

## Relationship Between the Process Parameters and Resin Content of a Glass/Epoxy Prepreg Produced by Dipping Method

Hamid Reza Khalafi, Mehrzad Mortezaei\*, and Iraj Amiri Amraei

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

Received: 10 April 2014, accepted: 20 September 2014

### ABSTRACT

The properties of prepregs are characterized in terms of their volatile content, resin content, the degree of pre-cure, void content, tack and flow ability. Resin content is one of the most important properties of prepregs so that its changing will result in altered properties such as, tack and resin flow. In order to monitor the resin content, a quantitative relation to the processing parameters such as line speed, viscosity and distance between the resin up taking rollers have to be determined. In this study, a tri-axial E-glass fabric with the areal weight of 1025 g/m<sup>2</sup> and an epoxy resin (Epon 828) were used to produce the prepreg by the dipping method. In the theoretical part of this work, the free coating is studied and as a result the thickness layer of the coating resin through the resin bath is calculated by Landau-Levich model. In continuation, the achieved thickness was considered as a feed for the calendaring process. Using the momentum equation for the passing impregnated fibres through the extra resin uptake rollers, the relation between the internal resin layer thickness and final coating resin layer thickness was achieved in an integral equation form. In order to solve this integral equation, MAPLE software was applied. The theoretical results were in good agreement with the experimental data and showed that the resin content increased linearly with increasing the distance between rollers, the radius and roller angular velocity. In contrast, the resin content decreased with increasing the line speed. According to our calculations, the effect of the resin viscosity variation on the resin content was negligibly small.

#### Keywords:

prepreg,  
resin content,  
calendaring,  
free coating,  
numerical solution  
technique

(\*)To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: [mhormorteza@gmail.com](mailto:mhormorteza@gmail.com)

## ارتباط پارامترهای فرایندی و مقدار رزین در پیش‌آغشته‌های اپوکسی - شیشه تولید شده به روش غوطه‌وری

حمیدرضا خلفی، مهرزاد مرتضایی\*، ایرج امیری امرایی

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

صندوق پستی ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

دریافت: ۹۳/۱/۲۱، پذیرش: ۹۳/۶/۲۹

### چکیده

خواص پیش‌آغشته‌ها با پارامترهایی همچون مقدار مواد فرار، مقدار رزین، درجه پیش‌پخت، مقدار حفره یا فضای خالی، چسبناکی و جریان‌پذیری ارزیابی می‌شود. کسر وزنی رزین از مهم‌ترین خواص پیش‌آغشته به‌شمار می‌آید، به‌طوری که با تغییر در آن سایر خواص پیش‌آغشته مانند چسبناکی و جریان‌پذیری نیز تغییر می‌کند. برای کنترل کسر وزنی رزین باید ارتباط کمی آن با پارامترهای فرایندی، مانند سرعت خط تولید پیش‌آغشته، گرانش رزین و فاصله بین غلتک‌های گیرنده رزین اضافی معین شود. در پژوهش حاضر، از پارچه شیشه نوع E سه‌جهتی با چگالی سطحی  $1.025 \text{ g/cm}^2$  و رزین اپوکسی Epon 828 برای تولید پیش‌آغشته به روش غوطه‌وری استفاده شد. در بخش نظری، فرایند پوشش‌دهی آزاد مطالعه شد. در نتیجه، مقدار ضخامت لایه رزین پوشش‌یافته به واسطه عبور الیاف از حمام رزین با مدل Landau-Levich محاسبه شد. در ادامه، ضخامت به‌دست آمده به‌عنوان خوراک ورودی فرایند ورقه‌سازی با غلتک در نظر گرفته شد. با نوشتن معادله حرکت برای عبور الیاف آغشته شده از بین غلتک‌های گیرنده رزین اضافی، ارتباط بین ضخامت لایه رزین ورودی به غلتک‌ها و ضخامت نهایی لایه رزین پوشش‌یافته به شکل معادله انتگرالی به‌دست آمد. برای حل عددی معادله انتگرالی، نرم‌افزار MAPLE به‌کار گرفته شد. نتایج حاکی از انطباق مناسب میان داده‌های تجربی و نظری است و نشان می‌دهد، با افزایش شعاع، سرعت زاویه‌ای و فاصله بین غلتک‌ها، کسر وزنی رزین به شکل خطی افزایش و در مقابل، با افزایش سرعت خط تولید پیش‌آغشته، کسر وزنی رزین کاهش می‌یابد. همچنین، اثر تغییرات گرانش رزین بر کسر وزنی رزین پیش‌آغشته، در محدوده محاسبات این پژوهش، ناچیز است.

### واژه‌های کلیدی

پیش‌آغشته،  
مقدار رزین،  
ورقه‌سازی با غلتک،  
پوشش‌دهی آزاد،  
فن حل عددی

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

mhrmorteza@gmail.com

## مقدمه

پیش‌آغشته محصول واسطه‌ای شامل الیاف تقویت‌کننده و ماده پلیمری بوده که جزئی پخت شده است. پیش‌آغشته‌ها آماده شکل‌گیری و تبدیل به محصول نهایی کامپوزیتی هستند. بیشترین کاربرد پیش‌آغشته‌ها در ساخت محفظه موتور موشک‌ها، فداشونده‌ها، چندلایه‌ای‌های عایق الکتریکی و مواد پایه برای تولید صفحه‌های مدار چاپی است. امکان کنترل مناسب فرایند پخت و یکنواخت بودن خواص کامپوزیت تولیدی دو مزیت استفاده از پیش‌آغشته‌هاست [۱-۳].

از روش‌های متداول برای تولید پیش‌آغشته‌ها، روش غوطه‌وری است. در این روش، الیاف برای آغشته‌سازی به درون حمام رزین هدایت می‌شوند (شکل ۱). سپس، با استفاده از دو غلتک رزین اضافی آن گرفته می‌شود تا به درصد معینی از رزین برسد. پس از آن، پارچه اشباع شده از رزین وارد ستون گرمایی می‌شود تا پخت جزئی انجام شود [۴،۵].

کیفیت پیش‌آغشته با خواص چسبناکی، جریان‌پذیری، درصد مواد فرار، ضخامت، مقدار حفره یا فضای خالی و کسر وزنی رزین ارزیابی می‌شود [۶-۱۰]. از این میان، کسر وزنی رزین از مهم‌ترین خواص پیش‌آغشته به‌شمار می‌آید، به طوری که با تغییر در آن سایر خواص پیش‌آغشته نیز تغییر می‌کند. پارامترهای فرایندی گوناگونی مانند سرعت خط تولید پیش‌آغشته، دمای حمام آغشته‌سازی، فاصله بین غلتک‌های گیرنده رزین اضافی و نوع رزین و الیاف بر کسر وزنی

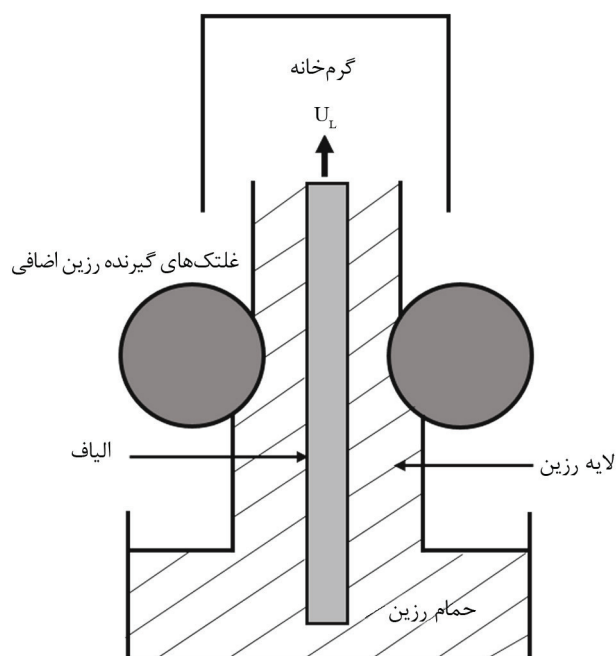
رزین پیش‌آغشته اثرگذارند [۱۱-۱۳]. برای پیش‌بینی و کنترل کسر وزنی رزین، باید بتوان ارتباطی بین پارامترهای فرایندی و خواص پیش‌آغشته برقرار کرد. دو روش می‌تواند مطرح شود: یکی بررسی ارتباط کیفی بین خواص پیش‌آغشته و پارامترهای فرایندی مؤثر با انجام آزمون‌های متعدد و در نتیجه دستیابی به دانش تجربی کنترل خواص و روش دوم، مدل‌سازی فرایند تولید پیش‌آغشته و یافتن معادله‌های کمی بین کسر وزنی رزین و پارامترهای فرایندی مؤثر است. تولید نمونه‌های متعدد پیش‌آغشته و انجام آزمون تعیین کسر وزنی رزین روی آنها، نیازمند صرف وقت و هزینه زیادی است. همچنین، با تغییر یکی از پارامترهای فرایندی، به‌عنوان مثال تغییر نوع رزین، آزمون‌ها باید دوباره تکرار شوند. بنابراین مدل‌سازی فرایند آغشته‌سازی، با وجود پیچیده بودن، به‌عنوان روش بهتر مطرح می‌شود. Liu و همکاران [۱۲] مدلی را برای محاسبه کسر وزنی رزین در پیش‌آغشته ارائه کردند. در این مدل، الیاف با سرعت ثابت از داخل حمام آغشته‌سازی بیرون آمده و پس از گذر از غلتک‌های گیرنده رزین اضافی داخل گرم‌خانه می‌شود. در این مدل، پس از نوشتن معادله‌های حرکت برای الیاف آغشته شده به رزین، فرض می‌شود، بیشینه ضخامت ممکن وقتی اتفاق می‌افتد که سرعت در سطح لایه رزین صفر باشد. در نتیجه، ضخامت لایه رزین پوشش‌یافته بر سطح الیاف ( $\delta_m$ ) برحسب پارامترهایی همچون گرانش رزین ( $\mu$ )، سرعت خط تولید پیش‌آغشته ( $U_L$ ) و چگالی رزین ( $\rho_m$ ) به‌دست می‌آید:

$$\delta_m = \left( \frac{2\mu U_L}{\rho_m g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

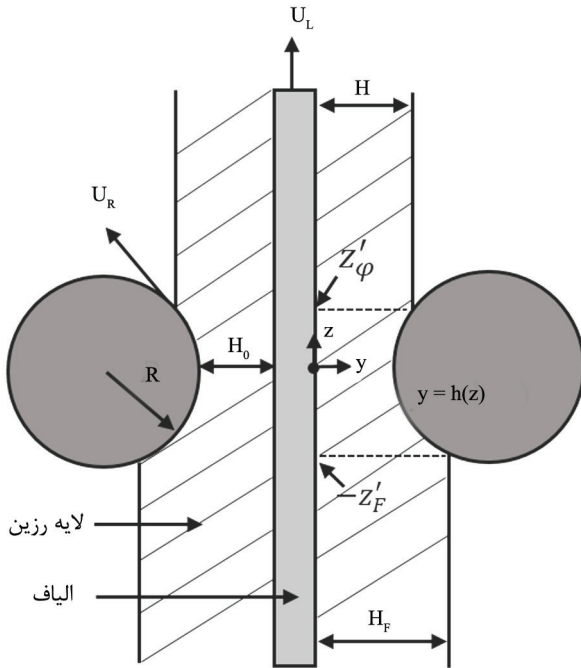
با محاسبه ضخامت لایه رزین پوشش‌یافته، کسر وزنی رزین پیش‌آغشته طبق معادله (۲) به‌دست می‌آید:

$$W_m = \frac{\rho_m \delta_m}{\rho_m \delta_m + \rho_f \delta_f} \quad (2)$$

در این معادله،  $\rho_f$  و  $\delta_f$  به ترتیب چگالی الیاف و نصف ضخامت الیاف است. از جمله مهم‌ترین محدودیت‌های مدل Liu، در نظر نگرفتن نقش غلتک‌های گیرنده رزین اضافی در محاسبه کسر وزنی رزین پیش‌آغشته‌هاست. فرایند تولید پیش‌آغشته به روش غوطه‌وری، شامل سه بخش اصلی عبور الیاف از داخل حمام آغشته‌سازی، عبور الیاف آغشته شده از بین غلتک‌های گیرنده رزین اضافی و پخت پیش‌آغشته حین عبور از گرم‌خانه است. از این میان، پخت پیش‌آغشته حین عبور از گرم‌خانه اثر چندانی بر کسر وزنی رزین پیش‌آغشته ندارد [۱۴،۱۵]. در پژوهش حاضر، معادله‌های حاکم بر دو بخش دیگر مطالعه شده



شکل ۱- طرح کلی فرایند ساخت پیش‌آغشته به روش غوطه‌وری.



شکل ۳- طرح کلی برای تحلیل فرایند عبور الیاف آغشته شده از بین غلتک‌های گیرنده رزین اضافی.

در جهت حرکت الیاف قابل صرف نظر است ( $u_y \ll u_x$ ).

۳- تغییرات سرعت رزین در جهت حرکت الیاف در برابر تغییرات آن

در جهت عمود بر حرکت الیاف قابل صرف نظر است ( $\frac{du_z}{dz} < \frac{du_y}{dy}$ ).

۴- تخلخل الیاف در داخل حمام رزین به طور کامل به وسیله رزین پر شده است.

۵- مجموعه الیاف و رزین موجود در داخل بافت الیاف، جسمی تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود.

۶- گرانی رزین در محدوده دمایی  $45^\circ\text{C}$  تا  $65^\circ\text{C}$  برای فرایند آغشته‌سازی مناسب است.

معادله حرکت دوبعدی در سامانه مختصات xyz به شکل معادله (۴) است [۲۱]:

$$\rho_m (u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu (\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2}) - \rho_m g \quad (4)$$

با اعمال فرضیه‌ها در معادله (۴)، معادله حرکت به شکل معادله (۵) بازنویسی می‌شود:

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} (\frac{\partial P}{\partial z} + \rho_m g) \quad (5)$$

با انتگرال‌گیری از معادله (۵):

$$u_z = \frac{1}{2\mu} (\frac{\partial P}{\partial z} + \rho_m g) y^2 + Ay + B \quad (6)$$

است، به نحوی که با برقراری ارتباط ریاضی بین پارامترهای فرایندی و مقدار رزین پیش آغشته، اثر هر یک از پارامترهای فرایندی مشخص شود. با توجه به مطالعات انجام شده، تاکنون پژوهش جامعی در زمینه محاسبه مقدار رزین پیش آغشته انجام نشده است.

### اساس مدل‌سازی

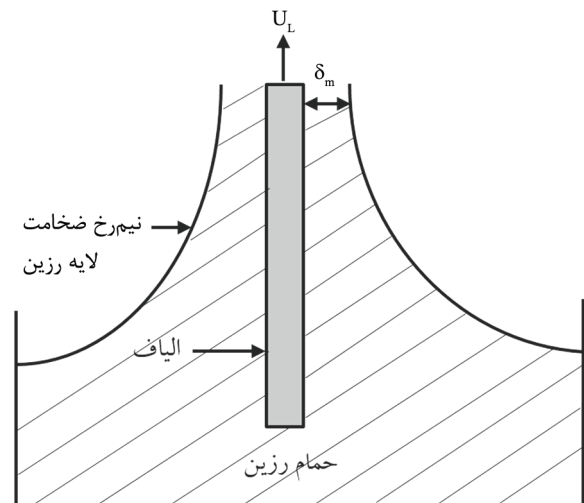
شبهه‌ترین فرایند برای عبور الیاف از داخل حمام آغشته‌سازی فرایند پوشش‌دهی آزاد است. در این فرایند، الیاف به شکل صفحه‌ای مسطح با سرعت  $U_L$  از داخل حمام رزین عبور می‌کنند و سپس خارج می‌شوند (شکل ۲) [۲۰-۱۶]. ضخامت رزین پوشش‌یافته روی الیاف، طبق مدل Landau-Levich [۱۸، ۱۹]، برحسب سرعت خط تولید پیش‌آغشته و مشخصات رزین از قبیل کشش سطحی ( $\gamma$ ) قابل محاسبه است (معادله ۳):

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

افزون بر فرایند پوشش‌دهی آزاد، برای بررسی تغییر ضخامت لایه رزین در فرایند عبور الیاف آغشته شده از بین غلتک‌های گیرنده رزین اضافی، فرایند ورقه‌سازی با غلتک نیز مدنظر است. در این فرایند، کسر وزنی رزین به واسطه چرخش غلتک‌ها کنترل می‌شود [۲۶-۲۱]. در فرایند عبور الیاف آغشته شده از بین غلتک‌ها، افزون بر چرخش غلتک‌ها، حرکت الیاف و نیروی وزن هم از عوامل اثرگذار بر کسر وزنی رزین هستند (شکل ۳). در این حالت، فرضیه‌های زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱- رفتار رزین اپوکسی همانند سیال نیوتنی فرض می‌شود [۲۷].

۲- سرعت رزین در جهت عمود بر حرکت الیاف در برابر سرعت آن



شکل ۲- طرح کلی فرایند پوشش‌دهی آزاد [۱۶].

$$\frac{dP'}{dz'} = -\left(\frac{12}{\left(\frac{H_0}{2R}\right)^2(1+z'^2)^3}\right)\left[\frac{Q}{2U_L H_0} - 1 - z'^2\right] - \left[\frac{H_0^2}{\mu U_L} \left(\frac{2R}{H_0}\right)^2 (\rho_m g)\right] + \frac{U_R - U_L}{U_L} \frac{6}{\left(\frac{H_0}{2R}\right)^2(1+z'^2)^2}$$

پارامتر بدون بعد سرعت حجمی جریان به شکل معادله (۱۷) تعریف می‌شود:

$$\frac{Q}{2U_L H_0} - 1 = \lambda^2 \quad (17)$$

با جاگذاری معادله (۱۷) در معادله (۱۶) گرادیان فشار به شکل معادله (۱۸) بازنویسی می‌شود:

$$\frac{dP'}{dz'} = 12\left(\frac{2R}{H_0}\right)^2 \left[\frac{(z'^2 - \lambda^2)}{(1+z'^2)^3} - \frac{\rho_m g H_0^2}{12\mu U_L} + \frac{U_R - U_L}{2U_L} \frac{1}{(1+z'^2)^2}\right] \quad (18)$$

با انتگرال‌گیری از معادله (۱۸)، معادله توزیع فشار بین غلتک‌ها به دست می‌آید. حد بالای انتگرال نقطه‌ای است که گرادیان فشار بدون بعد در آن صفر است:

$$P' = 12\left(\frac{2R}{H_0}\right)^2 \int_{z'_F}^{z'_0} \left[\frac{(z'^2 - \lambda^2)}{(1+z'^2)^3} - \frac{\rho_m g H_0^2}{12\mu U_L} + \frac{U_R - U_L}{2U_L} \frac{1}{(1+z'^2)^2}\right] dz' \quad (19)$$

$$\frac{dP'}{dz'}(z' = z'_F) = 0 \quad (20)$$

اگر خوراک ورودی به غلتک‌ها یک صفحه محدود باشد، آنگاه:

$$P'(z' = -z'_F) = 0 \quad (21)$$

از معادله‌های هندسی به عنوان تابعی از نسبت ضخامت لایه رزین ورودی به غلتک‌ها ( $H_F$ ) به فاصله بین سطح الیاف با غلتک‌ها ( $H_0$ ) به دست می‌آید:

$$z'_F = \left(\frac{H_F}{H_0} - 1\right)^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

با جاگذاری معادله‌های (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) در معادله (۱۹) معادله انتگرالی حاصل می‌شود که با حل عددی آن،  $\lambda$  برحسب  $H_F/H_0$  به دست می‌آید:

$$\int_{-z'_F}^{z'_0} \left[\frac{(\lambda^2 - z'^2)}{(1+z'^2)^3} + \frac{\rho_m g H_0^2}{12\mu U_L} - \frac{U_R - U_L}{2U_L} \frac{1}{(1+z'^2)^2}\right] dz' = 0 \quad (23)$$

در این سامانه دو شرط مرزی عدم لغزش (no slip) برقرار است: - سرعت رزین روی سطح الیاف برابر سرعت خط تولید پیش‌آغشته ( $U_L$ ) است:

$$U_z = U_L \text{ at } y = 0 \quad (7)$$

- سرعت رزین روی سطح غلتک‌ها برابر سرعت خطی غلتک‌ها ( $U_R$ ) است:

$$U_z = U_R \text{ at } y = h \quad (8)$$

با اعمال شرایط مرزی در معادله (۶) معادله نیم‌رخ سرعت به دست می‌آید:

$$u_z = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{dP}{dz} + \rho_m g\right)(y^2 - h(z)y) + \frac{U_R - U_L}{h(z)} y + U_L \quad (9)$$

همچنین، با استفاده از معادله‌های هندسی داریم:

$$h(z) = H_0 + R - (R^2 - z^2)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

در ادامه (برای ساده‌سازی محاسبات)، چند متغیر بدون بعد به ترتیب زیر تعریف می‌شود:

$$z' = \frac{z}{(2RH_0)^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

$$u'_z = \frac{u_z}{U_L} \quad (12)$$

$$y' = \frac{y}{H_0} \quad (13)$$

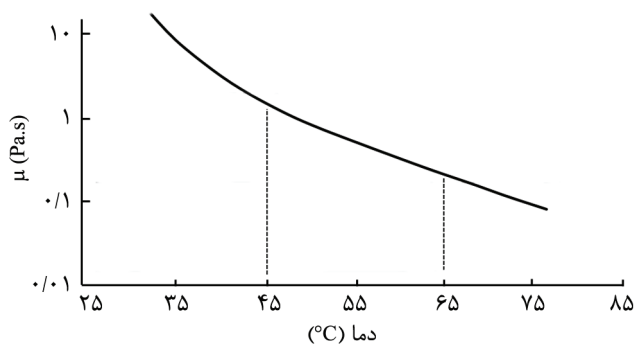
$$p' = \frac{PH_0}{\mu U_L} \quad (14)$$

معادله سرعت حجمی جریان به شکل معادله (۱۵) است:

$$Q = 2 \int_0^h u_z dy \quad (15)$$

با حل معادله (۱۵) گرادیان فشار بین غلتک‌ها به دست می‌آید:

$$(16)$$



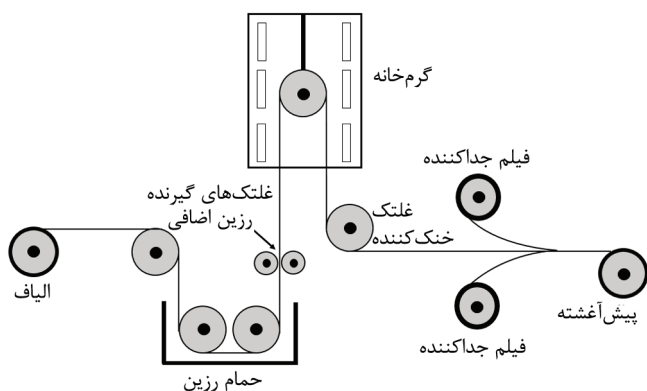
شکل ۴- نمودار گرانیوی رزین اپوکسی (μ) برحسب دما [۲۹].

### دستگاه‌ها

دستگاه پایش آغشته‌ساز برای تولید پایش آغشته‌ها به کار گرفته شد. در شکل ۵ نمایی از دستگاه پایش آغشته‌ساز استفاده شده آمده است. در این دستگاه، الیاف به درون حمام رزین هدایت شده و در این مرحله پایش اشباع می‌شود. سپس، با استفاده از دو غلتک رزین اضافی آن گرفته می‌شود تا به درصد معینی از رزین برسد و اشباع‌سازی به‌خوبی در پارچه انجام شود. پس از آن پارچه اشباع شده از رزین وارد ستون گرمایی یا به اصطلاح گرم‌خانه می‌شود تا پخت جزئی انجام شود. دمای پایش آغشته خارج شده از گرم‌خانه با استفاده از غلتک‌های خنک‌کننده کاهش می‌یابد. سپس، دو لایه فیلم جداکننده در دو طرف آن قرار می‌گیرد و در نهایت پایش آغشته روی غلتک دیگری جمع‌آوری می‌شود.

### روش‌ها

برای اندازه‌گیری کسر وزنی رزین پایش آغشته به روش تجربی، ابتدا نمونه‌ای با ابعاد ۲۰×۲۰ cm از پارچه شیشه پایش از آغشته‌سازی با استفاده از ترازو وزن شد ( $w_1$ ). در ادامه، یک نمونه با همین ابعاد از پایش آغشته تولیدی نیز وزن شد ( $w_2$ ). کسر وزنی رزین پایش آغشته از



شکل ۵- نمایی از دستگاه پایش آغشته‌ساز.

جمله دوم معادله (۲۳) مربوط به اثر نیروی وزن رزین است که در این مقاله G نامیده می‌شود:

$$\frac{\rho_m g H_0^2}{12 \mu U_L} = G \quad (24)$$

با استفاده از معادله (۱۷)، مقدار ضخامت لایه رزین خروجی از غلتک‌ها (H) به شکل معادله (۲۵) به دست می‌آید:

$$H = H_0(\lambda^2 + 1) \quad (25)$$

برای محاسبه کسر وزنی رزین در پایش آغشته، با در نظر گرفتن تخلخل الیاف شیشه در محاسبات ( $\epsilon$ )، معادله (۲) به شکل معادله (۲۶) بازنویسی می‌شود:

$$W_m = \frac{\rho_m(H + \epsilon \delta_f)}{\rho_m(H + \epsilon \delta_f) + \rho_f(1 - \epsilon \delta_f)} \quad (26)$$

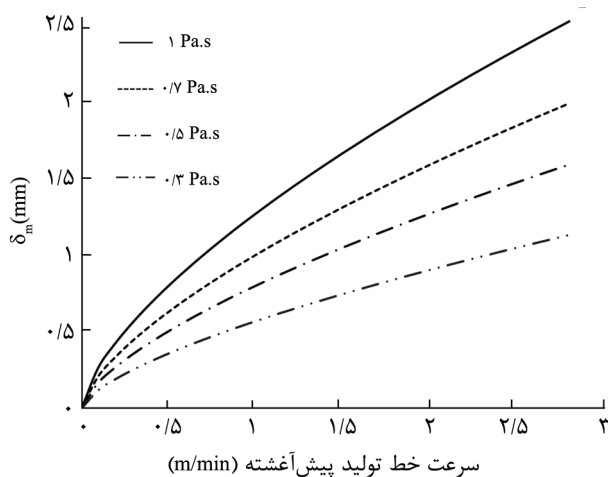
### تجربی

#### مواد

در این پژوهش، از رزین اپوکسی مایع با کد تجاری Epon 828 محصول شرکت Shell و همچنین از دی‌سیان دی‌آمید (DICY) محصول شرکت Merck با اندازه ذرات کمتر از ۱۰ μm به عنوان عامل پخت استفاده شد. دی‌سیان دی‌آمید براساس استوکیومتری به مقدار ۴ phr به کار رفته است. از پارچه شیشه نوع E سه‌جهتی با چگالی سطحی ۱۰۲۵ g/cm<sup>2</sup> محصول شرکت Mytex نیز به عنوان تقویت‌کننده استفاده شد. مشخصات رزین اپوکسی و پارچه شیشه در جدول ۱ آمده است. همچنین با توجه به شکل ۴، اگر دمای حمام رزین اپوکسی در محدوده ۴۵-۶۵°C در نظر گرفته شود، گرانیوی بین ۰/۳-۱ Pa.s حاصل می‌شود.

جدول ۱- مشخصات رزین اپوکسی و پارچه شیشه استفاده شده.

مقدار	کمیت
۰/۰۴۳	کشش سطحی رزین اپوکسی [۲۸] (N/m)
۱۱۳۰	چگالی رزین اپوکسی [۲۹] (kg/m <sup>3</sup> )
۲۵۸۰	چگالی الیاف شیشه [۳۰] (kg/m <sup>3</sup> )

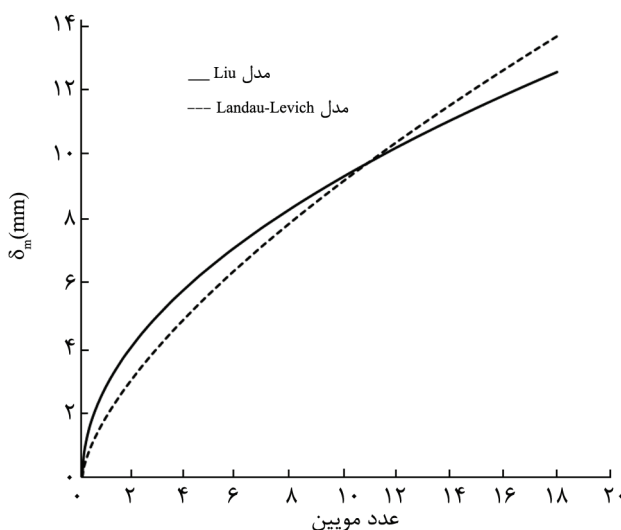


شکل ۶- ضخامت لایه رزین ( $\delta$ ) در مدل Landau-Levich برحسب سرعت خط تولید پیش آغشته در گرانروی‌های مختلف.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در اعداد موینگی کوچک ضخامت لایه رزین به دست آمده از مدل Landau-Levich کمتر از ضخامت لایه رزین حاصل از مدل Liu است. این مسئله به دلیل در نظر گرفتن پارامتر کشش سطحی در مدل Landau-Levich است. با افزایش عدد موینگی و ثابت ماندن کشش سطحی، به تدریج ضخامت لایه رزین به دست آمده از مدل Landau-Levich به دلیل توان بیشتر گرانروی و سرعت خط تولید پیش آغشته در معادله (۳) نسبت به معادله (۱)، افزایش یافته و از نقطه‌ای به بعد بیشتر از مدل Liu می‌شود.

### فرایند ورقه‌سازی با غلتک

برای بررسی پارامترهای مؤثر بر ضخامت لایه رزین خروجی در



شکل ۷- ضخامت لایه رزین ( $\delta$ ) برحسب عدد موینگی برای مدل‌های Landau-Levich و Liu.

معادله (۲۷) به دست آمد:

$$W_m = \frac{W_2 - W_1}{W_2} \quad (27)$$

برای محاسبه کسر حجمی تخلخل پارچه، ابتدا ضخامت پارچه شیشه با استفاده از کولیس اندازه‌گیری شد. سپس، با تقسیم چگالی سطحی پارچه به ضخامت چگالی نظری ( $\rho_{ff}$ ) به دست آمد. در نهایت، کسر حجمی تخلخل پارچه طبق معادله (۲۸) محاسبه شد:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ft}}{\rho_f} \quad (28)$$

با توجه به موارد گفته شده، ضخامت پارچه شیشه برابر ۰/۵۴ mm و کسر حجمی تخلخل آن ۰/۲۶ به دست آمد که از همین اعداد در محاسبات استفاده شد. همچنین، حل عددی معادله (۲۳) با نرم‌افزار MAPLE انجام شد.

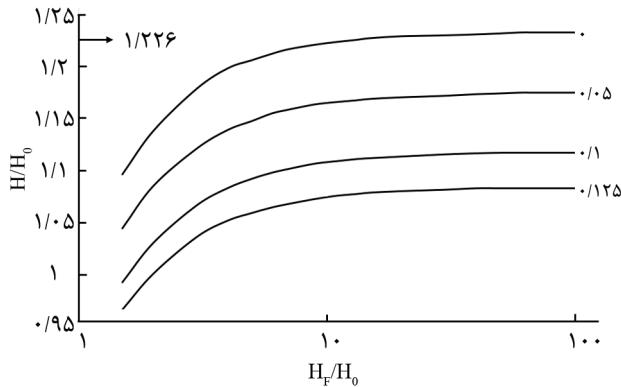
## نتایج و بحث

### نتایج مدل‌سازی

#### فرایند پوشش‌دهی آزاد

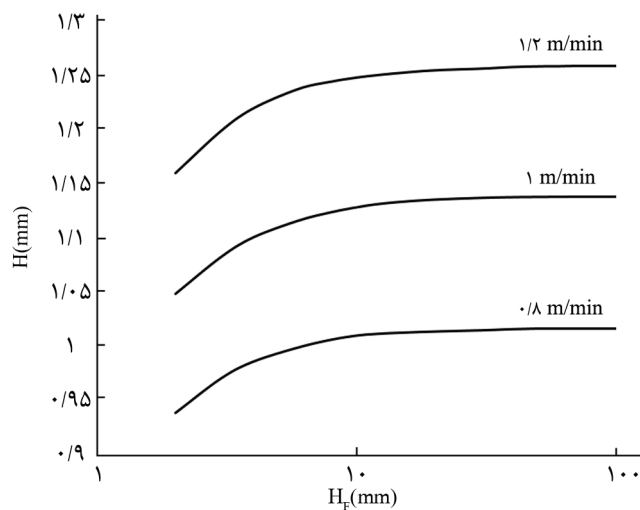
در فرایند پوشش‌دهی آزاد منفرد، سرعت خط تولید پیش آغشته و گرانروی رزین (مطابق معادله (۳)) بر مقدار ضخامت لایه رزین اثر گذارند. در شکل ۶ تغییرات ضخامت لایه رزین برحسب سرعت خط تولید پیش آغشته در گرانروی‌های مختلف رسم شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش سرعت خط تولید پیش آغشته و گرانروی رزین، ضخامت لایه رزین مطابق با توان ۲/۳ افزایش می‌یابد. باید توجه داشت، از مهم‌ترین اهداف استفاده از پیش آغشته‌ها دستیابی به کسر وزنی رزین مشخص است. به دلیل اثر سرعت خط تولید پیش آغشته بر مقدار درجه پخت آن در گرم‌خانه [۱۴]، بهتر است با ایجاد تغییر در گرانروی رزین به یکی از روش‌های اضافه کردن افزودنی مناسب به ترکیب درصد رزین، استفاده از حلال یا تغییر دمای حمام رزین، ضخامت لایه رزین را کنترل کرد. همچنین، برای این کار می‌توان از فرایند ثانویه مانند فرایند ورقه‌سازی با غلتک نیز استفاده کرد. برای مقایسه مدل‌های Landau-Levich و Liu از تعریف عدد موینگی استفاده شده است (معادله ۲۹):

$$ca = \frac{\mu U_L}{\gamma} \quad (29)$$



شکل ۹- تغییرات  $H/H_0$  برحسب  $H_F/H_0$  در مقادیر مختلف  $G$  ( $U_L=U_R$ )

مشاهده می‌شود و با افزایش اثر وزن ( $G$ )، ضخامت لایه رزین خروجی کاهش می‌یابد. با ادامه افزایش  $G$  (بیش از ۰/۱۲۵) نیروی وزن بر نیروی ناشی از سرعت خط تولید پیش‌آغشته و سرعت خطی غلتک‌ها غلبه می‌کند. در نتیجه، با تغییر جهت حرکت رزین دیگر معادله‌های فرایند ورقه‌سازی برقرار نیست. در قدم سوم، معادله (۲۳) با در نظر گرفتن اثر هر دو عامل حل می‌شود. با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ هر دو عامل نیروی وزن و اختلاف سرعت خط تولید پیش‌آغشته با سرعت خطی غلتک‌ها، اثر قابل توجهی بر ضخامت لایه رزین خروجی از غلتک‌ها دارند. در شکل ۱۰ با توجه به وجود متغیر  $H_0$  در محاسبه پارامتر بدون بعد  $G$  به جای نمودار  $H/H_0$  برحسب  $H_F/H_0$ ، نمودار  $H$  برحسب  $H_F$  رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت خطی غلتک‌ها ضخامت لایه رزین خروجی افزایش می‌یابد.

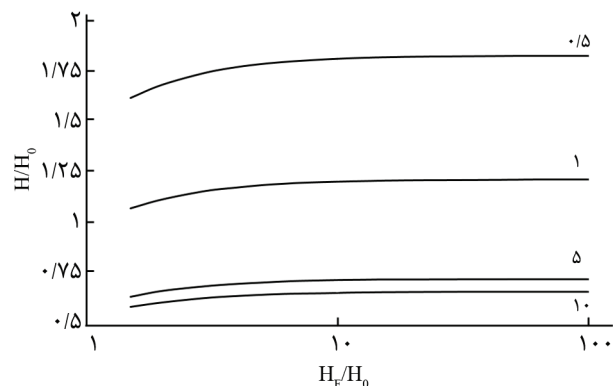


شکل ۱۰- تغییرات  $H$  برحسب  $H_F$  در مقادیر مختلف  $U_R$  ( $U_L=U_R$ )،  $H_R=2/8$  mm و  $U_L=1$  m/min و  $\mu=0.7$  Pa.s

فرایند ورقه‌سازی با غلتک، ابتدا با فرض صرف نظر از اثر نیروی وزن، نمودارهای شکل ۸ رسم شدند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت لایه رزین ورودی به غلتک‌ها ( $H_F$ )، ضخامت لایه رزین خروجی از غلتک‌ها ( $H$ ) افزایش می‌یابد. اما، با ادامه افزایش آن ضخامت لایه رزین خروجی ثابت می‌ماند. در این حالت، فقط فاصله بین غلتک‌ها ( $H_R$ ) معین‌کننده ضخامت نهایی لایه رزین است و فرض صفحه محدود برای لایه رزین ورودی به غلتک‌ها دیگر صادق نیست. در نتیجه، معادله (۲۱) به شکل معادله (۳) تغییر می‌کند:

$$z' = -\infty \quad \text{at} \quad P' = 0 \quad (30)$$

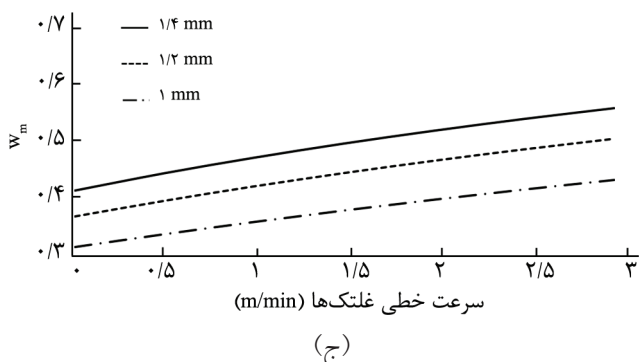
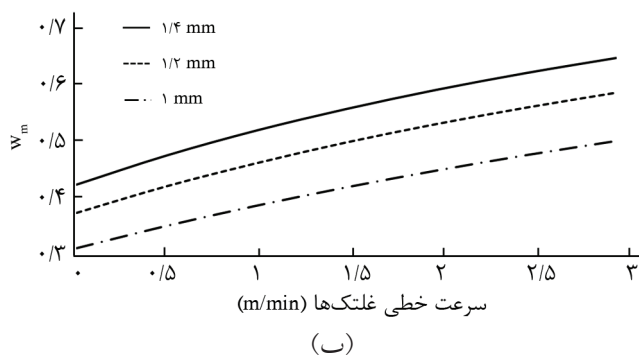
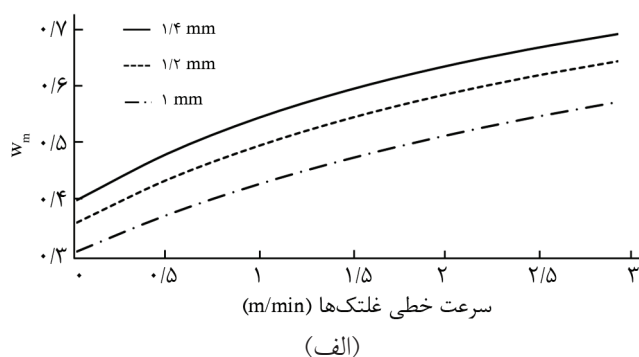
در شکل ۸ هرچه نسبت سرعت خط تولید پیش‌آغشته به سرعت خطی غلتک‌ها بیشتر شود، ضخامت لایه رزین خروجی از غلتک‌ها ( $H$ ) کمتر می‌شود. همچنین، در حالتی که سرعت خط تولید پیش‌آغشته بیشتر از سرعت خطی غلتک‌ها باشد ( $\frac{U_L}{U_R} > 1$ ) مقدار  $H$  کمتر از  $H_0$  می‌شود. این موضوع بدین معناست که الیاف، رزین را با خود می‌کشاند و در نتیجه از انجام کامل فرایند ورقه‌سازی با غلتک جلوگیری می‌کنند. در ادامه، با افزایش بیشتر نسبت سرعت خط تولید پیش‌آغشته به سرعت خطی غلتک‌ها، مقدار  $H/H_0$  (با توجه به معادله ۲۳) در نهایت به عدد ۰/۵ میل پیدا می‌کند. در قدم دوم، برای تحلیل اثر نیروی وزن بر ضخامت لایه رزین خروجی از غلتک‌ها، معادله (۲۳) با فرض برابری سرعت خط تولید پیش‌آغشته و سرعت خطی غلتک‌ها برای مقادیر مختلف پارامتر بدون بعد  $G$  حل شد که نتایج آن در شکل ۹ رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در حالتی که از اثر نیروی وزن صرف نظر شود ( $G=0$ )،  $H/H_0$  در نهایت به عدد ۱/۲۲۶ می‌رسد. با در نظر گرفتن اثر نیروی وزن کاهش ضخامت لایه رزین خروجی



شکل ۸- تغییرات  $H/H_0$  برحسب  $H_F/H_0$  در نسبت‌های مختلف  $G$  ( $U_L=U_R$ )



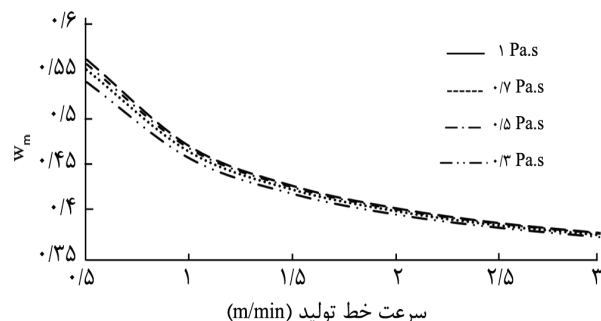
سرعت خط تولید پیش‌آغشته بر مقدار پخت پیش‌آغشته در گرم‌خانه موثر است. در نتیجه بهتر است، این پارامتر را ثابت در نظر گرفت و با تغییر سایر پارامترها کسر وزنی رزین پیش‌آغشته را کنترل کرد. همچنین در شکل ۱۱ مشاهده شد، گرانیوزی رزین هم اثر چندانی بر کسر وزنی رزین پیش‌آغشته ندارد. بنابراین، با تغییر دو پارامتر سرعت خطی غلتک‌های گیرنده رزین اضافی و فاصله بین غلتک‌های گیرنده رزین اضافی، باید به کسر وزنی مطلوب دست یافت. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، افزایش سرعت خطی و فاصله بین غلتک‌ها کسر وزنی رزین را به شکل خطی افزایش می‌دهند. همچنین همانند شکل ۱۱، با افزایش سرعت خط تولید پیش‌آغشته، کسر وزنی رزین کاهش می‌یابد. می‌توان



شکل ۱۲- نمودار کسر وزنی رزین ( $W_m$ ) در فاصله‌های مختلف بین غلتک‌ها ( $H_R$ ) بر حسب سرعت خطی غلتک‌های گیرنده رزین اضافی و سرعت‌های متفاوت خط تولید پیش‌آغشته ( $U_L$ ): (الف)  $1 \text{ m/min}$ ، (ب)  $2 \text{ m/min}$  و (ج)  $3 \text{ m/min}$ .

### تلفیق دو فرایند پوشش‌دهی آزاد و ورقه‌سازی با غلتک

در این بخش فرض می‌شود، ضخامت لایه رزین پوشش‌یافته در مدل Landau-Levich برابر با ضخامت لایه رزین ورودی به غلتک‌های گیرنده رزین اضافی در فرایند ورقه‌سازی با غلتک است. اگر مجموع ضخامت الیاف و لایه رزین پوشش‌یافته در فرایند پوشش‌دهی آزاد از فاصله بین غلتک‌های گیرنده رزین اضافی کمتر باشد، فرایند ورقه‌سازی با غلتک بدون اثر است و غلتک‌ها نقشی در کسر وزنی رزین پیش‌آغشته ندارند. در این حالت، ضخامت لایه رزین پوشش‌یافته فقط از فرایند پوشش‌دهی آزاد محاسبه می‌شود. در حالت دیگری، اگر مجموع ضخامت الیاف و رزین پوشش‌یافته در فرایند پوشش‌دهی آزاد خیلی بیشتر از فاصله بین غلتک‌های گیرنده رزین اضافی باشد، آنگاه معادله (۳۰) صادق است و ضخامت لایه رزین پوشش‌یافته فقط از فرایند ورقه‌سازی با غلتک محاسبه می‌شود. اگر ضخامت لایه رزین پوشش‌یافته در فرایند پوشش‌دهی آزاد بین دو حالت گفته شده باشد، نتایج آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. هر چند با افزایش گرانیوزی رزین و سرعت خط تولید پیش‌آغشته، ضخامت لایه رزین ورودی به غلتک‌ها افزایش می‌یابد (شکل ۶). اما همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت خط تولید پیش‌آغشته، کسر وزنی رزین پیش‌آغشته در نهایت کاهش می‌یابد. این مسئله به این دلیل است که کاهش ضخامت لایه رزین خروجی در فرایند ورقه‌سازی با غلتک بر افزایش ضخامت لایه رزین در فرایند پوشش‌دهی آزاد غلبه دارد. در حالی که در سرعت‌های کم خط تولید پیش‌آغشته در مقایسه با سرعت غلتک‌ها، کسر وزنی رزین در پیش‌آغشته بیشتر است و اثر تغییرات گرانیوزی بسیار کمتر می‌شود. با توجه به فرایندهای پوشش‌دهی آزاد و ورقه‌سازی با غلتک، چهار پارامتر سرعت خط تولید پیش‌آغشته، سرعت خطی غلتک‌های گیرنده رزین اضافی، گرانیوزی رزین و فاصله بین غلتک‌های گیرنده رزین اضافی در محاسبه کسر وزنی رزین پیش‌آغشته اثرگذارند. از این میان،



شکل ۱۱- نمودار کسر وزنی رزین ( $W_m$ ) بر حسب سرعت خط تولید پیش‌آغشته در مقادیر مختلف گرانیوزی ( $U_R = 1/5 \text{ m/min}$ ,  $H_R = 1 \text{ mm}$ ).

جدول ۲- مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی.

شماره نمونه	سرعت خطی غلتک‌ها (m/min)	سرعت خط تولید پیش‌آغشته (m/min)	فاصله بین غلتک‌ها (mm)		کسر وزنی رزین	
			نظری	تجربی		
۱	۱	۱	۱	۰/۴۲۲	۰/۳۹	
۲	۱	۱	۱/۲	۰/۴۹۳	۰/۴۵	
۳	۱	۱/۵	۱	۰/۴۰۷	۰/۳۸	
۴	۱/۵	۱	۱	۰/۴۷	۰/۴۳	

### نتیجه‌گیری

برای محاسبه کسر وزنی رزین در پیش‌آغشته اپوکسی - شیشه تولید شده به روش غوطه‌وری، معادله‌های دو فرایند پوشش‌دهی آزاد و ورقه‌سازی با غلتک با یکدیگر تلفیق شد. به نحوی که ضخامت لایه رزین پوشش‌یافته در فرایند پوشش‌دهی آزاد به‌عنوان ورودی فرایند ورقه‌سازی با غلتک در نظر گرفته شد. نتایج نظری به دست آمده، ضمن انطباق مناسب با داده‌های تجربی، نشان داد، کسر وزنی رزین در پیش‌آغشته تابع گرانروی رزین، سرعت خط تولید پیش‌آغشته و مشخصات غلتک‌های گیرنده رزین، شامل سرعت زاویه‌ای، شعاع و فاصله بین آنهاست. با افزایش شعاع، سرعت زاویه‌ای و فاصله بین غلتک‌ها، کسر وزنی رزین به شکل خطی افزایش می‌یابد. در مقابل، افزایش سرعت خط تولید پیش‌آغشته، ضمن کاهش کسر وزنی رزین، اثر افزایشی شعاع و سرعت زاویه‌ای را نیز کاهش می‌دهد. همچنین در محدوده محاسبات این پژوهش، اثر گرانروی رزین روی کسر وزنی رزین پیش‌آغشته بسیار ناچیز است.

### اختصارات

$\mu$	گرانروی رزین
$g$	شتاب جاذبه زمین
$G$	متغیر بدون بعد با پیروی از نیروی وزن
$U_L$	سرعت خط تولید پیش‌آغشته
$U_R$	سرعت خطی غلتک‌ها
$u_z$	سرعت رزین در جهت حرکت الیاف
$u_y$	سرعت رزین در جهت عمود بر حرکت الیاف
$u'_z$	متغیر بدون بعد سرعت رزین در جهت حرکت الیاف
$\omega$	سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها
$Q$	سرعت حجمی جریان
$\lambda$	متغیر بدون بعد سرعت حجمی جریان

گفت، افزایش سرعت خط تولید پیش‌آغشته باعث کاهش اثر سرعت خطی غلتک‌ها نیز می‌شود. طبق معادله (۳۱) سرعت خطی غلتک‌ها تابع سرعت زاویه‌ای و شعاع آنهاست:

$$U_R = \omega R \quad (31)$$

با افزایش شعاع و سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها، کسر وزنی رزین به شکل خطی افزایش می‌یابد. در عمل، پس از ساخت دستگاه پیش‌آغشته‌ساز امکان تغییر شعاع برای کنترل کسر وزنی رزین در پیش‌آغشته تولیدی وجود ندارد. در نتیجه، باید با تغییر سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها این کار انجام شود. نکته قابل توجه اینکه در حالت برابر بودن سرعت خطی غلتک‌ها در دو دستگاه پیش‌آغشته‌ساز با شعاع متفاوت، کسر وزنی رزین در پیش‌آغشته‌های تولیدی یکسان خواهد بود. اما، فشار بین غلتک‌ها در دستگاهی بیشتر می‌شود که شعاع غلتک‌های آن بزرگ‌تر باشد (معادله ۱۹). افزایش فشار بین غلتک‌های گیرنده رزین اضافی، مقدار فضای خالی در پیش‌آغشته را کاهش می‌دهد که این موضوع در پژوهش‌های بعدی دنبال می‌شود.

### مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی میان کسر وزنی رزین به دست آمده از مدل‌سازی و تجربی وجود دارد. با افزایش فاصله و سرعت خطی بین غلتک‌ها کسر وزنی رزین افزایش و با ازدیاد سرعت خط تولید پیش‌آغشته، کسر وزنی رزین کاهش می‌یابد. از دلایل بیشتر بودن کسر وزنی رزین محاسبه شده، فرض پرشدن کامل تخلخل الیاف حین فرایند آغشته‌سازی است. این در حالی است که به‌طور معمول ۱٪ تا ۲٪ فضای خالی در پیش‌آغشته تولیدی وجود دارد. همچنین، این امکان وجود دارد که مقدار بسیار ناچیزی از رزین به فیلم‌های جداکننده بچسبد و با برداشتن این فیلم‌ها از پیش‌آغشته خارج شود.

$z'_\phi$	در آن گرادیان فشار بدون بعد صفر است.	$\delta_m$	ضخامت لایه رزین پوشش یافته روی سطح الیاف
$\rho_f$	چگالی الیاف	$\delta_f$	نصف ضخامت الیاف
$\rho_{ft}$	چگالی نظری پارچه شیشه	$H_0$	فاصله بین سطح الیاف با غلتک‌ها
$\rho_m$	چگالی رزین	$H_F$	ضخامت لایه رزین ورودی به غلتک‌ها
$\gamma$	کشش سطحی میان رزین و هوا	$H$	ضخامت لایه رزین خروجی از غلتک‌ها
$w_m$	کسر وزنی رزین	$h$	فاصله متغیر بین سطح الیاف با غلتک‌ها
$\varepsilon$	کسر حجمی تخلخل پارچه شیشه	$H_R$	فاصله بین غلتک‌ها
$R$	شعاع غلتک‌ها	$z$	مختصات جهت حرکت الیاف
$Ca$	عدد مویین	$y$	مختصات جهت عمود بر حرکت الیاف
$P$	فشار	$z'$	مختصات بدون بعد جهت حرکت الیاف
$P'$	متغیر بدون بعد فشار	$y'$	مختصات بدون بعد جهت عمود بر حرکت الیاف
$w_1$	وزن پارچه شیشه پیش از آغشته‌سازی با رزین		مختصات بدون بعد نقطه ویژه در جهت حرکت الیاف که
$w_2$	وزن پیش آغشته تولیدی	$z'_f$	در آن فشار بدون بعد صفر است.
			مختصات بدون بعد نقطه ویژه در جهت حرکت الیاف که

### مراجع

- Beheshty M.H. and Heidary A.R., Science and Technology of Prepregs, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **4**, 34-47, 1991.
- Mazumdar S.K., *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, CRC LLC, 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, *Thermoch. Acta*, **557**, 37-43, 2013.
- Hayes B.S. and Seferis J.C., *Simulation Engineering of Polymeric Prepreg Composite Systems*, PhD Thesis, University of Washington, April 1997.
- Corporation, Hexcel, <http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets>, March 2005.
- Ahn K.J. and Seferis J.C., Prepreg Process Analysis, *Polym. Compos.*, **14**, 349-360, 1993.
- Ahn K.J. and Seferis J.C., Prepreg Processing Science and Engineering, *Polym. Eng. Sci.*, **33**, 1177-1188, 1993.
- Dubois O., Lecam J.B., and Beakou A., Experimental Analysis of Prepreg Tack, *Experim. Mech.*, **50**, 599-606, 2010.
- Hayes B.S. and Seferis J.C., The Effect of Fabric Tension and the Number of Impregnation Rollers on Woven Fabric Prepregquality and Cured Laminates, *Composites*, **28A**, 791-799, 1997.
- Crossley R.J., Schubel P.J., and Warrior N.A., The Experimental Determination of Prepreg Tack and Dynamic Stiffness, *Composites, Part A*, **43**, 423-434, 2012.
- Martin J.C., Putnam J.W., and Seferis J.C., Effect of Impregnation Conditions on Prepreg Properties and Honeycomb Core Crush, *Polym. Compos.*, **18**, 90-99, 1997.
- 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.
- Hayes B.S. and Seferis J.C., Development and Hot Melt Impregnation of a Model Controlled Flow Prepreg System, *Polym. Compos.*, **17**, 730-742, 1996.
- Shaghghi S., Beheshty M.H., and Rahimi H., *Preparation of Phenolic-Glass Prepregs and Investigation the Effect of Phenolic Resin Type on their Properties*, MSc Thesis, Iran Polymer and Petrochemical Institute, October 2010.
- Shaghghi S., Beheshty M.H., and Rahimi H., Preparation and Rheological Characterization of Phenolic/Glass Prepregs, *Iran. Polym. J.*, **20**, 969-977, 2011.
- Shim E., *A Study of Spin Finish Application on Fibers*, PhD Thesis, North Carolina State University, 2001.

17. Yusuf O.B., *Improved Non-Linear Solution of Dip Coating Flow*, MSc Thesis, University of Western Ontario, 2012.
18. 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. Tech.*, **201**, 2655-2661, 2006.
19. Krechetnikov R. and Homsy G.M., Experimental Study of Substrate Roughness and Surfactant Effects on the Landau-Levich Law, *Phys. Fluid.*, **17**, 1021081-10210816, 2005.
20. Spiers R.P., Subbaraman C.V., and Wilkinson W.L., Free Coating of a Newtonian Liquid Onto a Vertical Surface, *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 389-396, 1974.
21. Middleman S., *Fundamentals of Polymer Processing*, McGraw-Hill, USA, 170-187, 1977.
22. Mitsoulis E., Numerical Simulation of Calendering Viscoplastic Fluids, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **154**, 77-88, 2008.
23. Levine L., Corvalan C.M., Campanella O.H., and Okos M.R., A Model Describing the Two-Dimensional Calendering of Finite Width Sheets, *Chem. Eng. Sci.*, **57**, 643-650, 2002.
24. Arcos J.C., Bautista O., Mendez F., and Bautista E.G., Theoretical Analysis of the Calendered Exiting Thickness of Viscoelastic Sheets, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **177-178**, 29-36, 2012.
25. Arcos J.C., Mendez F., and Bautista O., Effect of the Temperature-Dependent Consistency Index on the Exiting Sheet Thickness in the Calendering of Power-Law Fluids, *J. Heat Mass Transfer*, **54**, 3979- 3986, 2011.
26. Zheng R. and Tanner R.I., A Numerical Analysis of Calendering, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **28**, 149-170, 1988.
27. Rahatekar S.S., Koziol K.K.K., Butler S.A., Elliott J.A., Shaffer M.S.P., Mackley M.R., and Windle A.H., Optical Microstructure and Viscosity Enhancement for an Epoxy Resin Matrix Containing Multiwall Carbon Nanotubes, *J. Rheol.*, **50**, 599-610, 2006.
28. Petrie E.M., *Epoxy Adhesive Formulations*, McGraw-Hill, USA, 51-52, 2006.
29. Corporation, Momentive, Technical Data Sheet-Epon828, <http://www.Momentive.com>, September 2005.
30. Krug III D.J., Asuncion M.Z., Popova V., and Laine R.M., Transparent Fiber Glass Reinforced Composites, *Compos. Sci. Technol.*, **77**, 95-100, 2013.