



جریان رزین داخل الیاف پیش شکل داده شده در فرایند قالب گیری انتقالی رزین به کمک خلاء با ابزارهای انعطاف پذیر

محمود مهرداد شکریه*، سید رسول آتشی پور

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

دریافت: ۸۷/۷/۲۲، پذیرش: ۸۷/۶/۱۱

یکی از روش های ساخت قطعات کامپوزیتی، فرایند قالب گیری انتقالی رزین به کمک خلاء است که زیرمجموعه قالب گیری انتقالی رزین است. با توجه به پیش رفت صنعتی این فرایند، روش های اصلاحی مختلفی برای بهبود فرایند و افزایش سرعت تولید پیشنهاد شده است. در این میان استفاده از قالب های با نیمه انعطاف پذیر و نیمه دیگر صلب از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این مقاله به منظور بررسی نحوه گسترش رزین از روزنه تزریق به داخل بستر الیاف، معادلات حاکم بر مرحله پرشدن الیاف پیش شکل داده شده در قالب های 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.

واژه های کلیدی

کامپوزیت پلیمری،
قالب گیری انتقالی رزین به کمک خلاء،
ابزار انعطاف پذیر،
الیاف پیش شکل داده شده، فراورده

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

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

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 قالب‌گیری انتقالی رزین (resin transfer molding, RTM) است که زیر مجموعه قالب‌گیری 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 جهت‌گیری 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 شکل‌گیری 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 هم‌چنین کوتاه بودن زمان آماده‌سازی فرایند، امکان تولید یک مرحله‌ای قطعات کپسول‌مانند و هم‌چنین امکان وارد کردن هر نوع اشیای جاداده شده در مرحله تولید قطعات و امکان تولید یک پارچه‌سازه‌های 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 نظر گرفتن معادلات انتقال گرما و مدل‌های مربوط به واکنش پخت تحلیل کرد [۳-۶].

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 هم‌چنین 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 آوردند.

مطالعات تجربی و تحلیلی بسیار کمی در ارتباط با مدل‌سازی مرحله تزریق رزین و تخمین زمان پرشدن در فرایند RTM اصلاح شده با تجهیزات خلاء و پوسته قالب انعطاف‌پذیر وجود دارد [۱۴-۱۶]. 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 بر آن اهمیت ویژه‌ای دارد. از این رو، در مقاله حاضر پس از تکمیل معادلات حاکم بر فرایند اصلاح شده 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

الیاف پیش شکل داده شده بیان کرد:

$$\sigma_{33} = E(h)|\epsilon| = E(h) \left(\frac{h^* - h}{h^*} \right) \quad (2)$$

که در آن h^* ضخامت اولیه الیاف پیش شکل داده شده ای است که هنوز داخل قالب قرار داده نشده اند. تنها در این حالت است که تنش فشاری الیاف صفر است. براین اساس، h^* حداکثر ضخامت الیاف پیش شکل داده شده است. با توجه به انتخاب ضخامت h_0 به عنوان مبنای محاسبات، لازم است که در تمام معادله ها، 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 پیش شکل داده شده برای ایجاد ضخامت h_0 چنین به دست می آید:

$$\sigma_{33}|_{h=h_0} = p_{atm} - p_0 \quad (3)$$

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

$$h^* = \left(\frac{E}{E_0} \right) h_0 \quad (4)$$

که در آن E سفتی فشاری الیاف پیش شکل داده شده و E_0 پارامتر ویژه سفتی الیاف است. این پارامتر به شکل زیر تعریف شده است:

$$\bar{E} = E - (p_{atm} - p_0) \quad (5)$$

با جای گذاری h^* از معادله (۴) در معادله (۲) و استفاده از معادله (۱)، معادله (۶) به دست می آید:

$$p - p_0 = \bar{E}(\bar{h} - 1) \quad (6)$$

که در آن \bar{h} پارامتر بی بعد ضخامت است و به شکل معادله (۷) تعریف می شود:

به فرایند قالب گیری انتقال رزین به کمک خلاء (vacuum assisted resin transfer molding, VARTM) با قالب های قدیمی بر روابط حاصل، عینا پاسخ های مربوط به این نوع فرایند قابل دست یابی است.

معادله های حاکم بر روش RTM اصلاح شده

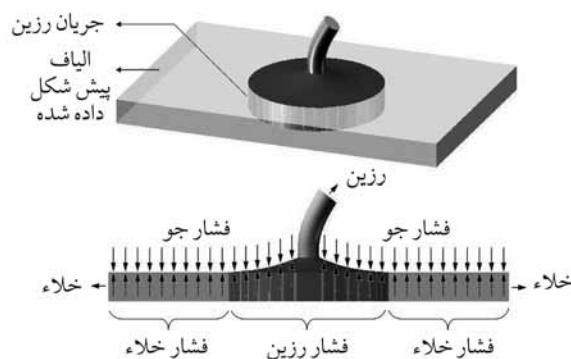
فرایندی که امروزه با عنوان RTM شناخته می شود، شکل اصلاح شده با بهره گیری از خلاء و پوسته قالب انعطاف پذیر است. در این فرایند، برخلاف نیمه صلب کف قالب، نیمه رویی انعطاف پذیر است، به نحوی که تغییرات فشار ناشی از تزریق رزین یا فشار جو، سبب فشردگی الیاف پیش شکل داده شده می شود. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، پس از آن که الیاف پیش شکل داده شده درون قالب قرار داده شد، خلاء از راه کیسه های موجود در گوشه های آن اعمال شده و در اثر اختلاف فشار داخل و فشار جو، الیاف پیش شکل داده شده تا مقدار کمینه ضخامت فشرده می شود. این ضخامت با h_0 نشان داده می شود و فرض می شود 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 می یابد. به تدریج با پیش روی جبهه جریان، از مقدار فشردگی الیاف پیش شکل داده شده کاسته می شود. با توجه به شکل ۱، می توان معادله های زیر را برای فشار رزین (p)، فشار مکش خلاء (p_0)، فشار جو (p_{atm}) و تنش نرمال فشاری الیاف پیش شکل داده شده (σ_{33}) بیان کرد:

$$p + \sigma_{33} = p_{atm} \quad \text{ناحیه تر} \quad (1)$$

$$p_0 + \sigma_{33} = p_{atm} \quad \text{ناحیه خشک}$$

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



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

چنین، \vec{v} و \vec{q} 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 بر حسب ضخامت، به شکل زیر به دست می آید:

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \bar{E} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2 \quad (13)$$

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

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{h}(r, \theta, t) K(\bar{h})) \frac{\partial \bar{h}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} (\bar{h}(r, \theta, t) K(\bar{h})) \frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta} = \frac{\mu}{\bar{E}} \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \quad (14)$$

حل معادلات حاکم

با توجه به سرعت کند تغییرات ضخامت الیاف پیش شکل داده شده و هم چنین ضریب کوچک μ/\bar{E} ، می توان با دقت خوبی از جمله آخر معادله حاکم (۱۴) در مقایسه با سایر جملات آن صرف نظر کرد. بنابراین، برای تحلیل جریان های شعاعی رزین در قالب های افقی، با صرف نظر از جمله مزبور، می توان معادله (۱۴) را در حالت متقارن محوری به شکل زیر ساده کرد:

$$\frac{1}{r} \left(r \bar{h}(r, t) K(\bar{h}(r, t)) \bar{h}_r(r, t) \right)_r = 0 \quad (15)$$

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

$$\int_{\bar{h}(R_i, t)}^{\bar{h}(r, t)} \bar{h} K(\bar{h}) d\bar{h} = C(t) \ln\left(\frac{r}{R_i}\right) \quad (16)$$

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 می شود، مناسب تر است و معمولاً در قالب گیری به روش RTM استفاده می شود [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 می شود:

$$p|_{r=R_i} = p_i \quad (17)$$

$$\bar{h} = h/h_0 \quad (7)$$

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

همان طور که پیش تر گفته شد، با تغییر ضخامت الیاف پیش شکل داده شده، نسبت تخلخل آن نیز تغییر می کند. با فرض ثابت باقی ماندن مقدار الیاف در هر سطح مشخص از الیاف، می توان کسر حجمی الیاف (v^f) را به ازای هر ضخامت از الیاف پیش شکل داده شده به کمک معادله (۸) بیان کرد:

$$v^f h = v_0^f h_0 \quad (8)$$

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:

$$\phi + v^f = 1 \quad (9)$$

با ترکیب معادله های (۸) و (۹)، نسبت تخلخل الیاف پیش شکل داده شده بر حسب تابع ضخامت بی بعد، چنین به دست می آید:

$$\phi = 1 - (1 - \phi_0)/\bar{h} \quad (10)$$

لوپاتیتیکوف و همکاران [۱۴]، معادله زیر را برای تحلیل فرایند RTM اصلاح شده در مرحله پر شدن الیاف پیش شکل داده شده پیشنهاد کردند:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left((\phi_0 + \bar{h} - 1) \frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left((\phi_0 + \bar{h} - 1) \frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x_2} \right) = \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \quad (11)$$

معادله حاکم (۱۱)، بر مبنای مدل جریان داری برای محیط های متخلخل [۱،۳] است که با معادلات زیر بیان می شود:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \phi \vec{v}) + \frac{\partial (\rho \phi)}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

$$\vec{v} = - \frac{[K(\phi)]}{\mu} (\vec{\nabla} p - \rho \vec{g})$$

که در آن ρ و μ به ترتیب چگالی و گرانروی رزین و t زمان است. هم

$$K_{11}(\bar{h}) = k \frac{(\bar{h} - (1 - \varphi_0))^3}{\bar{h}(1 - \varphi_0)^2} \quad (24)$$

اکنون با جای گذاری معادله (24) در معادله (22) و محاسبه انتگرال های مربوط و ساده سازی، در نهایت ضخامت الیاف پیش شکل داده شده، به عنوان تابعی از دو متغیر محل جبهه جریان و فاصله از مرکز روزنه تزریق، به شکل زیر حاصل می شود:

$$\bar{h}(r, s) = 1 - \varphi_0 + 4 \sqrt{\left(\varphi_0 + \frac{P_i - P_o}{\bar{E}} \right)^4 - \left[\left(\varphi_0 + \frac{P_i - P_o}{\bar{E}} \right)^4 - \varphi_0^4 \right] \frac{\ln(r/R_i)}{\ln(s/R_i)}} \quad (25)$$

جای گذاری معادله (25) در معادله های (6) به تابع توزیع فشار درون الیاف پیش شکل داده شده به شکل زیر می انجامد:

$$\bar{p}(r, s) = 4 \sqrt{\left(\varphi_0 + \frac{P_i - P_o}{\bar{E}} \right)^4 - \left[\left(\varphi_0 + \frac{P_i - P_o}{\bar{E}} \right)^4 - \varphi_0^4 \right] \frac{\ln(r/R_i)}{\ln(s/R_i)}} - \varphi_0 \quad (26)$$

که در آن پارامتر بی بعد فشار چنین تعریف می شود:

$$\bar{p} = (p - p_o) / \bar{E} \quad (27)$$

به منظور یافتن تابع مکان جبهه جریان برحسب زمان حین تزریق، لازم است که تابع سرعت جریان رزین معین شود. از این رو با جای گذاری معادله (13) در معادله داری برای جریان های یک بعدی به شکل زیر:

$$u = \frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (28)$$

و با استفاده از معادله های (24) و (25)، معادله (29) برای سرعت جریان رزین برحسب پارامتر ضخامت بی بعد حاصل می شود:

$$u(r, s) = -\frac{k\bar{E}}{4\mu(1 - \varphi_0)^2} \left(\varphi_0 + \frac{P_i - P_o}{\bar{E}} \right)^4 - \varphi_0^4 \times \left[1 - \varphi_0 + 4 \sqrt{\left(\varphi_0 + \frac{P_i - P_o}{\bar{E}} \right)^4 - \left[\left(\varphi_0 + \frac{P_i - P_o}{\bar{E}} \right)^4 - \varphi_0^4 \right] \frac{\ln(r/R_i)}{\ln(s/R_i)}} \right] \quad (29)$$

با استفاده از معادله (6) می توان مقدار ضخامت بی بعد الیاف پیش شکل داده شده در حوالی روزنه تزریق را به کمک معادله (18) محاسبه کرد:

$$\bar{h}|_{r=R_i} = 1 + \frac{P_i - P_o}{\bar{E}} \quad (18)$$

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

$$p|_{r=s} = p_o \quad (19)$$

با استفاده از معادله (6)، می توان شرط مرزی گفته شده را چنین بازنویسی کرد:

$$\bar{h}|_{r=s} = 1 \quad (20)$$

با اعمال شرط مرزی معادله (20) در معادله (16)، تابع مجهول چنین محاسبه می شود:

$$C(t) = -[\ln(s(t)/R_i)]^{-1} \int_1^{1 + \frac{P_i - P_o}{\bar{E}}} \bar{h} K(\bar{h}) d\bar{h} \quad (21)$$

جای گذاری معادله (21) در معادله (16) به معادله (22) می انجامد:

$$\int_{1 + \frac{P_i - P_o}{\bar{E}}}^{\bar{h}(r,t)} \bar{h} K(\bar{h}) d\bar{h} = -\frac{\ln(r/R_i)}{\ln(s/R_i)} \int_1^{1 + \frac{P_i - P_o}{\bar{E}}} \bar{h} K(\bar{h}) d\bar{h} \quad (22)$$

برای انجام ادامه مراحل حل مسئله، لازم است که از مدلی مناسب برای نفوذپذیری الیاف پیش شکل داده شده استفاده کرد. تاکنون مدل های مختلفی برای تشریح رفتار نفوذپذیری الیاف پیش شکل داده شده ارائه شده است [26-29]. ساده ترین معادله ارائه شده که هم خوانی خوبی با داده های حاصل از آزمایش دارد، معادله معروف کازنی - کارمن است که طبق آن، نفوذپذیری تنها تابعی از کسر حجمی الیاف و جنس آن است. این معادله به شکل زیر بیان می شود [26, 27]:

$$K_{11} = k \frac{(1 - v^f)^3}{(v^f)^2} \quad (23)$$

که در آن ضریب ثابت k به جنس الیاف بستگی دارد. با جای گذاری معادله های (9) و (10) در معادله (23)، رابطه بین نفوذپذیری و ضخامت بی بعد الیاف پیش شکل داده شده، به شکل معادله (24) به دست می آید:

$$\lim_{E \rightarrow \infty} u(r, s) = -\frac{K(p_i - p_o)}{\mu r \ln(s/R_i)} \quad (35)$$

با توجه به این که در فرایندهای RTM سنتی، از قالب های نسبتاً صلب استفاده می شود، انتظار می رود که ضخامت الیاف پیش شکل داده شده، همواره ثابت و برابر مقدار اولیه، h_0 باشد. معادله (32) به خوبی صحت این مطلب را تأیید می کند.

با دقت در معادله های (33) و (34)، دیده می شود که این معادله ها عیناً با معادله های ارائه شده برای توزیع فشار و سرعت جریان رزین در تحلیل های انجام شده برای مدل سازی مرحله پرشدن فرایندهای RTM سنتی یکسان است [12]. هم چنین، با محاسبه حد تابع موقعیت جبهه جریان رزین بر حسب زمان از معادله (31)، معادله (36) به دست می آید:

$$\lim_{E \rightarrow \infty} t = \frac{\mu(1 - \phi_0)^2 (2s^2 \ln(\frac{s}{R_i}) - (s^2 - R_i^2))}{4k\phi_0^2 (p_i - p_o)} \quad (36)$$

جای گذاری معادله های (9) و (23) در معادله (36)، چنین نتیجه می دهد:

$$\lim_{E \rightarrow \infty} t = \frac{\mu\phi_0 R_i^2}{4K(p_i - p_o)} (1 + (\frac{s}{R_i})^2 (2 \ln(\frac{s}{R_i}) - 1)) \quad (37)$$

معادله (37) عیناً با معادله ارائه شده در مرجع 12 برای پیش بینی پیش رفت جریان در قالب های نسبتاً صلب در فرایندهای RTM سنتی یکسان است. بنابراین، معادلات به دست آمده در این پژوهش که برای قالب های نیمه انعطاف پذیر پایه گذاری شده است، با ساده سازی برای قالب های صلب، به شکل معادلات و روابط موجود قبلی در می آید.

مطالعات مروری

همان طور که پیش تر گفته شد، در قالب گیری مواد کامپوزیتی به روش فرایندهای RTM اصلاح شده جدید، از ابزارهای انعطاف پذیر استفاده می شود. این مسئله سبب تأثیر اختلاف فشار بر الیاف پیش شکل داده شده و در نتیجه تغییر ضخامت آن طی فرایند تزریق می شود. در شکل 2 نمودار تغییرات پارامتر ضخامت بی بعد الیاف پیش شکل داده شده بر حسب راستای شعاعی و به ازای فواصل متفاوت جبهه جریان از روزنه تزریق نشان داده شده است.

با دقت در این شکل دیده می شود که بیشترین ضخامت الیاف پیش شکل 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 بخش های خشک

اکنون با به کارگیری معادله (29) و استفاده از تعریف سرعت جبهه جریان، معادله (30) به دست می آید:

$$u|_{r=s} = \phi_0 \frac{ds}{dt} = -\frac{k\bar{E}((\phi_0 + \frac{p_i - p_o}{\bar{E}})^4 - \phi_0^4)}{4\mu(1 - \phi_0)^2 s \ln(s/R_i)} \quad (30)$$

از آن جا که سرعت تغییرات ضخامت الیاف پیش شکل داده شده نسبت به زمان کم و کند است، بنابراین انتظار می رود که معادله (30) از دقت بالایی برخوردار بوده و از حل آن تابع پیش روی جبهه جریان بر حسب زمان حاصل می شود. از این رو، با حل معادله دیفرانسیل (30)، معادله (31) به دست می آید:

$$t(s) = \frac{\mu\phi_0(1 - \phi_0)^2 (2s^2 \ln(\frac{s}{R_i}) - (s^2 - R_i^2))}{k\bar{E}((\phi_0 + \frac{p_i - p_o}{\bar{E}})^4 - \phi_0^4)} \quad (31)$$

بررسی صحت محاسبات انجام شده

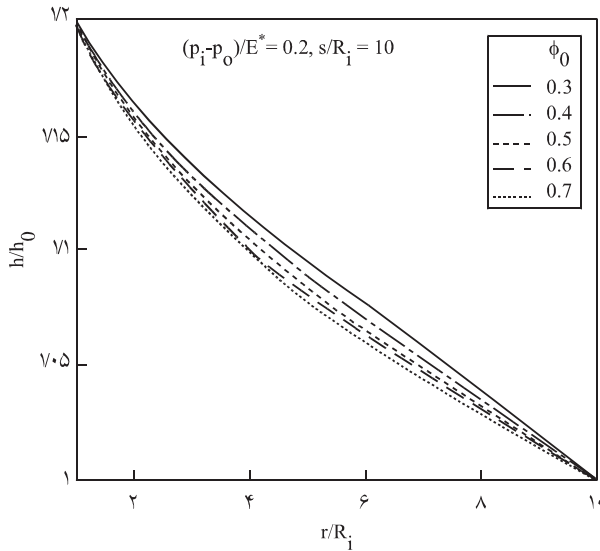
بر اساس مطالعات انجام شده توسط مؤلفان و با توجه به عدم وجود داده های حاصل از آزمایش در مراجع، در این مقاله به منظور بررسی صحت محاسبات انجام شده، معادلات حاصل در حالتی خاص بررسی شد. این حالت خاص، مرحله پرشدن قالب های صلب در فرایندهای RTM سنتی است. در این حالت، ضخامت الیاف پیش شکل داده شده، در مرحله تزریق ثابت باقی می ماند. این واقعیت را می توان با اعمال شرط بی نهایت بودن سفتی فشاری الیاف پیش شکل داده شده (E)، در معادله های مربوط اعمال کرد. بدین منظور، با استفاده از معادله های (25)، (26) و (29) معادله های زیر به دست می آید:

$$\lim_{E \rightarrow \infty} h(r, s) = h_0 = \text{const.} \quad (32)$$

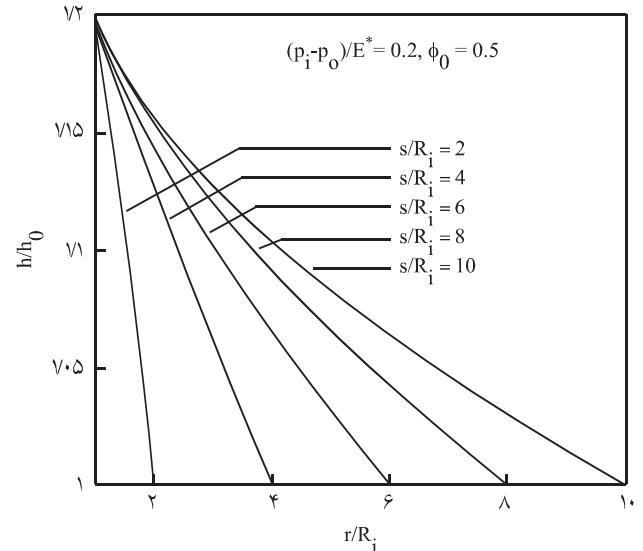
$$\lim_{E \rightarrow \infty} p(r, s) = p_i - (p_i - p_o) \frac{\ln(r/R_i)}{\ln(s/R_i)} \quad (33)$$

$$\lim_{E \rightarrow \infty} u(r, s) = -\frac{k\phi_0^3 (p_i - p_o)}{\mu(1 - \phi_0)^2 r \ln(s/R_i)} \quad (34)$$

جای گذاری معادله های (9) و (23) برای مدل نفوذپذیری کازنی - کارمن در معادله (34) چنین نتیجه می دهد:



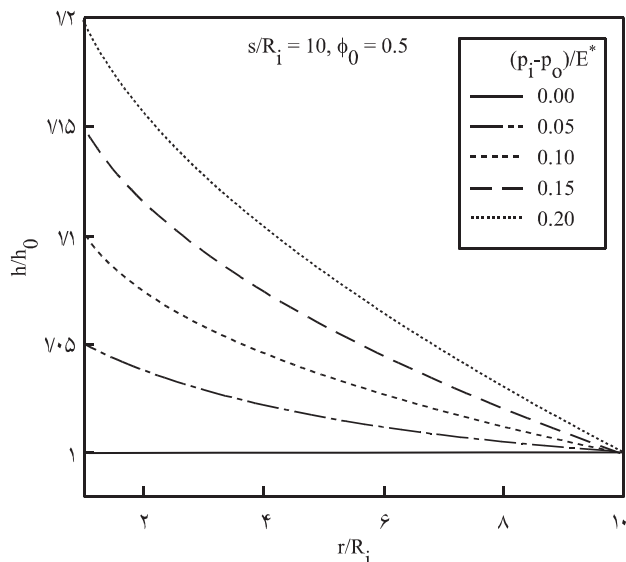
شکل ۳ - تغییرات ضخامت بی بعد در راستای پیش روی رزین به ازای مقادیر مختلف نسبت تخلخل الیاف.



شکل ۲ - تغییرات ضخامت بی بعد در راستای پیش روی رزین به ازای چند طول جریان مختلف.

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

الیاف یکسان است. در این شکل دیده می‌شود که ضخامت الیاف پیش شکل داده شده، همواره از مقدار بیشینه خود در اطراف روزنه تزریق تا محل جبهه جریان کاهش می‌یابد. با پیش رفت 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 تقریباً خطی است.

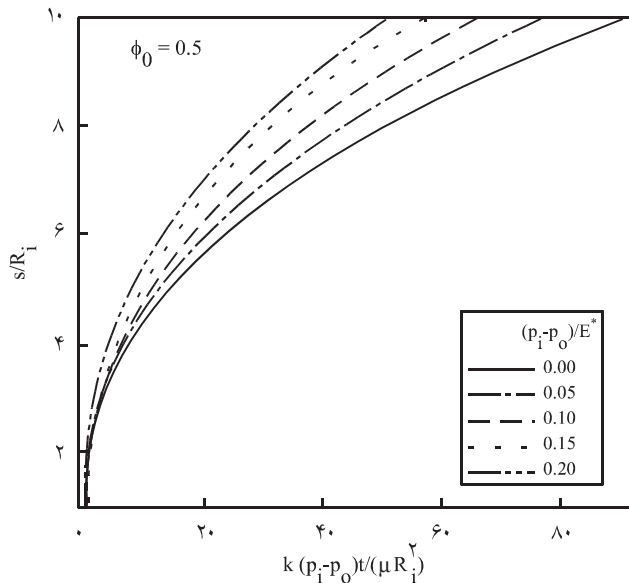


شکل ۴ - تغییرات ضخامت بی بعد در راستای شعاعی پیش روی رزین به ازای مقادیر مختلف پارامتر فشار تزریق بی بعد.

در شکل ۳، اثر نسبت تخلخل الیاف پیش شکل 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 یکنواخت تر می‌شود.

در شکل ۴ می‌توان اثر پارامتر بی بعد فشار تزریق را بر تغییرات ضخامت الیاف پیش شکل داده شده در راستای پیش روی جریان رزین مشاهده کرد.

در این شکل به خوبی دیده می‌شود که با کاهش مقدار این پارامتر، ضخامت الیاف پیش شکل 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 پیش شکل داده شده به دلیل افزایش فشار تزریق در مرحله پرشدن است که پدیده نامطلوبی محسوب می‌شود، چرا که این مسئله سبب کاهش دقت تولید

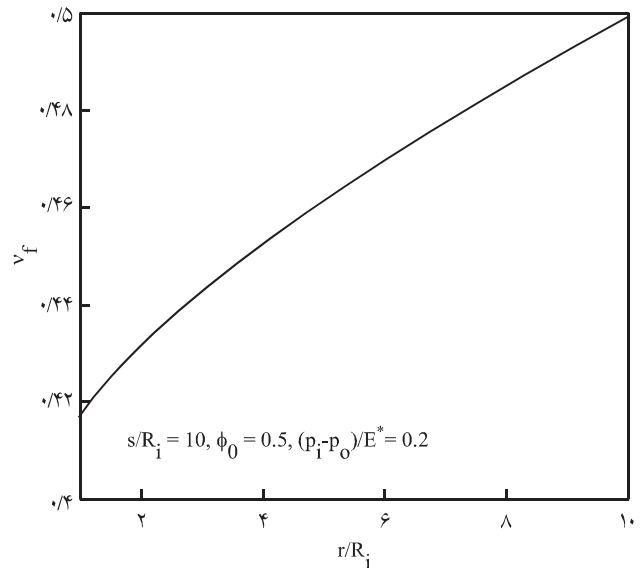


شکل ۷ - زمان پیش روی جبهه جریان رزین در مرحله تزریق به ازای مقادیر مختلف پارامتر فشار تزریق بی بعد.

در شکل ۶، نمودارهای توزیع فشار رزین نسبت به راستای پیش روی جریان از محل روزنه تزریق تا جبهه جریان نشان داده شده است، که هر کدام مربوط به یک مقدار پارامتر فشار تزریق بی بعد است. با دقت در این نمودارها مشاهده می شود که افزایش اختلاف فشار تزریق نسبت به فشار مکش در روزنه های تخلیه، سبب افزایش مقدار فشار در راستای پیش روی آن می شود. این مسئله برای حالتی که انعطاف پذیری اجزا افزایش یابد، نیز اتفاق می افتد.

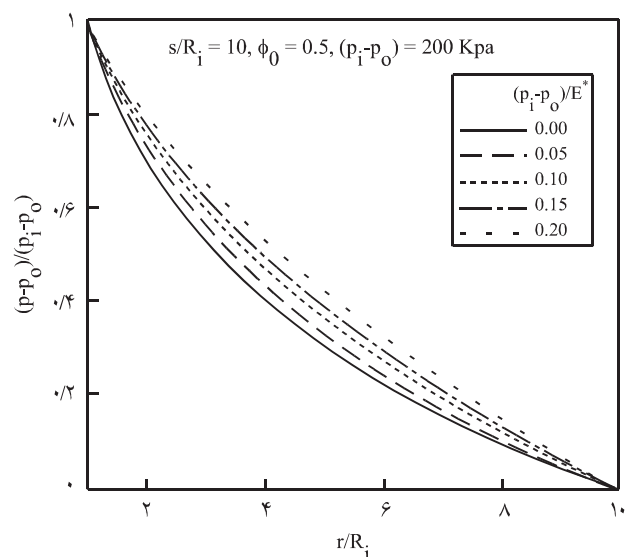
به منظور بررسی رفتار پیش روی رزین در مرحله پرشدن الیاف پیش شکل داده شده، در شکل ۷، نمودار موقعیت جبهه جریان بر حسب زمان، به ازای مقادیر متفاوت پارامتر فشار تزریق بی بعد ترسیم شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، رزین با بیشترین سرعت در طول تزریق، وارد الیاف پیش شکل داده شده می شود و با پیش رفت جبهه جریان به تدریج از سرعت آن کاسته می شود، به نحوی که جریان رزین در انتهای مرحله قالب گیری، کمترین سرعت را دارد. اما این کاهش سرعت، در ابتدای مرحله قالب گیری بیشتر از هر زمان دیگر است.

نکته دیگری که از نمودارهای این شکل حاصل می شود، کاهش مدت زمان مرحله پرشدن، با افزایش اختلاف فشار تزریق نسبت به فشار مکش در خروجی هاست که در عمل مشکلاتی را به همراه دارد. اما مهم این است که افزایش انعطاف پذیری قالب های مورد استفاده در فرایند قالب گیری به روش RTM اصلاح شده، سبب کاهش چشم گیری در مدت زمان فاز پرشدن می شود، بدون آن که نیازی به فشار زیاد تزریق باشد.



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

این ویژگی، مربوط به قالب گیری با ابزارهای صلب RTM سنتی است. همان طور که در شکل ۵ دیده می شود، کسر حجمی الیاف از مقدار کمینه در محل روزنه تزریق تا موقعیت جبهه جریان افزایش می یابد. بنابراین، همواره کمترین کسر حجمی الیاف در اطراف روزنه تزریق اتفاق می افتد. این پدیده با آن چه که پیش تر در باره نحوه تغییر ضخامت الیاف پیش شکل داده شده ذکر شد، قابل توجیه است.



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

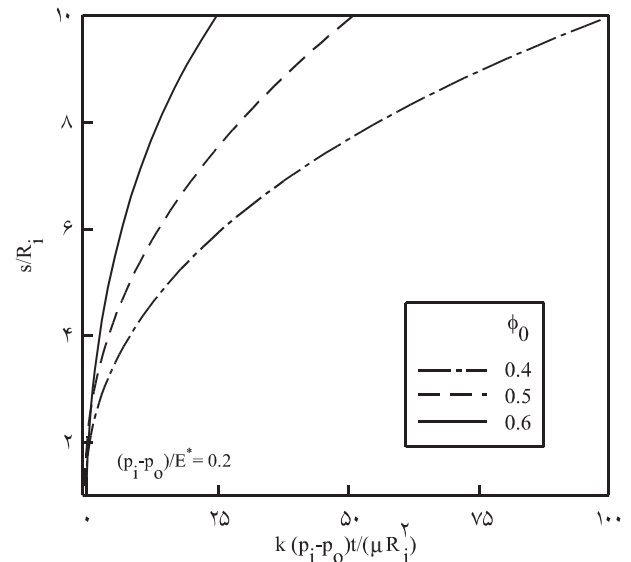
نتیجه گیری

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 روزه های تزریق متعدد استفاده می شود، بنابراین، تحلیل جریان شعاعی رزین از محل روزه 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 روزه 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 روزه های تزریق می شود.
- کسر حجمی الیاف از مقدار کمینه در محل روزه 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., Brusckhe 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. Brusckhe M.V. and Advani S.G., A Numerical Approach to



شکل ۸- 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.

- 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 Vacuum 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. Brusckhe M.V. and Advani S.G., Flow of Generalized Newtonian Fluids Across A Periodic Array of Cylinders, *J. Rheol.*, **37**, 479-498, 1993.