×250 میلی متر با ضخامت 0.8 میلی متر به صورت المان سه بعدی<sup>1</sup> شبیه سازی شده است. مشخصه المان های موجود در نرم افزار C3D8R می باشد. شکل مش بندی المان ها به صورت چهاروجهی منظم مطابق شکل 3 می باشد. در شبیه سازی کشش در آزمون رهایی تنش، مطابق شکل 4 سمت چپ چندلایه به صورت گیردار و سمت راست آن به صورت جابجایی مقید در راستای طولی بارگذاری شده است. دو طرف چندلایه کامپوزیتی به طول 20 میلی متر (محل گرفتن نمونه توسط فک های دستگاه در آزمون تجربی) به منظور اعمال شرایط مرزی جدا گشته است. مدت زمان حل برای به دست آوردن رفتار ویسکوالاستیک وابسته به زمان در نرم افزار 9000 ثانیه در نظر گرفته شده است. برای شبیه سازی رفتار ویسکوالاستیک ماده ارتوتروپیک<sup>2</sup> در این پژوهش زیر برنامه VUMAT برای نرم افزار آباکوس نوشته شده است.

## 3-2- خواص کامپوزیت

خواص کامپوزیت در این شبیه سازی به دو دسته خواص ناحیه الاستیک و ویسکوالاستیک تقسیم می گردد. رزین و الیاف استفاده شده در این پژوهش با مواد مصرفی در پژوهش ابراهیمی [12] یکسان بوده به همین منظور خواص ناحیه الاستیک کامپوزیت مطابق جدول 1 به کار رفته و همچنین مدول یانگ برای سه راستای کامپوزیت از نتایج آزمون های رهایی تنش به دست می آیند.

نمودار نیرو بر حسب زمان به عنوان خروجی آزمون رهایی تنش نمونه کامپوزیتی می باشد که می توان محور نیرو را تقسیم بر سطح مقطع نمونه کرده و با استفاده از کرنش ثابت اعمالی در آزمون و قانون هوک مدول رهایی تنش بر حسب زمان را به دست آورد.

سان و چانگ [13] بر روی تست های محوری نمونه های کامپوزیتی با زوایای الیاف خارج محور<sup>3</sup> بررسی انجام داده اند. آن ها با استفاده از آزمون های تجربی و شبیه سازی عددی اثبات کرده اند که خواص به دست آمده برای نمونه های کامپوزیتی با زاویه الیاف خارج از محور با خواص واقعی آن ها مقداری فاصله دارد. دلیل این اختلاف نیز مناسب نبودن شرایط مرزی نمونه پس از ایجاد کرنش برشی در آن است و این مشکل را با ایجاد زاویه در شرایط مرزی نمونه کامپوزیتی رفع کرده اند. در حقیقت پس از اعمال بار کششی در قطعه کرنش برشی ایجاد می گردد و در ادامه آزمون بارگذاری به صورت محوری برای نمونه نمی باشد و همان طور که گفته شد با زاویه دار کردن شرایط مرزی متناسب با کرنش برشی در آزمون تجربی به حل این مشکل پرداخته می شود. به همین جهت در این پژوهش برای به دست آوردن نمودار حقیقی مدول رهایی تنش در زاویه الیاف 45 درجه، با استفاده از نرم افزار آباکوس اختلاف بین دو شرط مرزی در نمونه کامپوزیتی را به دست آورده و در نتایج آزمون های تجربی اعمال می گردد. شکل 5 دو نمونه مدل سازی شده در نرم افزار آباکوس را برای زاویه الیاف 45 درجه نشان می دهد که شکل اول در حالت بدون در نظر گرفتن کرنش برشی بوده و شکل دوم بعد از اعمال کرنش برشی می باشد.

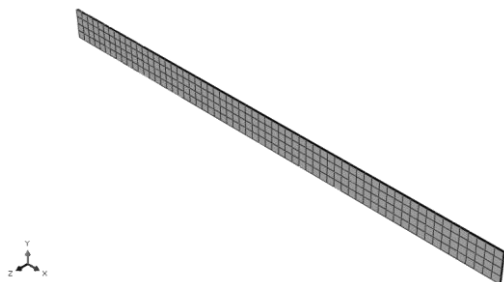


Fig. 3 Meshed layout of composite laminate

شکل 3 مش بندی چندلایه کامپوزیتی



Fig. 4 Boundary condition

شکل 4 شرایط مرزی

برای تعیین رفتار ویسکوالاستیک ماده از سری پرونی مطابق رابطه 1، استفاده می گردد. در رابطه سری پرونی ضرایب ثابتی وجود دارد که با استفاده از داده های تجربی نمودار مدول رهایی تنش بر حسب زمان به دست می آیند. به همین منظور با استفاده از برنامه بهینه سازی در نرم افزار متلب<sup>4</sup> بهترین تعداد جملات سری پرونی برای همسان سازی مناسب با منحنی تجربی، چهار جمله می باشد. دستور بهینه سازی برای همسان سازی منحنی تجربی با سری پرونی مربوطه در نرم افزار متلب، Isqcurvefit می باشد. برای استفاده از این دستور نیاز به ورود نمودار تجربی به صورت مختصات نقطه ای و معادله مورد نظر به همراه ضرایب مجهول آن می باشد. پس از اجرای برنامه ضرایب مجهول به عنوان خروجی داده می شود. با رسم معادله به دست آمده و تطابق آن با منحنی تجربی می توان به تعداد مناسب جملات سری پرونی دست یافت. شکل های 6، 7 و 8 منحنی های تجربی به همراه نمودار همسان سازی شده سری پرونی چهار جمله ای برای زوایای الیاف صفر، 90 و 45 درجه می باشند که رابطه های 2، 3 و 4 نشان دهنده سری پرونی آن ها به همراه ضرایب ثابت هستند.

$\tau$  در رابطه سری پرونی نشان گر زمان رهایی تنش<sup>5</sup> و  $E_m$  نشان گر مقدار مدول رهایی تنش در بی نهایت می باشند که در روابط سری پرونی زمان رهایی تنش بر حسب دقیقه و ضرایب مدول رهایی تنش بر حسب گیگاپاسکال آمده اند.

پس از تعیین سری پرونی مناسب از آن برای اعمال رفتار ویسکوالاستیک در ماده کامپوزیتی برای زیر برنامه VUMAT استفاده شده به صورتی که نتایج زوایای صفر و 90 درجه نمونه های کامپوزیتی برای رفتار در راستای الیاف و عمود بر آن استفاده شده است. رفتار راستای عمود بر الیاف و راستای عمود بر صفحه نیز با یکدیگر یکسان فرض شده است.

<sup>1</sup> Solid

<sup>2</sup> Orthotropic

<sup>3</sup> Off-axis

<sup>4</sup> Matlab

<sup>5</sup> Relaxation time

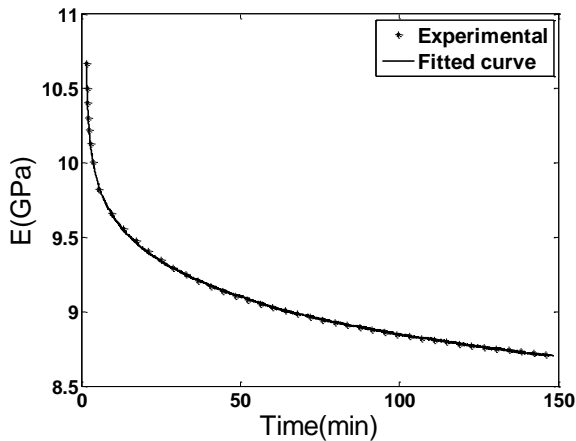


Fig. 8 Relaxation modulus of 45 degree direction

شکل 8 مدول رهایی تنش راستای 45 درجه

$$E(t) = E_{\infty} + E_1 \exp(-t/\tau_1) + E_2 \exp(-t/\tau_2) + E_3 \exp(-t/\tau_3) + E_4 \exp(-t/\tau_4) \quad (1)$$

$$E_0(t) = 21.138 + 0.673 \exp(-t/30) + 0.263 \exp(-t/96) + 0.257 \exp(-t/996) + 0.654 \exp(-t/8400) \quad (2)$$

$$E_{90}(t) = 6.796 + 0.237 \exp(-t/9.6) + 0.471 \exp(-t/96) + 0.357 \exp(-t/996) + 0.714 \exp(-t/8400) \quad (3)$$

$$E_{45}(t) = 8.797 + 25.138 \exp(-t/30) + 0.83 \exp(-t/96) + 0.507 \exp(-t/996) + 0.890 \exp(-t/8400) \quad (4)$$

4- نتایج و بحث

4-1- مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی

در این بخش پس از تکمیل روند شبیه سازی آزمون رهایی تنش نمونه کامپوزیتی، نتایج تجربی و عددی مدول رهایی تنش وابسته به زمان با یکدیگر مقایسه می شوند. شکل 9 نشانگر کانتور تنش نمونه کامپوزیتی پس از تحلیل می باشد، که قسمت میانی آن (قسمتی که در دستگاه تست توسط کشش سنج<sup>1</sup> کنترل می شود) دارای تنش یکنواخت می باشد.

شکل های 10، 11 و 12 مقایسه نتایج تجربی و عددی آزمون رهایی- تنش در زوایای الیاف صفر، 90 و 45 درجه را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود مطابقت قابل قبولی در نتایج وجود دارد که حاکی از صحت شبیه سازی روند آزمون در نرم افزار المان محدود می باشد.

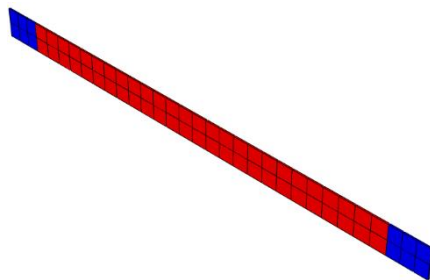


Fig. 9 Contour configuration of composite sample

شکل 9 کانتور شبیه سازی نمونه کامپوزیتی

<sup>1</sup> Extensometer

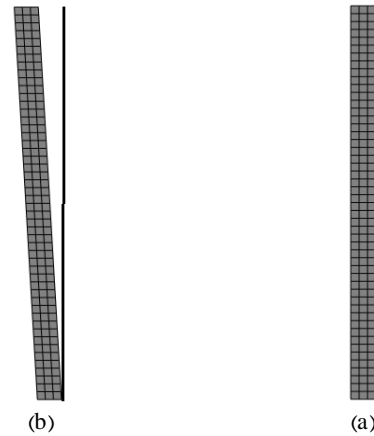


Fig. 5 Composite sample with 45 degree fiber orientation (a) simple mode (b) consider shear strain

شکل 5 نمونه کامپوزیتی با زاویه الیاف 45 درجه (الف) در حالت عادی (ب) پس از در نظر گرفتن کرنش برشی

جدول 1 خواص الاستیک کامپوزیت [12]

Table 1 Elastic properties of composite [12]

$V_{12}$	$V_{13}$	$V_{23}$	$G_{12}(\text{GPa})$	$G_{13}(\text{GPa})$	$G_{23}(\text{GPa})$
0.21	0.21	0.08	4.86	4.86	4.67

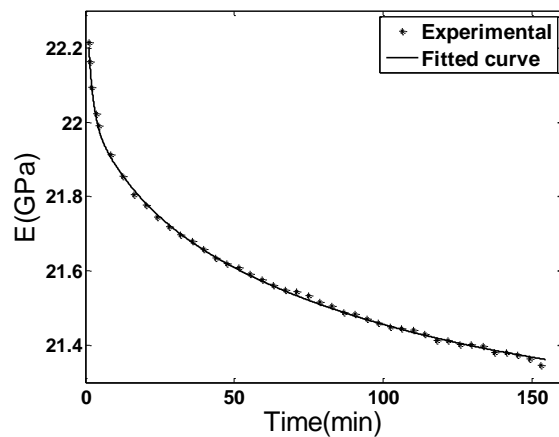


Fig. 6 Relaxation modulus of 0 degree direction

شکل 6 مدول رهایی تنش راستای صفر درجه

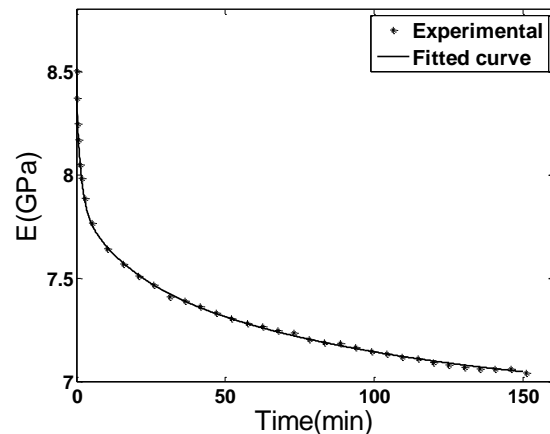


Fig. 7 Relaxation modulus of 90 degree direction

شکل 7 مدول رهایی تنش راستای 90 درجه

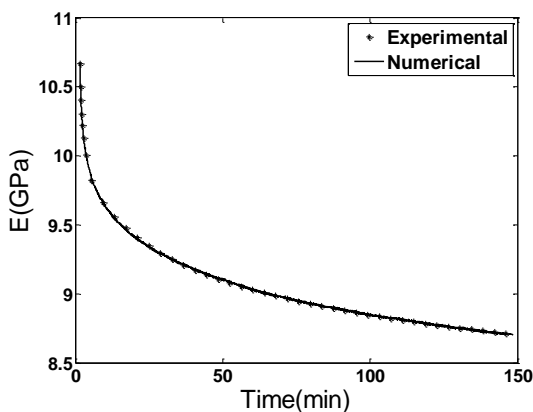


Fig. 12 Experimental and numerical data of time dependent relaxation modulus in 45 degree orientation

شکل 12 نتایج تجربی و عددی مدول رهایی تنش بر حسب زمان در راستای 45 درجه

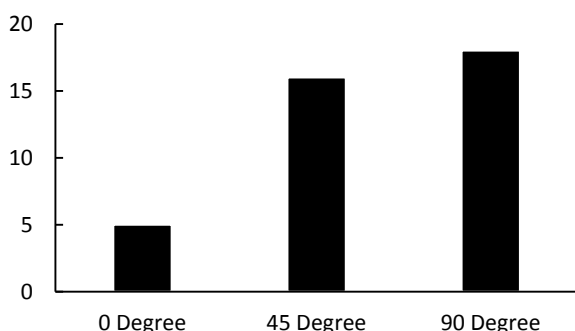


Fig. 13 Percentage of decreasing relaxation modulus in 0, 45 and 90 degree fiber orientation

شکل 13 درصد کاهش مدول رهایی تنش در راستای الیاف صفر، 45 و 90 درجه

### 5- جمع بندی

در این پژوهش شبیه سازی آزمون رهایی تنش برای نمونه های کامپوزیتی با الیاف بلند در زوایای صفر، 45 و 90 درجه صورت گرفته و با نتایج تجربی آزمون رهایی تنش مقایسه گردیده است. برای تعریف رفتار ویسکوالاستیک ماده ارتوتروپیک در نرم افزار المان محدود آباکوس زیر برنامه تکمیلی VUMAT به کار گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی آزمون رهایی- تنش با نتایج آزمون های تجربی مطابقت مناسبی داشته که بیان گر صحت شبیه سازی و زیر برنامه نوشته شده برای نرم افزار آباکوس می باشد. میزان تأثیر زاویه الیاف از جمله نتایج به دست آمده در این پژوهش بوده که مقدار کاهش مدول رهایی تنش در مدت زمان 150 دقیقه برای زوایای الیاف صفر، 45 و 90 درجه به ترتیب 5، 16 و 18 درصد می باشد که این عامل می تواند برای طراحی قطعات کامپوزیتی از اهمیت خاصی برخوردار باشد. یک نکته قابل توجه این است که با تغییر زاویه الیاف از صفر درجه به 45 درجه، درصد کاهش مدول رهایی تنش افزایش چشم گیری داشته در صورتی که این عامل در تغییر زاویه الیاف از 45 درجه به 90 درجه دارای تغییرات کمتری می باشد. همچنین در بسیاری از کاربردها می توان از شبیه سازی رفتار ویسکوالاستیک کامپوزیت های تک جهته با زاویه الیاف صفر درجه، به علت میزان تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک در رفتار کلی ماده، چشم پوشی کرد تا با این کار در زمان و هزینه صرف جویی شود.

پس از تایید مدل المان محدود با استفاده از شبیه سازی و زیر برنامه تکمیلی VUMAT برای نرم افزار آباکوس می توان رفتار ویسکوالاستیک چندلایه کامپوزیتی با الیاف بلند و تک جهته را در قطعه های متفاوت با بارگذاری های مختلف شبیه سازی کرده و نتایج نزدیک به نتایج تجربی را استنتاج کرد.

### 4-2- بررسی زاویه الیاف در رفتار ویسکوالاستیک چندلایه کامپوزیتی

در این بخش به بررسی تأثیر زاویه الیاف در کامپوزیت های تک جهته تقویت- شده با الیاف بلند پرداخته می شود. شکل 13 نمودار درصد کاهش مدول رهایی تنش را نسبت به مدول اولیه در مدت زمان 150 دقیقه نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، در مدت زمان آزمون نمونه با زاویه الیاف صفر درجه تنها 5 درصد دچار کاهش مدول می گردد که این مقدار می تواند در بسیاری از کاربردها قابل چشم پوشی بوده و با این کار در زمان و هزینه صرف جویی کرد. در حالی که با افزایش زاویه الیاف نسبت به محوری طولی نمونه، درصد کاهش مدول در 45 درجه به 16 درصد و در 90 درجه به 18 درصد افزایش می یابد. هرچه زاویه الیاف نسبت به محور طولی نمونه افزایش یابد خصوصیات ماده به خصوصیات رزین به کار رفته نزدیک تر می گردد، به همین جهت با توجه به رفتار ویسکوالاستیک رزین های پلیمری با افزایش زاویه الیاف میزان تأثیر گذاری خاصیت ویسکوالاستیک نیز افزایش می یابد که در نمودار شکل 13 این امر قابل مشاهده است.

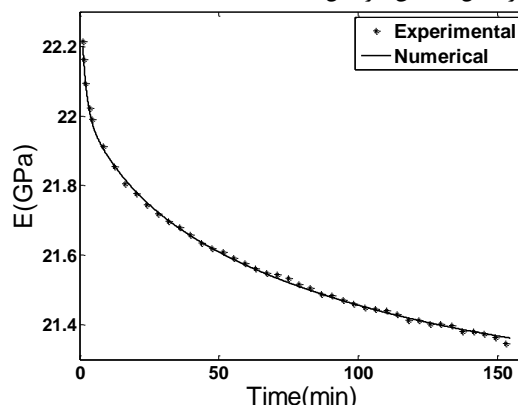


Fig. 10 Experimental and numerical data of time dependent relaxation modulus in 0 degree orientation

شکل 10 نتایج تجربی و عددی مدول رهایی تنش بر حسب زمان در راستای صفر درجه

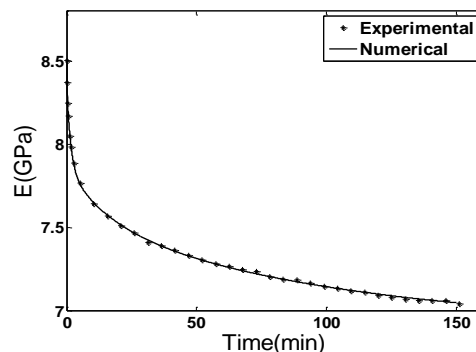


Fig. 11 Experimental and numerical data of time dependent relaxation modulus in 90 degree orientation

شکل 11 نتایج تجربی و عددی مدول رهایی تنش بر حسب زمان در راستای 90 درجه



## 6- مراجع

- [1] Khalili, S. M. R., Eslami Farsani, R., Dastmard, A., and Saeedi, A., "Experimental investigation of creep behavior in Phenolic based polymer composites" *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 1, No. 2, pp. 37-42, 2015. (in Persian فارسی)
- [2] Rafiee, R. and Mazhari, B., "Modeling creep in long fiber reinforced laminated composites using micromechanical rules", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 4, pp. 409-418, 2017. (in Persian فارسی)
- [3] Ghasemi, A. R. and Hosseinpour, K., "The effects of fiber angle and temperature on the distribution of long-term stress and creep strain for unidirectional multilayer composite cylinder", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 233-242, 2016. (in Persian فارسی)
- [4] Darvizeh, A., Ansari Khalkhali, R., Mahmoodi, M. J., and Hassanzadeh Aghdam, M. K., "Investigation of interphase effect on the non-linear viscoelastic behavior of multiphase polymer composites", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 181-191, 2016 (in Persian فارسی)
- [5] Obaid, N., Kortschot, M. T., and Sain, M., "Predicting the stress relaxation behavior of glass-fiber reinforced polypropylene composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 161, No. 1, pp. 85-91, 2018.
- [6] Huang, B., Kim, H. S., Wang, J., Du, J., and Guo, Y., "Time-dependent stress variations in symmetrically viscoelastic composite laminates under uniaxial tensile load," *Composite Structures*, Vol. 142, pp. 278-285, 2016.
- [7] Galuppi, L. and Royer-Carfagni, G., "Laminated beams with viscoelastic interlayer," *International Journal Solids and Structures*, Vol. 49, pp. 2637-2645, 2012.
- [8] Yang, J., Xiong, J., Ma, L., Wang, B., Zhang, G., and Wu L., "Vibration and damping characteristics of hybrid carbon fiber composite pyramidal truss sandwich panels with viscoelastic layers," *Composite Part B Engineering*, Vol. 106, pp. 570-580, 2013.
- [9] Balkan, D. and Mecitoğlu, Z., "Nonlinear dynamic behavior of viscoelastic sandwich composite plates under non-uniform blast load: Theory and experiment," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 72, pp. 85-104, 2014.
- [10] Joshi, N. and Muliana, A., "Deformation in viscoelastic sandwich composites subject to moisture diffusion," *Compos. Struct.*, Vol. 92, pp. 254-264, 2010.
- [11] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM Standard D3039, 2002.
- [12] Ebrahimi, B., "Numerical and experimental analysis of composite energy absorber with DLR section", MSc dissertation, Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, 2017.
- [13] Sun, C. T. and Chung, I., "An oblique end-tab design for testing off-axis composite specimens", *Composites*, Vol. 24, pp. 619-623, 1993.