

بررسی نظری و تجربی زمان پر شدن قالب در فرایند قالبگیری انتقالی رزین

A Theoretical and Experimental Study of the Mould Filling Time in Resin Transfer Moulding Process

علی فصیحی دستجردی، محمدحسین بهشتی^{*}، حمید رحیمی

تهران، پژوهشگاه پلیمر ایران، صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

دریافت: ۷۹/۶/۶، پذیرش: ۷۹/۱۱/۹

چکیده

یکی از عوامل موثر بر اقتصادی شدن هر فرایند، کاهش زمان چرخه ساخت قطعات تولیدی است. فرایندهای ساخت کامپوزیتها عموماً چرخه قالبگیری طولانی دارند و زمان پر شدن قالب ناشی از ناهمبندی بر زمان فرایند و در نتیجه اقتصادی تر شدن آن بویژه فرایند RTM به عنوان یکی از روشهای مهم ساخت قطعات کامپوزیتی دارد. در این مقاله، چگونگی پر شدن قالب در فرایند RTM به صورت تجربی بررسی شده و نتایج آن با نتایج نظری حاصل از حل معادله داریسی به روش حل عددی اجزای محدود، که با استفاده از نرم افزار LCMF01 صورت گرفت، مقایسه شده است. همچنین، اثر برخی از متغیرهای فرایند نظیر فشار تزریق رزین، مقدار الیاف و گرانروی رزین بر زمان پر شدن قالب نیز ارزیابی شده است. نتایج حاصل نشان دهنده تطابق قابل قبول نتایج نظری و تجربی و مویده آن است که قبل از ساخت هر قالب و تعیین محل تزریق و سایر شرایط فرایند، بررسی متغیرهای فرایند به کمک مدلسازی با توجه به صرفه جویی در هزینه و وقت ضروری است.

واژه‌های کلیدی: قالبگیری انتقالی رزین، شبیه‌سازی پر شدن قالب، متغیرهای فرآوردن، چرخه قالبگیری، کامپوزیت

Key Words: resin transfer moulding, mould filling simulation, processing factors, moulding cycle, composite

مقدمه

را بیرون می‌راند و الیاف را آغشته می‌سازد. زمانی که پخت کامل شد، قالب باز شده و قطعه از درون آن برداشته می‌شود و فرایند برای تولید قطعه بعدی ادامه می‌یابد [۱، ۲]. مراحل مختلف این روش شکل‌دهی در شکل ۱ نشان داده شده است.

انتخاب مناسب متغیرهای فرایند علاوه بر تاثیر مستقیم بر کیفیت محصول، منجر به کاهش چرخه قالبگیری خواهد شد [۳، ۴]. علاوه بر دیگر متغیرهای فرایند، انتخاب مناسب محل یا محل‌های تزریق و خروج هوا در قالب نیز تاثیر اساسی بر کاهش زمان قالبگیری و اقتصادی‌تر شدن فرایند دارد [۵، ۶]. بررسی نظری فرایند پر شدن قالب

فرایند قالبگیری انتقالی رزین (RTM) فرایندی موثر برای ساخت انواع محصولات کامپوزیتی با هر درجه پیچیدگی و اندازه است. در این فرایند، ابتدا الیاف به ابعاد موردنظر بریده و پیش شکل داده می‌شود. سپس، تقویت کننده پیش شکل داده شده درون حفره قالب قرار می‌گیرد و قالب به کمک گیره یا پرس با فشار کم بسته می‌شود. رزین و عوامل پخت که از قبل مخلوط شده‌اند به وسیله دستگاه تزریق درون قالب تزریق می‌شود. رزین درون قالب پیش می‌رود، هوای درون قالب

^{*} مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: M.Beheshty@proxy.ipi.ac.ir

مجله علمی پژوهشی پلیمر ایران، سال چهاردهم، شماره اول، اردیبهشت ۱۳۸۰

رزین است.

برای قالبهای نازک بديهي است که تغير فشار (و بنا بر این تغيرات سرعت) در جهت ضخامت برابر صفر در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب معادله ۲ به صورت زیر خواهد بود [۲]:

$$\begin{pmatrix} U_x \\ U_y \end{pmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

که K_1 و K_2 به ترتیب نفوذپذیری ایاف در جهت ایاف و عمود بر آن است. θ زاویه محور مختصات مفروض (x,y) با محورهای مختصات اصلی (۱,۲) است. بنا بر این، معادله ۳ به صورت زیر برای جریان در حالت صفحه ای خواهد بود [۲]:

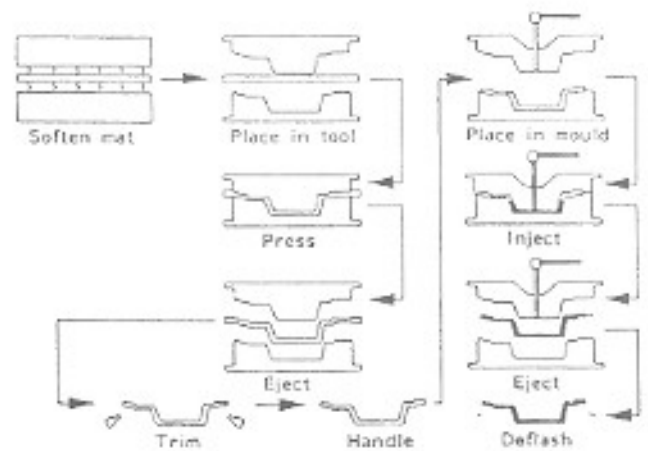
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_{xx}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_{xy}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_{xy}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_{yy}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (6)$$

بطور کلی، دو روش محاسبات عددی برای حل این معادلات و مدل سازی جبهه رزین می توان برگزید [۲,۷]. روش اول فن تقسیم بندی متحرک (moving grid) است که قسمت آغشته با رزین در فاصله زمانی مشخص تقسیم بندی می شود و روش دوم فن یا روش تقسیم بندی ثابت (fixed grid) است که تقسیم بندی در کل مدت زمان ثابت در نظر گرفته می شود. روش اول دقیقتر است، ولی در هر فاصله زمانی تقسیم بندی مجدد لازم است که کاری وقتگیر و برای قالبهای با چند محل تزریق و به همراه قطعات الحاقی کاری فوق العاده مشکل است.

برای شبیه سازی فرایند پر شدن قالب آگاهی از میزان نفوذپذیری ایاف (K) لازم است. از حل معادله دارسی در جریان با تزریق از مرکز و با دروازه دایره ای شکل معادله زیر حاصل می شود [۱۲]:

$$\left(\frac{r}{r_0} \right) = \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \left(2 \ln \left(\frac{r}{r_1} \right) - 1 \right) + 1 = \frac{4KP_0 t}{\phi \mu c r_1^2} \quad (7)$$

که r شعاع جبهه رزین در زمان t ، r_0 شعاع محل تزریق، ϕ میزان تخلخل و P_0 فشار تزریق است. با رسم منحنی $\left(\frac{r}{r_1} \right)$ بر حسب t و عبور بهترین خط، شیب آن (m) و نفوذپذیری ایاف بدست می آید.



شکل ۱- مراحل پیش شکل دهی ایاف و قالبگیری در فرایند قالبگیری انتقالی رزین [۲].

به دلایل متعدد از جمله کاهش زمان قالبگیری، کمک به طراحی جدید و بطور کلی صرفه جویی در هزینه و وقت، چه قبل از ساخت قالب و چه در حین فرایند، اهمیت اساسی دارد و درباره این موضوع بسیاری از پژوهشگران مطالعه کرده اند. [۱۰-۷] برای انجام چنین محاسباتی به اطلاعات زیادی از جمله شکل هندسی قالب و دروازه، فشار تزریق رزین، تغییرات گرانیوی رزین با زمان و سوانح پرش، میزان نفوذپذیری درصد حجمی ایاف لازم است [۵,۱۱].

معمولاً برای مدل سازی فرایند پر شدن قالب در فرایند RTM مواردی به عنوان پیش فرض در نظر گرفته می شود که در مقاله قبلی [۶] به آن اشاره شده است. با توجه به این فرضیات معادلات پیوستگی و حرکت (قانون دارسی) به صورت زیر خواهد بود [۲,۷]:

$$\nabla U = 0 \quad (1)$$

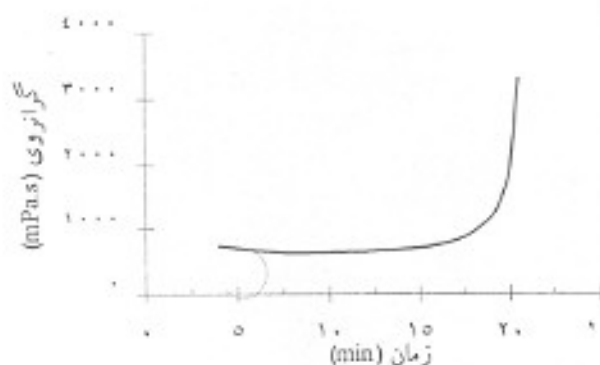
معادله حرکت از میان محیط متخلخل (قانون دارسی):

$$U = \frac{K}{\mu} \nabla P \quad (2)$$

با قرار دادن معادله ۲ در معادله ۱ خواهیم داشت:

$$\nabla \cdot \left(\frac{K}{\mu} \nabla P \right) = 0 \quad (3)$$

که در آن μ گرانیوی رزین، P فشار تزریق، K تسور نفوذپذیری و U سرعت جبهه رزین است. شرایط مرزی برای حل معادله ۳ عبارت است از $P = P_0$ در محل تزریق، $P = 0$ در جبهه رزین و در سطوح غیر قابل نفوذ $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ ، که $\frac{\partial P}{\partial n}$ مشتق در جهت نرمال خارج از صفحه مماس بر جبهه



شکل ۳- منحنی تغییرات گرانروی بر حسب زمان برای رزین پلی استر نوع ایزو.

- متیل اتیل کتون پروکسید و کبالت نفتات تجاری.

دستگاهها و روشها

از دستگاه ویسکومتر بروکفیلد مدل LVF مطابق استاندارد ASTM D2982 برای اندازه گیری گرانروی رزین و از روش استاندارد ASTM-D 2471 برای اندازه گیری زمان ژل شدن و دمای پخت رزین استفاده شد.

سیستم تزریق رزین

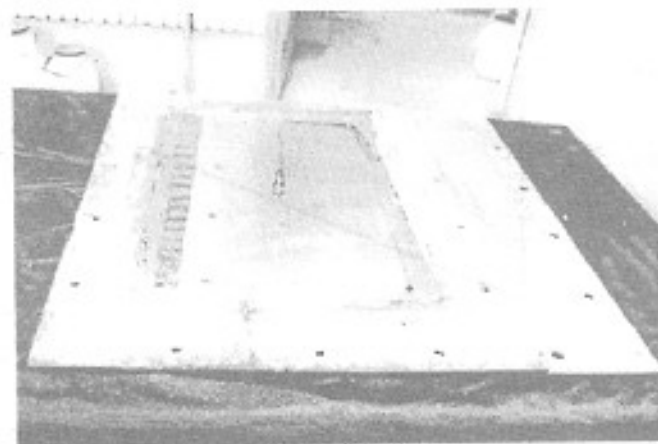
برای ساخت نمونه‌ها از سیستم تزریق یک مرحله‌ای استفاده شد که طراحی و ساخت آن در پژوهشگاه پلیمر ایران صورت گرفته است. این سیستم شامل یک مخزن هوای فشرده، سیستم مخزن رزین و اسکلت فلزی نگهدارنده مخزن و قالب است.

قالب

قالب مورد نظر برای ساخت قطعات به صورت دو کفه‌ای تهیه شد و شامل یک صفحه فولادی ضخیم به ضخامت 6 mm و یک صفحه کامپوزیتی بود که صفحه شیشه‌ای برای مشاهده جریان رزین در داخل آن تعبیه شده بود. هنگامی که دو کفه قالب با چند پیچ و مهره به هم بسته می‌شوند، محفظه‌ای به ابعاد 260 × 170 × 3 mm در بین این دو ایجاد می‌گردد. سوراخی در مرکز قالب برای تزریق رزین و چهار منفذ در پیرامون آن برای خروج هوا انتخاب شد. شکل ۲ نمایی از قالب مورد استفاده را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

شناسایی خواص مواد مصرفی برای شروع یک کار پژوهشی لازم است.



شکل ۲- قالب مورد استفاده.

$$K = \frac{m \rho_{\text{resin}} l}{\rho_p} \quad (8)$$

در یک چند لایه‌ای که تعداد n لایه از الیاف در آن بکار رفته است، میزان تخلخل عبارت است از [۱۲]:

$$\phi = 1 - \frac{\rho_{\text{resin}}}{\rho_f} \quad (9)$$

که n تعداد لایه‌ها، ρ_{resin} وزن واحد سطح الیاف، ρ_f چگالی الیاف و ϕ ضخامت چند لایه‌ای است. از نرم افزار LCMHot برای بررسی مدل سازی فرآیند در این کار مطالعاتی استفاده شد که جزئیات بیشتر در مورد آن در مقاله قبلی آورده شده است [۹].

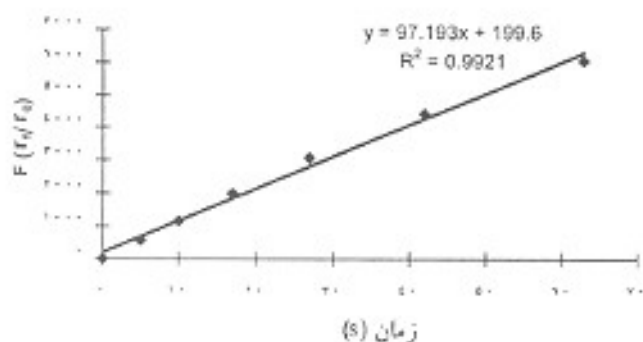
تجربی

مواد

مواد اولیه مورد استفاده در این کار پژوهشی عبارتند از:
 - الیاف شیشه به شکل نمد متقطع (CSM) از نوع E با وزن واحد سطح 470 g/m^2 .
 - رزین پلی استر نوع ایزو ۷۵۱۱۲۹ از شرکت صنایع شیمیایی بوشهر و

جدول ۱- ترکیب درصد رزین پلی استر سیرنشده (دمای محیط 24°C و زمان ژل شدن ۲۵ دقیقه است).

مقدار (g)	مواد
۱۰۰	رزین
۱	پروکسید
۰/۲	شتاب دهنده

شکل ۵- تغییرات $(\frac{F(t)}{F_0})$ بر حسب زمان.

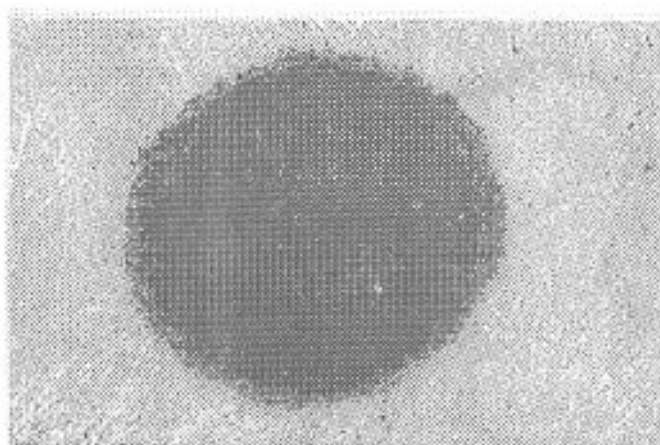
برای محاسبه نفوذپذیری الیاف از رزین پلی‌استر استفاده شد. گرانروی این رزین در محدوده وسیعی از سرعت‌های برش مختلف ثابت است و سیال رفتار نیوتونی دارد [۱۴]. میزان گرانروی برای رزین مورد استفاده در این آزمایش و در دمای کاربرد حدود $1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ است. با آزمایش‌های متعدد فاصله جبهه رزین از محل تزریق $(F(t))$ بر حسب زمان اندازه‌گیری شد و از آنجا $(\frac{F(t)}{F_0})$ معین گردید و طبق معادله ۷ شیب منحنی $(\frac{F(t)}{F_0})$ بر حسب زمان (۱) محاسبه شد که برابر $97/193$ بدست آمد. شکل ۵ تغییرات $(\frac{F(t)}{F_0})$ را بر حسب زمان نشان می‌دهد. فشار تزریق در این آزمایش 20 kPa و شعاع محل تزریق $0/25 \text{ cm}$ است. از این‌رو، نفوذپذیری الیاف برابر خواهد شد با:

$$K = \frac{m \rho_{\text{resin}}^2}{F P} = 6/21 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \quad (10)$$

شبیه‌سازی فرایند پرشدن قالب

پس از اعمال قلم و موم روی دو کفه قالب برای رهاپش قطعات قالبگیری شده، سه لایه الیاف سوزنی بی‌شکل داخل قالب قرار داده شد و قالب با چند پیچ و مهره محکم بسته شد. سپس، مخلوط رزین، پروکسید و شتاب‌دهنده با فشار 40 kPa تزریق گردید و زمان رسیدن جبهه رزین به نقاط مشخص قالب مشاهده و ثبت گردید. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

برای تحلیل فرایند پرشدن قالب با نرم‌افزار LCMFlot ابتدا شکل هندسی قالب ترسیم و به صورت اجزای مثلثی سه‌گانه تقسیم‌بندی شد. شکل ۶ نمایی از شبکه ایجاد شده در قالب و در حوالی محل تزریق را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از نرم‌افزار، معادله حرکت



شکل ۴- جبهه رزین لحظاتی پس از تزریق.

مهمترین خواص یک رزین شامل چگالی، عمر مفید، زمان ژل شدن و گرانروی است و خواص الیاف نیز شامل نفوذپذیری، چگالی، میزان تخلخل و وزن واحد سطح است.

با توجه به حداقل زمان مورد نیاز برای یک جرخه فرایند که برای فرار دادن الیاف درون حفره قالب، بستن آن و آماده شدن جهت تزریق لازم است، ترکیب درصد مناسبی از رزین، کاتالیزور (پروکسید) و شتاب‌دهنده معین شد (جدول ۱).

تغییرات گرانروی آمیزه رزین پلی‌استر (جدول ۱) بر حسب زمان در شکل ۳ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که گرانروی آمیزه رزین در مراحل ابتدایی (تقریباً قبل از دقیقه ۱۷) برای قالبگیری مناسب است. از این‌رو، قبل از این زمان، تزریق رزین باید پایان پذیرفته باشد.

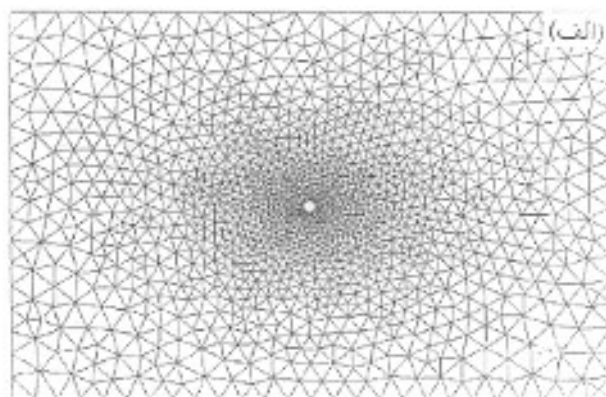
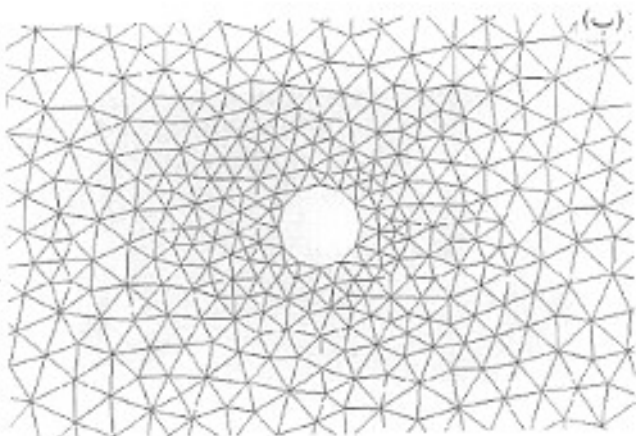
در بررسی خواص الیاف نیز ابتدا باید وزن واحد سطح را مشخص کرد. با آزمایش‌هایی که انجام شد وزن واحد سطح الیاف برابر 468 g/m^2 بدست آمد. در تزریق‌های اولیه مشخص شد که جبهه رزین طی تزریق دایره‌ای است و بنابراین الیاف مورد نظر دارای آرایش کاملاً بی‌نظم و خواص همسانند (شکل ۴).

میزان تخلخل الیاف وابسته به تعداد لایه‌های یکبار رفته در چند لایه‌ای است (معادله ۱۹). در این کار تحقیقاتی از سه لایه الیاف استفاده شد، بنابراین میزان تخلخل (ϕ) برابر است با:

$$\phi = 1 - 0/1828 = 0/8172$$

جدول ۲- زمان رسیدن جبهه رزین بر حسب فاصله معین از محل تزریق.

فاصله جبهه رزین از محل تزریق (cm)	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	پرشدن کامل قالب
زمان (s)	۳	۶	۱۱	۱۸	۲۱	۴۹	۶۶	۸۸	۱۱۸	۱۵۱	۱۷۱



شکل ۶- نمایی از شبکه ایجاد شده: (الف) نمای کلی قالب (تعداد المانها: ۲۸۸۴ عدد) و (ب) در حوالی محل تزریق.

قالبگیری موفق است و تغییر این متغیرها اثر مستقیم بر کیفیت محصول خواهد داشت. اما، در این مقاله اثر متغیرهای یاد شده بر چرخه قالبگیری و زمان پرشدن قالب بررسی می‌شود. در اینجا از میان عواملی که بر زمان پرشدن قالب موثر است، به سه متغیر اصلی یعنی فشار تزریق رزین، میزان الیاف و گرانیوی رزین پرداخته می‌شود.

اثر فشار تزریق رزین بر زمان پرشدن قالب

فشار تزریق رزین بر زمان پرشدن قالب اثر مستقیم دارد. برای ارزیابی اثر این متغیر بر زمان پرشدن قالب، چهار فشار ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ kPa انتخاب شد. در همه این حالتها، سایر شرایط فرایند از قبیل دمای محیط و رزین، که بر گرانیوی آمیزه اثر مستقیم دارد، ثابت است. روش کار بدین صورت است که پس از اعمال قلم و موم روی سطوح قالب و قرار دادن سه لایه از الیاف در داخل آن، قالب بسته می‌شود و آمیزه رزین، که از پیش آماده شده است، تحت فشارهای مشخص به درون قالب تزریق می‌شود. پس از خروج رزین از محلهای خروج هوا، جریان رزین قطع شده و زمان پرشدن قالب محاسبه می‌شود که نتایج آن در شکل ۷ ارائه شده است. همچنین با استفاده از نرم افزار LCMPlot

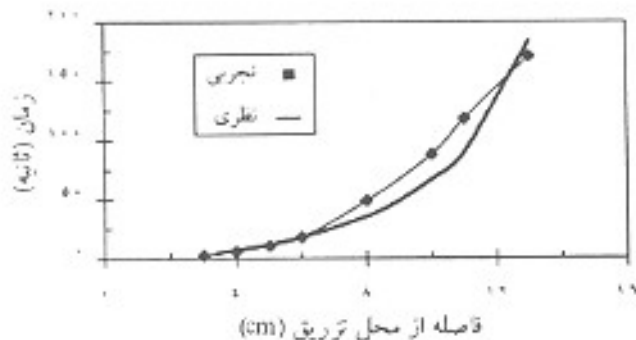
(قانون دارسی) با روش حل عددی اجزای محدود حل شد و جبهه پیش‌رونده رزین در قالب در زمانهای مختلف معین گردید. شرایط فرایند در جدول ۳ ارائه شده است. در شکل ۷ نتایج حاصل از پیش‌بینی نظری با مشاهدات تجربی آورده شده است که نشان دهنده تطابق خوب آن دو بویژه در مراحل ابتدایی است.

برای طراحی و ساخت قالب دانستن تغییرات فشار و میزان وسعت این نواحی لازم است. تغییرات فشار در قالب باعث تغییر در ضخامت قطعه بویژه در نواحی با فشار بالا و در نتیجه دقت ابعادی کمتر در آن نقاط و شستنوی الیاف خواهد شد. شکل ۸ این تغییرات را در طول قالب و در زمان پرشدن کامل آن نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که فشار در نزدیکی محل تزریق تغییرات بسیار زیادی دارد و با دور شدن از محل تزریق میزان آن بشدت کاهش می‌یابد و در گوشه‌های قالب (محلهای خروج هوا) به حداقل یا فشار اتمسفری کاهش پیدا می‌کند.

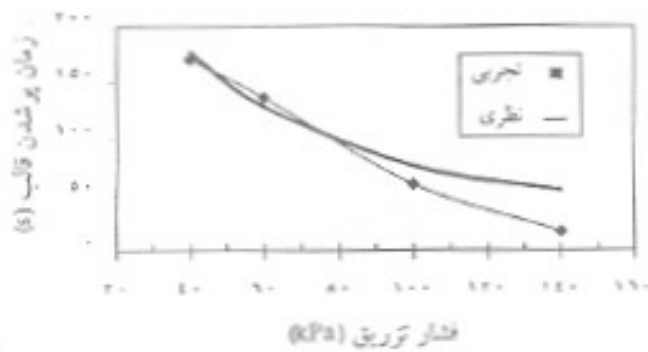
اثر متغیرهای فرایند بر زمان پرشدن قالب

بدیهی است که انتخاب مناسب متغیرهای فرایند تنها راه رسیدن به یک جدول ۳- مشخصات شرایط ورودی مواد و فرایند برای بررسی نظری با نرم افزار.

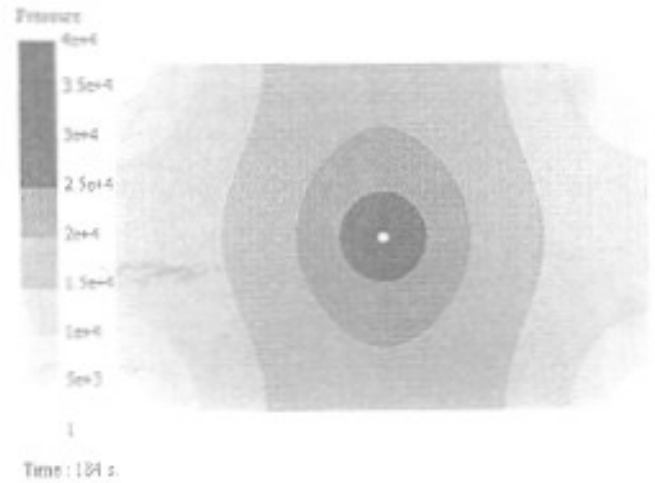
ویژگی	مقدار
دمای محیط (C)	۱۴
گرانیوی رزین (mPas)	۱۲۵۰
فشار تزریق (kPa)	۴۰
فشار جبهه رزین (Pa)	۰
نفوذپذیری الیاف (m ²)	$6/21 \times 10^{-9}$
ابعاد قالب (mm)	۲۶۰، ۱۷۰، ۳
قطر محل تزریق (mm)	۵



شکل ۷- فاصله جبهه رزین از محل تزریق بر حسب زمان.



شکل ۹- تغییرات زمان پرشدن قالب بر حسب فشار تزریق.



شکل ۸- تغییرات فشار در قالب در هنگام پرشدن.

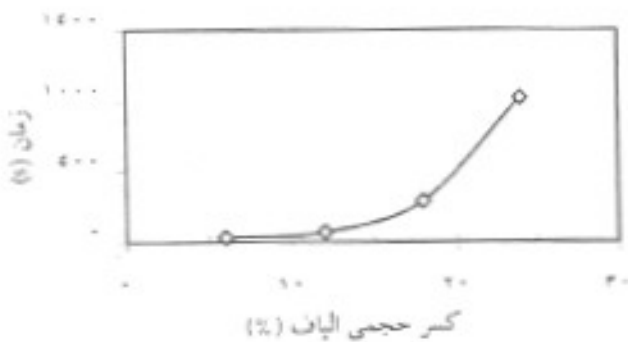
نواحی قطعه کاملاً خشک (dry spot) می‌ماند. از این رو، برای قالبگیری به روش RTM باید به تغییرات درصد الیاف در طول مسیر جریان رزین کاملاً توجه داشت و سعی در حذف آن با بی‌اثر کردن آن بر فرایند پرشدن قالب کرد.

برای بررسی نظری زمان پرشدن قالب بر حسب تغییرات مقدار الیاف آنگاهی از میزان نفوذپذیری الیاف (K) لازم است. اما، میزان نفوذپذیری الیاف خود با استفاده از اندازه‌گیریهای تجربی زمانهای پرشدن قالب حاصل می‌شود (معادلات ۷ و ۸). بنابراین، بدست آوردن زمان پرشدن قالب با استفاده از میزان نفوذپذیری الیاف که خود از زمان پرشدن قالب بدست می‌آید (بدون آنکه هیچ پارامتر دیگر فرایند، تغییری کرده باشد) کاری بیهوده است و بدیهی است که همان اعداد اول حاصل خواهد شد. اما، بدست آوردن میزان نفوذپذیری الیاف بر حسب تغییر میزان تخلخل الیاف برای بررسی سایر پدیده‌ها از جمله اثر گرانروی رزین بر زمان پرشدن قالب (متغیر مورد بحث در قسمت بعدی) لازم است. برای میزان تخلخل ۸۲ درصد میزان نفوذپذیری الیاف بطور دقیق اندازه‌گیری شد که نتایج آن در

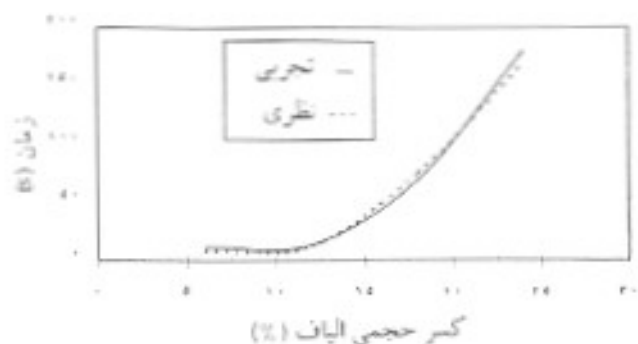
زمان پرشدن قالب بطور نظری نیز محاسبه شد که نتایج آن در شکل ۹ ارائه شده است. همان طور که این شکل نشان می‌دهد در فشار تزریق بالا، انحراف قابل ملاحظه‌ای بین نتایج نظری و تجربی وجود دارد. هرچند سرعت متوسط جبهه رزین طی پرشدن قالب زیاد نیست و بنابراین براساس مرجع ۱۴ گرانروی رزین در این محدوده سرعت تزریق تقریباً ثابت است، ولی در نزدیکی محل تزریق این میزان بسیار بیشتر است. به همین علت ممکن است رزین پلی‌استر رفتار غیرنیوتونی نشان دهد. علت دیگری نیز متصور است و آن اینکه چون فاصله بین الیاف بسیار کم است، افزایش سرعت برش منجر به ایجاد گرما و در نهایت کاهش گرانروی می‌شود و بدین علت قالب سریعتر پر خواهد شد.

اثر مقدار الیاف بر زمان پرشدن قالب

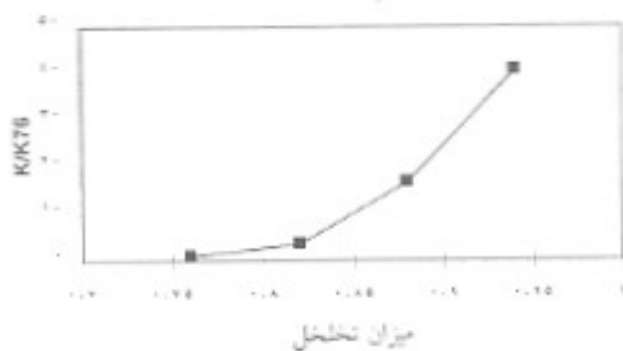
یکی دیگر از متغیرهای فرایند RTM، مقدار الیاف است. بدیهی است که افزایش مقدار الیاف منجر به کاهش نفوذپذیری و در نتیجه افزایش زمان پرشدن قالب خواهد شد. اما، این وابستگی به صورت خطی نیست. برای بررسی این منبسط از رزینی با گرانروی ۳۰۰۰ mPas استفاده شد. در این مرحله چند قالبگیری انجام شد و مقدار الیاف از یک تا چهار لایه تغییر کرد. نتایج تجربی این آزمایش در شکل ۱۰ ارائه شده است. چنانچه از این شکل پیداست با افزایش مقدار الیاف از ۳ لایه به چهار لایه (یعنی با افزایش تنها ۲۵ درصد وزنی الیاف)، زمان پرشدن قالب بیش از ۳ برابر افزایش یافته و از ۴/۸ دقیقه به حدود ۱۷ دقیقه رسیده است. بنابراین، اگر در نقاط مختلف الیاف پیش شکل داده شده مورد استفاده در قالبگیری تغییری در مقدار الیاف رخ دهد، مسیرهایی ایجاد می‌شود که رزین به علت کمتر بودن مقدار الیاف در آن مسیر و نفوذپذیری بیشتر، سریعتر از آن عبور می‌کند و در نتیجه بعضی از



شکل ۱۰- زمان پرشدن قالب بر حسب مقدار الیاف برای رزین پلی‌استر (P_{resin}=۳۰۰۰ mPas, μ=۸۰ kPa).



شکل ۱۲- زمان پرشدن قالب برحسب کسر حجمی الیاف برای رزین با گرانروی کم ($\sigma_{\text{ویز}} = 8 \text{ kPa}$ و $\sigma = 60 \text{ mPas}$)



شکل ۱۱- میزان نفوذپذیری بی‌بعد شده برحسب تخلخل (۵)

از آنجا که میزان ۲۴ درصد حجمی الیاف، درصد چندان زیاد برای ساخت قطعات کامپوزیتی نیست و در ضمن، قالب مورد استفاده شکلی کاملاً ساده با ابعادی نسبتاً کوچک دارد، از این رو بدون در نظر گرفتن خواص قطعات تولیدی و تنها با در نظر گرفتن زمان جرخه قالبگیری و اثر آن بر اقتصاد فرایند می‌توان نتیجه گرفت که اصولاً رزینهای با گرانروی زیاد برای این فرایند مناسب نیست. برای رفع این مشکل می‌توان از گرما دادن به عنوان بهترین راه حل برای کاهش گرانروی رزین بهره جست.

نتیجه‌گیری

بررسی نتایج تجربی و نظری وابستگی میزان نفوذپذیری الیاف به میزان تخلخل (شکل ۱۱) بیانگر آن است که تغییر اندک در میزان تخلخل باعث تغییرات زیادی در نفوذپذیری الیاف خواهد شد. از آنجا که تغییرات میزان نفوذپذیری الیاف باعث ایجاد مسیرهای جریان آسان و در نتیجه ساخت قطعات معیوب می‌گردد، از این رو برای ساخت قطعات کامپوزیتی به روش RTM باید به این مسئله توجه داشت و سعی در حذف و یا بی‌اثر کردن مسیرهای جریان آسان در فرایند پرشدن قالب کرد.

بررسی نتایج تجربی و نظری فرایند پرشدن قالب و مطالعه اثر متغیرهای فرایندی فشار تزریق رزین، میزان الیاف و گرانروی رزین بیانگر آن است که افزایش فشار تزریق، به کاهش شدید زمان پرشدن قالب منجر می‌شود. در فشارهای تزریق زیاد، کاهش زمان پرشدن قالب به دلیل کاهش گرانروی رزین. باز هم بیشتر خواهد شد و باعث اختلاف بین نتایج تجربی و نتایج نظری می‌شود.

تغییرات میزان الیاف، به تغییرات بسیار شدید در زمان پرشدن قالب منجر می‌شود (شکل ۱۲) و موید این مطلب است که تغییرات

قسمتهای قبل ارائه شده است. استفاده از عدد زمان پرشدن کامل قالب به تنهایی برای تعیین نفوذپذیری توام با اندکی خطاست که میزان این خطا در نتایج تجربی بسیار کمتر از پنج درصد است. طبق معادله داریسی ارتباط میزان تخلخل (ϕ) با نفوذپذیری الیاف (K) برابر است با:

$$K = \frac{A\phi}{\eta} \quad (11)$$

A ثابتی است که بستگی به مشخصات قالب و رزین دارد (معادله ۷). نمودار ارتباط نفوذپذیری با میزان تخلخل و زمانهای بدمت آمده از زمان پرشدن قالب (شکل ۱۰) رسم شد که نتایج آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. بنا بر این حالت نفوذپذیری برای تخلخل ۷۶ درصد در نظر گرفته شده است.

بررسی اثر گرانروی رزین بر زمان پرشدن قالب

افزایش دمای محیط با افزودن رقیق کننده‌های واکنش‌پذیر باعث کاهش گرانروی رزین خواهد شد. بدیهی است کاهش گرانروی رزین باعث پرشدن سریعتر قالب و کاهش حبابهای ریزحسب شده در داخل الیاف خواهد شد. برای بررسی اثر این متغیر بر زمان پرشدن قالب از رزین پلی‌استری استفاده شد که گرانروی آن در شرایط آزمایش 3000 mPas است. در این آزمایشها نیز تعداد لایه‌های الیاف بکار رفته در ساخت قطعات از یک تا چهار لایه تغییر می‌کند. شکل ۱۲ زمان پرشدن قالب را برای این شرایط نشان می‌دهد. برای بررسی زمان پرشدن به صورت نظری از مقدار عددی نفوذپذیری الیاف که در شکل ۱۱ ارائه شده است، استفاده شد. ملاحظه می‌شود که نتایج تجربی و نظری زمان پرشدن قالب تطابق قابل قبولی باهم دارند. از مقایسه شکلهای ۱۰ و ۱۲ مشاهده می‌شود که کاهش گرانروی از 3000 به 600 mPas در شرایط ۲۴ درصد حجمی الیاف، باعث کاهش زمان پرشدن قالب از حدود ۱۷ دقیقه به حدود ۳ دقیقه می‌شود.

۶- فصیحی دستجردی علی و بهشتی محمدحسین، تعیین محل‌های تریق و نقاط خروج هوای قطعات لوله‌ای شکل در فرایند RTM به روش تجربی و شبیه‌سازی، مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال سیزدهم، شماره ۵۰، زمستان ۱۳۷۹.

7. Golestanian H. and El-Gizawy A. S., Physical and Numerical Modeling of Mold Filling in Resin Transfer Moulding; *Polym. Comp.*; **19**, 4, 395-407, August 1998.
8. Trochu F., Gauvin R. and Gao D. M., Numerical Analysis of the Resin Transfer Moulding Process by the Finite Element Method; *Adv. Polym. Tech.*; **12**, 4, 329-42, 1993.
9. Kang M. K., Jung J. and Lee W. I., Analysis of Resin Transfer Moulding; Process with Controlled Multiple Gates Resin Injection; *Composites*; **31**, 5, 407-22, 2000.
10. Lin M. Y. and Hahn H. T., Resin Transfer Moulding Process Optimization; *Composites*; **31**, 4, 361-71, 2000.
11. Chen Y. E. and Stelson K. A., Prediction of Filling Time and Vent Locations for Resin Transfer Molds; *J. Comp. Mater.*; **31**, 11, 1141-61, 1997.
12. Carter E. J., Fell A. W., Griffin P. R. and Summerscales J., Data Validation Procedures for the Automated Determination of the Two-Dimensional Permeability Tensor of a Fabric Reinforcement; *Composites*; **27**, 4, 255-61, 1996.
13. Hayward J. S. and Harris B., Processing Factors Affecting the Quality of Resin Transfer Moulded; *Comp. Plast. Rubber Proc. Appl.*; **11**, 4, 191-98, 1989.
14. Gebart B. R., Permeability of Unidirectional Reinforcement for RTM; *J. Comp. Mater.*; **26**, 1100-33, 1992.

میزان تخلخل در الیاف پیش شکل داده شده بر روند و چگونگی پرشدن قالب اثر شدید دارد و تا حد امکان باید از این گونه تغییرات اجتناب کرد.

استفاده از رزینهای با گرانیوی زیاد منجر به افزایش بسیار زیاد زمان پرشدن قالب می‌شود. با توجه به میزان حداکثر الیاف مورد استفاده در این پژوهش (حدود ۲۴ درصد حجمی) که البته میزان چندان بالایی نیست و مشاهده افزایش بسیار شدید زمان پرشدن قالب می‌توان این گونه نتیجه گرفت که بطور کلی، رزینهای با گرانیوی زیاد برای این فرایند مناسب نیست.

با توجه به تطابق قابل قبول مشاهدات تجربی با نتایج نظری می‌توان نتیجه گرفت که قبل از شروع هر فعالیتی مدلسازی فرایند به دلیل صرفه‌جویی قابل ملاحظه در زمان و هزینه کاملاً ضروری بنظر می‌رسد.

مراجع

1. Johnson C. F., *Resin Transfer Moulding in Composite Materials Technology*, Mallick P. K. and Newman S. (Eds.), Hanser, New York, 103-76, 1990.
2. Rudd C. D., Long A. C., Kendall K. N. and Mangin C. G. E., *Liquid Moulding Technologies*; Wood head, Cambridge, England, 1-37, 1997.
3. Kendall K. N., Rudd C. D., Owen M. J. and Middleton V., Characterization of the Resin Transfer Moulding Process; *Comp. Manufac.*; **3**, 4, 235-49, 1992.
4. Yu H. W. and Young W. B., Optimal Design of Process Parameter for Resin Transfer Molding; *J. Composite Mater.*; **31**, 11, 1113-40, 1997.
5. Potter K.; *Resin Transfer Moulding*; Chapman & Hall, U.K., 1-141, 1997.