

# Evaluation of Methods for Improving the Resin Wettability of Fibers in Prepreg Manufacturing Process

Hamid Reza Khalafi and Mehrzad Mortezaei\*

Polymer Group, Faculty of Materials and Manufacturing Processes,  
Malek-e-Ashtar University of Technology, P.O. Box:15875-1774, Tehran, Iran

Received: 16 October 2016, Accepted: 6 December 2016

## Abstract

Prepreg is a pre-engineered laminating material manufactured by impregnating a fiber-reinforcement with a resin. Wetting of fibers by the resin is one of the key parameters in prepreg manufacturing process, because of its contribution on the mechanical properties of the prepreg. It is worth mentioning that there are two main mechanisms for increasing the wetting of the fibers by the resin; the first one is through the formation of chemical bonds between the resin and fibers, and the second one is increasing the ability of resin to penetrate through the fibers and make mechanical entanglement between the resin and fibers. Various methods exist to achieve both these mechanisms, such as, surface modification of fibers, changing the resin formulation, increasing the contact time between resin and fibers, and reducing the viscosity of the resin. In this paper, advantages and disadvantages of the above-mentioned methods are evaluated. In general, it can be said that increasing the wetting of fibers by the resin alone cannot be considered as a target in prepreg manufacturing process, because in order to improve the wetting of the fibers by the resin, there should be changes made in other conditions of the produced prepreg such as mechanical properties, final price, production time, etc.. Therefore, finding the optimal values for the parameters like wetting of the fibers by the resin is essential.

## Key Words

composite,  
prepreg,  
fibers,  
wetting,  
contact angle

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: mhrmorteza@gmail.com

# ارزیابی روش‌های بهبود ترشوندگی الیاف با رزین در فرایند ساخت پیش‌آغشته

حمیدرضا خلفی، مهرزاد مرتضایی\*

تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع مواد و فرایندهای ساخت، گروه پلیمر،

صندوق پستی ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

دریافت: ۱۳۹۵/۷/۲۶، پذیرش: ۱۳۹۵/۹/۱۶

پیش‌آغشته ماده پیش‌مهندسی شده‌ای است که از آغشته‌سازی الیاف تقویت‌کننده با رزین ساخته می‌شود. ترشوندگی الیاف با رزین از پارامترهای کلیدی در فرایند ساخت پیش‌آغشته به‌شمار می‌رود، زیرا بر خواص مکانیکی پیش‌آغشته اثرگذار است. دو سازوکار اصلی برای افزایش ترشوندگی الیاف با رزین وجود دارد: تشکیل پیوند شیمیایی میان الیاف و رزین و دیگری، افزایش نفوذپذیری رزین و ایجاد گره‌خوردگی‌های مکانیکی میان رزین و الیاف. بر این اساس، برای دستیابی به هر یک از این دو سازوکار روش‌های گوناگونی مانند اصلاح سطح الیاف تقویت‌کننده، تغییر یا اصلاح فرمول‌بندی رزین مصرفی، افزایش زمان تماس بین رزین و الیاف در حمام آغشته‌سازی و همچنین کاهش گرانش رزین وجود دارد. در این مقاله، معایب و مزایای روش‌های یاد شده ارزیابی شده است. به‌طور کلی می‌توان گفت، ترشوندگی الیاف با رزین به تنهایی نمی‌تواند به عنوان هدف اصلی در فرایند ساخت پیش‌آغشته مطرح شود. زیرا بر اساس روش انتخابی برای افزایش ترشوندگی الیاف با رزین، امکان تغییر در سایر مشخصه‌های محصول پیش‌آغشته تولیدی مانند خواص مکانیکی، قیمت تمام شده، مدت زمان تولید و غیره وجود دارد. بنابراین، یافتن مقادیر بهینه برای متغیرهایی مانند ترشوندگی الیاف با رزین ضروری است.

بسپارش

فصلنامه علمی-ترویجی

سال هفتم، شماره ۲،

صفحه ۳۸-۳۰، ۱۳۹۶

ISSN: 2252-0449

## چکیده



حمیدرضا خلفی



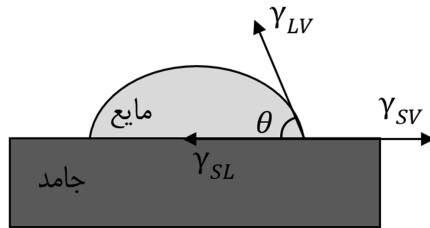
مهرزاد مرتضایی

## واژگان کلیدی

کامپوزیت،  
پیش‌آغشته،  
الیاف،  
ترشوندگی،  
زاویه تماس

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

mhrmorteza@gmail.com



شکل ۲- رفتار ترشوندگی مایع روی سطح صاف [۸].

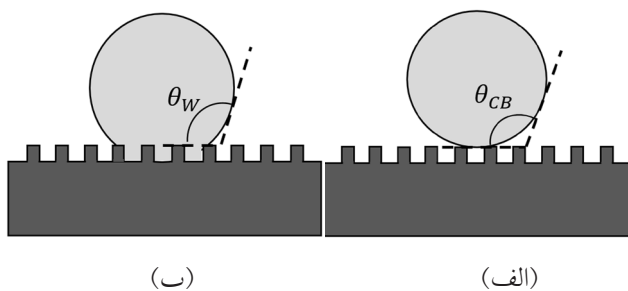
### ترشوندگی

ترشوندگی عبارت از مقدار پخش شدن یک مایع (رزین) روی یک سطح جامد (الیاف) است. در شکل ۲ رفتار ترشوندگی مایع روی سطح صاف نشان داده شده است. به طور معمول، مقدار ترشوندگی با اندازه‌گیری زاویه تماس ( $\theta$ ) میان قطره مایع و سطح جامد کمی می‌شود. معادله یانگ برای توصیف زاویه تماس به شکل زیر است [۷۸]:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

در این معادله،  $\gamma_{SL}$  و  $\gamma_{SV}$  به ترتیب انرژی آزاد سطح‌های جامد و مایع و  $\gamma_{LV}$  انرژی آزاد سطح مشترک جامد و مایع است. در سطوح جامدی مانند پارچه بافته‌شده از الیاف، سطح جامد کاملاً صاف نبوده و دارای پستی و بلندی است. دو نظریه نحوه قرارگیری مایع روی سطوح ناهموار وجود دارد: مدل Cassie-Baxter و مدل Wenzel [۹]. در شکل ۳ نحوه قرارگیری قطره مایع در هر یک از این دو مدل نشان داده شده است.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار سطح جامد در تماس با مایع در مدل Wenzel بیشتر است. این موضوع معادله‌های ریاضی حاکم بر این دو مدل را نیز تغییر می‌دهد. بر این اساس، زاویه تماس میان سطح جامد و قطره مایع  $\theta_{CB}$  و  $\theta_W$  در مدل‌های Wenzel و Cassie-Baxter به شکل زیر تعریف

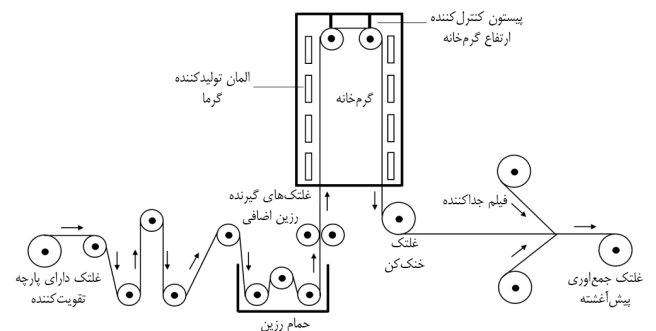


شکل ۳- مدل‌های قرارگیری قطره مایع روی سطح ناهموار: (الف) مدل Cassie-Baxter و (ب) مدل Wenzel [۹].

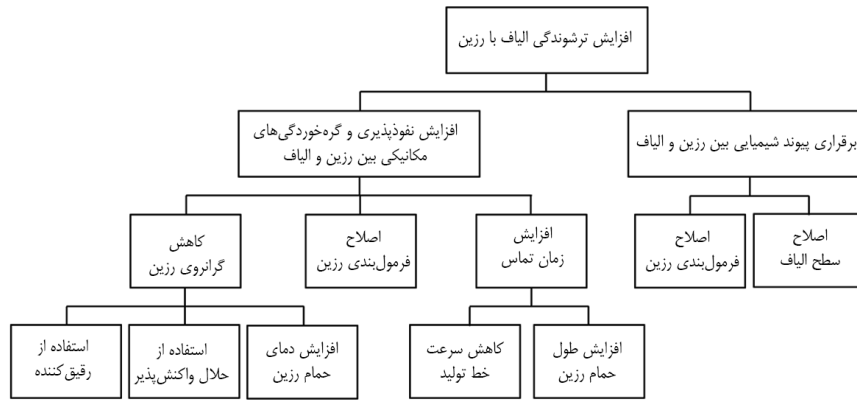
پیش‌آغشته محصول واسطه شامل الیاف تقویت‌کننده و رزین پلیمری است که به طور جزئی پخت شده باشد. پیش‌آغشته‌ها آماده شکل‌گیری و تبدیل به محصول کامپوزیتی هستند. بیشترین کاربرد پیش‌آغشته‌ها در ساخت محفظه و نازل موشک، توربین بادی، بدنه قطار و هواپیما، چوب اسکی، قایق بادی و مواد پایه برای تولید صفحات مدار چاپی است. امکان کنترل و دستیابی به خواص فیزیکی و مکانیکی بهینه و یکنواخت، از مزیت‌های مهم استفاده از پیش‌آغشته‌هاست [۱-۳].

از روش‌های متداول برای تولید پیش‌آغشته، غوطه‌وری الیاف در محلول یا مذاب رزین است (شکل ۱). در این روش، ابتدا الیاف برای آغشته‌سازی به درون حمام رزین هدایت می‌شوند. سپس، با استفاده از دو غلتک رزین اضافی آن‌ها گرفته می‌شود تا مقدار رزین به درصد معینی برسد. در ادامه، با عبور الیاف آغشته‌شده از درون ستون گرمایی، پخت جزئی انجام می‌پذیرد. پس از خروج پیش‌آغشته از ستون گرمایی و کاهش دمای آن با غلتک خنک‌کن، دو لایه فیلم جداکننده برای جلوگیری از چسبیدن الیاف به یکدیگر، در دو سمت پیش‌آغشته قرار می‌گیرند. در پایان نیز پیش‌آغشته روی غلتک جمع‌آوری و در شرایط دمایی خاصی انبار می‌شود [۴-۶].

فرایند تولید پیش‌آغشته متغیرهای گوناگونی دارد که هر کدام می‌توانند بر کیفیت پیش‌آغشته تولیدی اثرگذار باشند. یکی از این متغیرها، مقدار و چگونگی ترشوندگی الیاف با رزین است که بر مقدار حفره و فضای خالی در ساختار پیش‌آغشته و در پی آن خواص مکانیکی کامپوزیت تولیدی اثرگذار است. با توجه به مطالعات انجام شده، تاکنون پژوهشی در ارتباط با نقش پدیده ترشوندگی در فرایند ساخت پیش‌آغشته انجام نشده است. از این رو، در مقاله حاضر، روش‌های افزایش ترشوندگی الیاف با رزین در فرایند ساخت پیش‌آغشته با روش غوطه‌وری معرفی و امکان‌سنجی می‌شود.



شکل ۱- فرایند ساخت پیش‌آغشته با روش غوطه‌وری [۵].



شکل ۴- طرح کلی روش های افزایش ترشوندگی الیاف با رزین در فرایند ساخت پیش آغشته.

می شود [۹]:

$$(\theta) \downarrow \rightarrow (\cos \theta) \uparrow \xrightarrow{(1)} (\frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}}) \uparrow \rightarrow \begin{matrix} \gamma_{SV} \uparrow \\ \gamma_{LV} \downarrow \end{matrix} \quad (4)$$

#### اصلاح سطح الیاف

برای اصلاح سطح الیاف به منظور افزایش ترشوندگی آن ها با رزین، روش های رایج مختلفی از جمله پلاسما [۱۱-۱۳]، اکسایش الکتروشیمیایی [۱۴، ۱۵]، شیمیایی مرطوب [۱۶، ۱۷] و اصلاح گرمایی [۱۸-۲۱] وجود دارد. به طور کلی، استفاده از روش های اصلاح سطح الیاف به صرف هزینه و انرژی زیاد نیاز دارد. همچنین، احتمال آسیب به خواص مکانیکی الیاف نیز وجود دارد. در ادامه نمونه ای از این روش ها که تا حدودی ارزان تر است، شرح داده می شود.

از موارد مصرف الیاف کربن، ساخت قطعات کامپوزیتی با کاربردهای خاص مانند قطعات هواپیماست. بنابراین، الیاف کربن استفاده شده باید ترکیبی از خواص گرمایی، مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی را دارا باشند. از سوی دیگر، سطح الیاف کربن غیرقطبی است و این مسئله با کاهش ترشوندگی آن ها با رزین، تضعیف خواص مکانیکی کامپوزیت را به دنبال دارد. از طرفی، آکرلیک اسید مونومر وینیلی دارای گروه قطبی است که پیوندزدن آن به بسیاری از پلیمرها رایج است. اگر گروه عاملی کربوکسیل روی سطح الیاف کربن بنشینند، قطبش سطح الیاف کربن و به دنبال آن ترشوندگی الیاف کربن با رزین اپوکسی افزایش می یابد. برای نشان دادن گروه عاملی کربوکسیل موجود در آکرلیک اسید بر سطح الیاف کربن، ابتدا باید سطح این الیاف با پرتو گاما تابش دهی شود [۲۲]. در شکل ۵ مراحل اصلاح سطح الیاف کربن با پیوندزنی آکرلیک اسید و همچنین واکنش سطح الیاف کربن اصلاح شده با رزین اپوکسی در مجاورت عامل پخت انیدریدی آمده است.

$$\cos \theta_w = r_s \cos \theta \quad (2)$$

$$\cos \theta_{CB} = r_s f_s \cos \theta + f_s - 1 \quad (3)$$

که  $r_s$  نسبت زبری سطح و  $f_s$  کسری از نواحی برجسته سطح جامد است که با مایع تر شده است. اما آنچه در اینجا بیشتر اهمیت دارد، به دام افتادن هوا در پستی و بلندی موجود در مدل Cassie-Baxter است [۱۰]. در ادامه، با توجه به تعاریف اولیه ارائه شده درباره ترشوندگی به بررسی روش های افزایش ترشوندگی الیاف با رزین در فرایند ساخت پیش آغشته پرداخته می شود.

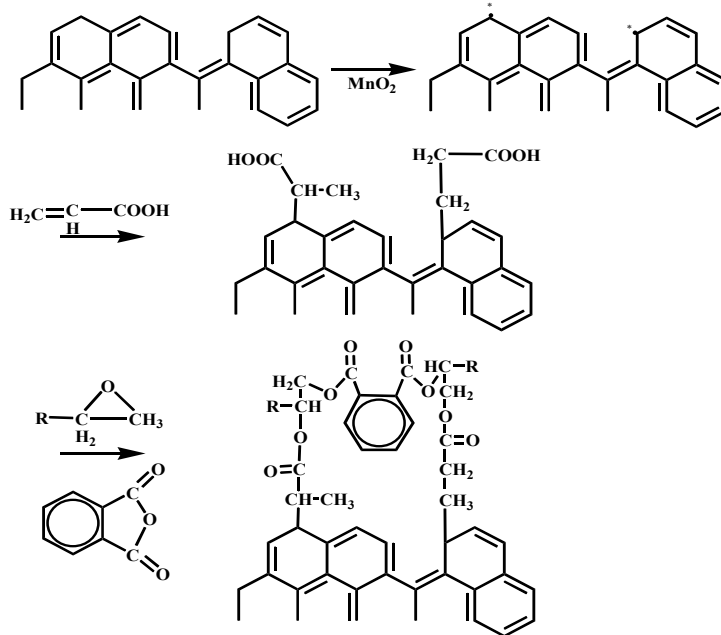
#### روش های افزایش ترشوندگی الیاف با رزین

به طور کلی، برای افزایش ترشوندگی الیاف با رزین و به عبارت دیگر کاهش زاویه تماس، دو سازوکار اصلی وجود دارد:

- ۱- برقراری پیوند شیمیایی بین رزین و الیاف و
- ۲- افزایش قابلیت نفوذ رزین و گره خوردگی های مکانیکی بین رزین و الیاف.

برای بهره مندی از هر یک از این دو سازوکار روش های مختلفی وجود دارد که در شکل ۴ طرح کلی آن ها ارائه شده است.

برای افزایش ترشوندگی با سازوکار برقراری پیوند شیمیایی بین رزین و الیاف، دو روش اصلاح سطح الیاف و فرمول بندی رزین وجود دارد. اصلاح سطح الیاف باید به افزایش انرژی آزاد سطح آن ها و اصلاح فرمول بندی رزین باید به کاهش انرژی آزاد سطح رزین منتهی شود که روند این موضوع در معادله (۴) اثبات شده است:



شکل ۵- واکنش شیمیایی میان الیاف کربن اصلاح شده با آکرلیک اسید و رزین اپوکسی [۲۲].

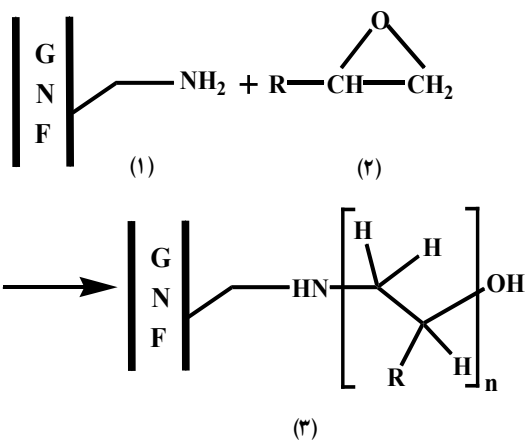
نانوالیاف گرافیت فعال، رفتار ترشوندگی رزین اپوکسی خالص و اصلاح شده با نانوالیاف گرافیت فعال بر الیاف شیشه در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزودن نانوالیاف گرافیت فعال به رزین اپوکسی باعث کاهش زاویه تماس میان رزین اپوکسی و الیاف شیشه می‌شود.

دو فرضیه در ارتباط با این کاهش زاویه تماس وجود دارد:

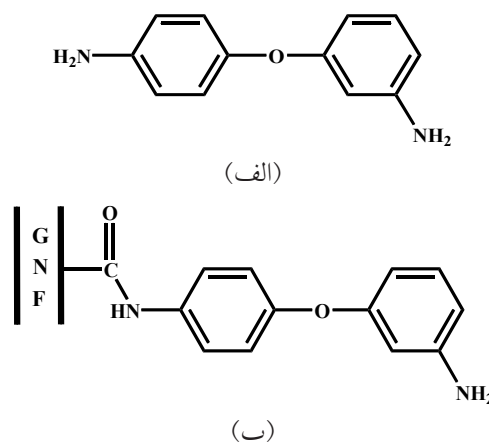
۱- ساختار نانوالیاف گرافیت فعال دارای گروه‌های فعال هیدروکسیل بوده که می‌توانند باعث اتصال شیمیایی رزین و الیاف به یکدیگر شوند.

#### اصلاح فرمول بندی رزین

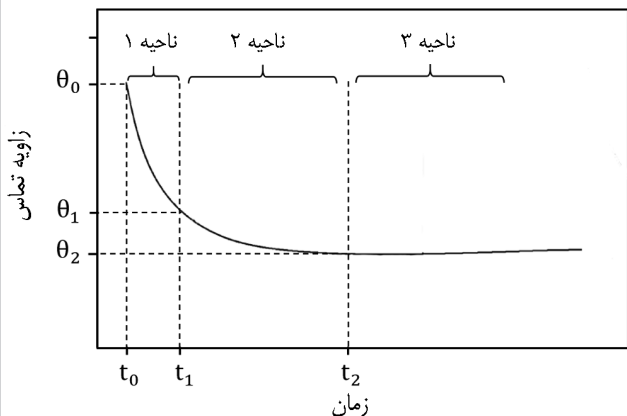
برای اصلاح فرمول بندی رزین به منظور افزایش ترشوندگی الیاف با رزین، روش‌های متفاوتی وجود دارد که هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و نیازمند دانش کافی هستند. از جمله این روش‌ها استفاده از الیاف گرافیت فعال در مقیاس نانو در ترکیب رزین اپوکسی است [۲۳]. برای این کار، ابتدا نانوالیاف گرافیت با ۴،۳-اکسی دی‌آنیلین اصلاح می‌شود. سپس با مونومر اپوکسی واکنش می‌دهد و به الیاف فعال تبدیل می‌شود. ساختار ۴،۳-اکسی دی‌آنیلین و نانوالیاف گرافیت اصلاح شده با آن در شکل ۶ و واکنش تشکیل نانوالیاف گرافیت فعال در شکل ۷ نشان داده شده است. به‌منظور بررسی اثر افزودن



شکل ۷- واکنش تشکیل نانوالیاف گرافیت فعال: (۱) نانو الیاف گرافیت اصلاح شده، (۲) مونومر اپوکسی و (۳) نانوالیاف گرافیت فعال [۲۴].



شکل ۶- (الف) ساختار شیمیایی ۴،۳-اکسی دی‌آنیلین و (ب) نانوالیاف گرافیت اصلاح شده با ۴،۳-اکسی دی‌آنیلین [۲۴].



شکل ۹- طرح کلی منحنی زاویه تماس بر حسب زمان [۲۵].

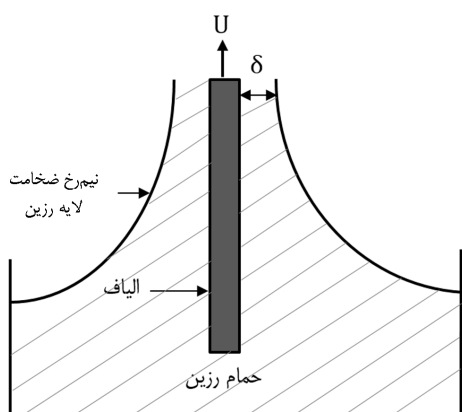
با عنوان سرعت پخش شدن قطره (v) تعریف می شود (معادله ۵):

$$v = \left\{ \frac{d\theta}{dt} \right\}_{t=0} = \left\{ \frac{df(t)}{dt} \right\}_{t=0} \quad (5)$$

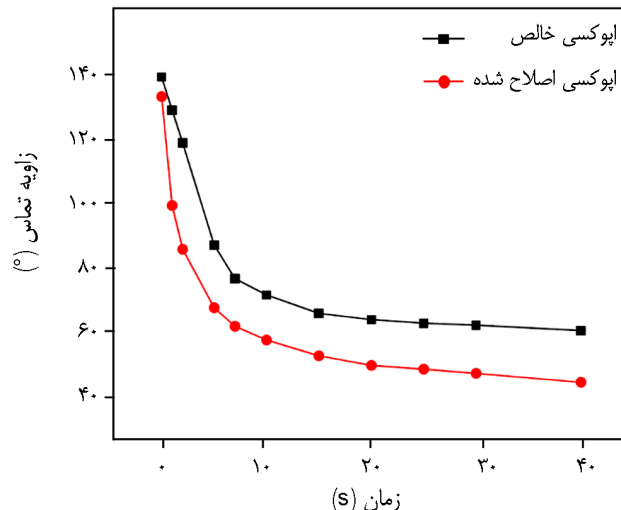
در معادله (۵) زاویه تماس ( $\theta$ ) تابعی از زمان (t) است. در برخی موارد که زمان لازم برای رسیدن به ناحیه ۳ وجود ندارد، انتخاب رزین با سرعت پخش شدن زیاد اهمیت ویژه ای پیدا می کند. به طور کلی، دو راه برای افزایش زمان تماس الیاف با رزین در فرایند ساخت پیش آغشته وجود دارد:

- کاهش سرعت خط تولید پیش آغشته و
- افزایش طول حمام رزین.

اگر فرایند خروج الیاف از داخل حمام آغشته سازی مشابه فرایند پوشش دهی آزاد در نظر گرفته شود (شکل ۱۰)، آنگاه کاهش سرعت خط تولید پیش آغشته باعث کاهش ضخامت لایه رزین تشکیل شده و در نتیجه کاهش مقدار رزین پیش آغشته می شود. افزون بر این موضوع، کاهش سرعت خط تولید پیش آغشته، زمان



شکل ۱۰- طرح کلی فرایند پوشش دهی آزاد [۲۶].



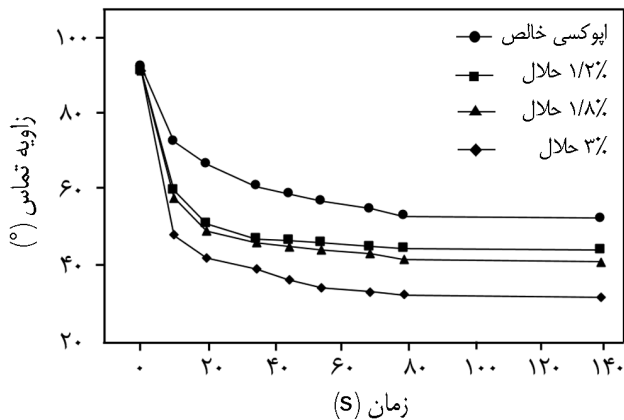
شکل ۸- رفتار ترشوندگی رزین اپوکسی خالص و اصلاح شده با نانوالیاف گرافیت فعال روی سطح الیاف شیشه [۹].

۲- از ویژگی های نانوالیاف، دارا بودن نسبت طول به قطر زیاد و در نتیجه سطح تماس زیاد آنهاست که می تواند سبب ایجاد گره خوردگی ها و درگیری های مکانیکی بین الیاف و رزین شود [۹]. از این رو، اصلاح فرمول بندی رزین می تواند به عنوان روشی برای هر دو سازوکار افزایش ترشوندگی الیاف با رزین (برقراری پیوند شیمیایی بین رزین و الیاف یا افزایش قابلیت نفوذ و گره خوردگی های مکانیکی بین رزین و الیاف) مطرح شود. همچنین، علت دیگر استفاده از نانوالیاف گرافیت فعال در فرمول بندی رزین اپوکسی، وجود هوای به دام افتاده در لایه بافت الیاف در اثر استفاده از رزین اپوکسی خالص و پیروی از مدل Cassie-Baxter است. در حالی که در رزین اپوکسی اصلاح شده این فضای خالی وجود ندارد [۹].

### افزایش زمان تماس الیاف با رزین

روش دیگر برای افزایش ترشوندگی الیاف با رزین، افزایش زمان تماس بین الیاف با رزین است. این روش برخلاف روش های اصلاح الیاف و فرمول بندی رزین، با تنظیم متغیرهای دستگاه پیش آغشته ساز امکان پذیر می شود. در شکل ۹ طرح کلی منحنی زاویه تماس بر حسب زمان نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، سه ناحیه در منحنی زاویه تماس بر حسب زمان مشخص شده است. در ناحیه اول، زاویه تماس با شیب تند در حال کاهش است. در ناحیه دوم از شیب کاهش زاویه تماس کاسته می شود و به طور معمول بین یک تا دو دقیقه زمان لازم است که رزین در ناحیه ۳ با زاویه تماس ثابت قرار گیرد [۲۵].

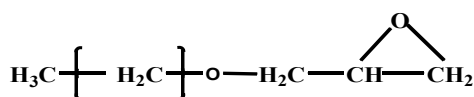
در ناحیه اول، شیب شروع منحنی (شیب منحنی در زمان  $t_0$ )



شکل ۱۲- اثر درصد حلال فعال بر زاویه تماس میان رزین اپوکسی و الیاف پلی اتیلن [۲۴].

روش دوم، استفاده از حلال غیرفعال (رقیق‌کننده) در حمام آغشته‌سازی است. این مواد در واکنش بین رزین و سخت‌کننده وارد نمی‌شوند. به عنوان مثال، برای رزین اپوکسی حلال‌های رایج غیرفعال عبارت از زایلن، تولوئن، الکل‌ها، کتون‌ها و غیره هستند [۳۰]. حلال غیرفعال معمولاً در درصد‌های زیاد (به عنوان مثال ۵۰٪ حجم رزین) به کار گرفته می‌شود. همچنین، حلال غیرفعال باید از ساختار پیش‌آغشته خارج شود که معمولاً با تبخیر آن در حین عبور پیش‌آغشته از گرم‌خانه انجام می‌پذیرد. اما این کار می‌تواند باعث بروز مشکلات زیست‌محیطی شود. در عین حال، خروج حلال غیرفعال به‌طور کامل انجام نمی‌شود که این موضوع تضعیف خواص مکانیکی و گرمایی پیش‌آغشته را به دنبال دارد. از نظر اقتصادی نیز استفاده از حلال غیرفعال توصیه نمی‌شود، زیرا هزینه‌هایی از قبیل خرید حلال، طراحی و ساخت مسیر مناسب برای خروج بخارهای آن و در صورت لزوم تامین تجهیزات ایمنی فردی ویژه را به تولید کننده تحمیل می‌کند.

روش دیگر، استفاده از حلال فعال است [۳۱]. حلال فعال قابلیت واکنش با رزین یا سخت‌کننده را دارد و با کاهش گرانیوی باعث افزایش ترشوندگی الیاف با رزین می‌شود. در شکل ۱۲ اثر افزودن حلال فعال n-بوتیل گلیسیدیل اتر بر زاویه تماس میان رزین اپوکسی و الیاف پلی اتیلن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش درصد حلال فعال کاهش زاویه تماس میان رزین اپوکسی و الیاف پلی اتیلن را به دنبال دارد. در ساختار شیمیایی n-بوتیل گلیسیدیل اتر (شکل ۱۳) وجود



شکل ۱۳- ساختار شیمیایی n-بوتیل گلیسیدیل اتر [۳۲].

لازم را برای تولید هر متر پیش‌آغشته افزایش و بهره‌وری اقتصادی را کاهش می‌دهد. بنابراین، پیشنهاد افزایش طول حمام می‌تواند بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

در فرایند پوشش‌دهی آزاد، الیاف به شکل صفحه مسطح با سرعت  $U_L$  از داخل حمام رزین خارج شده و ضخامت رزین پوشش‌یافته روی الیاف، طبق مدل لاند-لویچ به شکل زیر قابل محاسبه است [۲۸-۲۶]:

$$\delta_m = 0.94 \frac{(\mu U_L)^{\frac{2}{3}}}{(\rho_m g)^{\frac{1}{2}} (\gamma)^{\frac{1}{6}}} \quad (6)$$

که در این معادله،  $\mu$  گرانیوی رزین،  $\rho_m$  چگالی رزین،  $g$  شتاب گرانش زمین،  $\gamma$  کشش سطحی رزین و  $\delta_m$  ضخامت فیلم رزین پوشش‌یافته است.

### کاهش گرانیوی رزین

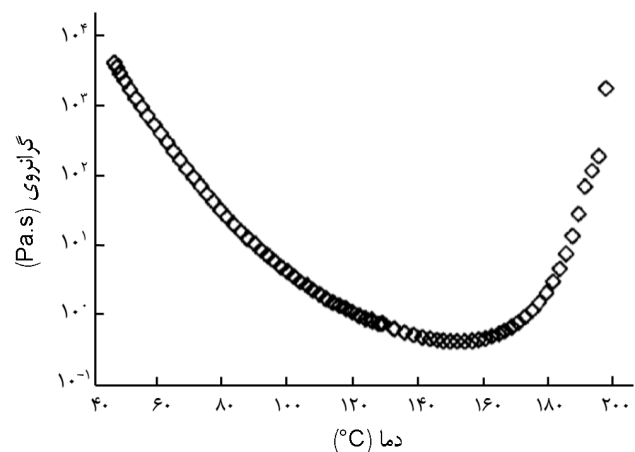
برای افزایش ترشوندگی الیاف با رزین با روش کاهش گرانیوی رزین سه راهکار وجود دارد:

۱- تغییر دمای حمام آغشته‌سازی،

۲- استفاده از حلال غیرفعال (رقیق‌کننده) و

۳- استفاده از حلال فعال.

در شکل ۱۱ تغییرات گرانیوی رزین اپوکسی بر حسب دما نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انتخاب دمای مناسب برای حمام آغشته‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این نمودار دمای  $60^\circ\text{C}$  تا  $80^\circ\text{C}$  برای رزین اپوکسی مناسب است. باید به این نکته توجه داشت، در نظر گرفتن دمای زیاد برای حمام آغشته‌سازی نیازمند صرف انرژی و به تبع آن هزینه است و در عین حال کنترل گرانیوی را دشوار می‌سازد.



شکل ۱۱- تغییرات گرانیوی رزین اپوکسی با دما [۲۹].

برای قرارگیری یک مایع بر سطح جامد، به بررسی روش‌های افزایش ترشوندگی الیاف با رزین در فرایند ساخت پیش‌آغشته پرداخته شد. با توجه به مطالب بیان شده، افزایش ترشوندگی الیاف با رزین به‌تنهایی نمی‌تواند به عنوان هدف در فرایند ساخت پیش‌آغشته مطرح شود. زیرا با توجه به روش انتخابی برای این کار، امکان تغییر سایر مشخصه‌های محصول پیش‌آغشته مانند خواص مکانیکی، مدت زمان لازم برای تولید و قیمت وجود دارد. اصلاح سطح الیاف و فرمول‌بندی رزین معمولاً نیازمند صرف زمان و هزینه و داشتن دانش کافی است. کاهش سرعت خط تولید پیش‌آغشته به منظور افزایش زمان تماس الیاف با رزین نیز علاوه بر افزایش زمان تولید، کاهش مقدار رزین پیش‌آغشته را به دنبال دارد. شاید افزایش طول حمام رزین گزینه بهتری برای افزایش زمان تماس الیاف با رزین باشد. افزودن حلال علاوه بر تضعیف خواص مکانیکی، هزینه‌های خرید و نگهداری را به دنبال دارد، به همین دلیل، افزایش دمای حمام آغشته‌سازی به منظور کاهش گرانیوی پیشنهاد بهتری است. در عین حال، کاهش بیش از حد گرانیوی باعث شره کردن رزین در مرحله خروج از حمام می‌شود که این خود مطلوب نیست. بنابراین، یافتن مقدار بهینه برای هر یک از پارامترهای زاویه تماس بین الیاف و رزین، گرانیوی رزین، سرعت خط تولید پیش‌آغشته، طول حمام رزین و دمای آن و سایر موارد می‌تواند موضوع مناسبی برای مطالعات آتی در این عرصه باشد.

گروه‌های اپوکسید، قابلیت واکنش با رزین یا سخت‌کننده را به این حلال می‌دهد. از ایزوپروپیل گلیسیدیل اتر و فنیل گلیسیدیل اتر نیز به عنوان حلال فعال برای رزین اپوکسی استفاده می‌شود. تعداد گروه‌هایی که قابلیت شرکت در واکنش با رزین یا سخت‌کننده را دارند و همچنین اندازه و نوع باقی‌مانده ساختار حلال فعال بر خواص رزین و در نتیجه پیش‌آغشته موثر است [۳۰]. در حالت استفاده از حلال فعال به خروج آن از ساختار پیش‌آغشته نیازی نیست. همچنین، این نوع حلال افت کمتری در خواص مکانیکی ایجاد می‌کند. اما مواردی مانند هزینه خرید و نگهداری و همچنین دانش استفاده، به عنوان موانع این روش به قوت خود باقی است. در پایان توجه به این نکته ضروری به نظر می‌رسد که مطابق معادله ارائه شده برای فرایند پوشش‌دهی آزاد (معادله ۶)، با کاهش گرانیوی رزین، ضخامت لایه رزین پوشش‌یافته روی سطح الیاف و در نتیجه مقدار رزین پیش‌آغشته کاهش می‌یابد. به عبارت بهتر، کاهش بیش از حد گرانیوی موجب شره کردن رزین در مرحله خروج عمودی الیاف از حمام آغشته‌سازی می‌شود. بنابراین، باید با در نظر گرفتن نقش هریک از پارامترهای موثر بر گرانیوی و مقدار رزین پیش‌آغشته، حد مطلوبی را برای آن‌ها تعیین کرد.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، ضمن تشریح پدیده ترشوندگی و مدل‌های موجود

## مراجع

- Beheshty M.H. and Heidary A.R., Science and Technology of Prepregs, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **4**, 34-47, 1991.
- Mazumdar S.K., *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, CRC, USA, 58-59, 2000.
- Vafayan M., Beheshty M.H., Ghoreishy M.H.R., and Abedini H., Advanced Integral Isoconversional Analysis for Evaluating and Predicting the Kinetic Parameters of the Curing Reaction of Epoxy Prepreg, *Thermochim. Acta*, **557**, 37-43, 2013.
- Shaghghi S., Beheshty M.H., and Rahimi H., Preparation and Rheological Characterization of Phenolic/Glass Prepregs, *Iran. Polym. J.*, **20**, 969-977, 2011.
- Lengsfeld H., Wolff-Fabris F., Krämer J., Lacalle J., and Altstädt V., *Composite Technology*, Carl Hanser Verlag, München, 36-38, 2015.
- Liu J., Hwang D.G., and Chen J.C., Development of a Theoretical Model for a Solvent-Type Prepreg Manufacturing Process, *Compos. Sci. Technol.*, **51**, 359-366, 1994.
- Bonn D., Eggers J., Indekeu J., Meunier J., and Rolley E., Wetting and Spreading, *Rev. Mod. Phys.*, **81**, 740-805, 2009.
- Zhong W.H., Sui G., Jana S., and Miller J., Cosmic Radiation Shielding Tests for UHMWPE Fiber/Nano-Epoxy Composites, *Compos. Sci. Technol.*, **69**, 2093-2097, 2009.
- Fu Y., Maguire R., Liu H., and Zhong W.H., Special Wetting Behavior of a Graphitic Nanofiber-Modified Epoxy Generalized for Rough Textured Fabric Surfaces, *Colloid. Polym. Sci.*,



- 289, 141-148, 2011.
10. Patel N.K., Micro Scale Flow Behavior, Fiber Wetting and Void Formation in Liquid Composite Molding, PhD Thesis, Ohio State University, 1994.
  11. Montes-Moran M.A., Martinez-Alonso A., and Tascon J.M., Effects of Plasma Oxidation on The Surface and Interfacial Properties of Ultra-High Modulus Carbon Fibres, *Composites Part A*, **32**, 361-366, 2001.
  12. Boudou J.P., Paredes J.I., Cuesta A., and Martinez-Alonso A., Oxygen Plasma Modification of Pitch-Based Isotropic Carbon Fibres, *Carbon*, **41**, 41-48, 2003.
  13. Ren Y., Wang C., and Qiu Y., Influence of Aramid Fiber Moisture Regain During Atmospheric Plasma Treatment on Aging of Treatment Effects on Surface Wettability and Bonding Strength To Epoxy, *Appl. Surf. Sci.*, **253**, 9283-9289, 2007.
  14. Fukunaga A. and Ueda S., Anodic Surface Oxidation for Pitchbased Carbon Fibers and The Interfacial Bond Strengths in Epoxy Matrices, *Compos. Sci. Technol.*, **60**, 249-259, 2000.
  15. Cao H., Huang Y., Zhang Z., and Sun J., Uniform Modification of Carbon Fibers Surface in 3-D Fabrics Using Intermittent Electrochemical Treatment, *Compos. Sci. Technol.*, **65**, 1655-1667, 2005.
  16. Severini F., Formaro L., Pegoraro M., and Posca L., Chemical Modification of Carbon Fiber Surfaces, *Carbon*, **40**, 735-743, 2002.
  17. Xu Z., Huang Y., Zhang C., and Chen G., Influence of Rare Earth Treatment on Interfacial Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites, *Mater. Sci. Eng., A*, **444**, 170-177, 2007.
  18. Pamula E. and Rouxhet P.G., Bulk and Surface Chemical Functionalities of Type III PAN-Based Carbon Fibres, *Carbon*, **41**, 1905-1913, 2003.
  19. Wang S., Chen Z.H., Ma W.J., and Ma Q.S., Influence of Heat Treatment on Physical Chemical Properties of PAN-Based Carbon Fiber, *Ceram. Int.*, **32**, 291-299, 2006.
  20. Lee W.H., Lee J.G., and Reucroft P.J., XPS Study of Carbon Fiber Surfaces Treated by Thermal Oxidation in a Gas Mixture of O<sub>2</sub>/(O<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>), *Appl. Surf. Sci.*, **171**, 136-143, 2001.
  21. Dai Z., Zhang B., Shi F., Li M., Zhang Z., and Gu Y., Effect of Heat Treatment on Carbon Fiber Surface Properties and Fibers/Epoxy Interfacial Adhesion, *Appl. Surf. Sci.*, **257**, 8457-8461, 2011.
  22. Xu Z., Chen L., Huang Y., Li J., Wu X., Li X., and Jiao Y., Wettability of Carbon Fibers Modified by Acrylic Acid and Interface Properties of Carbon Fiber/Epoxy, *Eur. Polym. J.*, **44**, 494-503, 2008.
  23. Fu Y., Liu H., and Zhong W.H., Wetting Characteristics of Epoxy Resins Modified by Graphitic Nanofibers with Different Functional Groups, *Colloids Surf., A*, **369**, 196-202, 2010.
  24. Neema S., Salehi-Khojin A., Zhamu A., Zhong W.H., Jana S., and Gan Y.X., Wettability of Nano-Epoxy to UHMWPE Fibers, *J. Colloid Interface Sci.*, **299**, 332-341, 2006.
  25. Hameed N., Thomas S.P., Abraham R., and Thomas S., Morphology and Contact Angle Studies of Poly(Styrene-Co-Acrylonitrile) Modified Epoxy Resin Blends and Their Glass Fibre Reinforced Composites, *Express Polym. Lett.*, **1**, 345-355, 2007.
  26. Jing C., Zhao X., and Tao H., An Approach to Predict the Solid Film Thickness Possibly Yielded from an Alumina Sol-Gel Liquid Film, *Surf. Coat. Technol.*, **201**, 2655-2661, 2006.
  27. Krechetnikov R. and Homsy G.M., Experimental Study of Substrate Roughness and Surfactant Effects on the Landau-Levich Law, *Phys. Fluids*, **17**, 102108-1-102108-16, 2005.
  28. Catauro M., Papale F., and Bollino F., Characterization and Biological Properties of TiO<sub>2</sub>/PCL Hybrid Layers Prepared Via Sol-Gel Dip Coating for Surface Modification of Titanium Implants, *J. Noncryst. Solids*, **415**, 9-15, 2015.
  29. Hayes B.S. and Seferis J.C., The Effect of Fabric Tension and the Number of Impregnation Rollers on Woven Fabric Prepreg Quality and Cured Laminates, *Composites*, **28**, 791-799, 1997.
  30. Augustsson C., *Epoxy Handbook*, Nils Malmgrem AB, Sweden, 11-12, 2004.
  31. Ma S., Liu X., Fan L., Jiang Y., Cao L., Tang Z., and Zhu J., Synthesis and Properties of a Bio-based Epoxy Resin with High Epoxy Value and Low Viscosity, *ChemSusChem*, **7**, 555-562, 2014.
  32. <http://www.sigmaldrich.com>.