

## Optimization of Tensile Strength of Phenolic-Glass Compound for Compression Molding Process

Hojjat Rajabzadeh<sup>1</sup>, Iraj Amiri Amraie<sup>1</sup>, and Amir Masood Rezadoust<sup>2\*</sup>

1. Department of Composites, Malek-e Ashtar University of Technology, P.O. Box: 15875-1774, Tehran, Iran

2. Department of Composites, Faculty of Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 5 April 2014, accepted: 13 December 2014

### ABSTRACT

Fiber-reinforced phenolic resins have been widely used in thermal insulation products. Processability and mechanical properties are the two important characteristics of these compounds. In this research, the flow in spiral mold and tensile strength were considered as indicators for processability and mechanical properties, respectively. B-stage curing time, fiber length and silane treatment effects on flow properties and tensile strength were studied. Spiral flow test results showed that B-stage has a significance effect on flow rates optimized at 85°C for 3 h. Under this condition, resin viscosity increased to a suitable level and improved in transferring and dispersing the fibers. Tensile strength was increased by 3.5 h heat treatment and it was dropped beyond the B-stage. Heat treatment beyond this stage weakened the possible attachment of different components together. Silane treatment increased the tensile strength and based on electron microscopy studies there was improved fiber-resin compatibility with better dispersion of the fibers. Although there were improvements observed in fiber dispersion in silane treatment as well as the B-stage curing, but the effect was greater in the latter case, such that treatment by 3.5 h B-stage produced tensile strength by 130% while the silane treatment effect resulted in 30% greater tensile strength. This may imply that for some applications the silane treatment of the fibers is not sufficient and heat treatment could be considered as a substitute. Tensile strength increased with fiber length which was related to the nature of short-fiber composites, while the load transfer improved with longer fibers.

#### Keywords:

molding compound,  
phenolic resin,  
silane modification,  
tensile strength,  
compound flow

(\*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [a.rezadoust@ippi.ac.ir](mailto:a.rezadoust@ippi.ac.ir)

# بهینه‌سازی استحکام کششی آمیزه فنولی - شیشه استفاده شده در فرایند قالب‌گیری فشاری

حجت رجب‌زاده<sup>۱</sup>، ایرج امیری امرایی<sup>۱</sup>، امیر مسعود رضادوست<sup>۲\*</sup>

۱- تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، گروه کامپوزیت، صندوق پستی ۱۷۷۴-۱۵۱۷۵

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، گروه کامپوزیت، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۹۳/۱/۱۶، پذیرش: ۹۳/۹/۲۰

## چکیده

آمیزه‌های قالب‌گیری فنولی، در ساخت عایق‌های گرمایی کاربرد گسترده‌ای دارند. فرایندپذیری و خواص مکانیکی، دو ویژگی مهم این آمیزه‌هاست. در این پژوهش، جریان‌یابی آمیزه در قالب مارپیچ به‌عنوان شاخص فرایندپذیری و استحکام کششی به‌عنوان شاخص خواص مکانیکی مورد توجه قرار گرفت و اثر متغیرهایی مانند پخت مرحله B، طول الیاف و وجود سیلان بر آنها بررسی شد. نتایج آزمون جریان‌یابی نشان داد، پخت مرحله B اثر قابل توجهی بر مقدار جریان آمیزه می‌گذارد و حداقل ۳ h در دمای ۸۵°C برای این کار لازم است. گرمادهی در این مرحله سبب افزایش گراندرویی رزین و کمک به حمل الیاف هنگام فرایند قالب‌گیری و در نتیجه بهبود پخش الیاف می‌شود. استحکام کششی آمیزه‌های قالب‌گیری شده تا زمان ۳/۵ h از پخت مرحله B، استحکام را افزایش می‌دهد. ولی مدت زمان بیشتر استحکام را کاهش می‌دهد. افزایش گرمادهی پس از ۳/۵ h، پخت را تا مرحله‌ای پیش می‌برد که امکان اتصال اجزای آمیزه به یکدیگر تضعیف شود. اصلاح سیلان نیز در هر حالتی سبب افزایش استحکام می‌شود که با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی به افزایش سازگاری رزین و الیاف، کمک به حمل الیاف هنگام فرایند و در نتیجه پخش بهتر الیاف نسبت داده شد. نکته جالب توجه اینکه برخلاف انتظار اولیه، پخت مرحله B اثر بیشتری بر افزایش استحکام کششی داشت. در حالی که سیلان، استحکام کششی را حدود ۳۰٪ تا ۴۰٪ افزایش می‌دهد، پخت مرحله B استحکام را بیش از ۱۳۰٪ زیاد می‌کند. استحکام کششی با ازدیاد طول الیاف نیز افزایش یافت که با توجه به ماهیت الیاف کوتاه و نقش مکانیکی آن، موضوع مورد انتظار بود.

## واژه‌های کلیدی

آمیزه قالب‌گیری،  
رزین فنولی،  
اصلاح سیلانی،  
استحکام کششی،  
جریان‌یابی آمیزه

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:  
[a.rezadoust@ippi.ac.ir](mailto:a.rezadoust@ippi.ac.ir)

## مقدمه

مواد عایق (نارسانا) در راکت‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کنند. در این پرتابه‌ها به دلیل احتراق سوخت، گرمای شدید و کوتاه مدتی ایجاد می‌شود که به همراه جریان جرمی شدید، باعث شکستگی و تخریب قطعه‌های تولید شده از هرگونه آلیاژ فلزی می‌شود. بنابراین ضروری است، از بدنه فلزی راکت‌ها در برابر این شرایط سخت محافظت شود. از مرسوم‌ترین مواد عایق‌های کامپوزیتی، پلیمرهای گرماسخت تقویت شده با الیاف هستند که به دلیل مقاومت گرمایی مناسب و نیز تحمل و کنترل تنش‌های حاصل از انقباض و انبساط ناشی از گرما، برای حفاظت از بدنه موتور و نازل‌ها مناسب‌اند. عملکرد این مواد فراتر از مواد کندسوز بوده و در واقع آنها سد عبور گرما هستند. این مواد با از بین رفتن و فدا شدن خود مانع انتقال گرما به سطح داخلی موتور یا نازل می‌شوند [۱].

از روش‌های مهم شکل‌دهی عایق‌های فداشونده، قالب‌گیری فشاری آمیزه‌های تقویت شده با الیاف کوتاه است. از دیرباز پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف این موضوع انجام شده است. Kamal [۲] گزارش کرد، با ازدیاد زمان پخت، سفتی قطعه فنولی و هم‌زمان جمع‌شدگی آن افزایش می‌یابد. همچنین با ازدیاد دمای قالب‌گیری، استحکام کششی ابتدا افزایش و سپس کاهش نشان می‌دهد. Lee و همکاران [۳] جریان‌پذیری و رئولوژی آمیزه پلی‌استر - الیاف شیشه را بررسی و اثر طول و درصد الیاف و دما را بر گرانروی آمیزه گزارش کردند. Pritchard و Rhoades [۴] اثر رزین را بر خواص مکانیکی آمیزه پلی‌استر - شیشه بررسی و گزارش کردند، افزایش عدد هیدروکسیل مدول کششی را افزایش داد و در استحکام کششی یک حداکثر مشاهده شد. Landi [۵،۶] اثر دما و زمان پخت را بر افزایش مدول و دمای شیشه‌ای شدن آمیزه قالب‌گیری شده فنولی - شیشه گزارش کرد. Kau [۷] آرایش‌یافتگی الیاف کوتاه را در آمیزه قالب‌گیری شیشه‌سازی و مشاهده کرد، با پوشش دهی آمیزه به مقدار ۷۰٪ در مرکز سطح قالب، آرایش‌یافتگی مختصری در الیاف پدید می‌آید. بهشتی و هاشمی [۸] اثر سیلان را بر افزایش استحکام خمشی آمیزه فنولی - شیشه گزارش کردند. McEwen و Newbould [۹] ترکیب اجزای سطحی قطعه قالب‌گیری شده آمیزه پلی‌استر-شیشه را با تغییر دما و فشار قالب‌گیری بررسی و مشاهده کردند، بهترین همگنی در شرایط دما-فشار زیاد حاصل می‌شود.

Haberstroh و همکاران [۱۰] اثر شرایط تزریق را بر خواص استحکامی، تابیدگی و تراکم قطعه قالب‌گیری شده از آمیزه فنولی- شیشه بررسی کردند. Yokoi و Ohta [۱۱] به‌طور چشمی، چگونگی پر شدن قالب تزریق با آمیزه فنولی-شیشه مغناطیسی شده را مشاهده کردند. آنها به کمک نشان‌گذاری مغناطیسی لایه‌ای مرزی با گرانروی زیاد در مجاورت دیواره قالب و لایه رقیق‌تر پس از آن و جریان قالبی

در وسط مشاهده کردند. Qi-Lin و همکاران [۱۲] فرایند قالب‌گیری فشاری آمیزه فنولی-شیشه را شبیه‌سازی و فشار و زمان لازم را برای فرایند پیش‌بینی کردند.

Boylan و Castro [۱۳] با استفاده از الیاف شیشه و کربن، اثر مقدار الیاف و طول آنها را بر خواص مکانیکی و کیفیت سطح آمیزه قالب‌گیری پلی‌استر-شیشه بررسی کردند. نتایج کار آنها نشان داد، آمیزه دارای الیاف شیشه، استحکام بیشتر و مدول و کیفیت سطح کمتری نشان می‌دهد. همچنین، با ازدیاد طول الیاف خواص مکانیکی افزایش می‌یابد و کیفیت سطح، بیشینه‌ای را در طول الیاف ۲۵ mm نشان می‌دهد.

Matsumoto و همکاران [۱۴] پودر زئولیت را در آمیزه قالب‌گیری فنولی استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند، این پرکننده، جریان‌پذیری آمیزه را بیشتر از تالک، کلسیم کربنات و حتی الیاف شیشه، بهبود می‌بخشد و خواص مکانیکی آن پس از آمیزه‌های دارای الیاف شیشه و بیشتر از سایر پرکننده‌ها قرار می‌گیرد. Guo و همکاران [۱۵] با افزودن کامپوزیت‌های بازیافتی از مدارهای چاپی به آمیزه قالب‌گیری فنولی، نوع جدیدی از این مواد تهیه کردند که پایداری گرمایی بیشتری نشان می‌داد. در ضمن، این نوع مواد خواص مکانیکی استاندارد را حفظ کرده بود. Rabinovich و همکاران [۱۶] از آزمون جریان‌یافتگی در قالب ماریچ، به‌عنوان روشی برای ارزیابی فرایندپذیری ترکیب قالب‌گیری پلی‌استر-شیشه استفاده کردند. Natali و همکاران [۱۷] با افزودن نانوسیلیکا به آمیزه قالب‌گیری فنولی - شیشه، پسرقت آن را در آزمون اکسی‌استیلن کاهش دادند. Wang و همکاران [۱۸] نیز با استفاده از نانولوله‌های کربنی خواص مکانیکی و فداشوندگی آمیزه فنولی را بهبود بخشیدند.

هدف از پژوهش حاضر، بهبود خواص مکانیکی آمیزه فنولی- شیشه بدون استفاده از سیلان بوده است. بدین منظور، استحکام کششی آمیزه قالب‌گیری شده به‌عنوان معیاری برای خواص مکانیکی، اندازه‌گیری شده و اثر عملیات پخت مرحله B بر این خاصیت مطالعه شده است. هم‌زمان، جریان‌یافتگی آمیزه در قالب ماریچ به‌عنوان شاخص فرایندپذیری ارزیابی و شاخص‌های نامبرده با اعداد مربوط به آمیزه دارای الیاف سیلانی مقایسه شد.

## تجربی

## مواد

الیاف شیشه بدون آهار استفاده شده در این پژوهش نوع E با نمره



شکل ۲- قالب نمونه‌های کشش و بست و نگهداری آن هنگام کشش.

### روش‌ها

برای سیلانی کردن الیاف بدون آهار [۸،۱۹]، سیلان SiSiB®PC1220 به مقدار ۳/۵٪ وزن الیاف، با محلول ۵٪ آب و ۹۵٪ اتانول مخلوط و چند قطره استیک اسید برای رسیدن به pH روی ۵/۴ تا ۵/۵ به آن اضافه شد. سپس، محلول با افشاندن یا عبور از حمام، روی رشته‌های الیاف اعمال شد. الیاف آغشته به سیلان ۵ min تا ۱۰ min در دمای ۱۱۰°C یا ۲۴ h در هوای آزاد قرار داده شد تا واکنش شیمیایی کامل و ساختار مورد نیاز روی الیاف شیشه تشکیل شود [۱۹].

برای تهیه آمیزه قالب‌گیری، فرمول‌بندی رزین با اختلاط رزین، اتانول، استتاریک اسید و سایر افزودنی‌ها تهیه و سپس رشته‌های الیاف شیشه با این مخلوط آغشته شد. الیاف آغشته شده به مدت ۱ h در گرم‌خانه ۸۵°C خشک و پس از خرد شدن با طول‌های معین، برای قالب‌گیری آماده شدند. در جدول ۱ فرمول‌بندی نمونه‌ها آمده است. از میان عوامل مختلف مؤثر بر استحکام کششی قطعه‌های قالب‌گیری شده، زمان پخت B، طول الیاف و اثر سیلان برای پژوهش حاضر انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمون در دو گروه الیاف سیلانی و غیرسیلانی بررسی شدند.



شکل ۳- قالب مارپیچ برای اندازه‌گیری مقدار جریان یافتگی آمیزه قالب‌گیری.

۲۴۰۰ tex محصول شرکت Hebeiyuniu چین و سیلان مصرفی برای تهیه الیاف سیلانی، نوع آمینی با کد تجاری PC 1220 محصول شرکت SiSiB®Silicones چین بود. برای ساخت آمیزه، رزین فنولی نوع نووالاک با کد تجاری IP 502 از شرکت رزیتان ایران تهیه شد. استتاریک اسید و سایر افزودنی‌های جزئی، به‌طور صنعتی تهیه و استفاده شدند.

### دستگاه‌ها

برای تهیه آمیزه رزین از مخلوط‌کن مکانیکی معمولی استفاده شد. آمیزه حاصل برای آغشته‌سازی رشته‌های الیاف شیشه به روش پیوسته (شکل ۱) به‌کار گرفته شد. قطعه‌های آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM D 651 و با قالب‌گیری فشاری تهیه شدند که تصویر قالب و بست نمونه کشش در شکل ۲ نشان داده شده است. تعیین مقدار جریان‌یافتگی آمیزه در قالب مارپیچی (شکل ۳) انجام شد. در این روش آمیزه قالب‌گیری درون قالب تزریق شده و مقدار پیشرفت آمیزه درون کانال مارپیچی قالب، به‌عنوان معیاری از جریان‌پذیری اندازه‌گیری می‌شود. گفتنی است، اگرچه این آزمون شبیه روش بیان شده در استاندارد ASTM D 3123 است، اما به لحاظ ابعادی بر این استاندارد تطبیق ندارد. آزمون‌های کشش با دستگاه Instron 6025 با ظرفیت ۲۰ kN استفاده شد. شکل‌شناسی سطح شکست نیز با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) مدل Tescan VEGA II بررسی شد.



شکل ۱- دستگاه آغشته‌سازی الیاف شیشه به رزین.

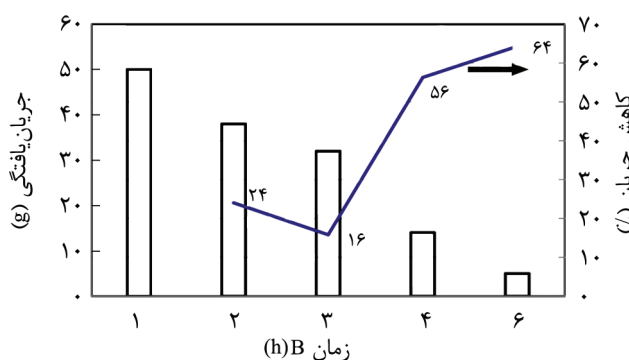
جدول ۱- فرمول‌بندی آمیزه‌های قالب‌گیری تهیه شده.

مقدار (phr)	ماده
۱۰۰	رزین فنولی (نووالاک)
۱۰۰	الیاف کوتاه شیشه
۲	استتاریک اسید

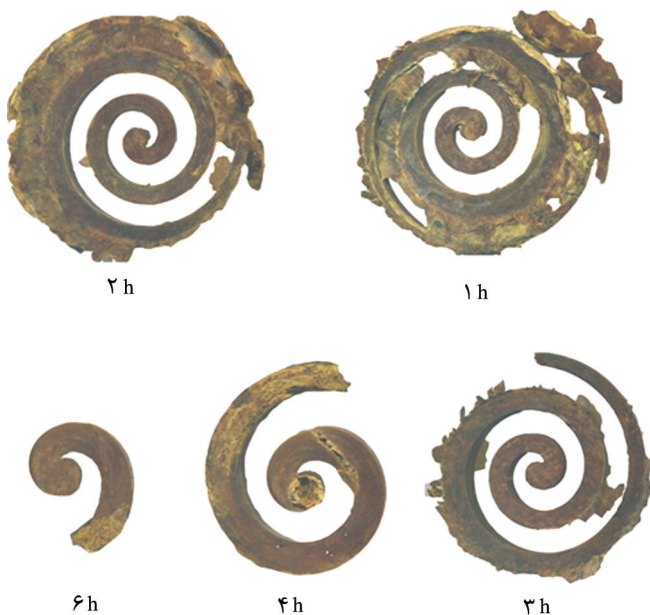
## نتایج و بحث

منحنی DSC رزین نووالاک IP502 [۲۰] حداکثر پخت را در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد و در آن پیک هیچ واکنشی نیز در دماهای کمتر از  $110^{\circ}\text{C}$  مشاهده نمی‌شود. بنابراین، برای انجام واکنش در زمان طولانی و امکان تفکیک اثر زمان بر پخت مرحله B و انجام ایمن آن، دمای  $85^{\circ}\text{C}$  برای پخت مرحله B انتخاب و قالب‌گیری آمیزه نیز در دمای  $160^{\circ}\text{C}$  انجام شد. برای قالب‌گیری خوب آمیزه، جریان‌یافتگی مناسب موضوع حیاتی به‌شمار می‌آید. اگر مقدار جریان‌یافتگی آمیزه کم باشد، مواد نمی‌توانند قالب را به‌خوبی پر کنند تا پس از ذوب به هم متصل شوند و قطعه‌ای یک‌پارچه را تشکیل دهند. همچنین، اگر جریان‌یافتگی مواد زیادتر از حد نیاز باشد، رزین از الیاف خارج شده و ضمن ایجاد ناهمگنی در نسبت الیاف به رزین، سبب ایجاد نقاط کم‌رزین و تضعیف خواص حاصل از آن می‌شود. آزمونی که می‌تواند مقدار جریان‌یافتگی را ارزیابی کند، تعیین مقدار جریان‌یافتگی آمیزه در قالب مارپیچی است که نتیجه آن برحسب طول یا وزن مواد جریان‌یافته گزارش می‌شود. نتایج این آزمون در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان B، جریان‌یافتگی آمیزه کاهش می‌یابد و این کاهش از ۳ h به بعد تشدید می‌شود. پخت مرحله B، هم بخشی از واکنش‌های پخت را انجام می‌دهد. از این‌رو، باقی‌مانده پخت در زمان کوتاه‌تری انجام می‌شود و مقدار



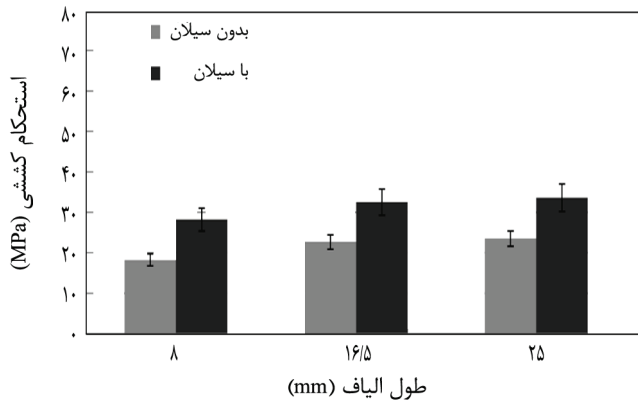
شکل ۴- مقدار جریان‌یافتگی آمیزه‌های با زمان پخت B متفاوت.



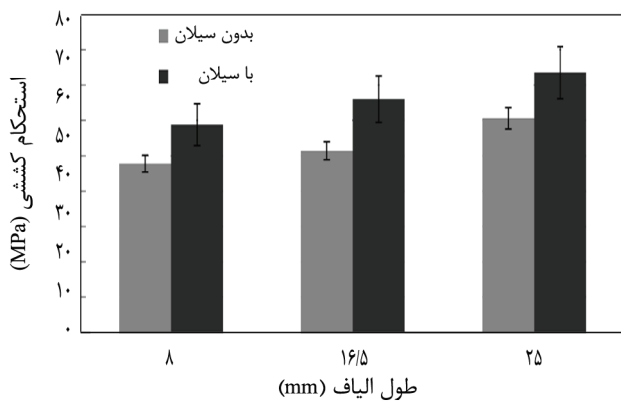
شکل ۵- شکل جریان‌یافتگی آمیزه‌های با زمان پخت B از ۱ h تا ۶ h.

جریان‌یافتگی را کاهش می‌دهد. دلیل دوم، افزایش گرانروی آمیزه با قرارگیری در شرایط پخت مرحله B است که سبب کاهش قابلیت جریان‌یافتگی آمیزه می‌شود. مشاهده شکل جریان نیز نشان می‌دهد، در زمان‌های B برابر با ۱ و ۲ h، گرانروی رزین هنوز کم است و می‌تواند با اعمال فشار از آمیزه شسته شود و از منافذ بیرون بزند. در زمان‌های B برابر با ۳ h این پدیده کاهش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد و افزایش گرانروی رزین قابلیت حمل الیاف را به آن می‌دهد. از طرف دیگر، با افزایش زمان B به ۶ h، مقدار جریان‌یافتگی به‌شدت کم می‌شود و کیفیت قالب‌گیری آمیزه کاهش می‌یابد. بنابراین، از نظر داده‌های جریان‌یافتگی در قالب مارپیچ، زمان B بین ۳ h تا ۴ h در دمای  $85^{\circ}\text{C}$  برای تهیه آمیزه قالب‌گیری مناسب است.

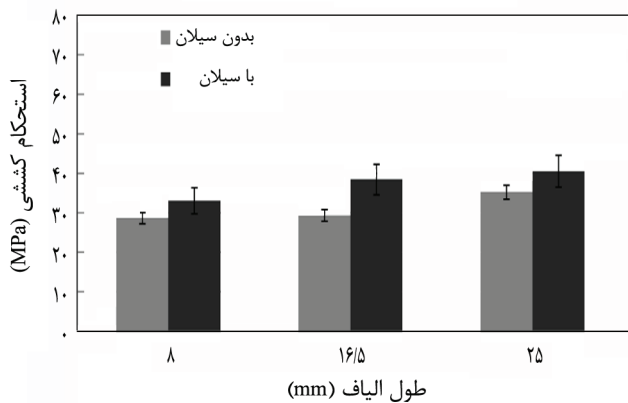
با توجه به هدف بهینه‌سازی خواص استحکامی و لزوم کاهش تعداد آزمون‌ها، نرم‌افزار طراحی آزمون، زمان‌های B استفاده شده برای بهینه‌سازی با سایر متغیرها را ۱، ۳/۵ و ۶ h معین کرد. نتایج آزمون کشش آمیزه‌های با طول الیاف مختلف و اثر پخت B بر آن، در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پخت مرحله B اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر استحکام کششی دارد. پخت مرحله B باعث می‌شود تا گرانروی رزین افزایش یابد و هنگام فرایند قالب‌گیری، الیاف را با خود حمل کند و پخش خوبی در کل قطعه حاصل شود. همگنی پخش الیاف در قطعه سبب افزایش استحکام آن می‌شود. تفاوت پخش الیاف در آمیزه‌های پخت B، ۱ و ۳/۵ h تأییدکننده همگنی پخش الیاف بوده که در شکل ۷ نشان داده شده است.



(الف)



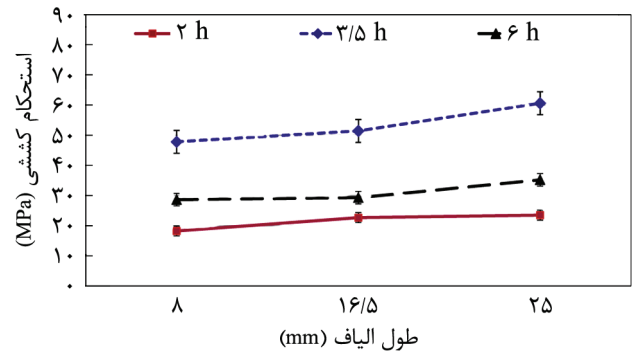
(ب)



(ج)

شکل ۸- اثر سیلان بر استحکام کششی آمیزه دارای الیاف با طول مختلف و زمان پخت B متفاوت: (الف) ۱ h، (ب) ۳/۵ h و (ج) ۶ h.

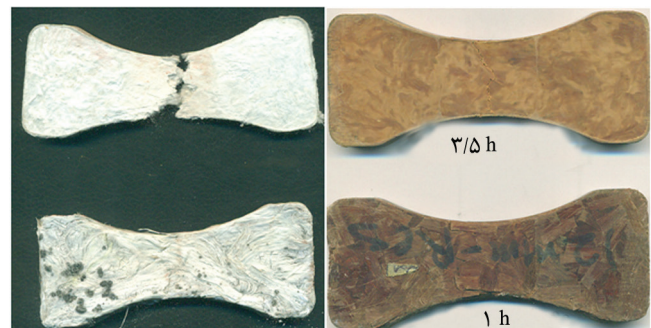
آمیزه‌های با طول الیاف ۱۶/۵ mm، در حالی که سیلان استحکام کششی را حدود ۳۰٪ تا ۴۰٪ افزایش می‌داد، پخت مرحله B استحکام را بیش از ۱۳۰٪ ارتقا داده است.



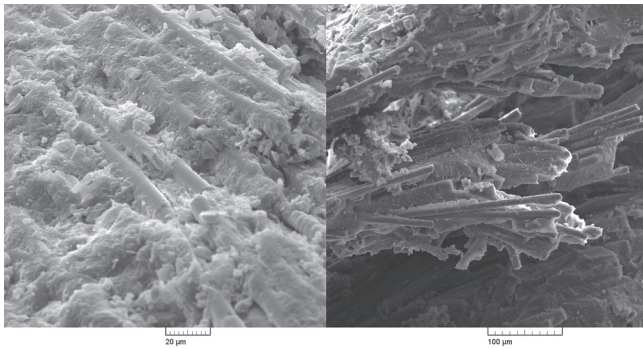
شکل ۶- اثر زمان پخت B بر استحکام کششی آمیزه‌های با طول الیاف مختلف.

همگنی و پخش الیاف به لحاظ مکانیکی، عملکرد تقویت‌کنندگی الیاف را در قطعه ارتقا می‌بخشد، ضمن اینکه به دلیل عدم وقوع شسته‌شدن الیاف هنگام فشردگی و عدم تشکیل نقطه ضعف در قطعه، استحکام کششی آن افزایش می‌یابد. این تفسیر با مشاهده دسته‌های پخش نشده الیاف در آمیزه‌های زمان پخت B برابر با ۱ h، قابل‌صحیح‌گذاری است.

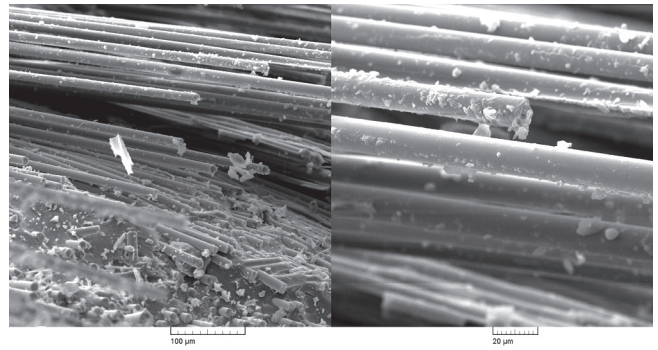
اثر سیلانی‌کردن الیاف بر استحکام کششی آمیزه‌های قالب‌گیری شده، در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیلانی‌کردن الیاف، در هر شرایطی از طول الیاف و زمان پخت B، سبب افزایش استحکام کششی قطعه می‌شود. این افزایش را می‌توان به دو دلیل نسبت داد. دلیل اول، افزایش سازگاری رزین و الیاف [۸] است که انتقال تنش را در قطعه بهبود می‌بخشد. این موضوع در تصاویر SEM سطح شکست (شکل ۹) مشهود است. دلیل دوم، بهبود سازگاری رزین و الیاف با وجود سیلان و کمک آن در حمل الیاف به وسیله رزین هنگام قالب‌گیری و بهبود پخش الیاف است که مانند پخت مرحله B سبب تقویت خواص مکانیکی می‌شود. افزایش فاصله بین رشته‌ها در حالت سیلانی، دلیلی بر وقوع این پدیده است. نکته جالب توجه دیگر اینکه پخت مرحله B، اثر بسیار مشهودتری بر افزایش خواص استحکامی نشان داده است. به‌عنوان نمونه، در



شکل ۷- اثر زمان پخت B بر پخش الیاف و همگنی آمیزه.



(ب)



(الف)

شکل ۹- اثر سیلان بر بهبود چسبندگی الیاف و رزین: (الف) الیاف بدون سیلان و (ب) الیاف سیلانی.

## نتیجه‌گیری

الیاف را بهبود می‌بخشد. همین موضوع سبب افزایش استحکام کششی آمیزه می‌شود. افزایش زمان پخت B تا h ۶، جریان‌پذیری آمیزه و نیز استحکام کششی آن را کاهش می‌دهد. سیلانی کردن الیاف نیز ضمن بهبود چسبندگی الیاف و رزین، به پخش بهتر الیاف نیز کمک کرده، استحکام را افزایش می‌دهد. افزایش طول الیاف نیز سبب افزایش استحکام می‌شود که موضوعی قابل‌انتظار است.

جریان‌پذیری و استحکام کششی آمیزه‌های قالب‌گیری فنولی، به‌عنوان دو شاخص برای فرایندپذیری و خواص مکانیکی این مواد بررسی شد. پخت مرحله B با افزایش گرانشی رزین سبب کاهش جریان‌پذیری آمیزه شده و در عین حال خروج رزین از الیاف را کاهش می‌دهد و با حمل الیاف به وسیله رزین غلیظ شده، پخش

## مراجع

- Oyumi Y., Ablation Characteristics of Silicon Insulation, *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, **36**, 233-239, 1998.
- Kamal M.R., Thermoset Characterization for Moldability Analysis, *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 231-239, 1974.
- Lee L.J., Marker L.F., and Griffith R.M., The Rheology and Mold Flow of Polyester Sheet Molding Compound, *Polym. Compos.*, **2**, 209-218, 1981.
- Pritchard G. and Rhoades G.V., The Resin Matrix: Its Influence on Sheet Molding Compound Mechanical Properties, *Polym. Compos.*, **2**, 179-184, 1981.
- Landi V.R. and Mersereau J.M., The Glass Transition in Novolac Phenolic Molding Compounds and the Kinetics of Its Development during Cure and Postcure. I, *Adv. Polym. Technol.*, **7**, 49-57, 1987.
- Landi V.R., Corporation R., and Connecticut R., The Glass Transition in Novolac Phenolic Molding Compounds and the Kinetics of Its Development during Cure and Postcure. II, *Adv. Polym. Technol.*, **7**, 209-218, 1987.
- Kau H.T., Determination of the Orientation of Short Glass Fibers in Sheet Molding Compound (SMC), *Polym. Compos.*, **8**, 82-93, 1987.
- Hashemi S.A. and Beheshty M.H., Silane Coupling Agents Effects on Reinforced Phenolic Molding Compounds, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **7**, 105-112, 1994.
- McEwen D.J. and Newbould J., The Effects of Molding Conditions on the Surface Composition of Sheet Molding Compound, *Polym. Compos.*, **12**, 315-319, 1991.
- Haberstroh E., Berthold J., and Jüntgen T., Injection-Compression Molding of Glass-Fiber Filled Phenolic Molding Compounds, *Adv. Eng. Mater.*, **2**, 752-756, 2000.
- Ohta T. and Yokoi H., Visual Analysis of Cavity Filling and Packing Process in Injection Molding of Thermoset Phenolic Resin by the Gate-Magnetization Method, *Polym. Eng. Sci.*, **41**, 806-819, 2001.
- Qi-lin M., Shi-lin Y., and Zhi-Xiong H., Numerical Simulation of Phenolic Sheet Molding Compound in Compression

- Molding, *J. Wuhan. Univ. Technol.*, **18**, 79-81, 2003.
13. Boylan S. and Castro J.M., Effect of Reinforcement Type and Length on Physical Properties, Surface Quality, and Cycle Time for Sheet Molding Compound (SMC) Compression Molded Parts, *J. Appl. Polym. Sci.*, **90**, 2557-2571, 2003.
  14. Matsumoto A., Ohtsuka K., Kimura H., Adachi S., and Takenaka M., Moldability and Properties of Phenolic/Artificial Zeolite Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **106**, 3666-3673, 2007.
  15. Guo J., Rao Q., and Xu Z., Application of Glass-Nonmetals of Waste Printed Circuit Boards to Produce Phenolic Moulding Compound, *J. Hazard. Mater.*, **153**, 728-734, 2008.
  16. Rabinovich M., Olsavsky K.L., Leach B., Cabrera-Rios M., and Castro J.M., Sheet Molding Compound Characterization Using Spiral Flow, *J. Appl. Polym. Sci.*, **109**, 2465-2471, 2008.
  17. Natali M., Monti M., Kenny J.M., and Torre L., A Nanostructured Ablative Bulk Molding Compound: Development and Characterization, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **42**, 1197-1204, 2011.
  18. Wang Z.J., Kwon D.J., Gu G.Y., Lee W., Park J.K., DeVries K.L., and Park J.M., Ablative and Mechanical Evaluation of CNT/Phenolic Composites by Thermal and Microstructural Analyses, *Compos. Part B-Eng.*, **60**, 597-602, 2014.
  19. Bagheri M., Atai M., Nekoomanesh M., and Amani S., Studying the Effect of Silane Coupling Agent and Amount of Filler on the Physical and Mechanical Properties of Dental Composites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **11**, 187-195, 1998.
  20. Naseri I., Kazemi A., Bahramian A.R., and Razzaghi-Kashani M., Polymerization of Phenol Formaldehyde in Solvent-Saturated Vapor and Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Novolac Aerogel Product, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **26**, 427-435, 2014.