



بررسی اثر دمای فرآیند بر روی خواص الاستیک و ویسکوالاستیک کامپوزیت های الیاف شیشه/پی وی سی

وحید زال¹، حسن مسلمی نائینی^{2*}، احمد رضا بهرامیان³، هادی عبداللهی⁴، امیرحسین بهروش⁵

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

3- دانشیار، مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

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

* تهران، صندوق پستی 143-14115، moslemi@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 23 تیر 1394

پذیرش: 08 مرداد 1394

ارائه در سایت: 04 مهر 1394

کلید واژگان:

گرمانرم پی وی سی

الیاف شیشه

مدول الاستیک خمشی

تحلیل حرارتی مکانیکی دینامیک

خواص ویسکوالاستیک

چکیده

در این مقاله به بررسی تاثیر دمای فرآوری و تولید بر روی خواص الاستیک و ویسکوالاستیک نظیر مدول ذخیره، ضریب دمپینگ و مدول اتلاف کامپوزیت های زمینه پی وی سی تقویت شده با الیاف شیشه بافت مسطح پرداخته شده است. برای این منظور نمونه های کامپوزیتی در سه دمای 160، 200 و 230 درجه سانتیگراد به روش انباشت لایه ها و با چیدمان $[90/0]_{10}$ تولید شده است. این نمونه ها در ابتدا مطابق استاندارد ASTM D790-07، تحت آزمون خمش سه نقطه ای قرار گرفته و استحکام و مدول خمشی الاستیک آنها با سه تکرار بدست آمده است. در ادامه با استفاده از آزمون تحلیل حرارتی مکانیکی دینامیک (آزمون DMTA) در حالت خمش سه نقطه ای، خواص ویسکوالاستیک نمونه ها در بازه دمایی 25 تا 220 درجه سانتیگراد استخراج شده و اثر دما و بارگذاری دینامیکی بر روی خواص محصولات بررسی و تعیین شده است. همچنین با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری، به بررسی اثر کیفیت آغشتگی محصولات بر خواص حرارتی و دینامیکی نمونه ها پرداخته شده است. در انتها نتیجه گرفته شد که مطابق آزمون DMTA، (همانند آزمون خمش استاتیکی)، دمای 230°C به عنوان دمای مناسب برای آغشتگی با کیفیت بالای الیاف شیشه با زمینه پی وی سی بدست می آید و این آزمون معیار مناسبی برای تعیین شرایط فرآوری کامپوزیت های زمینه پی وی سی است. همچنین مشاهده شد که افزایش دمای تولید تا 230°C ، مدول ذخیره نمونه ها را افزایش می دهد، درحالی که اثری بر روی دمای انتقال شیشه ای محصولات ندارد.

Investigation of the effect of processing temperature on the elastic and viscoelastic properties of PVC/fiberglass composite laminates

Vahid Zal¹, Hassan Moslemi Naeini^{1*}, Ahmad Reza Bahramian², Hadi Abdollahi³, Amir Hossein Behravesh¹

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, moslemi@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 July 2015
Accepted 30 August 2015
Available Online 26 September 2015

Keywords:

PVC Thermoplastic
Glass Fibers
Flexural Elastic Modulus
DMTA
Viscoelastic

ABSTRACT

In this paper, the effect of processing temperature on the elastic and viscoelastic properties including storage modulus, loss modulus and damping value of PVC/plain weave fiberglass composite laminates was investigated. For this, composite samples with $[0/90]_{10}$ lay ups were produced in three different temperatures including 160°C , 200°C and 230°C using film stacking procedure. Firstly, the flexural strength and modulus of the samples were measured using three points bending test according to ASTM D790-07 standard. Then, viscoelastic properties of the samples were measured in the temperature range of 25°C up to 220°C using Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) and the effect of temperature on the viscoelastic properties was studied. Also, the effect of fiber/ matrix impregnation quality on the thermal and dynamic properties of the samples was evaluated using optical microscope images. It was concluded that the temperature of 230°C is suitable to achieve high quality impregnation, according to both DMTA and three points bending test. Also, it was seen that increase of processing temperature up to 230°C increases the storage modulus; moreover, processing temperature does not affect the glass transition temperature of the samples.

1- مقدمه

مقایسه با فلزات، امروزه کاربردهای بسیار گسترده ای پیدا کرده اند. در صنایعی

نظیر هوا و فضا، هواپیماسازی و حتی صنایع خودرویی که سبکی محصول از

کامپوزیت ها بنا به مزایایی نظیر استحکام به وزن بالا و عمر خستگی زیاد در

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

که صلبیت و مدول الاستیک بالایی لازم است، محدودیت دارند. این عیب با افزایش اندک دمای کاری تشدید نیز می‌شود به طوری که دمای کارکرد محصول را بسیار محدود می‌کند. همچنین به علت رفتار ویسکوالاستیک گرمانرم‌ها، نرخ کرنش و بارگذاری نیز بر میزان صلبیت و مدول کامپوزیت‌های حاصل اثر می‌گذارد.

کامپوزیت‌ها متشکل از دو فاز زمینه و تقویتی هستند که ماهیت دو فازی کامپوزیت‌ها علاوه بر کارکردهای مکانیکی و استحکامی گسترده‌ای که دارد، موجب افزایش ضریب دمپینگ ارتعاشی و صوتی محصولات کامپوزیتی به دلیل لغزش بین فاز تقویتی (معمولا به شکل الیاف) و زمینه پلیمری و در نتیجه اتلاف انرژی ناشی از آن می‌شود [11]. همچنین حضور فاز ثانویه، شرایط فرآوری و تولید پلیمرها را نیز تغییر می‌دهد. به همین دلیل کارهای تحقیقی مختلفی بر روی بررسی خواص حرارتی و ویسکوالاستیک کامپوزیت‌ها و همچنین تاثیر شرایط فرآوری بر روی این خواص انجام گرفته است. برای بررسی خواص ویسکوالاستیک (نظیر مدول ذخیره³، مدول اتلاف⁴ و ضریب دمپینگ⁵) پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری و بررسی تاثیر حرارت بر روی این خواص، آزمون تحلیل حرارتی مکانیکی دینامیک⁶ بسیار استفاده می‌شود. همچنین این آزمون برای تعیین شرایط مناسب تولید و فرآوری محصولات نیز به کار می‌رود. ستارک و همکاران [12]، آزمون DMTA را برای ارزیابی و بررسی شرایط پخت ثانویه محصولات رزین فنولیک قالب گیری شده به کار بردند و توانستند با استفاده از این آزمون شرایط پخت ثانویه بهینه این محصولات را استخراج کنند. مافی و همکاران [13]، به بررسی رفتار پخت پودرهای پوششی پلی استر و پلی استر/اپوکسی با استفاده از آزمون DMTA پرداخته‌اند و نتیجه گرفتند که دمای پخت تاثیر معناداری بر روی ساختار پودرهای حاصل ندارد. ماپلز و همکاران [14]، با استفاده از آزمون DMTA و خمش، به بررسی اثر حرارت بر روی مدول ذخیره و مدول خمشی کامپوزیت های کربن/اپوکسی پرداخته‌اند و نتیجه گرفتند با افزایش دما تا 120 °C، مدول ذخیره و خمش نمونه‌ها تا 98 درصد افت می‌کند که با سرد کردن مجدد قابل بازیابی است.

با وجود تحقیقات گسترده انجام شده بر روی خواص مکانیکی و شرایط آغشتگی کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی، گزارشی راجع به خواص حرارتی و خواص ویسکوالاستیک آنها و تاثیر دما بر روی این خواص ارائه نشده است. درحالیکه با توجه به ماهیت بی‌شکل پی‌وی‌سی و در نتیجه وابستگی بالای خواصش به دما و نرخ کرنش، کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی نیز بسیار حساس به شرایط دمایی و بارگذاری هستند و تغییرات اندک در دمای کارکرد این کامپوزیت‌ها می‌تواند اثرات بسیار زیادی بر روی خواصشان داشته باشد. بنابراین خواص مکانیکی که در شرایط دمای محیط و بارگذاری استاتیکی بدست می‌آیند، به تنهایی نمی‌توانند معرف خواص این کامپوزیت‌ها باشند و تعیین خواص حرارتی و دینامیکی و بازه دمایی مجاز برای استفاده از این کامپوزیت‌ها بسیار ضروری می‌نماید. از طرف دیگر مطالعه این خواص و اثر شرایط تولید بر روی این خواص می‌تواند کمک زیادی به انتخاب شرایط مناسب تولید این کامپوزیت‌ها و همچنین طراحی و انتخاب محصولات کامپوزیتی زمینه پی‌وی‌سی برای کارکرد در شرایط مختلف داشته باشد.

با توجه به مسائل گفته شده و خلاء تحقیقات علمی بر روی خواص ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی، در این مقاله به بررسی

اهمیت بالایی برخوردار است، محصولات کامپوزیتی زمینه پلیمری جایگزین بسیاری از قطعات فلزی می‌شوند [1]. دو دسته عمده کامپوزیت‌های پلیمری شامل زمینه گرمانرم و زمینه گرماسخت است که کامپوزیت‌های زمینه گرمانرم بنا به مزایایی از قبیل مقاومت محیطی و مقاومت به ضربه خوب، قابلیت شکل‌دهی مجدد، چقرمگی شکست¹ بالا، قابلیت بازیابی مجدد و زمان نگهداری بالایی که در مقایسه با کامپوزیت‌های زمینه گرماسخت دارند [2،3]، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این وجود تولید و استفاده از محصولات کامپوزیتی گرمانرم به دلیل سختی فرآیند تولید، صلبیت پایین گرمانرم‌ها در مقایسه با گرماسخت‌ها (که این ویژگی به کامپوزیت حاصل نیز انتقال پیدا می‌کند) و همچنین سختی فرآیند آغشته‌سازی الیاف با پلیمرگرمانرم به دلیل ویسکوزیته بالا در مقایسه با گرماسخت‌ها و در نتیجه هزینه بالای تولید، محدود شده است [4]. پی‌وی‌سی یکی از گرمانرم‌های پرکاربرد با مزایای اقتصادی بالا است که با توجه به خواص مکانیکی و فیزیکی بسیار خوبش در صنایع مختلف کاربرد داشته و در حجم بالایی تولید می‌شود [5]. پی‌وی‌سی به خاطر خواص ویژه‌اش نظیر مقاومت بالا به شرایط جوی بد، مقاومت سایشی بالا، هزینه تولید پایین و عمر بالا، بسیار به کار می‌رود [6]. همچنین پی‌وی‌سی دارای گروه‌های عاملی قطبی است که موجب بالا بودن خاصیت چسبندگی آن می‌شود. بنابراین این خاصیت موجب می‌شود در مقایسه با سایر کامپوزیت‌های زمینه گرمانرم، اتصال بین الیاف تقویتی و زمینه بسیار خوب و مستحکمی برای کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی ایجاد شده و محصولات مستحکم‌تری حاصل شود.

به دلیل ساختار بی‌شکل پی‌وی‌سی، کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی با حرارت‌دهی نرم می‌شوند و نقطه ذوب مشخصی ندارند. بنابراین کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی می‌توانند به سهولت و با گرمایش کمی شکل‌دهی شده و برای تولید قطعات پیچیده و بزرگ به کار روند. پایداری ابعادی کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی در مقایسه با سایر کامپوزیت‌های زمینه گرمانرم نیز ویژگی دیگری است که موجب افزایش کاربرد این کامپوزیت‌ها می‌شود.

با توجه به مزایای مطرح شده، گرمانرم پی‌وی‌سی با تقویت کننده‌های مختلف برای تولید انواع کامپوزیت‌ها به کار رفته است. کوکتا و همکاران [7] به بررسی کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی تقویت شده با الیاف چوب پرداخته‌اند و اثر عملیات سطحی مختلف سلولز از قبیل پوشش‌دهی با لاتکس و یا پیونددهی با مونومر وینیل را بر روی مشخصات مکانیکی بررسی کرده و افزایش استحکام را مشاهده کردند. دجیدجلی و همکاران [8]، کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی تقویت شده با الیاف سیسال خام و عملیات سطحی شده را بررسی و ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که عملیات سطحی موجب افزایش استحکام و کاهش مدول و سختی کامپوزیت حاصل می‌شود. زال و همکاران [9،10]، کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی تقویت شده با الیاف ممتد شیشه را بررسی کرده و تاثیر سه پارامتر تولید دما، زمان و فشار را بر روی استحکام محصولات بدست آوردند. با وجود کارهای تحقیقی انجام گرفته بر روی فرآیند تولید و آغشته‌سازی کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی، نکته‌ای که کمتر در نظر گرفته شده، ماهیت بی‌شکل² زمینه پلیمری پی‌وی‌سی است که موجب نرم شدن تدریجی کامپوزیت حاصل با افزایش دما شده و مدول الاستیک و صلبیت محصول را به شدت وابسته به دمای کارکرد می‌کند. کامپوزیت‌ها (خصوصا کامپوزیت‌های گرمانرم تقویت شده با الیاف شیشه) در مقایسه با فلزات، مدول الاستیک پایینی دارند که در نتیجه برای کاربردهایی

3- Storage Modulus

4- Loss modulus

5- Damping Value

6- Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA)

1- Fracture toughness

2- Amorphous

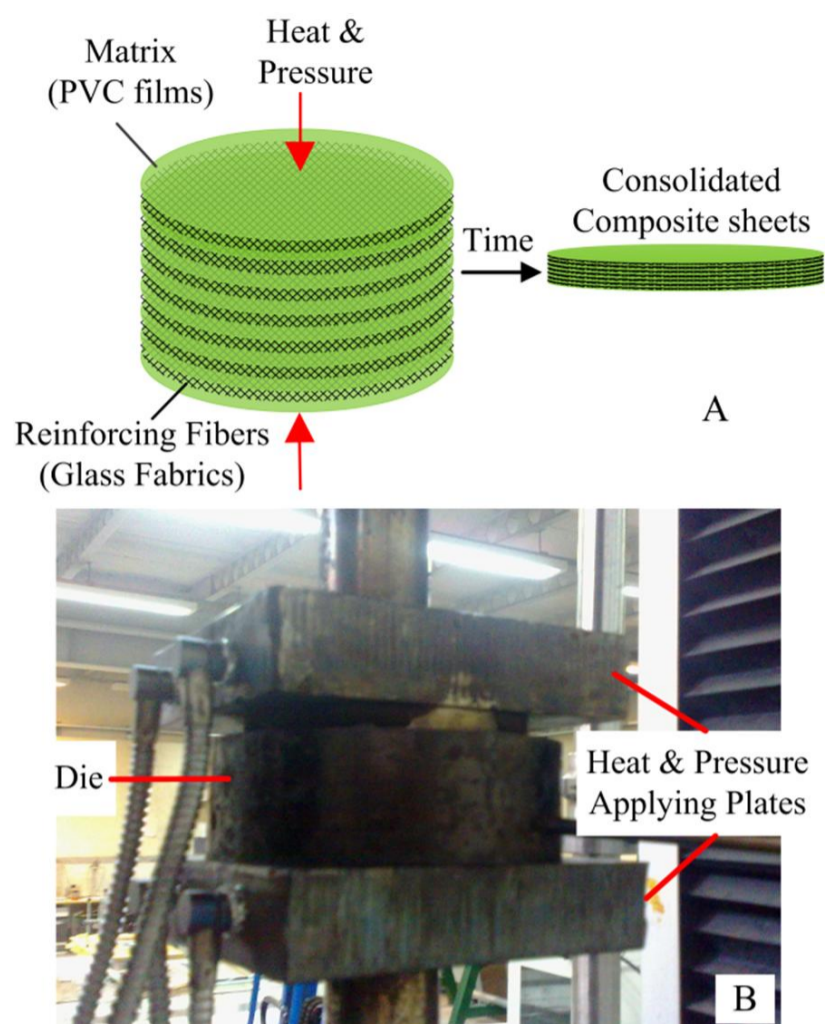


Fig. 2 A) Schematic of the film stacking procedure, B) laminates production setup

شکل 2 A) شماتیک تولید لمینت‌های کامپوزیتی به روش انباشت لایه‌ها و تصویر فرآیند تولید

3- طراحی آزمایش

در این مقاله سه نمونه در بازه دمایی بین 160°C (کمترین دمای لازم برای تولید نمونه‌های یکپارچه شده) و دمای 230°C (دمای بهینه تولید نمونه‌ها از نظر استحکام خمشی [9]) تولید شده‌اند که شرایط فرآیندی هر کدام از نمونه‌ها در جدول 1 ارائه شده است. مطابق نمونه‌های اولیه تولید شده، دمای تولید کمتر از 160°C به دلیل عدم ذوب و نرم شدن کافی زمینه پی‌وی‌سی، منجر به آغستگی ضعیفی می‌شود به طوری که عملاً محصول تولید شده یکپارچه نیست. از طرف دیگر به دلیل حساسیت بالای زمینه پی‌وی‌سی به تخریب حرارتی، افزایش دمای تولید به بالاتر از 230°C نیز موجب تخریب زمینه پی‌وی‌سی شده و اتصال و چسبندگی بین الیاف و زمینه از بین می‌رود. با توجه به این موضوع، دما در بازه 160°C تا 230°C بررسی شده است. برای تولید نمونه‌ها فشار فرآیند در 1.5 مگاپاسکال ثابت نگه داشته شده و زمان فرآیند نیز 30 دقیقه در نظر گرفته شده است. به دلیل اینکه در دمای 230°C افزایش زمان تولید بیش از 5 دقیقه همانند اثر افزایش دمای تولید، موجب تخریب زمینه پی‌وی‌سی می‌شد، زمان فرآیند برای نمونه سوم 5 دقیقه در نظر گرفته شده است تا بیشترین استحکام خمشی را داشته باشد.

جدول 1 شرایط فرآیندی تولید نمونه‌های کامپوزیتی

Table 1 Processing conditions of the samples production

دمای (°C)	زمان (دقیقه)	فشار (مگا پاسکال)	نمونه
160	30	1.5	نمونه اول
200	30	1.5	نمونه دوم
230	5	1.5	نمونه سوم

خواص ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های پی‌وی‌سی/الیاف شیشه تولید شده در دماهای مختلف (دمای تولید به عنوان موثرترین پارامتر تولید کامپوزیت‌های پی‌وی‌سی/الیاف شیشه [10]) پرداخته شده و این خواص در بازه دمایی 25 تا 220°C درجه سانتیگراد با استفاده از حالت خمش سه نقطه‌ای آزمون DMTA استخراج شده‌اند و با نتایج آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای متعارف (آزمون استاتیکی در دمای محیط) مقایسه شده‌اند تا اثر شرایط تولید و فرآوری محصول و کیفیت آغستگی آن و همچنین شرایط نرخ بارگذاری‌های مختلف بر روی این خواص بررسی شود.

2- مواد و روش تولید نمونه‌ها

برای تولید نمونه‌های کامپوزیتی مورد نظر، الیاف شیشه پارچه‌ای بافته شده گرید E با مشخصه وزنی 200 گرم بر مترمربع به عنوان فاز تقویت کننده به کار رفته است. همچنین برای فاز زمینه نیز از فیلم‌های پلیمری گرمانرم پی‌وی‌سی (با نرم کننده دی اکتیل فتالات¹) به ضخامت 0.2 میلیمتر و با دمای انتقال شیشه‌ای 74°C و دمای تخریب 296°C در شرایط جو هوای آزاد، استفاده شده است، در شکل 1 منحنی آزمون کالریمتری تفاضلی روبشی پی‌وی‌سی مورد نظر ارائه شده است.

برای تولید ورق‌های کامپوزیتی از فرآیند انباشت لایه‌ها³ به همراه پرس گرم استفاده شده است. 10 لایه پارچه بافت مسطح الیاف شیشه با چیدمان $10[90/0]$ به صورت متناوب در میان 11 لایه فیلم پی‌وی‌سی قرار گرفته و سپس در قالبی دایره‌ای به قطر 100 میلیمتر در طول زمانی مشخص تحت فشار و حرارت قرار گرفته‌اند تا در اثر نرم شدن زمینه پی‌وی‌سی و در نتیجه نفوذ آن به داخل لایه‌های الیاف شیشه، ورق‌های کامپوزیتی یکپارچه با ضخامت حدود 3 میلیمتر حاصل شود. در شکل 2 فرآیند تولید نمونه‌ها نشان داده شده است.

در این روند فشار مورد نظر قبل از رسیدن به دمای انتقال شیشه‌ای پی‌وی‌سی اعمال شده و تا سرد شدن نمونه تا زیر دمای انتقال شیشه‌ای حفظ می‌شود. در شکل 3 چرخه و آهنگ گرمایش و سرمایش و اعمال فشار برای تولید نمونه‌ها نشان داده شده است.

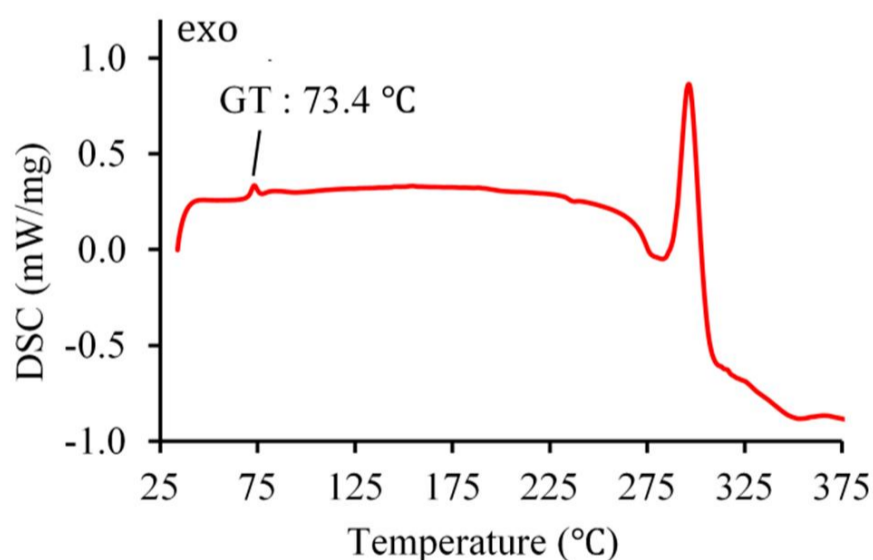


Fig. 1 DSC curve of the used PVC matrix (glass transition temperature: 73.4°C , degradation beginning: 270°C and peak of degradation: 296°C)

شکل 1 منحنی کالریمتری تفاضلی روبشی زمینه پی‌وی‌سی (دمای انتقال شیشه‌ای 73.4°C ، شروع تخریب از 270°C و اوج تخریب در دمای 296°C)

1- Dioctyl Phthalate (DOP)
2- Differential Scanning Calorimeter (DSC)
3- Film Stacking

از طرف دیگر با توجه به اینکه آزمون خمش سه نقطه‌ای برای ارزیابی در شرایط استاتیکی به کار می‌رود و معمولاً در دمای محیط انجام می‌گیرد، بنابراین برای بررسی خواص ویسکوالاستیک و حرارتی کامپوزیت‌های تولید شده و بررسی اثر دمای فرآیند تولید بر روی این خواص، از آزمون DMTA (با استفاده از دستگاه Netzsch-200f - ساخت کشور آلمان) استفاده شده است. به منظور استخراج نتایج قابل مقایسه با نتایج آزمون استاتیکی، این آزمون نیز در مد خمش سه نقطه‌ای (نمونه‌هایی به ابعاد $35 \times 3 \times 10$ میلیمتر) و در بازه دمایی 25 تا 220 درجه سانتیگراد، با آهنگ گرمایش 4 درجه سانتیگراد بر دقیقه و با فرکانس 1 هرتز، بر روی هر 3 نمونه کامپوزیتی انجام گرفته است. دمای انتقال شیشه‌ای نمونه‌ها با استفاده از نقطه پیک نمودار دمپینگ استخراج شده و اثر دما بر روی مدول ذخیره و مدول اتلاف هر سه نمونه بررسی شده است.

در این آزمون، جابجایی سینوسی به نمونه اعمال می‌شود و نیروی عکس‌العمل سینوسی ناشی از این جابجایی اندازه‌گیری می‌شود. برخلاف مواد الاستیک نظیر فلزات که در آنها بین نیروی اعمالی و جابجایی حاصل اختلاف فازی وجود ندارد، برای مواد ویسکوالاستیک نظیر کامپوزیت‌های گرمانرم بین جابجایی اعمالی و نیروی اندازه‌گرفته شده، اختلاف فاز وجود دارد. که با اندازه‌گیری این اختلاف فاز سه ویژگی مدول ذخیره، مدول اتلاف و ضریب دمپینگ محصول بدست می‌آید [20]. در شکل 4 شماتیک آزمون DMTA در حالت خمش سه نقطه‌ای نشان داده شده است.

4-3- بررسی میکروسکوپی کیفیت آغشتگی نمونه‌ها

برای بررسی اثر دمای تولید بر روی کیفیت آغشتگی و اتصال بین الیاف و زمینه، و همچنین ارتباط بین آغشتگی و خواص دینامیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد بررسی، از تصاویر میکروسکوپ نوری استفاده شده است. علاوه بر سه نمونه اصلی مورد بررسی، تخریب زمینه پی‌وی‌سی و اثر این تخریب بر اتصال بین الیاف/زمینه در نمونه اولیه تولید شده در 240°C نیز با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی بررسی و ارائه شده است.

5- نتایج و بحث

5-1- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای

آزمون خمش سه نقطه‌ای با سه تکرار برای هر کدام از سه نمونه کامپوزیتی انجام گرفت و نمودارهای نیرو-جابجایی برای هر کدام استخراج شد.

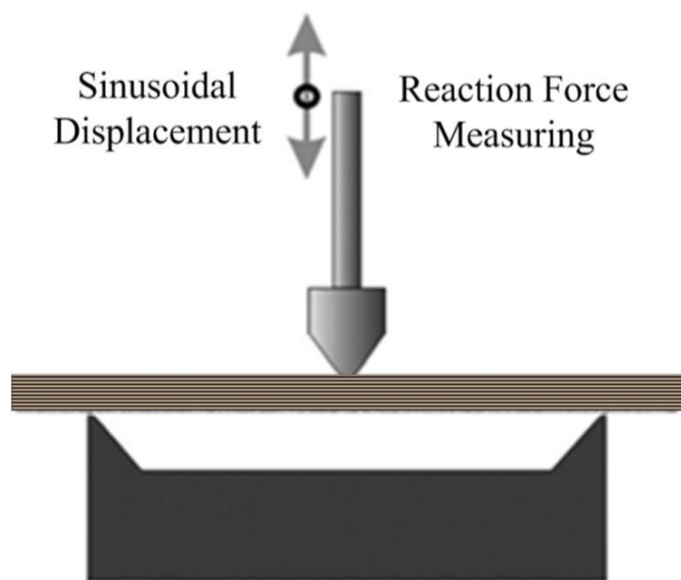


Fig. 4 Schematic of DMTA test in the three points bending mode

شکل 4 شماتیک آزمون DMTA در حالت خمش سه نقطه‌ای

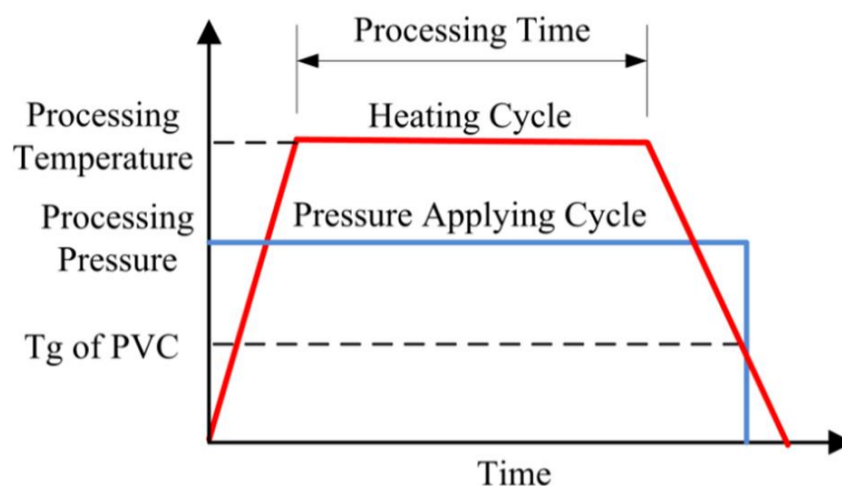


Fig. 3 Temperature and pressure cycle of the samples production, heating rate is $7^\circ\text{C}/\text{min}$ and cooling rate is $5^\circ\text{C}/\text{min}$

شکل 3 چرخه اعمال حرارت و فشار در طول زمان فرآیند تولید نمونه‌ها، نرخ گرمایش نمونه‌ها 7°C بر دقیقه و نرخ سرمایش نمونه‌ها نیز 5°C بر دقیقه است.

4- اندازه‌گیری‌ها

4-1- نحوه اندازه‌گیری خواص مکانیکی

به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده و کیفیت آغشته‌سازی و اتصال الیاف به زمینه و اتصال لایه‌ها به همدیگر، آزمون خمش سه نقطه‌ای بسیار متداول است [15, 16]. به همین دلیل در این مقاله برای هر کدام از شرایط آزمایش، 3 نمونه مستطیلی به ابعاد $80 \times 3 \times 12.5$ میلیمتر مطابق استاندارد ASTM D790-07، تولید شده و سپس با استفاده از دستگاه آزمون فشار کنترل کامپیوتری و با سرعت 5 میلیمتر بر دقیقه در شرایط دمای محیط تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای قرار گرفته‌اند.

با استفاده از نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای می‌توان دو ویژگی مکانیکی محصولات یعنی استحکام خمشی و مدول الاستیک خمشی نمونه‌ها را اندازه‌گیری کرد. استحکام خمشی نمونه‌ها با استفاده از تئوری الاستیک خطی تیرهای همگن در خمش تعیین می‌شود. مطابق این تئوری استحکام خمشی در تیر با مقطع مستطیلی از رابطه 1 بدست می‌آید [17].

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2wt^2} \quad (1)$$

در این رابطه σ_f استحکام خمشی بر حسب مگاپاسکال، F نیروی اعمالی در لحظه شکست بر حسب نیوتن، L ، W و t نیز به ترتیب فاصله بین دو تکیه‌گاه، عرض نمونه و ضخامت نمونه بر حسب میلیمتر می‌باشند. مدول خمشی استاتیکی نمونه‌ها نیز مطابق رابطه 2 بدست می‌آید.

$$E_b = \frac{mL^3}{4wt^3} \quad (2)$$

در این رابطه m شیب قسمت خطی دیاگرام نیرو-جابجایی است و بقیه پارامترها مطابق رابطه 1 هستند. با توجه به اینکه دیاگرام‌های نیرو-جابجایی به شکل خط ایده‌آل نیستند، بنابراین در این کار مدول خمشی نمونه‌ها با استفاده از شیب نقطه عطف نمودار نیرو-جابجایی محاسبه شده است که این روند توسط عبداللهی و همکاران [18] با دقت بسیار بالایی برای محاسبه مدول خمشی به کار رفته است.

4-2- نحوه اندازه‌گیری خواص ویسکوالاستیک

مواد ویسکوالاستیک نظیر پی‌وی‌سی به کار رفته در این کامپوزیت‌ها، دارای پاسخ وابسته به زمان هستند که در نتیجه آن خواص این مواد وابسته به نرخ کرنش و بارگذاری و همچنین شرایط دمایی است [19].

مطابق روابط 1 و 2 محاسبه شده و در شکل 6 نشان داده شده است. همانطور که در شکل 6 ملاحظه می شود، استحکام خمشی نمونه‌ها با افزایش دمای فرآیند بیشتر می‌شود که این مساله به دلیل آغشتگی بهتر محصولات با افزایش دمای فرآیند است. با افزایش دمای فرآیند، زمینه پی‌وی‌سی بیشتر نرم شده و نفوذ پذیرتر می‌شود در نتیجه الیاف را بهتر آغشته کرده و موجب توزیع یکنواخت‌تر نیروی اعمالی در میان الیاف می‌گردد. در شکل 6-A مشاهده می‌شود که با افزایش دمای فرآیند از 160°C به 200°C، استحکام خمشی در حدود 200 درصد بیشتر شده و با افزایش دمای فرآیند از 200°C به 230°C، افزایشی در حدود 75 درصد روی می‌دهد. این روند اثر بسیار بالای دمای فرآیند بر روی کیفیت آغشتگی و استحکام نمونه‌ها را نشان می‌دهد. افزایش بیشتر دمای فرآیند تا 240°C موجب تخریب زمینه پی‌وی‌سی و در نتیجه افت شدید خواص می‌شود که در ادامه بررسی خواهد شد.

این روند برای مدول خمشی الاستیک نیز مشاهده می‌شود. با افزایش دمای فرآیند از 160°C به 200°C، مدول خمشی افزایش چشمگیری در حدود 150 درصد پیدا می‌کند، به طوری که مدول خمشی نمونه از حدود 4 گیگا پاسکال به حدود 10 گیگا پاسکال افزایش می‌یابد. درحالی‌که با افزایش بیشتر دمای فرآیند با وجود بهبود استحکام، مدول ثابت می‌ماند. این روند بیانگر این است که در دمای فرآیندی 160°C لمینت‌ها به شکل مناسبی یکپارچه نشده‌اند و با اعمال نیرو دچار لغزش بر روی یکدیگر می‌شوند که این مساله صلبیت محصول را پایین می‌آورد. در حالیکه در دماهای فرآیندی بالا به دلیل آغشتگی مناسب، لغزش بین لایه‌ای روی نداده و مدول خمشی مطابق تئوری کلاسیک لمینت‌ها به دست می‌آید که وابسته به درصد الیاف بوده و بنابراین مدول ثابت می‌ماند.

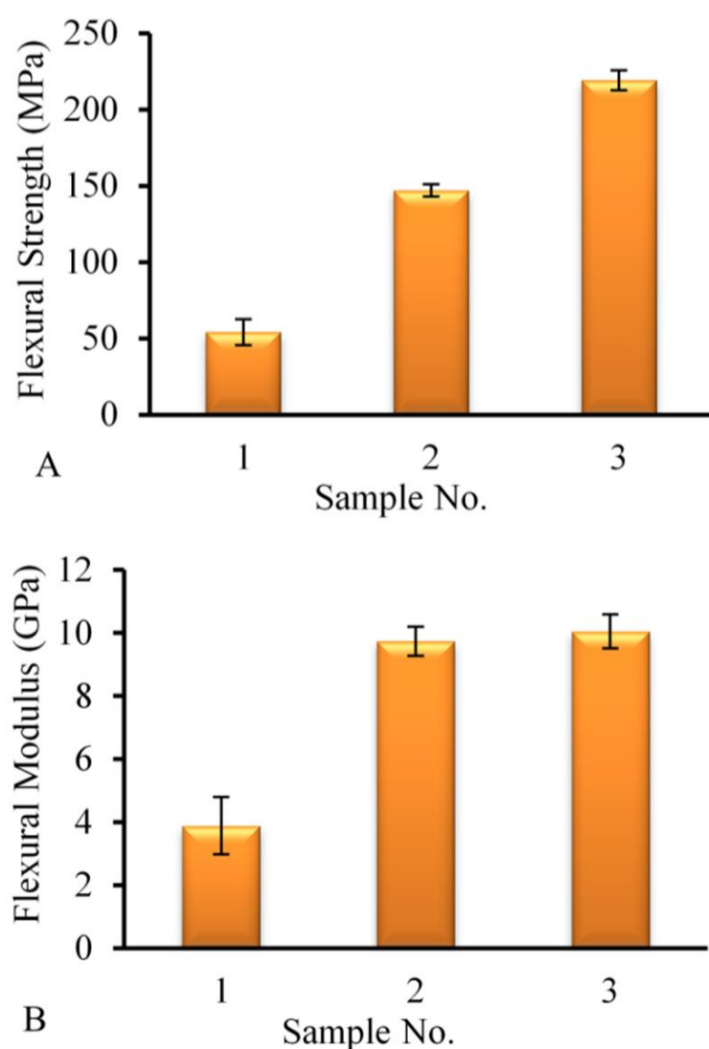


Fig. 6 A) Flexural Strength and B) Flexural Modulus of the samples, achieved from three points bending test

شکل 6 A) استحکام خمشی و B) مدول خمشی هر کدام از نمونه‌ها، بدست آمده از آزمون خمش سه نقطه‌ای

در شکل 5 نمودار نیرو-جابجایی برای تعدادی از آزمون‌ها و همچنین مجموعه انجام آزمون نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، نمونه‌ها رفتار متفاوتی در شرایط بارگذاری استاتیکی خمش سه نقطه-ای نشان می‌دهند. نمونه تولید شده در دمای 160°C (نمونه اول) به دلیل ویسکوزیته بالای زمینه پی‌وی‌سی و در نتیجه عدم آغشتگی مناسب بین الیاف تقویتی و پی‌وی‌سی، دارای اتصال ضعیفی بین لمینت‌ها است که در حین بارگذاری سریع دچار لغزش بین لمینت‌ها شده است، با این حال به دلیل اینکه الیاف دچار پارگی نشده‌اند، افت نیرویی شدید بعد از شکست مشاهده نمی‌شود و لمینت‌ها به تدریج و با نیروی ثابت بر روی همدیگر لغزیده‌اند. برای نمونه دوم که شرایط دمای تولید 200°C است شرایط آغشتگی و استحکامی بهتر شده و مشاهده می‌شود که بعد از حداکثر نیرو، نیروی اعمالی افت پیدا کرده است که این مساله بیانگر یکپارچه و همگن شدن نمونه است که در لحظه شکست الیاف دچار پارگی شده‌اند.

برای نمونه سوم (تولید شده در دمای 230°C) مشاهده می‌شود که بعد از شکست نمونه افت نیروی شدیدی روی می‌دهد که نشان دهنده پارگی همزمان الیاف تقویتی است. در این نمونه مکانیزم اصلی شکست پارگی الیاف است و هیچگونه لغزش بین لمینت‌ها روی نداده است. با توجه به این رفتار نمونه‌ها در طول بارگذاری، استحکام و مدول خمشی هر کدام از نمونه‌ها

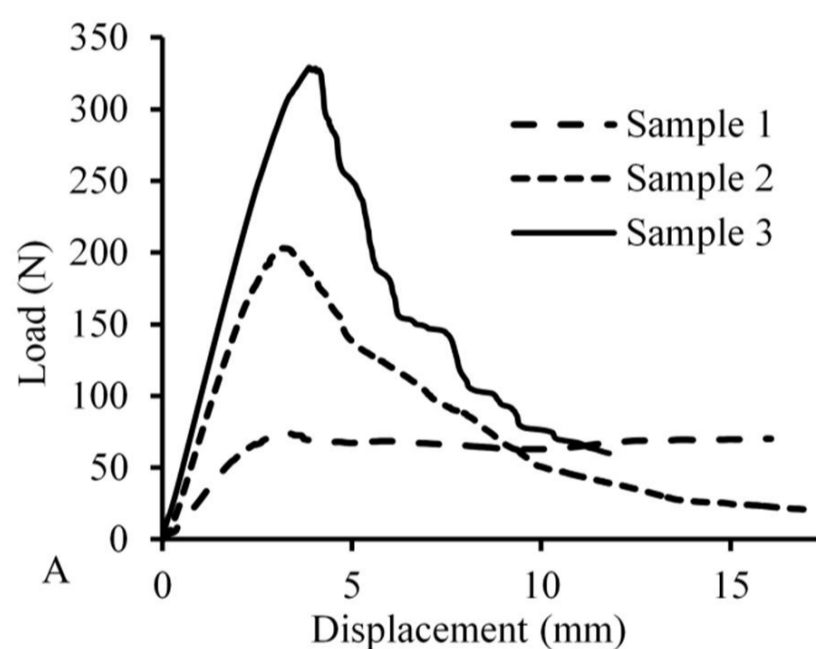


Fig. 5 A) Load-displacement diagrams of the three points bending test, B) the three points bending test setup

شکل 5 A) دیاگرام نیرو-جابجایی برای هر کدام از نمونه‌های کامپوزیتی در آزمون خمش سه نقطه‌ای، B) مجموعه آزمون خمش سه نقطه‌ای

2-5- رفتار دینامیکی مکانیکی

ذخیره نمونه بهینه تا 16 گیگاپاسکال نیز رسیده است که بیانگر بالاتر بودن 60 درصدی مدول ذخیره نمونه بهینه در مقایسه با نمونه استاتیکی می‌باشد. می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش نرخ اعمال کرنش به نمونه‌ها (در آزمون DMTA نسبت به آزمون خمش استاتیکی نرخ کرنش‌ها بسیار بالاتر هستند) فرصت لغزش‌های ریز بین الیاف و زمینه ایجاد نمی‌شود و در نتیجه نمونه صلب‌تر رفتار می‌کند. همچنین به دلیل اینکه پلیمرها (به ویژه گرمانرم‌های بی‌شکل) با افزایش نرخ کرنش صلب‌تر رفتار کرده و مدول الاستیک بالاتری از خود نشان می‌دهند [21]، در نتیجه بالاتر بودن مدول ذخیره نمونه‌های کامپوزیتی از مدول الاستیک ناشی از آزمون استاتیکی، منطقی است.

نکته دیگری که از نتایج مدول ذخیره مشاهده می‌شود، افزایش مدول ذخیره نمونه‌های کم استحکام (نمونه های اول و دوم) با افزایش دما تا 75 °C است در حالیکه برای نمونه 3 (نمونه تولید شده در دمای 230°C) با افزایش دما همواره مدول کاهش می‌یابد. این مساله می‌تواند ناشی از میکرو لغزش‌هایی باشد که بین الیاف و زمینه به دلیل عدم آغشتگی مناسب و کیفیت پایین اتصال بین الیاف/پی‌وی‌سی در نمونه‌های اول و دوم روی می‌دهد. در واقع در دماهای زیر دمای انتقال شیشه‌ای زمینه، به دلیل صلبیت هر دو فاز زمینه و الیاف تقویتی، این میکرو لغزش‌ها اتفاق می‌افتند که موجب کاهش مدول و صلبیت می‌شود. در حالیکه با افزایش دما، به دلیل افزایش خاصیت چسبندگی زمینه پی‌وی‌سی، اتصال بین الیاف/زمینه بهتر شده و میکرو لغزش‌ها کمتر می‌شوند، در نتیجه مدول افزایش می‌یابد. در ادامه با افزایش بیشتر دما، به علت نرم شدن و خمیری شدن زمینه، مدول ذخیره نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

برای نمونه تولید شده در دمای 230°C، به دلیل آغشتگی و اتصال مناسب و مستحکم بین الیاف تقویتی و زمینه پی‌وی‌سی، چنین میکرو لغزش‌هایی روی نداده و در نتیجه هم مدول بالاتری بدست می‌آید و هم افزایش مدول با افزایش دما ملاحظه نمی‌شود. بنابراین این روند نشان می‌دهد که نتایج حاصل از آزمون DMTA محصولات کامپوزیتی پی‌وی‌سی/الیاف شیشه می‌تواند برای تشخیص کیفیت آغشتگی و اتصال بین الیاف و زمینه و در نتیجه تعیین شرایط مناسب فرآوری محصولات کامپوزیتی به کار رود در حالیکه آزمون‌های استاتیکی مثل خمش تنها استحکام و خواص مکانیکی محصول را مشخص می‌کنند و هیچ اطلاعاتی راجع به نحوه رفتار اتصال بین الیاف و زمینه ارائه نمی‌کنند.

در واقع مطابق این آزمون، رفتار متناقض افزایش مدول ذخیره نمونه کامپوزیتی با افزایش دما (بنا به ماهیت مواد، همواره با افزایش دما صلبیت محصول کاهش می‌یابد) بیانگر اتصال ضعیف و غیر ایده‌آل بین فازها است. این روند با چندین تکرار این آزمون همواره مشاهده شد. با توجه به ماهیت این مکانیزم، روند مذکور می‌تواند برای سایر مواد و محصولات کامپوزیتی نیز به کار رود و به عنوان شاخصی از کیفیت اتصال بین الیاف و زمینه گرمانرم قرار گیرد. با توجه به این مساله، در شکل 8 تصاویر میکروسکوپ نوری مقاطع شکست نمونه‌ها ارائه شده اند تا استدلال‌های مطرح شده برای نتایج، با میزان آغشتگی نمونه‌ها انطباق داده شوند. همانطور که ملاحظه می‌شود، برای نمونه A لمینت‌ها بر روی هم لغزیده‌اند و در مقطع شکست نمونه هیچگونه پارگی الیاف مشاهده نمی‌شود در حالیکه الیاف از زمینه جدا شده‌اند که نمایانگر آغشتگی و اتصال ضعیف بین آنها است. کیفیت آغشتگی و اتصال با

پاسخ‌های دینامیکی سه نمونه کامپوزیتی تولید شده در شرایط مختلف در مد خمش سه نقطه‌ای اندازه گرفته شده است تا تاثیر شرایط آغشتگی بر پاسخ دینامیکی نمونه‌ها مطالعه شده و با نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای استاتیکی مقایسه شود. در شکل A-7 مشاهده می‌شود که مدول ذخیره نمونه‌ها با افزایش دمای تولید افزایش یافته است، در واقع با افزایش دمای تولید آغشتگی بهتر شده و بار اعمالی بهتر بین الیاف توزیع می‌شود، در نتیجه بخش بیشتری از الیاف درگیر شده و موجب افزایش صلبیت محصول می‌شود. همچنین همانطور که در بخش قبل نیز مطرح شد، با افزایش دمای تولید، لغزش بین لمینت‌ها کمتر شده و در نتیجه بر روی افزایش مدول موثر است. مدول ذخیره هر سه نمونه بیشتر از مدول خمشی متناظر ناشی از آزمون خمش استاتیکی است به طوری که در آزمون‌های استاتیکی افزایش

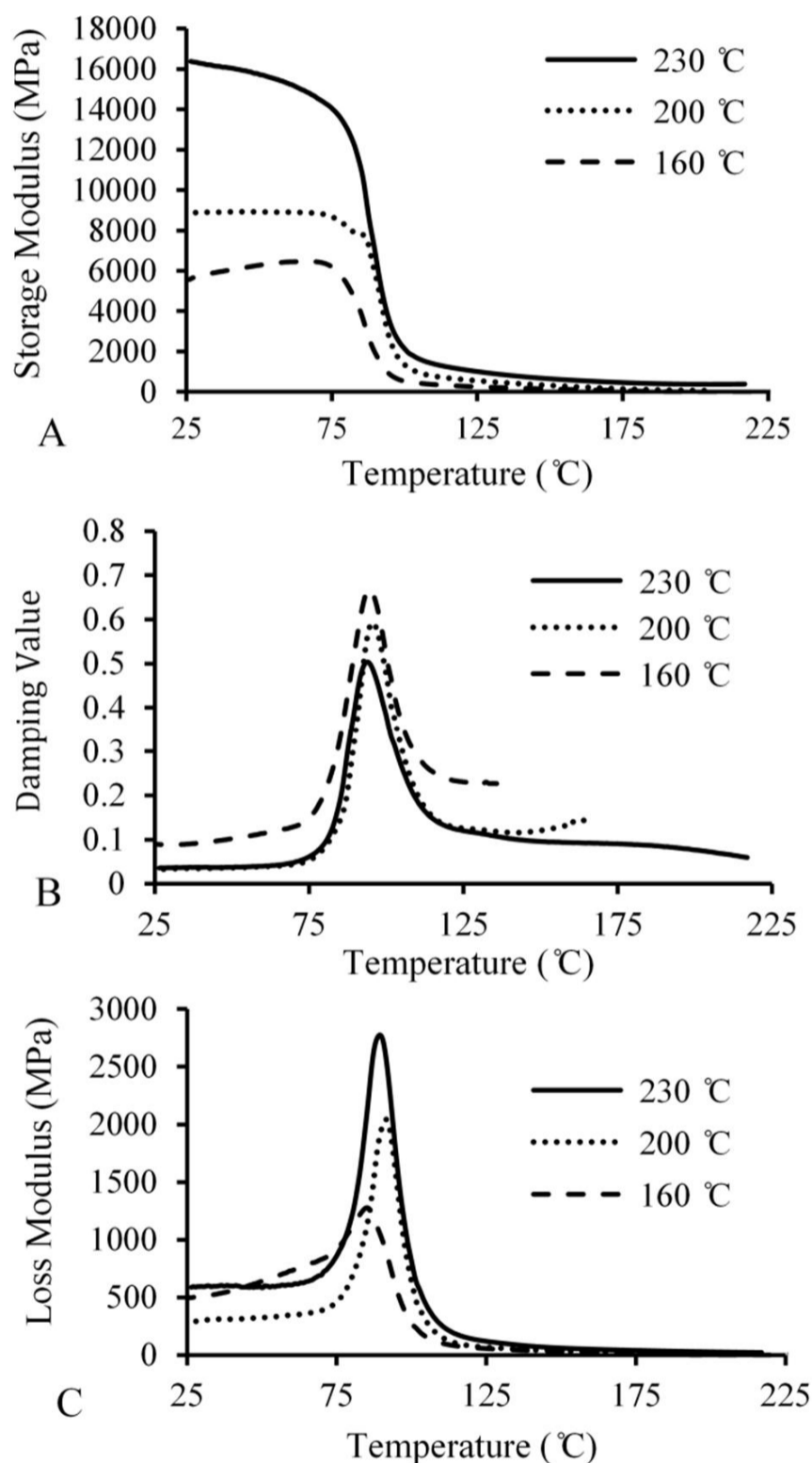


Fig. 7 Comparison of A) Storage Modulus, B) Damping Value and C) Loss Modulus of PVC/fiber glass composite laminates produced at 160°C, 200°C and 230°C

شکل 7 مقایسه (A) مدول ذخیره، (B) ضریب دمپینگ و (C) مدول اتلاف بین سه نمونه کامپوزیت پی‌وی‌سی/الیاف شیشه تولید شده در سه دمای 160، 200 و 230 درجه سانتیگراد

مدول تا 10 گیگاپاسکال ادامه می‌یابد ولی مطابق آزمون DMTA، مدول

بیشتری می‌شود، افزایش این لغزش با کاهش دمای تولید، در تصاویر میکروسکوپی کاملاً مشهود است. همچنین مطابق شکل 7-C، مدول اتلاف و رفتار ویسکوز نمونه‌های تولید شده در شرایط دمایی بالاتر، بیشتر است. برای همه نمونه‌ها دمای انتقال شیشه‌ای حدود 95°C بدست آمد که تقریباً 20°C بیشتر از دمای انتقال شیشه‌ای فیلم‌های پی‌وی‌سی به کار رفته است. در واقع حضور فاز تقویتی الاستیک الیاف شیشه در مجاورت فاز ویسکوالاستیک پی‌وی‌سی موجب افزایش 20°C دمای انتقال شیشه‌ای کامپوزیت حاصل شده است ولی دمای تولید محصولات و در نتیجه کیفیت آغشتگی تأثیری بر روی دمای انتقال شیشه‌ای محصولات نداشته است. همانطور که در بخش قبل اشاره شد، افزایش دمای تولید به بالاتر از 230°C موجب تخریب زمینه پی‌وی‌سی می‌شود که در این حالت به دلیل از بین رفتن اتصالات بین الیاف و زمینه، محصول بسیار ضعیف شده و یکپارچگی خود را از دست می‌دهد. در شکل 9 تصاویر میکروسکوپی نمونه اولیه تولید شده در دمای 240°C ارائه شده است.

همانطور که در شکل 9 ملاحظه می‌گردد، تخریب زمینه موجب از بین رفتن پیوندهای بین الیاف و زمینه شده است به طوری که اتصال و یکپارچگی خود زمینه نیز از بین رفته است. در این شرایط نمونه حاصل کیفیت خود را از دست داده و عملاً امکان بارگذاری مکانیکی وجود ندارد. با توجه به این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل تخریب زمینه در این شرایط تولید نمونه، خواص ویسکوالاستیک این نمونه نیز قابل اعتنا نباشد. در شکل 9-B ملاحظه می‌گردد که با وجود نفوذ اولیه خوب پی‌وی‌سی به اطراف الیاف، به دلیل تخریب و از بین رفتن خاصیت چسبندگی زمینه، الیاف از زمینه جدا شده‌اند. اگرچه افزایش دمای فرآیند تولید نمونه‌ها تا 230°C موجب بهبود

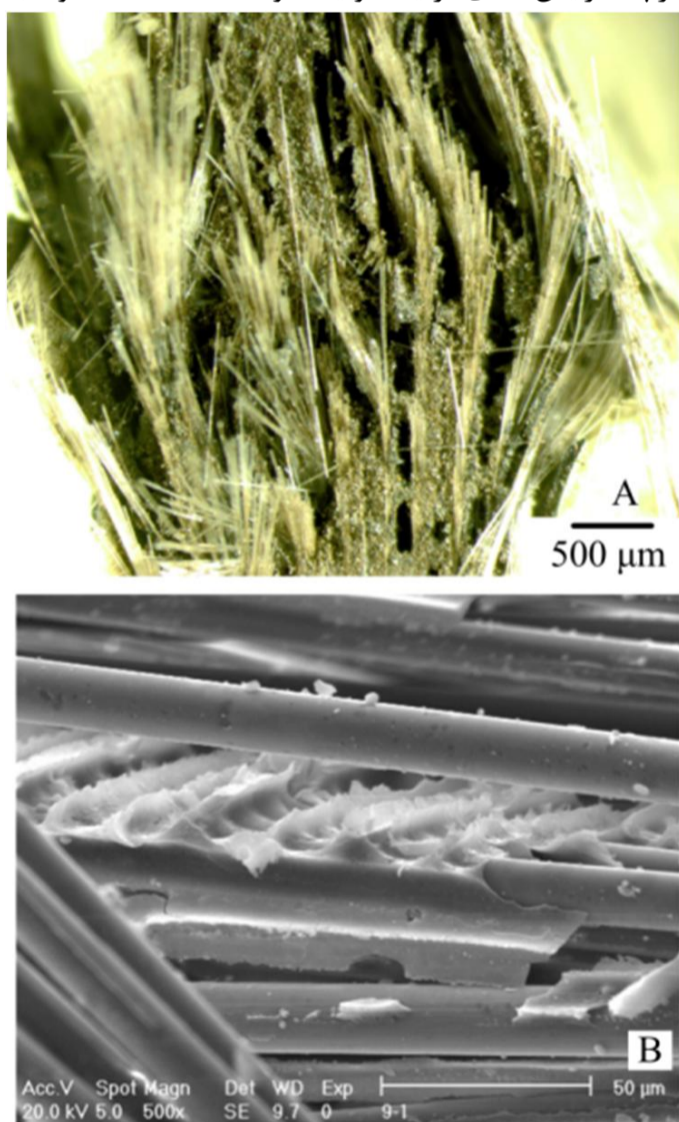


Fig. 9 A) Optical microscope and B) Electron microscope images of the 240°C produced sample

شکل 9 تصاویر میکروسکوپ نوری (A) و میکروسکوپ الکترونی (B) نمونه تولید شده در دمای 240°C

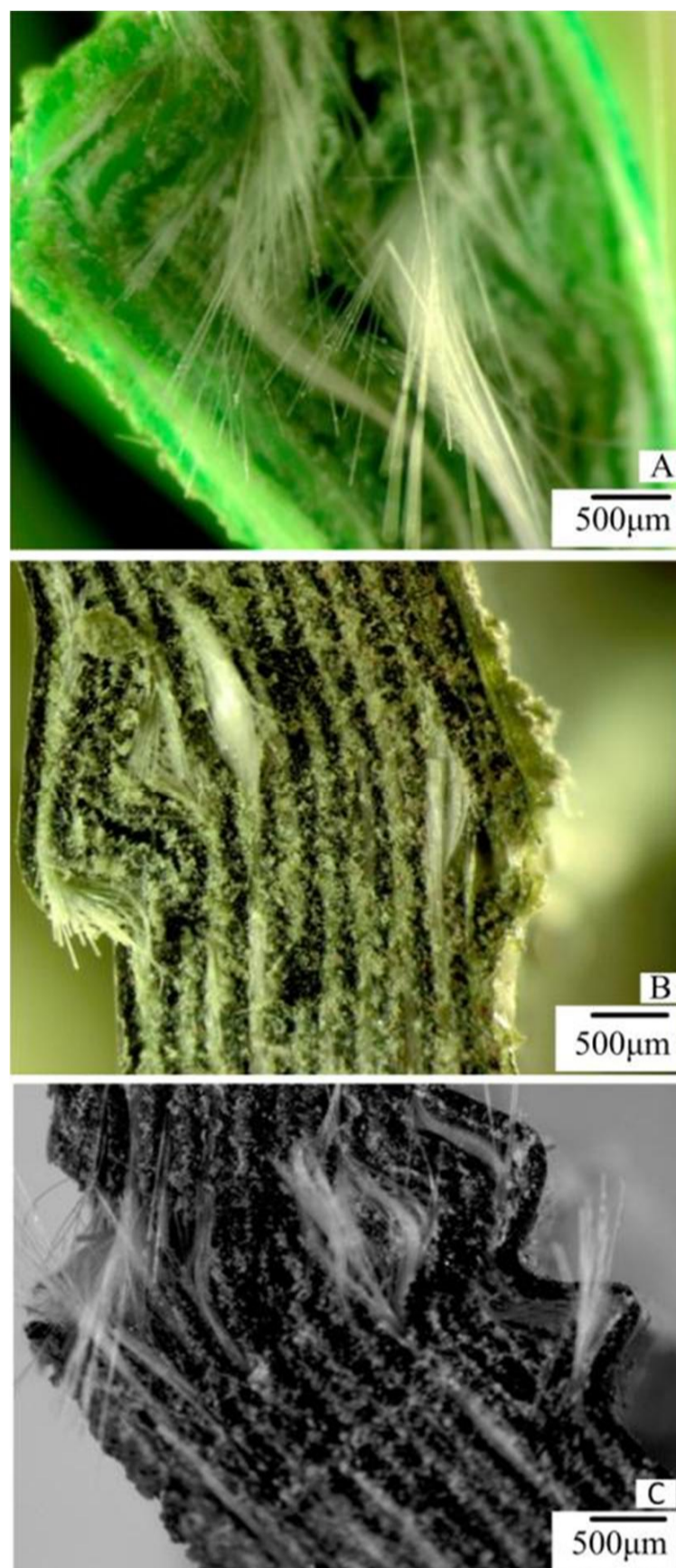


Fig. 8 Optical microscope images of the samples after three points bending test, A) Sample 1 produced at 160°C , B) Sample 2 produced at 200°C , C) Sample 3 produced at 230°C

شکل 8 تصاویر میکروسکوپ نوری مقطع نمونه‌ها بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای، نمونه اول: تولید شده در 160°C (B، نمونه دوم: تولید شده در 200°C (C، نمونه سوم: تولید شده در 230°C

افزایش دمای فرآیند بهبود یافته است. به طوری که برای نمونه تولید شده در 200°C ، در کنار لغزش لمینت‌ها بر روی یکدیگر، پارگی الیاف نیز مشاهده می‌شود و در ادامه برای نمونه تولید شده در 230°C ، شکست یکپارچه الیاف در سطح بیرونی نمونه مشاهده می‌شود که بیانگر اتصال کامل بین الیاف و زمینه و در نتیجه عدم لغزش بین آنها است. این روند در تطابق کامل با نتایج مدول ذخیره حاصل از آزمون DMTA است.

تصاویر ارائه شده همچنین در هماهنگی کامل با نتایج ضریب دمپینگ نمونه‌ها نیز است. در شکل 7-B مشاهده می‌شود که ضریب دمپینگ نمونه‌ها با کاهش دمای تولید افزایش می‌یابد، این مساله به دلیل لغزش بیشتر بین الیاف/زمینه به علت عدم آغشتگی مناسب است که موجب اتلاف انرژی

- [7] B. V. Kokta, D. Maldas, C. Daneault, P. Béland, Composites of poly(vinyl chloride) and wood fibers. Part II: Effect of chemical treatment. *Polymer Composites*, Vol. 11, No. 2, pp. 84-89, 1990.
- [8] H. Djidjelli, A. Boukerrou, R. Founas, A. Rabouhi, M. Kaci, J. Farenc, J. J. M. Vega, D. Benachour, Preparation and characterization of poly(vinyl chloride)/virgin and treated sisal fiber composites. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 103, No. 6, pp. 3630-3636, 2007.
- [9] V. Zal, H. Moslemi Naeini, A.R. Bahramian, A.H. Behraves, H. Abdollahi, Investigation of the effect of processing time and temperature on the strength of PVC/fiberglass thermoplastic composites, in the 23th. Annual (International) Conference on Mechanical Engineering, Tehran, Iran, 2015. (In Persian)
- [10] V. Zal, H. Moslemi Naeini, A.R. Bahramian, B. Abbaszadeh, H. Abdollahi, Analysis and optimization of tensile strength of PVC/fiberglass composite laminates, in the 4th international conference on composites (CCFA4), Tehran, Iran, 2014.
- [11] S. Davey, R. Das, W.J. Cantwell, S. Kalyanasundaram, Forming studies of carbon fibre composite sheets in dome forming processes, *Composite Structures*, Vol. 97, pp. 310-316, 2013.
- [12] W. Stark, H. Goering, U. Michel, H. Bayerl, Online monitoring of thermoset post-curing by dynamic mechanical thermal analysis DMTA, *Polymer Testing*, Vol. 28, No. 6, pp. 561-566, 2009.
- [13] R. Mafi, S.M. Mirabedini, M.M. Attar, S. Moradian, Cure characterization of epoxy and polyester clear powder coatings using Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA), *Progress in Organic Coatings*, Vol. 54, No. 3, pp. 164-169, 2005.
- [14] H. A. Maples, S. Wakefield, P. Robinson, A. Bismarck, High performance carbon fibre reinforced epoxy composites with controllable stiffness, *Composites Science and Technology*, Vol. 105, pp. 134-143, 2014.
- [15] S.U. Khan, R.C. Alderliesten, C.D. Rans, R. Benedictus, Application of a modified Wheeler model to predict fatigue crack growth in Fibre Metal Laminates under variable amplitude loading, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, No. 9, pp. 1400-1416, 2010.
- [16] M. Valente, F. Sarasini, F. Marra, J. Tirillò, G. Pulci, Hybrid recycled glass fiber/wood flour thermoplastic composites: Manufacturing and mechanical characterization, *Composites Part A*, Vol. 42, No. 6, pp. 649-657, 2011.
- [17] Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials, ASTM D790-07. West Conshohocken, ASTM International, 2007.
- [18] H. Abdollahi, R. A. Mahdavejad, V. Zal, M. Ghambari, Optimization of mechanical properties of iron metallurgy parts and investigation of these properties by transverse rupture test, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 149-157, 2014. (in persian).
- [19] R. Ansari, M. K. Hassanzadeh Aghdam, Effects of regular and random distribution of silica nanoparticles on the thermo-elastic and viscoelastic properties of polymer nanocomposites-Micromechanics-based analysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 99-107, 2014. (in persian).
- [20] C. Chindama, A. Lakhtakia, N. R. Brownb, W. Orfalic, O. O. Awadelkarim, Frequency- and temperature-dependent storage and loss moduli of microfibrillar thin films of Parylene C, *Materials Letters*, Vol. 116, pp. 296-298, 2014.
- [21] J. Richeton, S. Ahzi, K.S. Vecchio, F.C. Jiang, R.R. Adharapurapu, Influence of temperature and strain rate on the mechanical behavior of three amorphous polymers: Characterization and modeling of the compressive yield stress, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, No. 7-8, pp. 2318-2335, 2006.

آغستگی و در نتیجه خواص مکانیکی و دینامیکی نمونه‌ها می‌گردد، ولی با افزایش بیشتر دمای فرآیند، تخریب ناگهانی زمینه پی‌وی‌سی روی داده و نمونه معیوب حاصل شود.

6- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر دمای تولید بر روی استحکام و مدول خمشی و همچنین خواص ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی تقویت شده با الیاف شیشه پرداخته شده است. نتایج زیر از این مقاله بدست آمدند:

- با افزایش دمای تولید تا 230°C ، آغستگی بین زمینه و الیاف و در نتیجه استحکام و مدول الاستیک خمشی محصولات کامپوزیتی پی‌وی‌سی/الیاف شیشه افزایش می‌یابد و افزایش بیشتر دمای تولید موجب تخریب زمینه پی‌وی‌سی می‌گردد.
- با افزایش دمای تولید تا 230°C ، مدول ذخیره محصولات کامپوزیتی پی‌وی‌سی/الیاف شیشه افزایش می‌یابد و همچنین به دلیل رفتار صلب-تر پلیمرها در شرایط نرخ کرنش بالا، مدول ذخیره نمونه‌ها از مدول الاستیک استاتیکی بالاتر است.
- دمای تولید و فرآوری تاثیری بر روی دمای انتقال شیشه‌ای کامپوزیت‌های پی‌وی‌سی/الیاف شیشه ندارد.
- افزایش مدول ذخیره نمونه‌ها با افزایش دما تا دمای انتقال شیشه‌ای زمینه، به عنوان شاخصی از اتصال ضعیف و نامناسب بین الیاف تقویتی و زمینه معرفی شد.
- آزمون DMTA به خوبی میکروولغزش‌های بین الیاف/زمینه در بارگذاری دینامیکی را نشان می‌دهد و با توجه به رفتار ویسکوالاستیک نمونه‌ها، می‌تواند برای تعیین شرایط مناسب آغستگی و در نتیجه فرآوری و تولید کامپوزیت‌های پی‌وی‌سی/الیاف شیشه به کار رود.

7- مراجع

- [1] S. A. Hoseini, M. H. Pol, Investigation of the tensile and the flexural properties of the glass/epoxy composites reinforced with nanoclay particles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 103-108, 2014. (in persian)
- [2] 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, pp. 279-287, 2013.
- [3] H.F. Hwang, K.J. Hwang, Stamp forming of locally heated thermoplastic composites, *Composites: Part A*, Vol. 33, No. 5, pp. 669-676, 2002.
- [4] H. Parton, I. Verpoest, In situ polymerization of thermoplastic composites based on cyclic oligomers, *Polymer Composites*, Vol. 26, No. 1, pp. 60-65, 2005.
- [5] K. Endo, Synthesis and structure of poly(vinyl chloride), *Progress in Polymer Science*, Vol. 27, No. 10, pp. 2021-2054, 2002.
- [6] R. Wirawan, S.M. 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.