



بهبود مقاومت تورق کامپوزیت‌های شیشه-فنولی به روش چقرمه‌سازی زمینه توسط پلی‌وینیل بوتیرال

محیا فرجی¹، امیر مسعود رضادوست^{2*}، مسعود اسفنده³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران
 2- استادیار، مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران
 3- استاد، مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران
 * تهران، صندوق پستی 14977-13115، a.rezadoust@ippi.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
کامپوزیت‌ها انواع مختلف دارند که از جمله آن‌ها کامپوزیت‌ها با ساختار لایه‌ای می‌باشند که در آنها احتمال تورق تحت بارهای اعمالی وجود دارد. کامپوزیت رزین فنولیک / الیاف شیشه از جمله کامپوزیت‌های پر کاربرد می‌باشد که احتمال تورق در آن زیاد است. در این پژوهش افزایش مقاومت این کامپوزیت در برابر تورق با کمک افزودنی پلیمری گرمانرم پلی وینیل بوتیرال (PVB) با مقادیر 1، 3، 5، 10 و 20phr مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا پیش آغشته الیاف شیشه و رزین فنولی اصلاح شده تهیه شده، به منظور رسیدن به پخت جزئی، در شرایط دما-زمان معین قرار داده و میزان جریان یابی آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس با فرآیند قالب‌گیری فشاری از نمونه‌های با مقدار جریان‌یابی یکسان 10%، نمونه‌های آزمون خمش تهیه شد. نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای نشان داد که افزودن PVB در مقادیر مختلف موجب بهبود نسبی استحکام و مقاومت در برابر تورق شده که میزان آن تابع مقدار افزودنی است. افزودن PVB تا 3 phr موجب افزایش چقرمگی شکست تا 58/2% و بیشتر از 3 phr موجب کاهش آن شده، متوسط نیروی پیش برنده شکست نیز تنها در کامپوزیت حاوی 3 phr از PVB افزایش یافت. در این راستا میزان 3 phr از PVB به عنوان مقدار بهینه شناخته شد. بررسی مورفولوژی سطوح شکست با استفاده از SEM بیانگر ممانعت از رشد ترک در این کامپوزیت‌ها حتی در مقدار 1 phr می‌باشند.	تاریخ دریافت: 96/3/21 تاریخ پذیرش: 96/7/22 کلیدواژگان: کامپوزیت شیشه-فنولی تورق پلی وینیل بوتیرال چقرمه‌سازی استحکام خمشی

Improvement of delamination resistance of glass-phenolic composites through matrix toughening mechanism using poly (vinyl butyral)

Mahya Faraji, Amir Masoud Rezadoust*, Masoud Esfandeh

Composites Department, Iran Polymer & Petrochemical Institute, Tehran, Iran
 * P.O.B. 14977-13115, Tehran, Iran, a.rezadoust@ippi.ac.ir

Keywords	Abstract
Glass-phenolic Composites Delamination Polyvinyl Butyral Toughening Flexural Strength	There are various types of composites among which these with layered structure are susceptible to delamination under the applied loads. Phenolic resin/glass fiber composites, one of the most commonly used composites, are prone to delamination. In this research, the improvement of the delamination resistance of phenolic composites via the addition of polyvinyl butyral (PVB), a thermoplastic additive at various contents (i.e. 1, 3, 5, 10 and 20 phr) has been studied. For this purpose a phenolic/glass fiber prepreg modified with thermoplastic additive was prepared and brought to a partially cured (B-stage) by using a specified temperature-time condition. The flow ability of the prepared prepreps was measured. Samples for the flexural test were then prepared by compression molding of the prepreps having the flow abilities of 10%. Three-point bending test results showed that the addition of PVB relatively improves the strength and delamination resistance of the composites, the extent of which depends on the additive content. The addition of PVB at 3 phr increased the fracture toughness up to 58.2%, however beyond which it was reduced; hence 3phr was regarded as the optimum value. Inspection of the fracture surface morphology by SEM revealed the inhibition of crack propagation even at 1 phr of PVB.

تورق بحرانی‌ترین نوع شکست است که ممکن است در یک کامپوزیت چند لایه اتفاق بیفتد و بعد از آن کامپوزیت خواص مکانیکی خود را از دست می‌دهد. این پدیده برای کامپوزیت‌های فنولی محتمل‌تر است، از این رو نیاز بیشتری به بررسی دارد. تورق ممکن است در اثر خمش، فشار، ضربه و حتی

1- مقدمه
 کامپوزیت‌های چند لایه، به دلیل خواص قابل تنظیم متناسب با کاربرد، در صنایع پیشرفته گسترش فراوانی یافته‌اند. از طرف دیگر، یکی از مشکلات مهم این نوع کامپوزیت‌ها، جدایی لایه‌های الیاف از یکدیگر و وقوع تورق است.

Please cite this article using:

Faraji, M. Rezadoust, A.M. and Esfandeh, M., "Improvement of delamination resistance of glass-phenolic composites through matrix toughening mechanism using poly (vinyl butyral)", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 521-528, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

نمونه‌ها در مقدار 10 phr از PVB به حداکثر می‌رسد. لیو و همکاران [18] از میکرو ذرات پلی اتیلن با جرم مولکولی بسیار بالا (UHMWPE) که اصلاح سطح روی آن‌ها انجام شده بود، برای بهبود استحکام برشی میان لایه‌های کامپوزیت شیشه-فنولی استفاده کردند و نتیجه گرفتند که اصلاح سطح مقاومت برشی میان لایه‌های نمونه‌ها را به میزان 50% بهبود می‌دهد. اوزدمیر و همکاران [19] با افزودن لاستیک آکریلونیتریل بوتادین (NBR) و آکریلونیتریل بوتادین با انتهای کربوکسیله (CNBR) در ابعاد نانو، چقرمگی شکست الگوی 1 و 2 کامپوزیت شیشه-اپوکسی را به ترتیب 190 و 70% افزایش دادند. همچنین در تحقیقات بهشتی و همکاران [20]، مشاهده شد که با افزایش میزان آکریلونیتریل در آمیزه فنولی-NBR، بهبود قابل توجهی در خواص حرارتی و مکانیکی آلیاژ مربوطه حاصل می‌شود. فتوحی و همکاران [21] پلی وینیلیدن دی فلوراید را بصورت لایه الکترورسی شده در میان لایه‌های کامپوزیت کربن-اپوکسی قرار دادند و چقرمگی شکست با الگوی 1 را 98% افزایش دادند. کمر و همکاران [22] نیز با استفاده از کولپمر سه بلوکه استایرن-بوتادین-متیل متاکریلات (SMB)، چقرمگی شکست با الگوی 1 را 290% بهبود دادند. سونفولد و همکاران [23] لایه پلیمری از پلی اتر کتون و پلی فنیلن سولفاید را بین لایه‌های کامپوزیت اپوکسی-کربن قرار دادند و مشاهده کردند که سطح نواحی دچار تورق شده، 3-2/5 برابر کاهش، و مقاومت ضربه قطعات افزایش می‌یابد.

در مجموع مطالعات انجام شده در این حوزه، دو نکته به چشم می‌خورد: یکی اینکه، علی‌رغم پایین بودن مقاومت به تورق کامپوزیت‌های فنولی، مطالعات بسیار محدودی برای بهبود چقرمگی شکست آن‌ها انجام گرفته است. دیگر آنکه گزارشی از کاربرد PVB به عنوان ماده چقرمه کننده و ارزیابی مقاومت برشی بین لایه‌های مشاهده نشد. از آنجا که الکل، حلال مشترک PVB و رزین فنولی می‌باشد، و همچنین با توجه به خواص چقرمه‌سازی که این ماده داراست، در این تحقیق، بهبود مقاومت به تورق کامپوزیت شیشه-فنولی با مکانیزم چقرمه‌سازی زمینه کامپوزیتی توسط PVB، مورد توجه قرار گرفته است.

2- تجربی

2-1- مواد

برای انجام این پژوهش از تقویت‌کننده شیشه نوع E بصورت پارچه با بافت ساده و وزن واحد سطح 200g/m^2 (تهیه شده از شرکت Sichuan Fiber Glass Co چین)، رزین فنولی (IL800 محصول شرکت رزیتان ایران) و پلی وینیل بوتیرال (PVB) (شرکت Kuraray آلمان با کد Mowital B 30 H) استفاده شده است.

2-2- آماده سازی نمونه

برای تهیه نمونه‌ها در این تحقیق از نسبت وزنی استفاده شده است و چون رزین رزول مورد استفاده از نوع محلول بوده مقدار درصد مواد جامد آن (85٪) در محاسبات در نظر گرفته شده است. برای اندازه‌گیری درصد جامد رزول مطابق ASTM D-4639 عمل شد. مطابق این استاندارد یک ظرف آلومینیم ی با قطر 63 و عمق 20 mm تهیه و 5 g از رزول درون آن ریخته شد و به مدت 2 ساعت درون آن تحت گردش هوای داغ با دمای 150°C قرار گرفت. نسبت وزن رزین پس از دماهی به وزن اولیه، درصد جامد رزین را نشان می‌دهد که مقدار آن 85% بود.

بارهای دینامیک به هنگام به‌کارگیری قطعه ایجاد شود و به سه شکل قیچی، لغزشی، باز کننده یا تلفیق این‌ها اتفاق بیافتد [1] (شکل 1).

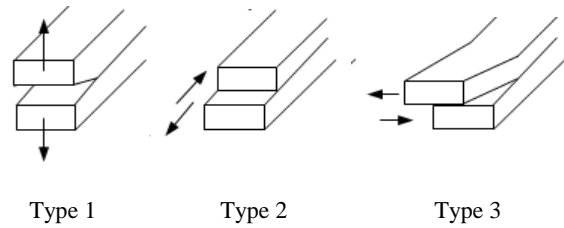


Fig. 1 Modes of delamination fracture: Crack opening, Sliding shear and Scissoring shear [1]

شکل 1 انواع الگوی‌های محتمل شکست به‌صورت تورق؛ الف) باز شدن ترک، ب) برش لغزشی و ج) برش قیچی [1]

از جمله عوامل بروز تورق در کامپوزیت‌های چندلایه می‌توان به شکنندگی رزین در نواحی غنی از رزین و فاقد تقویت کننده و نیز در فصل مشترک الیاف و رزین اشاره نمود که باعث تضعیف میان لایه و ظهور پدیده تورق می‌شود [2].

منشأ تورق هرچه باشد، باعث کاهش شدید توانایی سازه در تحمل نیرو می‌شود. از این رو، روش‌های مختلفی برای بهبود مقاومت به تورق بکار گرفته شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از بافت عمودی [3] و [4]، استفاده از نانوذرات [5] و [6]، استفاده از الیاف میکرو [7] و [8] و نیز چقرمه سازی زمینه با پلیمر [9] و [10] اشاره نمود.

میرزاپور و همکاران [11] اثر نانوسیلیکا را بر خواص خمشی کامپوزیت الیاف شیشه-رزین فنولی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد مدول خمشی و استحکام نمونه‌های دارای 2٪ نانوسیلیکا به ترتیب حدود 19 و 40٪ نسبت به کامپوزیت خالص افزایش می‌یابد.

رجب زاده و همکاران [12] از سیلان به منظور افزایش استحکام کششی کامپوزیت شیشه-فنولی استفاده کردند و مشاهده نمودند افزودن سیلان استحکام کششی را حدود 30% تا 40% افزایش می‌دهد.

از میان روش‌های مذکور، تمرکز زیادی بر استفاده از پلیمرها برای چقرمه‌سازی زمینه کامپوزیت و محدود ساختن رشد ترک بین لایه‌های است. بدین منظور از لاستیک‌های مایع یا پلیمرهای گرمانرم متنوعی استفاده شده است [2] و [13]. وو [14] از یک پلیمر گرمانرم به عنوان ماده چقرمه کننده در اپوکسی استفاده کرد و عملکرد آن را با آزمون دینامیکی- مکانیکی ارزیابی نمود. نتایج او نشان داد که اثر چقرمه کنندگی وقتی ظاهر می‌شود که قطعه در دماهای بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای آن قرار داشته باشد. وو و مائو [15] از پلی اترامید برای چقرمه کردن زمینه اپوکسی در کامپوزیت الیاف کربن استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد در اثر افزودن این پلیمر گرمانرم، چقرمگی شکست مود اول 3/27 برابر و چقرمگی شکست نوع دوم 4/5 برابر افزایش می‌یابد. راجولو و همکاران [16] از پلی کربنات برای چقرمه سازی زمینه اپوکسی در کامپوزیت الیاف شیشه استفاده کردند و مشاهده نمودند که استحکام برشی میان لایه‌های کامپوزیت کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که در یک مقدار معین از پلی کربنات، افزایش کسر حجمی الیاف، استحکام برشی را زیاد می‌کند. اسماعیل و همکاران [17] خواص مکانیکی-حرارتی کامپوزیت شیشه-فنولی چقرمه شده با پلی وینیل بوتیرال (PVB) را بررسی کردند. نتایج مطالعات ایشان حاکی از این بود که استحکام ضربه آیزود

در ابتدا الیاف بریده شده در ابعاد قالب به اندازه 130mm×100mm وزن گردید و سپس وزن معادل آن از رزین (با احتساب میزان مواد فرار) توزین شد. به رزین‌های توزین شده محلول اتانول-PVB حاوی مقادیر 1، 3، 5، 10 و 20 phr PVB اضافه شد. سپس توسط همزن مکانیکی با دور 1000 rpm همزده شد تا نمونه‌های یکنواختی حاصل شود. بعد از آغشته سازی الیاف به روش دستی، نمونه‌ها بر روی ورق‌های آلومینیم ی قرار گرفت و درون آن در دمای 90 °C و زمان مناسب که از آزمون جریان‌یابی به دست آمده بود، قرار داده شد تا پخت جزئی یا همان پخت مرحله B در مورد آن انجام شود.

توضیح اینکه پخت B، به معنی قرار گیری آمیزه در شرایطی است که یک پخت جزئی در آن اتفاق می‌افتد و جریان‌یابی آن کنترل می‌شود. در این تحقیق دمای آن 90 °C انتخاب شد و زمان پخت B، طوری انتخاب شد که آمیزه‌های حاوی مقادیر متفاوت از PVB دارای جریان‌یابی ثابت 10% بودند. سپس تمامی نمونه‌ها داخل قالب تحت فشار 100 bar و دمای 160 °C قرار گرفت تا کاملاً پخت شود. به منظور مقایسه، نمونه شاهد کامپوزیت شیشه-فنولی، بدون هر گونه افزودنی نیز مورد بررسی قرار گرفت.

3-2- آزمون‌ها

برای تعیین شرایط پخت مرحله B، از پارچه‌های آغشته به رزین، آزمون جریان‌یابی مشابه استاندارد ASTM 3531، به عمل آمد. در این آزمون، دو لایه با ابعاد 50 mm× 50 mm بعد از پخت مرحله B وزن شد و سپس تحت پرس 10 bar در دمای 160 °C به مدت 15 دقیقه قرار گرفت تا به پخت کامل برسد. سپس نمونه از پرس خارج و رزین‌های خروجی از آن جدا شد (شکل 2) و اختلاف وزن ثانویه و اولیه نمونه نسبت به وزن اولیه به عنوان میزان جریان‌یابی گزارش شد. با توجه به تجربیات عملی، جریان‌یابی 10% برای همه لایه‌ها تنظیم شد تا الیاف بر اثر جریان یافتگی رزین، جابه‌جا نشوند و در عین حال رزین هنوز قابلیت جریان‌یابی در قالب را دارا باشد. علاوه بر این بر اساس داده‌های آزمون خمش پدیده تورق در ضخامت‌های بالای 5mm از نمونه‌های کامپوزیتی اتفاق می‌افتد و این ضخامت در جریان‌یابی 10% به دست می‌آید. بنابراین در این تحقیق، مدت زمان پخت مرحله B برای هر آمیزه بر همین اساس تعیین گردید. از تمامی پیش‌آغشته‌ها بعد از پخت مرحله B و قبل از پخت کامل تحت پرس، آزمون جریان‌یابی گرفته شد تا همه‌ی قطعات به لحاظ رفتار جریان یکسان باشند و ضخامت مورد نظر از قطعه نیز به دست آید.

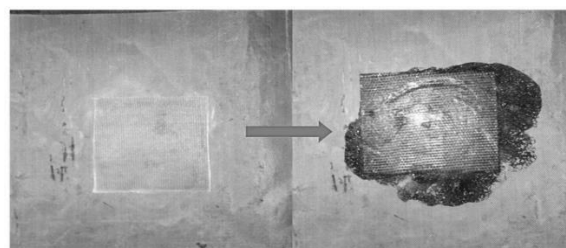


Fig. 2 Prepreg Samples; before and after flow test

شکل 2 مقایسه نمونه پیش آغشته قبل و بعد از آزمون جریان‌یابی

برای مشاهده پدیده تورق و تأثیر حضور PVB بر آن، از آزمون خمش استفاده شد. آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای برای پنج نمونه در هر گروه، و در دما و رطوبت محیط و مطابق استاندارد ASTM D790-10 و ابعاد 100×12/7×5mm انجام گرفت تا شکست به شکل برش در لایه میانی اتفاق بیفتد. برای انجام آزمایش از دستگاه یونیورسال (مدل STM-150

3- نتایج و بحث

3-1- آزمون جریان‌یابی

همانگونه که در بخش تجربی اشاره شد، به منظور تعیین شرایط پخت مرحله B در دمای 90 °C برای همه پیش‌آغشته‌های حاوی PVB و فاقد آن، آزمون جریان‌یابی انجام شد. نتایج آزمون فوق در شکل 3 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزودن PVB به آمیزه رزین فنولی، جریان‌یابی آن محدود می‌شود. این امر ناشی از آن است که PVB یک ماده جامد است که با قرار گرفتن در آمیزه رزینی، ویسکوزیته‌ی آن را افزایش می‌دهد. لذا برای رسیدن به یک جریان‌یابی معین، لازم است هر آمیزه به مدت خاصی تحت دما قرار گیرد تا پخت جزئی متفاوت، در نهایت همه پیش‌آغشته‌ها جریان‌یابی یکسانی داشته باشند. با رسم جریان‌یابی 10% برای همه آمیزه‌ها می‌توان این زمان را بدست آورد. زمان‌های بدست آمده، در شکل 4 با هم مقایسه شده است.

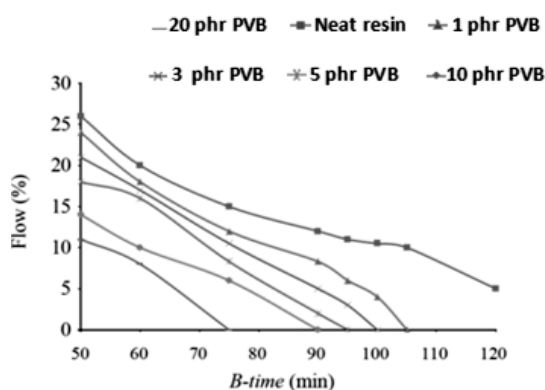


Fig. 3 Resin flow vs. B-time for phenolic-glass prepreps with various PVB contents.

شکل 3 نمودار جریان‌یابی بر حسب زمان پخت B برای الیاف شیشه آغشته به رزین فنولی با مقادیر متفاوت PVB

بر اساس این نتایج، زمان قرارگیری پیش‌آغشته تهیه شده از هر آمیزه تعیین شد. به عنوان نمونه آمیزه‌ی فاقد PVB، حدود 100 دقیقه و آمیزه حاوی 20 phr PVB، حدود 60 دقیقه در دمای 90 °C قرار داده شد تا جریان‌یابی آن 10% باشد.

3-2- آزمون خمش

در مرحله‌ی بعد، نمونه‌های قالبگیری شده از پیش‌آغشته‌ها در شرایط ذکر شده در بخش تجربی، قالب‌گیری شد و تحت آزمون خمش قرار گرفت. نتایج این آزمون در شکل 5 نشان داده شده است.

نمونه حاوی 1 phr، ابتدا دچار ترک طولی کوچکی شده، در نتیجه افت کوتاهی در تنش بروز کرد. سپس این ترک‌ها شروع به رشد کردند و در نهایت شکست اصلی در نمونه اتفاق افتاد. نکته قابل توجه در این نمودار این بود که بعد از شکست، افت سریعی در تنش اتفاق نیفتاد و این به معنی بود که نمونه استحکام خود را تا حدودی حفظ کرده است در صورتی که در کامپوزیت بدون افزودنی بعد از شکست اولیه، تنش افت شدیدی نشان می‌داد و قطعه خاصیت تحمل نیروی خود را از دست می‌داد. این اتفاق در کامپوزیت حاوی 3، 5 و 10 phr نیز مشاهده شد که نمایی از نمونه 3٪ در شکل 6 نشان داده شده است.

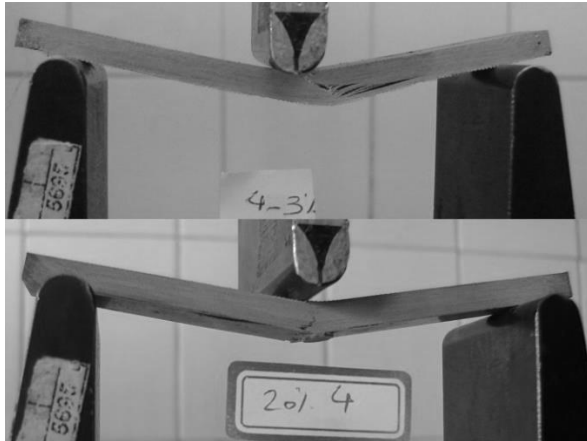


Fig. 6 Delamination and crack path change between layers of composites contained 3% PVB and tensile failure in composites contained 20% PVB.

شکل 6- تورق و تغییر مسیر ترک بین لایه‌ها در کامپوزیت حاوی 3٪ PVB و شکست کششی در کامپوزیت حاوی 20٪ PVB

در آمیزه‌ی حاوی 20phr از PVB هیچگونه تورقی مشاهده نشد و الگوی شکست از تورق، به شکست فشاری در قوس داخلی خمش و کششی در قوس بیرونی تغییر پیدا کرده بود. در واقع با افزودن PVB به آمیزه، تورق سراسری حذف می‌شود و با مکانیزم تغییر مسیر ترک و مسدودسازی مسیر مستقیم آن، شکست در یک مسیر حذف شده، ترک بین لایه‌ها جابجا می‌شود (شکل 6).

علت وجود پیک‌های متعدد بلند در کامپوزیت حاوی 10 phr از PVB وجود شکست‌های اصلی متعدد در این نمونه بود که با عدم امکان رشد در یک لایه، به لایه دیگر منتقل شده و افت نیرو در نمودار ایجاد می‌کرد. پیک‌های متعدد کوچک نیز ناشی از وجود آمدن ترک‌های ریزی است که رشد نمی‌کنند. نکته‌ی جالب دیگر این است که ضمن آنکه استحکام خمشی نمونه‌ها با افزودن PVB کاهش نمی‌یابد (شکل 7)، نیروی پیش‌برنده شکست (میانگین نیروها بعد از افت اولیه تا شکست نهایی) در کرنش 0/05 که بعد از شکست اصلی در نمودار مشاهده می‌شود، در آمیزه حاوی 3phr از PVB افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد (شکل 8). همین موضوع باعث می‌شود چقرمگی آمیزه (سطح زیر نمودار تنش-کرنش) حاوی این مقدار PVB با 58.2٪ افزایش نسبت به نمونه فاقد افزودنی، بیشترین چقرمگی را از خود نشان دهد (شکل 9). چرایی بیشتر این تغییرات را می‌توان از مطالعه‌ی سطح شکست توسط آزمون میکروسکوپ الکترونی دریافت کرد.

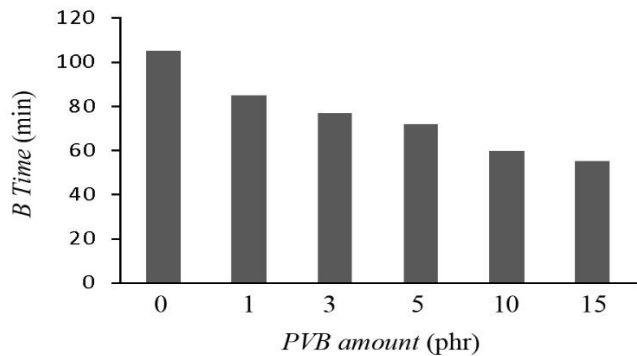


Fig. 4 B-time vs. PVB contents in phenolic-glass prepregs.

شکل 4- نمودار زمان B برای الیاف آغشته به رزین فنولی حاوی مقادیر متفاوت افزودنی پلیمری در جریان یابی 10٪.

همانطور که در شکل 5 مشاهده می‌شود، در نمونه‌ی شاهد، به هنگام خمش، به دلیل تورق سراسری در لایه‌ی میانی نمونه و افتی شدید در نیروی خمشی اتفاق می‌افتد. توضیح اینکه استحکام کششی و فشاری در کامپوزیت‌ها بیشتر از استحکام برشی است [24] و دلیل این امر وجود الیاف بلند در کامپوزیت‌هاست، از آنجایی که در شکست کششی و فشاری الیاف مقاومت می‌کند اما در شکست برشی به علت حرکت لایه‌ها بر روی هم عامل جلوگیری از حرکت لایه‌ها، مقاومت رزین است و به دلیل مقاومت همواره کمتر رزین نسبت به الیاف، استحکام برشی همواره از استحکام کششی و فشاری یک کامپوزیت کمتر است. به همین دلیل طی آزمون خمش می‌توان این مطلب را برداشت کرد که افت ناگهانی که در نمودار مشاهده شد مربوط به شکست برشی است. این موضوع با مشاهدات عینی نمونه‌ها به هنگام شکست مطابقت داشت.

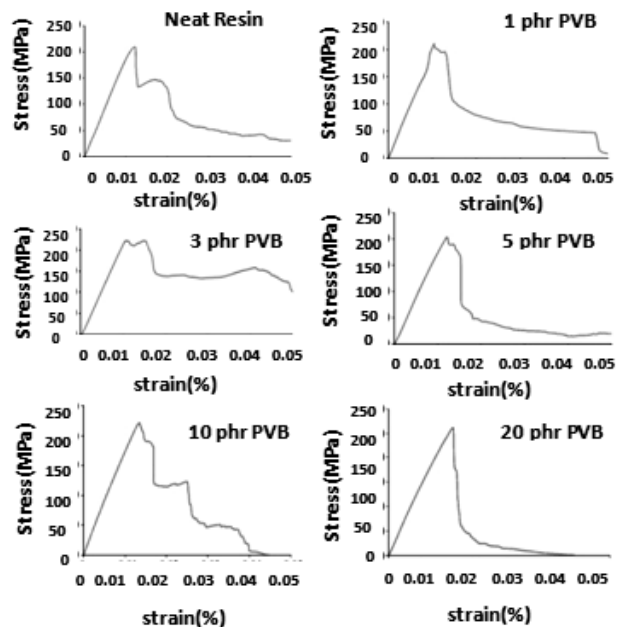


Fig. 5 Flexural stress-strain curves of glass-phenolic composite with various contents of PVB.

شکل 5- نمودار تنش بر حسب کرنش خمش کامپوزیت فنولی/ شیشه بر حسب مقادیر PVB.

ناگهانی تنش پس از شکست اولیه در کامپوزیت باشد. ضمن آنکه با این رفتار، چقرمگی پایینی از قطعه بدست خواهد آمد [25].

شکل 10-b مربوط به رزین فنولیک حاوی 1 phr از PVB است. در رزین خالص تنها حفره‌های کروی شکل حاصل از خروج آب دیده می‌شود، حال آنکه در این نمونه‌ها، حفره‌های مربوط به نواحی شامل PVB که توسط حلال شسته شده بودند نیز مشاهده می‌شود.

تفاوت بارز سطح شکست نمونه‌های حاوی PVB 1 phr، با سطح شکست رزین خالص، در میزان زبری و برجستگی بود. دلیل این پدیده را می‌توان نواحی PVB دانست که در رزین فنولیک پخش شده‌اند. این نواحی، به هنگام رشد ترک‌های ذاتی قطعه یا ایجاد شده از تنش، سر راه آن‌ها قرار می‌گیرند و موجب انحراف مسیر ترک می‌شوند، در مسیر جدید این ترک به ناحیه ذرات PVB بعدی برخورد کرده و دوباره از مسیر خود منحرف می‌شود. به همین دلیل ترک مسیر طولانی‌تری را طی کرده، انرژی بیشتری برای شکست صرف می‌شود.

همانطور که در آزمون خمش هم گفته شد با اضافه کردن درصد‌های مختلف PVB جلوی رشد ترک گرفته شد و تورق سراسری اتفاق نیفتاد. همین امر منجر به افزایش چقرمگی شد. دلیل زبر شدگی سطح شکست هم همین انحرافات دائمی ترک است که مسیر ترک را به شکل زیگزاگ گونه در آورده [25] و ظاهری زبر را به وجود می‌آورد. میزان این زبر شدگی و چقرمگی کامپوزیت به اندازه ذرات PVB و همچنین فاصله آنها وابسته است. لازم به ذکر است که سفیدی‌های مشاهده شده در این شکل در مقایسه با رزین خالص بیشتر شد و علاوه بر اطراف حفره‌ها در سطح نمونه هم دیده شد که این نشان‌دهنده جذب انرژی و تغییر شکل پلاستیک بیشتر در این نمونه در مقایسه با کامپوزیت خالص بود [26] که ناشی از حضور PVB گرمانرم می‌باشد.

سفیدی‌های به وجود آمده شکل 10-c بیشتر از رزین 1 phr از PVB بود، در نتیجه می‌توان گفت تغییر شکل پلاستیک در این کامپوزیت افزایش پیدا کرده است. زبر شدگی نیز در این نمونه، در مقایسه با کامپوزیت 1 phr از PVB افزایش پیدا کرد که این هم به دلیل افزایش درصد PVB و در نتیجه بزرگتر شدن یا افزایش نواحی حاوی PVB در کنار هم بود. در شکل، یک حفره که در اثر خروج PVB به وجود آمده دیده می‌شود که به وضوح بزرگتر شدن آن مشاهده می‌شود. این بزرگتر شدن نواحی ذرات موجب به دام انداختن راحت‌تر ترک‌ها شده است [27] و باعث انحراف بیشتر در مسیر ترک خوردگی شده است و سطح شکست نمونه را زبرتر کرده است و چقرمگی کامپوزیت را افزایش داده است.

از طرفی استحکام نیز در این کامپوزیت افزایش چشم‌گیری داشت. با توجه به تصویر میکروسکوپی، می‌توان گفت با بزرگ شدن نواحی PVB، فضای کمتری برای رشد ترک‌ها در دسترس بوده، به دلیل افزایش چقرمگی زمینه، ترک در تنش بالاتری شروع به رشد می‌نماید و استحکام خمشی افزایش نشان می‌دهد.

شکل 10-d که سطح شکست رزین فنولیک به همراه 5 phr از PVB را نشان می‌دهد در مقایسه با رزین با 3 phr و PVB 1 phr زبری بیشتری نشان می‌دهد که این اتفاق قابل پیش بینی بود. چون با افزایش درصد PVB باز هم تعداد نواحی PVB بیشتر شد و به هم نزدیک‌تر شدند و در اثر انحراف بیشتر ترک، سطح شکست زبرتر شد.

با توجه به این پدیده انتظار می‌رفت که چقرمگی در کامپوزیت 5 phr از کامپوزیت 3 phr بیشتر شود اما این‌گونه نشد. این امر را می‌توان ناشی از

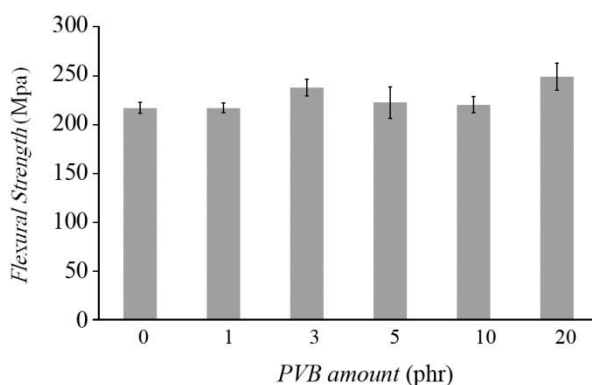


Fig. 7 Flexural strength of glass-phenolic composite with various contents of PVB.

شکل 7- نمودار استحکام خمشی کامپوزیت فنولی/شیشه حاوی مقادیر متفاوت PVB

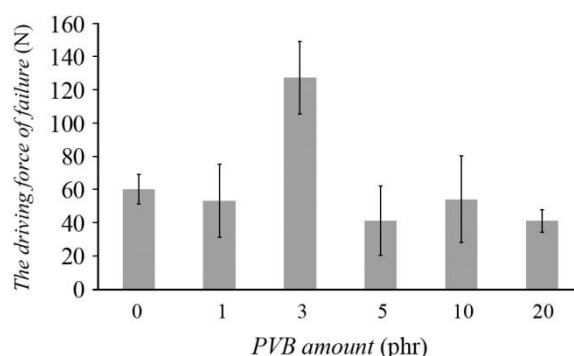


Fig. 8 The diagram of the average driving force of failure for glass-phenolic composite with various contents of PVB.

شکل 8- نمودار متوسط نیروی پیش برنده شکست کامپوزیت فنولی/شیشه حاوی مقادیر متفاوت PVB

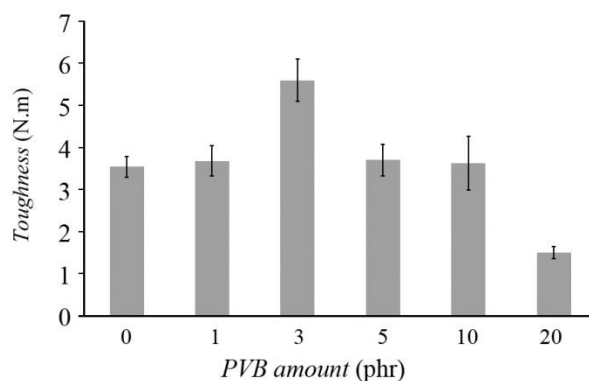


Fig. 9 The average toughness of glass-phenolic composite with various contents of PVB.

شکل 9- نمودار متوسط چقرمگی کامپوزیت فنولی/شیشه حاوی مقادیر متفاوت PVB

در شکل 10 سطح شکست آمیزه‌های حاوی PVB نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در رزین خالص (شکل 10-a) سفید شدگی تنها در اطراف حفره‌ها مشاهده شد و رزین، رفتار شکست ترد از خود نشان داد به همین علت رشد ناگهانی در ترک تا انتها اتفاق افتاد و شکست صاف و آینه‌ای بدون زبری قابل توجهی دیده شد که همین امر می‌تواند دلیل افت

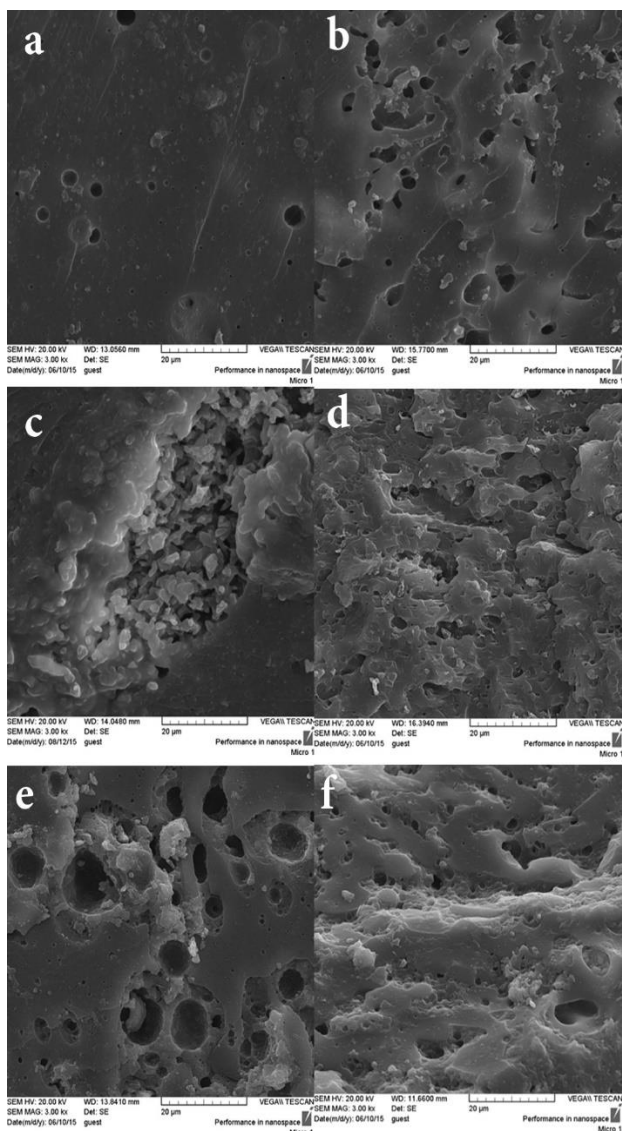


Fig. 9 Image of electron microscope of breakdown cross-section of phenolic resin containing different PVB values with a magnification of 3000 a) phenolic resin without additives b) phenolic resin with 1 phr of PVB c) phenolic resin with 3 phr of PVB d) phenolic resin with 5 phr of PVB e) phenolic resin with 10 phr of PVB f) phenolic resin with 20 phr of PVB

شکل 10- تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع شکست رزین فنولی حاوی مقادیر متفاوت PVB با بزرگ نمایی 3000 (a) رزین فنولی بدون افزودنی (b) رزین فنولی با 1 phr از PVB (c) رزین فنولی با 3 phr از PVB (d) رزین فنولی با 5 phr از PVB (e) رزین فنولی با 10 phr از PVB (f) رزین فنولی با 20 phr از PVB

5- مراجع

- [1] Benzerga D., Haddi A. and Lavie A., "Delamination Model Using Damage Mechanics Applied to New Composite for Orthopaedic Use" International Journal of Materials Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 103-113, 2014.
- [2] Sridharan, S., "Delamination Behaviour of Composites" First ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp. 737-739, 2008.
- [3] Najafloo B., Rezadoust A.M. and Latifi M., "Effect of Through-the-Thickness Areal Density and Yarn Fineness on the Mechanical Performance of Three-Dimensional Carbon-Phenolic Composites" Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 35 No. 20, pp. 1447-1459, 2016.
- [4] Shiino M. Y., Pelosi T. S., Hilarío Cioffi M. O., and M. Donadon V., "The Role of Stitch Yarn on the Delamination Resistance in Non-crimp Fabric: Chemical and Physical Interpretation" Journal

کاهش استحکام رزین در اثر نقایص ناشی از نزدیکتر شدن نواحی PVB دانست. همانگونه که در شکل دیده می‌شود، فاز PVB که به دلیل شستشو با اتانول، بصورت حفره دیده می‌شود، بطور گسترده‌ای در زمینه فنولیکی پخش شده است و امکان ایجاد نقایص فراوانی را موجب شده است. با این شرایط اگرچه زبری سطح افزایش یافته اما به دلیل کاهش نیروی لازم برای گسترش ترک، سطح زیر نمودار منحنی تنش-کرنش کوچک‌تر شده، انرژی شکست کاهش یافته است.

شکل 10-e که سطح شکست رزین فنولیک حاوی 10phr، PVB را نشان می‌دهد، دارای سفید شدگی بیشتری در مقایسه با نمونه‌های قبلی است، از طرفی سطح شکست به خاطر افزایش PVB و دلایلی که قبلاً ذکر شد زبرتر شده است. تعداد حفره‌های ایجاد شده در این تصویر در مقایسه با تصویرهای قبلی بیشتر شده و این حفره‌ها بزرگتر شده‌اند که نشان از بزرگ‌تر شدن نواحی ذرات PVB دارد. در این کامپوزیت ذرات حاصل از نواحی PVB خیلی به نزدیک شده‌اند که این امر موجب رشد آسان‌تر ترک شده است، در نتیجه چقرمگی و استحکام در این نمونه هم کمتر از نمونه 3 phr از PVB شد.

در شکل 10-f سطح شکست رزین به همراه 20 phr از PVB نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نواحی PVB به حالت نیمه پیوسته درآمد و حفره‌های حاصل از PVB بیش از حد بزرگ هستند و دیگر توان منحرف کردن مسیر ترک را ندارند و ترک به راحتی می‌تواند در خود این نواحی رشد کند. به همین دلیل در نمودار خمش دیده شد که در این کامپوزیت چقرمگی به شدت کم شد و رفتار شکست نمونه‌ها، علی‌رغم حضور نواحی PVB، شکننده بود. در این شکل سفید شدگی و تغییر شکل پلاستیک نیز از نواحی محدود به حالتی شبه پیوسته در آمد که ایده تاثیر بر شبکه اتصالات عرضی را تقویت می‌کند.

4- نتیجه‌گیری

به دلیل افزایش ویسکوزیته ناشی از حضور افزودنی PVB برای رسیدن به جریان یابی و ضخامت معین، زمان‌های پخت مرحله B متفاوتی، از 60 تا 100 دقیقه، برای آمیزه های حاوی افزودنی پلیمری به دست می‌آید. افزودن PVB در درصدهای مختلف، تورق سرتاسری را متوقف می‌کند و چقرمگی و استحکام خمشی را افزایش می‌دهد. بیشترین مقدار چقرمگی با 58/2٪ افزایش از نمونه حاوی 3 phr از PVB، به دست آمد.

بررسی مورفولوژی شکست نشان می‌دهد که علاوه بر فازهای پخش شده PVB، امتزاج فازی محدودی نیز در مرز مشترک با زمینه اتفاق می‌افتد که سبب وقوع تغییر شکست پلاستیک و نقش آفرینی در چقرمگی می‌شود. با افزودن 20 phr از PVB، مکانیسم شکست از برشی به شکست فشاری-کششی در خمش تغییر یافته و با استحکام 250 MPa، بیشترین میزان استحکام خمشی، حاصل می‌شود. ضمن آن‌که مشاهده شد، حد بهینه‌ای برای چقرمه شدن رزین، برای چقرمه عمل کردن کامپوزیت وجود دارد.

- Composites (CFRPs) Using a Triblock Copolymer” Polymer, Vol. 111, pp. 36-47, 2017.
- [23] Sonnenfeld C., Mendil-Jakani H., Agogué R., Nunez P. and Beauchêne P., “Thermoplastic/Thermoset Multilayer Composites: A Way to Improve the Impact Damage Tolerance of Thermosetting Resin Matrix Composites” Composite Structures, Vol. 171, pp. 298–305, 2017.
- [24] Kelly A., “Concise Encyclopedia of Composite Materials” First Ed, Pergamon Press, Massachusetts, pp. 249-251, 1989.
- [25] Norul Azlin M Z., Senin H B., Kok Sheng C., “Morphology Observation and Physical Properties of Phenolic Resin-Silicate Layered Nanocomposites”, Journal of Nuclear and Related Technologies, Vol. 6, No. 1, Special Edition, 2009.
- [26] Greenhalgh E. S., “Failure Analysis and Fractography of Polymer Composites” Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, Cambridge, pp. 175-209, 2009.
- [27] R. Atrif R., Inam F., “Fractography Analysis of 0.5 wt% Multi-Layer Grapheme/Nanoclay Reinforced Epoxy Nanocomposites” AIMS MATERIALS Science, Vol. 3, No. 3, pp. 1266-1280, 2016.
- [28] Atrif R., Inam F., “Fractography Analysis of 0.5 wt% Multi-Layer Grapheme/Nanoclay Reinforced Epoxy Nanocomposites”, Aims Materials Science, 3(3), 1266-1280, 2016.
- of Materials Engineering and Performance, Vil. 26, No. 3, pp. 978-986, 2017.
- [5] Naderi A., Mazinani S., Ahmadi S. J., Sohrabian M. and Arasteh R., “Modified Thermo-Physical Properties of Phenolic Resin-Carbon Fiber Composite with Nano Zirconium Dioxide” Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 117, No. 1, pp. 393-401, 2014.
- [6] Ávila A. F., Carvalho M. G. R., Van Petten A. M. V., “An Investigation on Graphene-Based Hybrid Nanocomposites Under Shear Loadings” 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Orlando, Florida, 12 - 15 April 2010.
- [7] Liu N., Wang J., Yang J., Han G. and Yan F., “Effects of Nano-Sized and Micro-Sized Carbon Fibers on the Interlaminar Shear Strength and Tribological Properties of High Strength Glass Fabric-Phenolic Laminate in Water Environment” Composites: Part B, Vol. 68, pp. 92–99, 2015.
- [8] Phong N. T., Gabr M. H., Okubo K., Chuong B. and Fujii T., “Enhancement of Mechanical Properties of Carbon Fabric/Epoxy Composites Using Micro/Nano-Sized Bamboo Fibrils” Materials and Design, Vol. 47, pp. 624-632, 2013.
- [9] Beckermann G. W. and Pickering K. L., “Mode I and Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Composite Laminates Interleaved with Electrospun Nanofibre Veils” Composites: Part A, Vol. 72, pp. 11-21, 2015.
- [10] Heijden S., Daelemans L., Meireman T., De Baere I., Rahier H., Paepegem W. V. and De Clerck K., “Interlaminar Toughening of Resin Transfer Molded Laminates by Electrospun Polycaprolactone Structures: Effect of the Interleave Morphology” Composites Science and Technology, Vol. 136, pp. 10-17, 2016.
- [11] Mirzapour A., Pourhasan B. and Eslami Z., “Effect of Nanosilica on Bending Strength and Thermal Stability of Glass Fiber/Phenolic Nanocomposite”, In Persian, Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 29, No. 4, pp. 377-386, 2016.
- [12] Rajabzadeh H., Amiri-Amraie I. and Rezaoust A.M., “Optimization of Tensile Strength of Phenolic-Glass Compound for Compression Molding Process” In Persian, Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 28, No. 1, pp. 19-26, 2015.
- [13] Sela N. and Ishai O., “Interlaminar Fracture Toughness and Toughening of Laminated Composite Materials: a Review” Composites, Vol. 20, pp. 423-435, 1989.
- [14] Woo E. M., “Time-temperature Viscoelastic Behavior of an Interlaminar-Toughened Epoxy Composite” Journal of Applied Polymer Science, Vol. 50, pp. 1683-1692, 1993.
- [15] Woo E. M. and Mao K. L., “Evaluation of Interlaminar-Toughened Poly(Ether Imide)-Modified Epoxy/Carbon Fiber Composites” Polymer Composites, Vol. 17, pp. 799-805, 1996.
- [16] Rajulu A. V., Rao G. B., Devi L. G., Balaji P. J., He J. and Zhang J., “Interlaminar Shear Strength of Polycarbonate-Toughened Epoxy Composites Reinforced with Glass Rovings” Advances in Polymer Technology, Vol. 22, pp. 373–377, 2003.
- [17] Ismail I.N, Ishak Z.A.M., Jaafar M.F., Omar S., Zainal Abidin M.F. and Ahmad Marzuki H.F, “Thermomechanical Properties of Toughened Phenolic Resol Resin” Solid State Science and Technology, Vol. 17, pp. 155-165, 2009.
- [18] Liu N., Wang J., Chen B., Han G., Yan F., “Enhancement on Interlaminar Shear Strength and Tribological Properties in Water of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene/Glass Fabric/Phenolic Laminate Composite by Surface Modification of Fillers” Materials and Design, Vol. 55, pp. 805–811, 2014.
- [19] Ozdemir N. G., Zhang T., Hadavinia H., Aspin I., Scarpa F., “Glass Fibre Reinforced Polymer Composites Toughened with Acrylonitrile Butadiene Nanorubber” Composites Part B: Engineering, Vol. 88, pp. 182-188, 2016.
- [20] Beheshty M.H., Afzali S.K. and Naderi G., “The Compounding of Phenolic Nitrile Blends: II-Effect of Nitrile Elastomer Type”, In Persian, Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 14, No. 5, pp. 317-322, 2001.
- [21] Fotouhi M, Saghafi H, Brugo T, Minak G, Fragassa C, Zucchelli A, Ahmadi M, “Effect of PVDF Nanofibers on the Fracture Behavior of Composite Laminates for High-Speed Woodworking Machines” Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 231, pp. 31-43, 2017.
- [22] Kamar N. T., Drzal L. T., Lee A. and Askeland P., “Nanoscale Toughening of Carbon Fiber Reinforced/Epoxy Polymer

Archive of SID