Archive of SID

قابل دسترس در نشانی: http://jips.ippi.ac.ir

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال بیست و یکم، شماره ۴،
صفحه ۳۳۸-۳۲۹، ۱۳۸۷
ISSN : 1016-3255

جریان رزین داخل الیاف پیش‌شکل داده شده در فرایند قالب‌گیری انتقالی رزین به کمک خلاء با ابزارهای انعطاف‌پذیر

محمود مهرداد شکریه*، سید رسول آتشی پور

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت، صندوق پستی ۱۶۸۴۶/۱۳۱۱۴

دریافت: ۸۷/۱/۲۲، پذیرش: ۸۷/۶/۱۱

یکی از روش‌های ساخت قطعات کامپوزیتی، فرایند قالب‌گیری انتقالی رزین به کمک خلاء است که زیرمجموعه قالب‌گیری انتقالی رزین است. با توجه به پیش‌رفت صنعتی این فرایند، روش‌های اصلاحی مختلفی برای بهبود فرایند و افزایش سرعت تولید پیشنهاد شده است. در این میان استفاده از قالب‌های با نیمه انعطاف‌پذیر و نیمه دیگر صلب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله به منظور بررسی نحوه گسترش رزین از روزنه تزریق به داخل بستر الیاف، معادلات حاکم بر مرحله پرشدن الیاف پیش‌شکل داده شده در قالب‌های مزبور در مختصات قطبی، به شکل تحلیلی حل شده است. براساس حل انجام شده، برای پارامترهای مختلف از جمله تغییرات ضخامت الیاف پیش شکل داده شده، فشار رزین، سرعت رزین و کسر حجمی الیاف، به عنوان توابعی از دو متغیر فاصله از روزنه تزریق و زمان، پاسخ بسته ارائه شده است. پس از نشان دادن صحت روش حل، نتایج حاصل از آن ارائه شده و عوامل موثر بر افزایش کیفیت و سرعت تولید مورد مطالعه قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی

کامپوزیت پلیمری،
قاب‌گیری انتقالی رزین به کمک خلاء،
ابزار انعطاف‌پذیر،
الیاف پیش‌شکل داده شده، فراورش

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

shokrieh@iust.ac.ir

Resin Flow in Fiber Preformed by Vacuum Assisted Resin Transfer Molding with Flexible Tools

M.M. Shokrieh* and S.R. Atashipour

Composites Research Laboratory, Mechanical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, P.O. Box: 16846/13114, Tehran, Iran

Received 10 April 2008; accepted 1 September 2008

Abstract

Vacuum assisted resin transfer molding, as a sub-branch of RTM is a method of manufacturing composite specimens. Considering the industrial development of this method, different modified techniques are designed to improve its performance. Among these techniques, using a half flexible mold is regarded as an important method. In this work, dominant equations of resin flow through the mold in polar coordinates are solved analytically. Based on this approach, closed-form solutions have been presented for different parameters such as thickness variation of preformed fiber, resin pressure, resin velocity and fiber volume fraction as functions of two variables, namely, time and the distance from injection port. After verification of the approach employed in this work, the results are presented. Important parameters influencing the quality and the rate production are studied in detail.

Key Words

polymer composite,
vacuum assisted resin transfer molding,
flexible tool,
preformed fibers, processing

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: shokrieh@iust.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

از جمله مهم‌ترین پیش‌رفت‌های انجام شده در زمینه ساخت مواد صنعتی، کامپوزیت‌های پلیمری هستند که استفاده از آنها روز به روز در حال افزایش است. یکی از روش‌های تولید این نوع کامپوزیت‌ها، فرایندهای قالب گیری انتقالی رزین (resin transfer molding, RTM) است که زیر مجموعه قالب گیری مایع (liquid molding) هستند. به طور کلی، همه انواع فرایندهای RTM از چهار مرحله تشکیل می‌شوند. مرحله اول، برش الیاف مختلف و قرار دادن آنها با جهت گیری دلخواه درون نیمه مادگی قالب یا استفاده از بستر الیاف از پیش تهیه شده است که اصطلاحاً الیاف پیش شکل داده شده (preform) نامیده می‌شوند. مرحله دوم، تزریق رزین و پرشدن محیط متخلخل الیاف، مرحله سوم، عملیات پخت و شکل گیری ماتریس و مرحله چهارم، جدایش قطعه و انجام عملیات پرداخت نهایی است.

قابلیت کنترل خوب خواص مکانیکی قطعه تولید شده با استفاده از الیاف پیش شکل داده شده مناسب، کوتاه‌تر بودن زمان چرخه تولید در مقایسه با فرایندهای سنتی، کم بودن هزینه‌های ابزاری و قالب و هم چنین کوتاه بودن زمان آماده‌سازی فرایند، امکان تولید یک مرحله‌ای قطعات کپسول مانند و هم چنین امکان وارد کردن هرنوع اشیای جاداده شده در مرحله تولید قطعات و امکان تولید یک پارچه سازه‌های بزرگ با هندسه پیچیده از جمله عواملی هستند که موجب توجه به فرایند RTM شده‌اند [۱]. مزایا و امتیازات زیاد RTM سبب کاربرد گسترده این فرایند در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، نظامی، خودروسازی، الکترونیک، صنایع مکانیکی و تجهیزات ورزشی شده است [۲].

در میان مراحل چرخه تولید RTM، فاز پرشدن محیط متخلخل الیاف پیش شکل داده شده، اهمیت و حساسیت ویژه‌ای دارد. چرا که سهم عمده‌ای از کیفیت قطعه تولید شده و مدت زمان چرخه فرایند، به نحوه انجام این مرحله بستگی دارد [۲]. بنابراین، شناخت دقیق این مرحله و تعیین پارامترهای اثرگذار آن، ضروری به نظر می‌رسد. یکی از مشخصه‌های RTM که آن را از فرایندهای مشابه از جمله SRIM (structural reaction injection molding) متمایز می‌سازد، این است که می‌توان مرحله جریان رزین و پرشدن قالب را مستقل از مرحله پخت در نظر گرفت و تحلیل کرد. زیرا، واکنش‌های اصلی پخت پس از اتمام مرحله جریان رزین انجام می‌شود. از این رو، می‌توان با دقت مناسبی این مرحله را بدون در نظرگرفتن معادلات انتقال گرما و مدل‌های مربوط به واکنش پخت تحلیل کرد [۶-۳].

به منظور افزایش کیفیت قطعات کامپوزیتی تولید شده به روش RTM، تاکنون اصلاحات زیادی روی مواد و تجهیزات فرایند انجام شده است. از جمله مهم‌ترین اصلاحات انجام شده روی این فرایند، می‌توان به استفاده از تجهیزات خلاء و پوسته قالب انعطاف‌پذیر اشاره کرد [۷]. بهره‌گیری از مکش خلاء، سبب خروج بهتر هوای باقی‌مانده از لابه‌لای الیاف و تسهیل حرکت رزین در آن می‌شود. در این حالت عامل اصلی پرشدن قالب، مکش خلاء به جای فشار تزریق است. قالب‌گیری با استفاده از پوسته قالب انعطاف‌پذیر نیز، علاوه بر حذف دسته‌ای از پدیده‌های نامطلوب فرایند در مرحله پرشدن، سبب کاهش قابل ملاحظه مدت زمان چرخه تولید می‌شود.

تاکنون مطالعات گسترده‌ای بر پایه روش‌های عددی و تجربی در زمینه تحلیل رفتار الیاف پیش شکل داده شده و مدل‌سازی فاز پرشدن در فرایند RTM برای قالب‌های صلب انجام شده است. یالواک و همکاران [۸،۹]، مرور جامعی از این پژوهش‌ها را ارائه کردند. از جمله مطالعات مهم انجام شده با هدف بهینه‌سازی محل روزنه‌های تزریق و خروج هوا و هم چنین کاهش زمان پرشدن در فرایند RTM می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط فصیحی و بهشتی [۱۰] و فصیحی و همکاران [۱۱] اشاره کرد. کارهای تحلیلی معدودی در زمینه مدل‌سازی مرحله پرشدن قالب در فرایند RTM وجود دارد. کای [۱۲] مجموعه‌ای از محاسبات ساده را برای تحلیل جریان رزین در فرایند RTM با قالب‌های صلب سنتی انجام داد. وی در تحلیل خود، برای قالب‌های نازک با شرایط مرزی مختلف، پاسخ بسته ارائه کرد. یون و همکاران [۱۳] با فرض وجود دو نیمه قالب صلب و با در نظر گرفتن آثار افت اصطکاکی در لوله تزریق و آثار گرانش، روابطی را برای فرایند RTM به کمک خلاء به دست آورند.

مطالعات تجربی و تحلیلی بسیار کمی در ارتباط با مدل‌سازی مرحله تزریق رزین و تخمین زمان پرشدن در فرایند RTM اصلاح‌شده با تجهیزات خلاء و پوسته قالب انعطاف‌پذیر وجود دارد [۱۶-۱۴]. تمام این پژوهش‌ها، محدود به جریان کانالی رزین در قالب‌های بلند یک بعدی است. بنابراین، بر اساس اطلاعات مولفان، مقاله پژوهشی جامعی برای مدل‌سازی جریان شعاعی رزین اعم از روش‌های تحلیلی یا مطالعات تجربی بر پایه آزمایش در منابع یافت نشده است. از آن‌جا که در فرایندهای واقعی برای تولید قطعات کامپوزیتی کاربردی از روزنه‌های تزریق متعدد استفاده می‌شود، بنابراین، تحلیل جریان شعاعی رزین از محل روزنه تزریق به داخل الیاف پیش شکل داده شده و عوامل اثرگذار برآن اهمیت ویژه‌ای دارد. از این رو، در مقاله حاضر پس از تکمیل معادلات حاکم بر فرایند اصلاح‌شده به کمک خلاء و پوسته قالب انعطاف‌پذیر، این معادلات برای نخستین بار به شکل کاملاً تحلیلی برای فرایند تزریق فشار ثابت شعاعی حل شده است. اهمیت تحلیل حاضر در بررسی نحوه گسترش رزین به داخل الیاف پیش شکل داده شده و اثر آن بر پارامترهای مختلف در حوالی روزنه تزریق است. به منظور بررسی صحت حل انجام شده، نشان داده شده است که با اعمال شرایط مربوط

www.SID.ir

Archive of SID

به فرایند قالب‌گیری انتقال رزین به کمک خلاء (vacuum assisted resin transfer molding, VARTM) با قالب‌های قدیمی بر روابط حاصل، عینا پاسخ‌های مربوط به این نوع فرایند قابل دست‌یابی است.

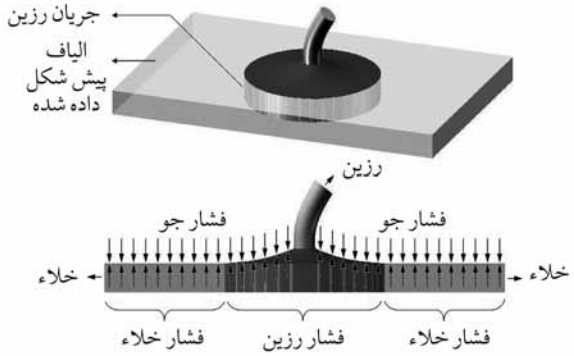
معادله‌های حاکم بر روش RTM اصلاح شده

فرایندی که امروزه با عنوان RTM شناخته می‌شود، شکل اصلاح شده با بهره‌گیری از خلاء و پوسته قالب انعطاف‌پذیر است. در این فرایند، برخلاف نیمه صلب کف قالب، نیمه رویی انعطاف‌پذیر است، به نحوی که تغییرات فشار ناشی از تزریق رزین یا فشار جو، سبب فشردگی الیاف پیش‌شکل داده شده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، پس از آن که الیاف پیش‌شکل داده شده درون قالب قرار داده شد، خلاء از راه کیسه‌های موجود در گوشه‌های آن اعمال شده و در اثر اختلاف فشار داخل و فشار جو، الیاف پیش‌شکل داده شده تا مقدار کمینه ضخامت فشرده می‌شود. این ضخامت با h_0 نشان داده می‌شود و فرض می‌شود که نسبت تخلخل در این حالت برابر ϕ_0 باشد.

پس از شروع عملیات تزریق، رزین از راه روزنه ورودی به داخل محیط متخلخل الیاف جریان می‌یابد. به تدریج با پیش‌روی جبهه جریان، از مقدار فشردگی الیاف پیش‌شکل داده شده کاسته می‌شود. با توجه به شکل ۱، می‌توان معادله‌های زیر را برای فشار رزین (p)، فشار مکش خلاء (p_o)، فشار جو (p_{atm}) و تنش نرمال فشاری الیاف پیش‌شکل داده شده (σ_{33}) بیان کرد:

$$\begin{aligned} &\text{ناحیه تر}: \quad p+\sigma_{33}=p_{atm} \\ &\text{ناحیه خشک}: \quad p_o+\sigma_{33}=p_{atm} \end{aligned} \qquad (۱)$$

در حالت کلی می‌توان معادله (۲) را بین تنش σ_{33} و مقدار فشردگی



شکل ۱ ـ جریان رزین در محیط متخلخل الیاف پیش‌شکل داده شده در مرحله پرشدن در فرایند RTM اصلاح شده.

الیاف پیش‌شکل داده شده بیان کرد:

$$\sigma_{33}=E(h)|\varepsilon|=E(h)\left(\frac{h^*-h}{h^*}\right) \qquad (۲)$$

که در آن h^* ضخامت اولیه الیاف پیش‌شکل داده شده‌ای است که هنوز داخل قالب قرار داده نشده‌اند. تنها در این حالت است که تنش فشاری الیاف صفر است. براین اساس، h^* حداکثر ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده است. با توجه به انتخاب ضخامت h_0 به عنوان مبنای محاسبات، لازم است که در تمام معادله‌ها، h_0 جای‌گزین h^* شود. با استفاده از معادله (۱) برای بخشی از الیاف که رزین به آن ناحیه نرسیده است، مقدار تنش مؤثر بر الیاف پیش‌شکل داده شده برای ایجاد ضخامت h_0 چنین به دست می‌آید:

$$\sigma_{33}\big|_{h=h_0}=p_{atm}-p_o \qquad (۳)$$

یادآور می‌شود، تاکنون مدل‌های زیادی برای بیان رفتار تغییر شکل الیاف پیش‌شکل داده شده ارائه شده است [۲۳-۱۷]. هاموند و همکاران [۲۴]، به منظور بررسی رفتار فشردگی الیاف پیش‌شکل داده شده، آزمایش‌های گسترده‌ای را روی الیاف مختلف انجام دادند. آنها دریافتند که به ازای تغییر شکل‌های کوچک الیاف پیش‌شکل داده شده، می‌توان رفتار فشردگی آن را با دقت مناسبی خطی فرض کرد. در این تحلیل نیز از فرض رفتار خطی بین تنش و تغییرشکل استفاده شده است. بنابراین، با اعمال شرط (۳) در معادله (۲)، رابطه بین h^* و h_0 به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$h^*=\left(\frac{E}{\breve{E}}\right)h_0 \qquad (۴)$$

که در آن E سفتی فشاری الیاف پیش‌شکل داده شده و $\breve{E}$ پارامتر ویژه سفتی الیاف است. این پارامتر به شکل زیر تعریف شده است:

$$\breve{E}=E-(p_{atm}-p_o) \qquad (۵)$$

با جای‌گذاری h^* از معادله (۴) در معادله (۲) و استفاده از معادله (۱)، معادله (۶) به دست می‌آید:

$$p-p_o=\breve{E}(\bar{h}-1) \qquad (۶)$$

که در آن $\bar{h}$ پارامتر بی‌بعد ضخامت است و به شکل معادله (۷) تعریف می‌شود:

www.SID.ir

Archive of SID

$$\bar{h} = h / h_0 \tag{۷}$$

بنابراین، برای حالتی که الیاف پیش‌شکل داده شده رفتار کشسان خطی داشته باشند، فشار رزین درون قالب نیز رفتاری خطی دارد که با معادله (۶) بیان می‌شود.

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، با تغییر ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده، نسبت تخلخل آن نیز تغییر می‌کند. با فرض ثابت باقی ماندن مقدار الیاف در هر سطح مشخص از الیاف، می‌توان کسر حجمی الیاف (v^f) را به ازای هر ضخامت از الیاف پیش‌شکل داده شده به کمک معادله (۸) بیان کرد:

$$v^f h = v_0^f h_0 \tag{۸}$$

که در آن زیروند صفر مربوط به الیاف فشرده شده درون قالب پیش از شروع عملیات تزریق رزین است. رابطه بین کسر حجمی الیاف و نسبت تخلخل به شکل معادله (۹) است:

$$\varphi + v^f = 1 \tag{۹}$$

با ترکیب معادله‌های (۸) و (۹)، نسبت تخلخل الیاف پیش‌شکل داده شده برحسب تابع ضخامت بی‌بعد، چنین به دست می‌آید:

$$\varphi = 1 - (1 - \varphi_0)/\bar{h} \tag{۱۰}$$

لوپاتنیکوف و همکاران [۱۴]، معادله زیر را برای تحلیل فرایند RTM اصلاح شده در مرحله پرشدن الیاف پیش‌شکل داده شده پیشنهاد کردند:

$$\frac{\partial}{\partial x_1}\left((\varphi_0 + \bar{h} - 1)\frac{K}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x_1}\right) + \frac{\partial}{\partial x_2}\left((\varphi_0 + \bar{h} - 1)\frac{K}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x_2}\right) = \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \tag{۱۱}$$

معادله حاکم (۱۱)، بر مبنای مدل جریان دارسی برای محیط‌های متخلخل [۱،۳] است که با معادلات زیر بیان می‌شود:

$$\vec{\nabla}.(\rho\varphi\vec{v}) + \frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} = 0$$
$$\vec{v} = -\frac{[K(\varphi)]}{\mu}(\vec{\nabla}p - \rho\vec{g}) \tag{۱۲}$$

که در آن ρ و μ به ترتیب چگالی و گرانروی رزین و t زمان است. هم چنین، $\vec{v}$ و $\vec{g}$ بردارهای سرعت و K گرانش و ماتریس نفوذپذیری الیاف است. این مدل در محدوده اعداد رینولدز پایین از دقت بالایی برخوردار است. با استفاده از معادله (۶)، مشتقات جزئی فشار برحسب ضخامت، به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \breve{E}\frac{\partial \bar{h}}{\partial x_i} \quad , i = 1,2 \tag{۱۳}$$

با جای گذاری معادله (۱۳) در معادله (۱۱) و بازنویسی معادلات حاصل در مختصات قطبی، معادله (۱۴) حاصل می‌شود:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\bar{h}(r,\theta,t)K(\bar{h})\frac{\partial \bar{h}}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\bar{h}(r,\theta,t)K(\bar{h})\frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta}\right) = \frac{\mu}{\breve{E}}\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \tag{۱۴}$$

حل معادلات حاکم

با توجه به سرعت کند تغییرات ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده و هم چنین ضریب کوچک $\mu / \breve{E}$، می‌توان با دقت خوبی از جمله آخر معادله حاکم (۱۴) در مقایسه با سایر جملات آن صرف نظر کرد. بنابراین، برای تحلیل جریان‌های شعاعی رزین در قالب‌های افقی، با صرف نظر از جمله مزبور، می‌توان معادله (۱۴) را در حالت متقارن محوری به شکل زیر ساده کرد:

$$\frac{1}{r}\left(r\bar{h}(r,t)K(\bar{h}(r,t))\bar{h}_r(r,t)\right)_{,r} = 0 \tag{۱۵}$$

با دو بار انتگرال گیری از طرفین معادله (۱۵)، معادله (۱۶) به دست می‌آید:

$$\int_{\bar{h}(R_i,t)}^{\bar{h}(r,t)} \bar{h}K(\bar{h})d\bar{h} = C(t)\ln\left(\frac{r}{R_i}\right) \tag{۱۶}$$

در معادله (۱۶)، R_i شعاع دهانه روزنه تزریق و $C(t)$ تابع مجهولی از متغیر زمان است. دو روش متداول تزریق، شامل تزریق در سرعت حجمی ثابت و تزریق با فشار ثابت است. روش تزریق با فشار ثابت برای حالتی که از مقادیر زیاد کسر حجمی الیاف استفاده می‌شود، مناسب‌تر است و معمولاً در قالب‌گیری به روش RTM استفاده می‌شود [۲۵]. با فرض تزریق با فشار ثابت، اولین شرط مرزی مربوط به مقدار فشار تزریق، در دهانه روزنه ورودی است و با معادله (۱۷) بیان می‌شود:

$$p|_{r=R_i} = p_i \tag{۱۷}$$

www.SID.ir

Archive of SID

با استفاده از معادله (۶) می‌توان مقدار ضخامت بی‌بعد الیاف پیش‌شکل داده شده در حوالی روزنه تزریق را به کمک معادله (۱۸) محاسبه کرد:

$$\bar{h}\big|_{r=R_i} = 1 + \frac{p_i - p_\circ}{\breve{E}} \qquad (۱۸)$$

شرط مرزی دیگر مربوط به مقدار فشار در محل جبهه جریان، s(t)، است که با مقدار فشار مکش در روزنه‌های خروجی برابر است:

$$p\big|_{r=s} = p_\circ \qquad (۱۹)$$

با استفاده از معادله (۶)، می‌توان شرط مرزی گفته شده را چنین بازنویسی کرد:

$$\bar{h}\big|_{r=s} = 1 \qquad (۲۰)$$

با اعمال شرط مرزی معادله (۲۰) در معادله (۱۶)، تابع مجهول چنین محاسبه می‌شود:

$$C(t) = -[\ln(s(t)/R_i]^{-1} \int_1^{1+\frac{p_i - p_o}{\breve{E}}} \bar{h}K(\bar{h})d\bar{h} \qquad (۲۱)$$

جای‌گذاری معادله (۲۱) در معادله (۱۶) به معادله (۲۲) می‌انجامد:

$$\int_{1+\frac{p_i-p_o}{\breve{E}}}^{\bar{h}(r,t)} \bar{h}K(\bar{h})d\bar{h} = -\frac{\ln(r/R_i)}{\ln(s/R_i)} \int_1^{1+\frac{p_i-p_o}{\breve{E}}} \bar{h}K(\bar{h})d\bar{h} \qquad (۲۲)$$

برای انجام ادامه مراحل حل مسئله، لازم است که از مدلی مناسب برای نفوذپذیری الیاف پیش‌شکل داده شده استفاده کرد. تاکنون مدل‌های مختلفی برای تشریح رفتار نفوذپذیری الیاف پیش‌شکل داده شده ارائه شده است [۲۹-۲۶]. ساده‌ترین معادله ارائه شده که هم‌خوانی خوبی با داده‌های حاصل از آزمایش دارد، معادله معروف کازنی ـ کارمن است که طبق آن، نفوذپذیری تنها تابعی از کسر حجمی الیاف و جنس آن است. این معادله به شکل زیر بیان می‌شود [۲۶،۲۷]:

$$K_{11} = k\frac{(1-v^f)^3}{(v^f)^2} \qquad (۲۳)$$

که در آن ضریب ثابت k به جنس الیاف بستگی دارد. با جای‌گذاری معادله‌های (۹) و (۱۰) در معادله (۲۳)، رابطه بین نفوذپذیری و ضخامت بی‌بعد الیاف پیش‌شکل داده شده، به شکل معادله (۲۴) به دست می‌آید:

$$K_{11}(\bar{h}) = k\frac{(\bar{h}-(1-\varphi_0))^3}{\bar{h}(1-\varphi_0)^2} \qquad (۲۴)$$

اکنون با جای‌گذاری معادله (۲۴) در معادله (۲۲) و محاسبه انتگرال‌های مربوط و ساده‌سازی، در نهایت ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده، به عنوان تابعی از دو متغیر محل جبهه جریان و فاصله از مرکز روزنه تزریق،، به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$\bar{h}(r,s) = 1-\varphi_0 + \sqrt[4]{(\varphi_0 + \frac{p_i - p_o}{\breve{E}})^4 - [(\varphi_0 + \frac{p_i - p_o}{\breve{E}})^4 - \varphi_0^4]\frac{\ln(r/R_i)}{\ln(s/R_i)}} \qquad (۲۵)$$

جای‌گذاری معادله (۲۵) در معادله‌های (۶) به تابع توزیع فشار درون الیاف پیش‌شکل داده شده به شکل زیر می‌انجامد:

$$\bar{p}(r,s) = \sqrt[4]{(\varphi_0 + \frac{p_i - p_o}{\breve{E}})^4 - \left[(\varphi_0 + \frac{p_i - p_o}{\breve{E}})^4 - \varphi_0^4\right]\frac{\ln(r/R_i)}{\ln(s/R_i)}} - \varphi_0 \qquad (۲۶)$$

که در آن پارامتر بی‌بعد فشار چنین تعریف می‌شود:

$$\bar{p} = (p - p_\circ)/\breve{E} \qquad (۲۷)$$

به منظور یافتن تابع مکان جبهه جریان برحسب زمان حین تزریق، لازم است که تابع سرعت جریان رزین معین شود. از این رو با جای‌گذاری معادله (۱۳) در معادله دارسی برای جریان‌های یک بعدی به شکل زیر:

$$u = \frac{K}{\mu}\frac{\partial p}{\partial r} \qquad (۲۸)$$

و با استفاده از معادله‌های (۲۴) و (۲۵)، معادله (۲۹) برای سرعت جریان رزین برحسب پارامتر ضخامت بی‌بعد حاصل می‌شود:

$$u(r,s) = -\frac{k\breve{E}}{4\mu(1-\varphi_0)^2} \times \frac{(\varphi_0 + \frac{p_i - p_\circ}{\breve{E}})^4 - \varphi_0^4}{r\ln(s/R_i)\left(1-\varphi_0 + \sqrt[4]{(\varphi_0 + \frac{p_i - p_\circ}{\breve{E}})^4 - \left[(\varphi_0 + \frac{p_i - p_\circ}{\breve{E}})^4 - \varphi_0^4\right]\frac{\ln(r/R_i)}{\ln(s/R_i)}}\right)} \qquad (۲۹)$$

www.SID.ir

Archive of SID

اکنون با به کارگیری معادله (۲۹) و استفاده از تعریف سرعت جبهه جریان، معادله (۳۰) به دست می‌آید:

$$u|_{r=s} = \varphi_0 \frac{ds}{dt} = -\frac{k\breve{E}((\varphi_0 + \frac{p_i - p_\circ}{\breve{E}})^4 - \varphi_0^{\,4})}{4\mu(1-\varphi_0)^2 s \ln(s/R_i)} \qquad (۳۰)$$

از آن‌جا که سرعت تغییرات ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده نسبت به زمان کم و کند است، بنابراین انتظار می‌رود که معادله (۳۰) از دقت بالایی برخوردار بوده و از حل آن تابع پیش‌روی جبهه جریان برحسب زمان حاصل می‌شود. از این‌رو، با حل معادله دیفرانسیل (۳۰)، معادله (۳۱) به دست می‌آید:

$$t(s) = \frac{\mu\varphi_0(1-\varphi_0)^2(2s^2\ln(\frac{s}{R_i}) - (s^2 - R_i^{\,2}))}{k\breve{E}((\varphi_0 + \frac{p_i - p_\circ}{\breve{E}})^4 - \varphi_0^{\,4})} \qquad (۳۱)$$

بررسی صحت محاسبات انجام شده

بر اساس مطالعات انجام شده توسط مؤلفان و با توجه به عدم وجود داده‌های حاصل از آزمایش در مراجع، در این مقاله به منظور بررسی صحت محاسبات انجام شده، معادلات حاصل در حالتی خاص بررسی شد. این حالت خاص، مرحله پرشدن قالب‌های صلب در فرایندهای RTM سنتی است. در این حالت، ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده، در مرحله تزریق ثابت باقی می‌ماند. این واقعیت را می‌توان با اعمال شرط بی‌نهایت بودن سفتی فشاری الیاف پیش‌شکل داده شده (E)، در معادله‌های مربوط اعمال کرد. بدین منظور، با استفاده از معادله‌های (۲۵)، (۲۶) و (۲۹) معادله‌های زیر به دست می‌آید:

$$\lim_{E\to\infty} h(r,s) = h_0 = \text{const.} \qquad (۳۲)$$

$$\lim_{E\to\infty} p(r,s) = p_i - (p_i - p_o)\frac{\ln(r/R_i)}{\ln(s/R_i)} \qquad (۳۳)$$

$$\lim_{E\to\infty} u(r,s) = -\frac{k\varphi_0^{\,3}}{\mu(1-\varphi_0)^2}\frac{(p_i - p_\circ)}{r\ln(s/R_i)} \qquad (۳۴)$$

جای‌گذاری معادله‌های (۹) و (۲۳) برای مدل نفوذپذیری کازنی - کارمن در معادله (۳۴) چنین نتیجه می‌دهد:

$$\lim_{E\to\infty} u(r,s) = -\frac{K}{\mu}\frac{(p_i - p_\circ)}{r\ln(s/R_i)} \qquad (۳۵)$$

با توجه به این که در فرایندهای RTM سنتی، از قالب‌های نسبتاً صلب استفاده می‌شود، انتظار می‌رود که ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده، همواره ثابت و برابر مقدار اولیه، h_0، باشد. معادله (۳۲) به خوبی صحت این مطلب را تأیید می‌کند.

با دقت در معادله‌های (۳۳) و (۳۴)، دیده می‌شود که این معادله‌ها عیناً با معادله‌های ارائه شده برای توزیع فشار و سرعت جریان رزین در تحلیل‌های انجام شده برای مدل‌سازی مرحله پرشدن فرایندهای RTM سنتی یکسان است [۱۲]. هم‌چنین، با محاسبه حد تابع موقعیت جبهه جریان رزین بر حسب زمان از معادله (۳۱)، معادله (۳۶) به دست می‌آید:

$$\lim_{E\to\infty} t = \frac{\mu(1-\varphi_0)^2(2s^2\ln(\frac{s}{R_i}) - (s^2 - R_i^{\,2}))}{4k\varphi_0^{\,2}(p_i - p_\circ)} \qquad (۳۶)$$

جای‌گذاری معادله‌های (۹) و (۲۳) در معادله (۳۶)، چنین نتیجه می‌دهد:

$$\lim_{E\to\infty} t = \frac{\mu\varphi_0 R_i^{\,2}}{4K(p_i - p_\circ)}(1 + (\frac{s}{R_i})^2(2\ln(\frac{s}{R_i}) - 1)) \qquad (۳۷)$$

معادله (۳۷) عیناً با معادله ارائه شده در مرجع ۱۲ برای پیش‌بینی پیش‌رفت جریان در قالب‌های نسبتاً صلب در فرایندهای RTM سنتی یکسان است. بنابراین، معادلات به دست آمده در این پژوهش که برای قالب‌های نیمه انعطاف‌پذیر پایه‌گذاری شده است، با ساده‌سازی برای قالب‌های صلب، به شکل معادلات و روابط موجود قبلی در می‌آید.

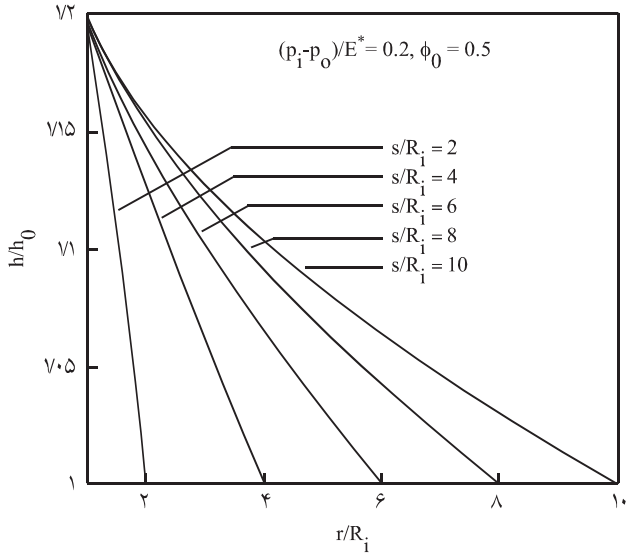
مطالعات مروری

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، در قالب‌گیری مواد کامپوزیتی به روش فرایندهای RTM اصلاح‌شده جدید، از ابزارهای انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود. این مسئله سبب تأثیر اختلاف فشار بر الیاف پیش‌شکل داده شده و در نتیجه تغییر ضخامت آن طی فرایند تزریق می‌شود. در شکل ۲ نمودار تغییرات پارامتر ضخامت بی‌بعد الیاف پیش‌شکل داده شده برحسب راستای شعاعی و به ازای فواصل متفاوت جبهه جریان از روزنه تزریق نشان داده شده است.

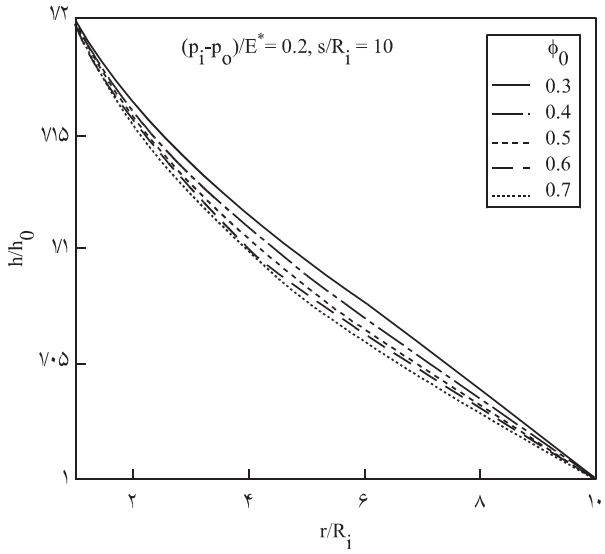
با دقت در این شکل دیده می‌شود که بیشترین ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده مربوط به اطراف روزنه تزریق رزین و کمترین مقدار آن مربوط به محل جبهه جریان است. به وضوح مشخص است که این مقدار کمینه ضخامت در محل جبهه جریان و بخش‌های خشک

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲ - تغییرات ضخامت بی‌بعد در راستای پیش‌روی رزین به ازای چند طول جریان مختلف.



شکل ۳ - تغییرات ضخامت بی‌بعد در راستای پیش‌روی رزین به ازای مقادیر مختلف نسبت تخلخل الیاف.

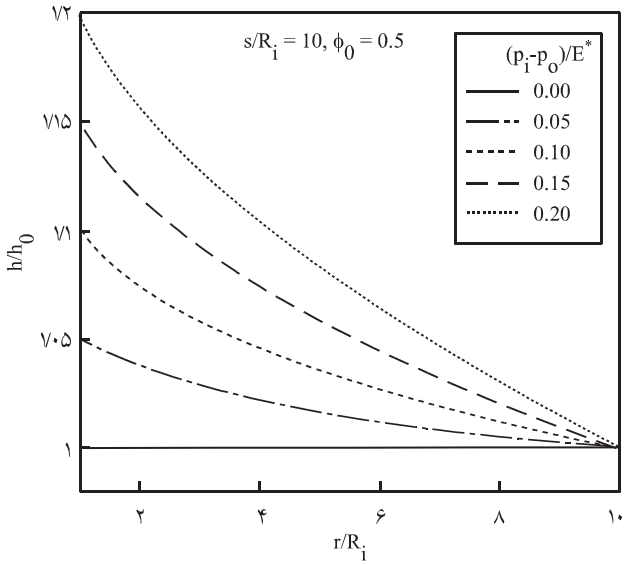
الیاف یکسان است. در این شکل دیده می‌شود که ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده، همواره از مقدار بیشینه خود در اطراف روزنه تزریق تا محل جبهه جریان کاهش می‌یابد. با پیش‌رفت جبهه جریان، ضخامت الیاف افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تغییرات ضخامت نسبت به راستای شعاعی، در اطراف روزنه تزریق شدیدتر از سایر بخش‌هاست و در نزدیکی محل جبهه جریان تقریبا خطی است.

در شکل ۳، اثر نسبت تخلخل الیاف پیش‌شکل داده شده بر تغییرات ضخامت آن در راستای شعاعی جریان رزین دیده می‌شود. با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که استفاده از الیاف با کسر حجمی بیشتر، سبب افزایش نسبی ضخامت در تمام بخش‌های قطعه می‌شود. این موضوع سبب کاهش حالت غیرخطی تغییرات ضخامت قطعه کامپوزیتی تولیدی و نزدیک شدن به حالت یکنواخت‌تر می‌شود.

در شکل ۴ می‌توان اثر پارامتر بی‌بعد فشار تزریق را بر تغییرات ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده در راستای پیش‌روی جریان رزین مشاهده کرد.

در این شکل به خوبی دیده می‌شود که با کاهش مقدار این پارامتر، ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده در همه نقاط آن به طور نسبی کاهش یافته و تغییرات ضخامت قطعه کامپوزیتی حالت یکنواخت‌تری می‌یابد. این مسئله نشان‌دهنده افزایش ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده به دلیل افزایش فشار تزریق در مرحله پرشدن است که پدیده نامطلوبی محسوب می‌شود، چرا که این مسئله سبب کاهش دقت تولید و ایجاد خطای هندسی قطعه کامپوزیتی می‌شود.

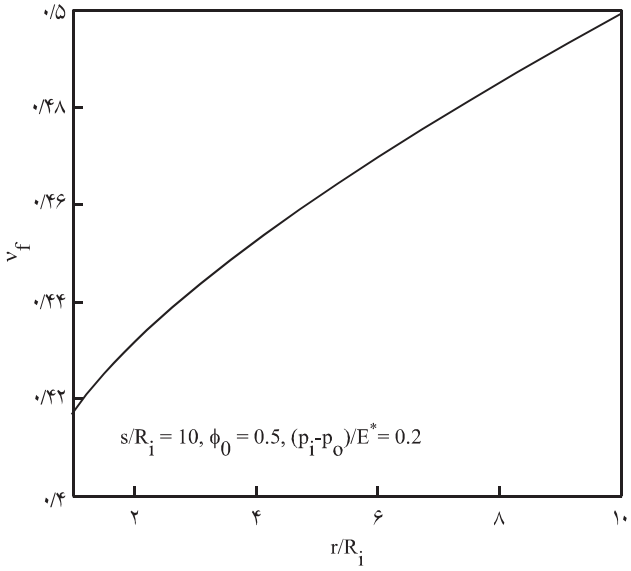
نکته مهم دیگری که از نمودارهای این شکل نتیجه می‌شود، اثر سفتی الیاف پیش‌شکل داده شده بر تغییرات ضخامت قطعه کامپوزیتی است. در این شکل دیده می‌شود که افزایش سفتی الیاف پیش‌شکل داده شده، تغییرات ضخامت قطعه را کاهش می‌دهد. به نحوی که با افزایش این پارامتر، در حالت حدی، ضخامت قطعه تولید شده یکنواخت می‌شود.



شکل ۴ - تغییرات ضخامت بی‌بعد در راستای شعاعی پیش‌روی رزین به ازای مقادیر مختلف پارامتر فشار تزریق بی‌بعد.

www.SID.ir

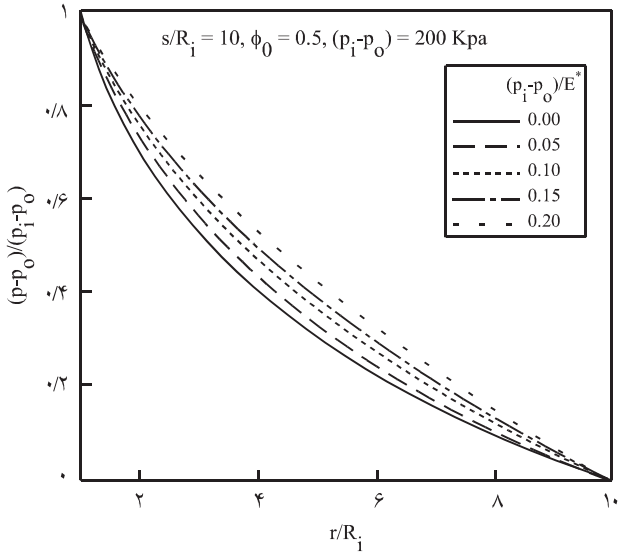
Archive of SID



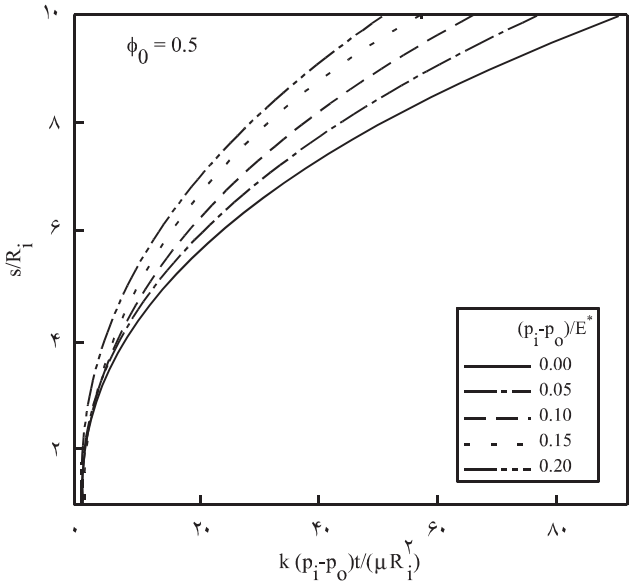
شکل ۵ - تغییرات کسر حجمی الیاف در راستای شعاعی پیش‌روی رزین.

این ویژگی، مربوط به قالب‌گیری با ابزارهای صلب RTM سنتی است.

همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، کسر حجمی الیاف از مقدار کمینه در محل روزنه تزریق تا موقعیت جبهه جریان افزایش می‌یابد. بنابراین، همواره کمترین کسر حجمی الیاف در اطراف روزنه تزریق اتفاق می‌افتد. این پدیده با آن چه که پیش‌تر در باره نحوه تغییر ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده ذکر شد، قابل توجیه است.



شکل ۶ - توزیع فشار رزین در راستای شعاعی جریان به ازای مقادیر مختلف پارامتر فشار تزریق بی‌بعد.



شکل ۷ - زمان پیش‌روی جبهه جریان رزین در مرحله تزریق به ازای مقادیر مختلف پارامتر فشار تزریق بی‌بعد.

در شکل ۶، نمودارهای توزیع فشار رزین نسبت به راستای پیش‌روی جریان از محل روزنه تزریق تا جبهه جریان نشان داده شده است، که هرکدام مربوط به یک مقدار پارامتر فشار تزریق بی‌بعد است. با دقت در این نمودارها مشاهده می‌شود که افزایش اختلاف فشار تزریق نسبت به فشار مکش در روزنه‌های تخلیه، سبب افزایش مقدار فشار در راستای پیش‌روی آن می‌شود. این مسئله برای حالتی که انعطاف‌پذیری اجزا افزایش یابد، نیز اتفاق می‌افتد.

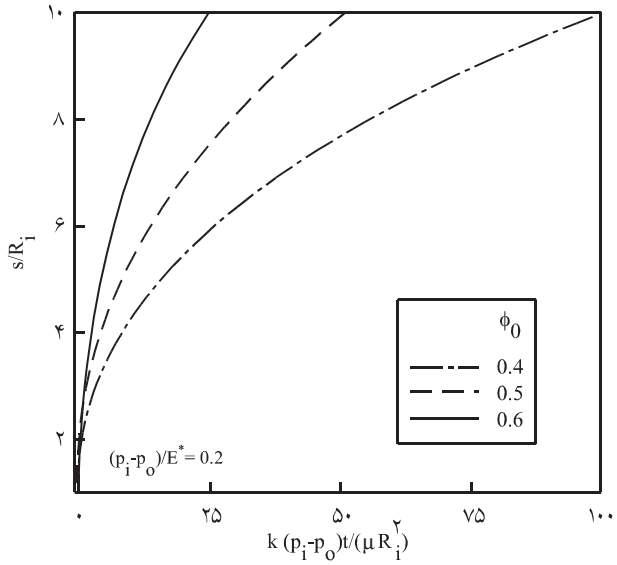
به منظور بررسی رفتار پیش‌روی رزین در مرحله پرشدن الیاف پیش‌شکل داده شده، در شکل ۷، نمودار موقعیت جبهه جریان برحسب زمان، به ازای مقادیر متفاوت پارامتر فشار تزریق بی‌بعد ترسیم شده است.

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، رزین با بیشترین سرعت در طول تزریق، وارد الیاف پیش‌شکل داده شده می‌شود و با پیش‌رفت جبهه جریان به تدریج از سرعت آن کاسته می‌شود، به نحوی که جریان رزین در انتهای مرحله قالب‌گیری، کمترین سرعت را دارد. اما این کاهش سرعت، در ابتدای مرحله قالب‌گیری بیشتر از هر زمان دیگر است.

نکته دیگری که از نمودارهای این شکل حاصل می‌شود، کاهش مدت زمان مرحله پرشدن، با افزایش اختلاف فشار تزریق نسبت به فشار مکش در خروجی‌هاست که در عمل مشکلاتی را به همراه دارد. اما مهم این است که افزایش انعطاف‌پذیری قالب‌های مورد استفاده در فرایند قالب‌گیری به روش RTM اصلاح‌شده، سبب کاهش چشم‌گیری در مدت زمان فاز پرشدن می‌شود، بدون آن که نیازی به فشار زیاد تزریق باشد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۸ ـ زمان پیش روی جبهه جریان در الیاف پیش شکل داده شده به ازای مقادیر مختلف نسبت تخلخل الیاف.

این مسئله امکان بهره گیری از ابزارهای قالب ارزان تر را مهیا می سازد که مسلماً باعث کاهش هزینه تولید قطعه می شود. هم چنین احتمال وقوع پدیده های نامطلوبی از جمله شسته شدن الیاف در مرحله تزریق از بین می رود. از آن جا که در سالیان اخیر تلاش های زیادی برای افزایش سرعت تولید کامپوزیت ها انجام شده است، بنابراین، استفاده از فرایندهای قالب گیری انتقال رزین جدید با ابزارهای انعطاف پذیر، گامی مؤثر برای افزایش سرعت تولید است.

اما همان طور که قبلاً گفته شد، نباید کاهش کیفیت ناشی از انعطاف پذیری زیاد قالب های مزبور را از نظر دور داشت.

با دقت در شکل ۸ نیز مشاهده می شود که کاهش کسر حجمی الیاف، یا افزایش نسبت تخلخل آن، سبب کاهش زمان پرشدن می شود. همان طور که در نمودارهای این شکل دیده می شود، استفاده از الیاف پیش شکل داده شده با تراکم الیاف زیاد، زمان چرخه را بیش از حد معمول افزایش می دهد، اما از آن جا که در قالب گیری به روش RTM از الیاف پیش شکل داده شده با نسبت حجمی الیاف کم استفاده می شود، زمان قالب گیری به طور نسبی چندان طولانی نیست.

نتیجه گیری

تا به امروز اصلاحات مختلفی روی مواد و فرایند تولید کامپوزیت ها به روش RTM در راستای بهبود فرایند و حذف پدیده های نامطلوب آن، بهبود کیفیت تولید قطعات کامپوزیتی و افزایش سرعت تولید فرایند انجام شده است. یکی از مهم ترین شکل های اصلاحی فرایند RTM، روش قالب گیری با انتقال رزین به کمک خلاء و پوسته قالب انعطاف پذیر است. در این مقاله، برای نخستین بار معادلات حاکم بر روش مزبور در مرحله پرشدن الیاف پیش شکل داده شده برای فرایند تزریق فشار ثابت شعاعی، به شکل تحلیلی حل شده است. از آن جا که در فرایندهای واقعی برای تولید قطعات کامپوزیتی کاربردی از روزنه های تزریق متعدد استفاده می شود، بنابراین، تحلیل جریان شعاعی رزین از محل روزنه تزریق به داخل الیاف پیش شکل داده شده و عوامل اثرگذار بر آن اهمیت ویژه ای دارد. از جمله مهم ترین نتایج حاصل از تحلیل انجام شده می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- استفاده از پوسته قالب انعطاف پذیر سبب می شود، اختلاف فشار بر الیاف پیش شکل داده شده اثر گذاشته و در نتیجه ضخامت آن در طول فرایند تزریق تغییر کند.
- بیشترین ضخامت الیاف پیش شکل داده شده مربوط به اطراف روزنه تزریق رزین و کمترین مقدار آن مربوط به محل جبهه جریان است.
- با پیش روی جبهه جریان، ضخامت الیاف پیش شکل داده شده در همه بخش های آن افزایش می یابد.
- افزایش کسر حجمی الیاف، سبب افزایش ضخامت الیاف پیش شکل داده شده در تمام بخش های آن می شود. این موضوع سبب یکنواخت تر شدن تغییرات ضخامت قطعه تولیدی در حوالی روزنه های تزریق می شود.
- کسر حجمی الیاف از مقدار کمینه در محل روزنه تزریق تا موقعیت جبهه جریان افزایش می یابد.
- افزایش انعطاف پذیری ابزارهای مورد استفاده در فرایند قالب گیری به روش RTM اصلاح شده سبب کاهش قابل ملاحظه مدت زمان فاز پرشدن و در نتیجه افزایش سرعت تولید می شود.
- استفاده از الیاف پیش شکل داده شده با تراکم زیاد سبب افزایش زمان چرخه تولید می شود.

مراجع

1. Advani S.G., Bruschke M.V., and Parnas R.S., *Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing,* Elsevier Science, Amsterdam, 465-515, 1994.
2. Poter K., *Resin Transfer Moulding,* Chapman & Hall, London, 1-141, 1997.
3. Bruschke M.V. and Advani S.G., A Numerical Approach to

www.SID.ir

Archive of SID

Model Non-isothermal Viscous Flow through Fibrous Media with Free Surfaces, *Int. J. Numer. Meth. Fluid,* **19**, 575-603, 1994.

4. Kang M.K., Simulation of Mold Filling Process During Resin Transfer Molding, *J. Mater. Proc. Manuf. Sci.,* **3**, 297-313, 1995.
5. Velten K., Quantitative Analysis of the Resin Transfer Molding Process, *J. Compos. Mater.,* **32**, 1865-1892, 1998.
6. Cai Z., Simplified Mold Filling Simulation in Resin Transfer Molding, *J. Compos. Mater.,* **26**, 2606-2630, 1992.
7. Yeagley H., RTM on A Diet, *CF Comp. Fabric.,* **12**, 24-27, 2002.
8. Yalvac S., Cohen A., and Pollard M., A Review of Resin Transfer Molding Process-Part 1: Preform Characterization Techniques, *Proceedings of the First International Conference on Transport Phenomena in Processing,* Hawaii, 1183-1193, 1992.
9. Yalvac S., Cohen A., and Pollard M., A Review of Resin Transfer Molding Process-Part 2: Mold Filling Simulation, *Proceedings of the First International Conference on Transport Phenomena in Processing,* Hawaii, 1194-1202, 1992.
10. Fasihi Dastjerdi A. and Beheshty M.H., Determination of Injection Port and Vent Locations of Hollow Tubes by RTM; Experimental and Computer Simulation, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (in Persian),* **13**, 201-210, 2001.
11. Fasihi Dastjerdi A., Beheshty M.H., and Rahimi H., A Theoretical and Experimental Study of the Mould Filling Time in Resin Transfer Moulding, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (in Persian),* **14**, 3-10, 2001.
12. Cai Z., Analysis of Mold Filling in RTM Process, *J. Compos. Mater.,* **26**, 1310-1338, 1992.
13. Yoon M.K., Baidoo J., Gillespie J.W., and Heider D., Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) Process Incorporating Gravitational Effects: A Closed-form Solution, *J. Compos. Mater.,* **39**, 2227-2242, 2005.
14. Lopatnikov S., Simacek P., Gillespie J., and Advani S.G., A Closed-Form Solution to Describe Infusion of Resin under Vcuum in Deformable Fibrous Porous Media, *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.,* **12**, S191-S204, 2004.
15. Li J., *Modeling, Design and Control of Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) for Thickness Variation Reduction,* PhD thesis Florida State University College of Engineering, USA, 1-168, 2006.
16. Song Y.S., Mathematical Analysis of Resin Flow through Fibrous Porous Media, *Appl. Compos. Mater.,* **13**, 335-343, 2006.
17. Robitaille F. and Gauvin R., Compaction of Textile Reinforcements for Composites Manufacturing I: Review of Experimental Results, *Polym. Compos.,* **19**, 198-216, 1998.
18. Matsudaira M. and Qin H., Features and Mechanical Properties of a Fabric's Compressional Property, *J. Text. Inst.,* **86**, 476-486, 1995.
19. Pearce N. and Summerscales J., The Compressibility of a Reinforcement Fabric, *Compos. Manuf.,* **6**, 15-21, 1995.
20. Saunders R.A., Lekakou C., and Bader M.G., Compression and Microstructure of Fiber Plain Woven Cloths in the Processing of Polymer Composites, *Composites, Part A,* **29**, 443-454, 1998.
21. Saunders R.A., Lekakou C., and Bader M.G., Compression in the Processing in the Polymer Composites. Part 1: A Mechanical and Microstructural Study for Different Glass Fibrics and Resins, *Compos. Sci. Technol.,* **59**, 983-993, 1999.
22. Chen B., Cheng A.H.D., and Chou T.W., A Nonlinear Compaction Model for Fibrous Preforms, *Composites, Part A,* **32**, 701-707, 2001.
23. Chen B., Lang E.J., and Chou T.W., Experimental and Theoretical Studies of Fabric Compaction Behavior in Resin Transfer Molding, *Mater. Sci. Eng., Part A,* **317**, 188-196, 2001.
24. Hammond V.H., Loos A.C., Dexter H.B., and Hasko G.H., *Verification of a Two-Dimensional Infiltration Model for the Resin Transfer Molding Process,* MS Thesis, Center for Composite Materials and Structures, Blacksburg Virginia, USA, 1-186, 1993.
25. Soltani F., Geometry-based Modeling of the Mold Filling Process Using Neural Networks, Stevens Institute of Manufacturing Engineering, New Jersey, USA, 1-178, 2000.
26. Carman P.C., Fluid Flow through Granular Beds, *Trans. Inst. Chem. Eng.,* **15**, 150-166, 1937.
27. Sullivan R.R., Further Study of The Flow of Air through Porous Media, *J. Appl. Phys.,* **12**, 503-508, 1941.
28. Gebart B.R., Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM, *J. Compos. Mater.,* **26**, 1100-1133, 1992.
29. Bruschke M.V. and Advani S.G., Flow of Generalized Newtonian Fluids Across A Periodic Array of Cylinders, *J. Rheol.,* **37**, 479-498, 1993.

www.SID.ir