

تعیین محل‌های تزریق و خروج هوای قالب قطعات لوله‌ای شکل در فرایند RTM به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی

Determination of Injection Port and Vent Locations of Hollow Tubes by RTM-Experimental and Computer Simulation

علی فصیحی دستجردی، محمدحسین بهشتی*

بزرگسازان، مهندسی، مهندسی، ۱۳۹۶/۱۱۵

دریافت: ۱۳۹۶/۶/۷، پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۷

چکیده

یکی از فرایندهای شکل‌دهی کامپوزیتها که در سالهای اخیر توسعه قابل توجهی یافته و تحقیقات زیادی را به خود اختصاص داده است، فرایند قالبگیری انتقالی رزین است که از قابلیت‌های زیادی برای تولید قطعات کامپوزیتی پیچیده برخوردار است. با توجه به مزایای قابل توجه این فرایند استفاده از آن روز به روز گسترش می‌یابد. موفقیت تولید با این فرایند بستگی اساسی به طراحی مناسب قالب دارد و از مهمترین گزینه‌ها در طراحی و ساخت قالب، علاوه بر جنس و ساختار آن، تعیین محل یا محل‌های تزریق و خروج هواست. در این مقاله، پس از معرفی فرایند RTM و مزایای استفاده از آن، درباره چگونگی تعیین محل‌های مناسب تزریق و خروج هوا برای قطعه‌ای با شکل هندسی پیچیده که کاربردهای زیادی در صنایع هوا-فضا دارد به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی بحث می‌شود. همچنین، اثر مقدار الیاف مورد استفاده بر زمان پرشدن قالب، اثر زاویه قالب و تغییر ضخامت بررسی می‌گردد. نتایج حاصل بیانگر تطابق خوب نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی و اهمیت تعیین محل‌های مناسب تزریق و خروج هوا در تولید یک قطعه بدون نقص است.

واژه‌های کلیدی: قالبگیری انتقالی رزین، محل تزریق، محل خروج هوا، فرآوری، شبیه‌سازی کامپیوتری

Key Words: RTM, injection port, vent location, processing, computer simulation

مقدمه

فرایند قالبگیری انتقالی رزین (RTM) فرایندی نوپا و با قابلیت زیاد در ساخت محصولات کامپوزیتی است که در سالهای اخیر گام‌های اساسی در راه توسعه و بهبود آن برداشته شده است و هم اکنون از این روش برای تولید قطعات کوچک تا بسیار بزرگ استفاده می‌شود [۴-۱]. در این فرایند، ماده تقویت‌کننده به صورت خشک به ابعاد مورد نظر بریده

* مولف مسئول مکاتبات

یا به شکل مورد نظر پیش‌شکل‌دهی شده و درون حفره قالب قرار داده می‌شود. سپس، قالب بسته شده و توسط گیره یا پرس با فشار کم، محکم بسته نگاه داشته می‌شود. رزین درون قالب تزریق شده و ضمن خیس کردن تقویت‌کننده، هوای درون محفظه قالب را بیرون می‌راند و قالب را پر می‌کند. زمانی که پخت رزین کامل می‌گردد، قالب باز و قطعه از درون قالب برداشته می‌شود و فرایند برای تولید قطعه بعدی ادامه می‌یابد [۱، ۵، ۶]. شمایی از مجموعه کامل بکار رفته در این فرایند در شکل ۱

شدن آن می‌شود. از مواد مختلفی در ساخت قالبهای RTM استفاده می‌شود و همچنین، عوامل دیگری را باید در ساخت قالب، بویژه انتخاب محل مناسب تزریق در نظر گرفت که در مقاله‌ای دیگر بررسی شده است [۷].

معادلات حاکم بر فرایند RTM

دلایل متعددی وجود دارد که محققان و صنعتگران به مدلسازی فرایند قالبگیری انتقالی رزین و بررسی نظری آن روی آورده‌اند که از آن جمله می‌توان به دلایل زیر اشاره کرد [۸]:

- کمک به طراح برای پیدا کردن شرایط بهینه، از قبیل طراحی دروازه و غیره و

- کمک به طراحی شرایط جدید و بهینه کردن آنها.

تاکنون بعضی از شرایط و متغیرهای فرایند به کمک روابط تحلیلی یا نرم‌افزارها مدلسازی شده‌اند. این پدیده‌ها عبارتند از:

- محاسبه شکل جبهه رزین، سرعت و موقعیت آن با زمان و شکل هندسی و درصد حجمی الیاف موردنظر،

- محاسبه زمان پخت، زمان باز شدن قالب، دماهای قالب و قطعه در هر موقعیت و

- محاسبه آثار جمع شدگی، انبساط قالب در اثر گرما و تنشهای پسماند.

برای انجام چنین محاسباتی اطلاعات زیادی لازم است که عبارتند از [۸]:

- شکل هندسی قالب و دروازه،

- فشار تزریق رزین یا چگونگی توزیع سرعت جریان با زمان،

- منحنی گرانروی رزین با زمان، دما و آثار مواد دیگر (افزودنیها) بر سرعت برشی طی تزریق،

- سرعت و رفتار گرمایی قالب و انتقال گرما به رزین،

- نفوذپذیری منفذ به منفذ و میزان درصد حجمی الیاف در هر سه جهت عمود بر هم،

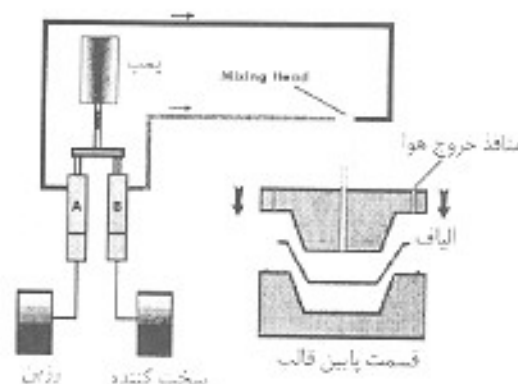
- کشش سطحی و زاویه ترشوندگی الیاف و رزین در هر شرایط دمایی و زمانی طی فرایند،

- سرعت واکنش، تولیدگرما، هدایت گرما از الیاف آغشته شده و تغییرات آن طی فرایند و

- تغییرات حجمی رزین در اثر تغییرات دما و شرایط پخت.

اندازه‌گیری و محاسبه تمام متغیرها کاری مشکل است، از این رو باید عواملی که از اهمیت بیشتری در طراحی و بررسی پدیده‌های خاص برخوردارند در نظر گرفت. در این مقاله به مطالعه جریان از درون تقویت کننده و بررسی معادلات حاکم پرداخته می‌شود.

بطور کلی، دو روش عمده برای پیش‌گویی زمان پر شدن قالب



شکل ۱- نمای کامل تجهیزات بکار رفته در فرایند RTM [۶]

نشان داده شده است. اگرچه مبانی این فرایند ساده بنظر می‌رسد و با وجود مزایای بیشمار آن مانند انتشار کمتر حلال بکار رفته در محیط و امکان ساخت قطعه‌ای با دقت ابعادی زیاد در حداقل زمان، استفاده از آن برای کاربران و صنعتگران به دلیل مشکلات فراوان محدود شده است. تنها در چند سال اخیر است که پیشرفتهای قابل ملاحظه‌ای در این زمینه صورت گرفته و این فرایند به روشی اقتصادی و قابل رقابت تبدیل شده است. این پیشرفتها شامل بهبود دستگاههای تزریق، طراحی بهتر قالبها، پیشرفت در ساخت تقویت کننده‌ها و فرمولبندی رزینها و درک بهتر چگونگی عمل فرایند است. مزایای عمده استفاده از این فرایند در مقاله‌ای دیگر ارائه شده است [۷].

در این فرایند محدودیتی برای نوع الیاف یا رزین مورد استفاده وجود ندارد. رزینهای مصرفی باید گرانروی کمی در محدوده $1000-10000$ CP داشته باشند. در صورتی که گرانروی رزین از این مقدار بیشتر باشد، می‌توان از گرما برای کاهش گرانروی استفاده کرد. درصد الیاف بکار رفته در این فرایند نیز نمی‌تواند چندان زیاد باشد و حداکثر به حدود 50 تا 60 درصد وزنی الیاف می‌توان دست یافت [۱]. فشار بستن قالب شدت وابسته به درصد الیاف است و نتایج مهمی در کل فرایند خواهد داشت. فشار بیش از حد، علاوه بر تاثیر در دقت ابعادی قالب منجر به جابه‌جایی الیاف (بویژه الیاف تک جهتی) در اثر جریان رزین خواهد شد [۸].

از دیگر اجزای مهم و اساسی فرایند، قالب است. قالب مهمترین بخش و به تعبیری قلب فرایند محسوب می‌شود. در گذشته تصور می‌شد که مهمترین قسمت فرایند، دستگاه تزریق رزین است. امروزه درست نبودن این نظر کاملاً ثابت شده است، زیرا با وجود مهم بودن سایر اجزای فرایند و همچنین اثر شگرف شرایط فراروش بر کیفیت قطعات تولیدی [۹] و خواص آنها [۱۰]، پذیرفته شده که مهمترین قسمت در فرایند، قالب است [۱۱، ۱۲]. فشار کم مورد نیاز برای تزریق رزین (حدود $2-4$ bar) سبب کاهش قیمت قالب و ساده‌تر

معادله ۷ به صورت زیر درمی‌آید:

$$U = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (9)$$

سرعت ماکروسکوپی عبارت است از سرعت جبهه رزین تقسیم بر میزان تخلخل:

$$V = \frac{U}{\phi} \quad (10)$$

با قرار دادن معادله ۹ در معادله ۸ خواهیم داشت:

$$\nabla \cdot \left(\frac{K}{\mu} \nabla P \right) = 0 \quad (11)$$

شرایط مرزی برای معادله ۱۱ عبارت است از $P=P_0$ در محل تزریق، $P=0$ در جبهه رزین و در سطوح نفوذناپذیر $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ که مشتق در جهت نرمال خارج از صفحه است.

در این مقاله، محلهای مختلف مناسب برای تزریق رزین و خروج هوا در قالب جهت شکل‌دهی یک قطعه پیچیده (لوله‌ای شکل غیرمستقیم) در فرایند RTM به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی بررسی می‌شود.

تجربی

مواد

مواد اولیه‌ای که در ساخت قطعات لوله‌ای شکل بکار گرفته شدند عبارتند از:

الیاف شیشه به شکل نمدی منقطع (CSM) از نوع E با وزن واحد سطح 470 g/m^2 از بازارهای داخلی و رزین پلی‌استر نوع ایزو ۷۵۱۱۲۹ از شرکت صنایع شیمیایی بوشهر.

دستگاهها

از دستگاه گرانروی-سنج بروکفیلد مدل LVF مطابق استاندارد ASTM-D 2982 برای اندازه‌گیری گرانروی رزین و برای ساخت نمونه‌ها از دستگاه تزریق یک مرحله‌ای ساخته شده در پژوهشگاه پلیر ایران استفاده شد.

روشها

دستگاه تزریق یک مرحله‌ای بکار رفته در ساخت نمونه‌ها شامل مخزن

و تعیین محلهای خروج هوا وجود دارد که عبارتند از [۱۳]:

- بکار بردن قواعد هندسی یا راه حل‌های تحلیلی محدوده که اغلب برای شکل‌های هندسی ساده کاربرد دارد.
- استفاده از شبیه‌سازی عددی.

روش اول سریعتر و در عین حال از دقت کمتری برخوردار است. روش دوم دارای دقت بیشتری است، ولی منابع محاسباتی متعدد لازم دارد [۱۲].

فرضیات

برای مدل‌سازی فرایند پرشدن قالب موارد زیر فرض می‌شود [۱۳]:

- ۱- حرکت رزین از میان تقویت کننده از قانون داریسی پیروی می‌کند.
- ۲- جبهه ماکروسکوپی بین مایع ورودی و گاز خروجی کاملاً نیز است، بدین معنی که هرگونه حاشیه جزئی خیس شده کوچک است (از جریان میکروسکوپی صرف‌نظر شده و تنها جریان ماکروسکوپی در نظر گرفته می‌شود).
- ۳- دمای قالب و سیال پرکننده طی پرشدن قالب ثابت است. اگرچه واکنشهای ششک‌های شدن رزین گرماده است، اما باید توجه داشت این واکنشها زمانی آغاز می‌شوند که قالب بطور کامل پر شده است، در نتیجه در نظر گرفتن جریان پرشدن قالب به صورت هم‌دما فرضی صحیح است.
- ۴- نیروی جاذبه در مقابل فشار پرکننده قالب قابل چشمپوشی است.
- ۵- فشار نسبی در نواحی آغشته شده قالب برابر صفر است.

معادلات حاکم برای جریان سیال از میان محیط متخلخل عبارتند از [۱۴، ۱۵]:

معادله پیوستگی:

$$\phi \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (6)$$

معادله حرکت (قانون داریسی):

$$U = -\frac{K}{\mu} (\nabla P - \rho g) \quad (7)$$

که در آن ϕ میزان تخلخل، ρ گرانروی رزین، P فشار تزریق، g چگالی، K تسور نفوذپذیری، U سرعت جبهه رزین و t زمان است. با فرض جریان سیال تراکم‌ناپذیر خواهیم داشت:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (8)$$

نیروی جاذبه در معادله گشتاور قابل چشمپوشی کردن است، در نتیجه

جدول ۱- ترکیب درصد رزین پلی استر.

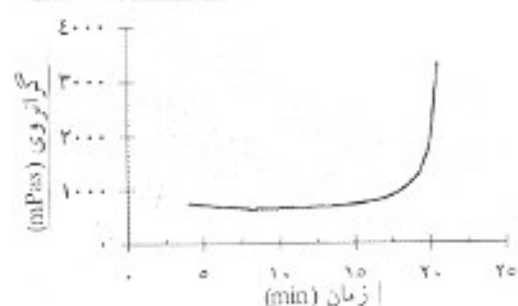
۱۰۰	رزین (g)
۱	پروکسید (g)
-/۲	شتاب دهنده (g)
۲۵/۵	زمان ژل شدن (min)
۲۴	دمای محیط (°C)

دارسی و به روش حل عددی اجزای محدود بدست می آید. سپس، با استفاده از آن سرعت جبهه رزین محاسبه می شود. بدین صورت که در مقاطع زمانی مشخص مکانهای جدید جبهه رزین با در نظر گرفتن اجزای سیر شده از رزین محاسبه و معین می گردد و این عمل تا پر شدن کامل قالب ادامه می یابد.

نتایج و بحث

قبل از شروع کار، باید رفتار و خواص رزین را دانست. خواص و رفتار رزین شامل چگالی، عمر مفید، زمان ژل شدن و گرانیوی است. با توجه به حداقل زمان مورد نیاز برای یک چرخه فرایند (حدود ۲۰ دقیقه)، ترکیب درصد مناسبی از مواد معین شد (جدول ۱).

منحنی تغییرات گرانیوی بر حسب زمان در شکل ۴ و همچنین منحنی افزایش دما بر حسب زمان در شکل ۵ ارائه شده است. شکل ۴ نشان می دهد که گرانیوی مخلوط رزین در مراحل ابتدایی (تقریباً قبل از دقیقه ۱۷) برای قالبگیری مناسب است، از این رو قبل از این زمان تریق در قالب باید پایان پذیرفته باشد. شکل ۵ که افزایش دمای مخلوط رزین را به دلیل گرمای ایجاد شده در اثر واکنشهای پخت نشان می دهد، بیانگر آن است که حداکثر دمای حاصل حدود 140°C است که با توجه به ضخامت قطعات مورد بررسی در این تحقیق، مشکلی را ایجاد نمی کند.



شکل ۴- منحنی تغییرات گرانیوی بر حسب زمان برای رزین پلی استر.

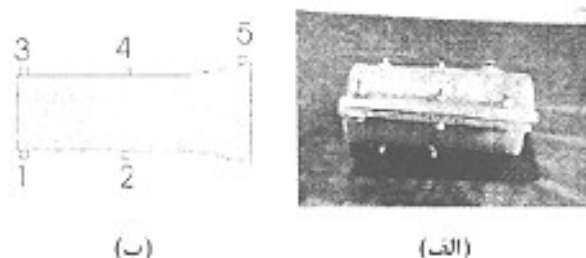


شکل ۲- قالب مورد استفاده.

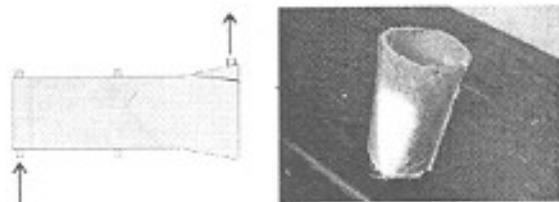
هوای فشرده، مخزن رزین و اسکلت فلزی نگهدارنده مخزن است.

قالب مورد استفاده برای ساخت قطعات لوله ای شکل به روش RTM به صورت سه تکه، شامل یک هسته یا مندرل لوله ای شکل آهنی و دو کفه بالا و پایینی از جنس کامپوزیت پلی استر شیشه است. ابتدا، لوله ای فلزی به ابعاد 20 cm و قطر تقریبی 10 cm تهیه، تراشکاری و صیقل کاری شد. این لوله قسمت مرکزی قالب (مندرل) را تشکیل می دهد. اما، برای ساخت محفظه قالب تصمیم گرفته شد که یکی از لبه ها ضخیم تر ساخته شود و هدف از آن بررسی رفتار رزین در حین عبور از این قسمت است. اجزای قالب ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است. با استفاده از این قالب می توان قطعات لوله ای شکل به طول 20 cm ، قطر 10 cm و ضخامت 2 mm تهیه کرد که ضخامت لبه ضخیم تر 8 mm است. برای بررسی تجربی تمام حالات ممکن برای ورود رزین و خروج هوا، روی یکی از کفه ها سه سوراخ و بر دیگری دو سوراخ تعبیه گردید. شکل ۳ قالب بسته شده به همراه شماره گذاری سوراخهای ایجاد شده بر آن را نشان می دهد.

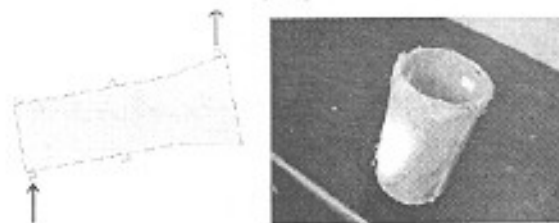
برای شبیه سازی فرایند پر شدن قالب از نرم افزار LCM Flow نسخه $1/3/1$ استفاده شده است. این نرم افزار توسط دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه اکل پلی تکنیک مونترال کانادا تهیه و توسعه یافته است. با این نرم افزار ابتدا تغییرات فشار در قالب با حل معادله



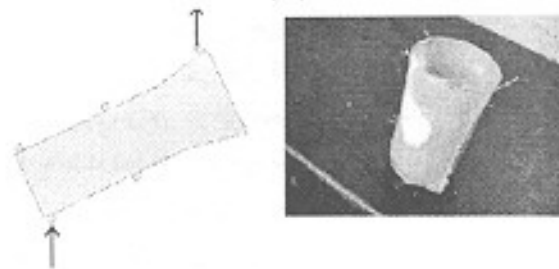
شکل ۳- منافذ ایجاد شده در قالب با ذکر شماره آنها: (الف) قالب اصلی، (ب) نمای قطعه.



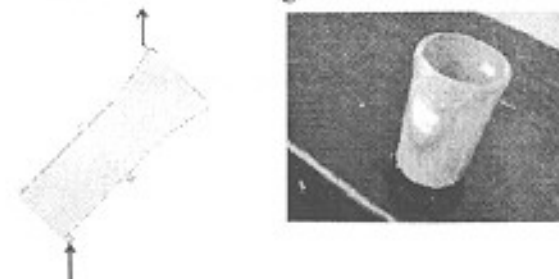
(الف)



(ب)



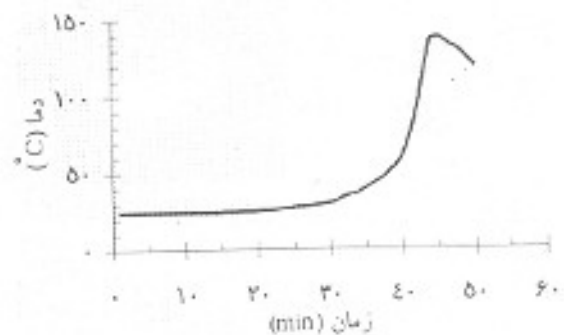
(ج)



(د)

شکل ۷- قطعات تولیدی به همراه نمایش زاویه قالب. محل تزریق منفذ شماره ۱ و محل خروج هوا منفذ شماره ۵ است. زاویه قالب از حالت (الف) تا حالت (د) از صفر تا حدود ۴۵ درجه افزایش می‌یابد.

افزایش یافت. در همه این حالتها مانند قطعه شماره ۱ (شکل ۶) محل تزریق، منفذ شماره ۱ و خروج هوا منفذ شماره ۵ در نظر گرفته شد. شکل ۷ این قطعات را به همراه زاویه مورد استفاده در ساخت آنها نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که حتی افزایش زاویه قالب به میزان زیاد (حدود ۴۵ درجه) اگرچه از میزان ناحیه خشک و آغشته نشده الیاف کاسته، اما توانسته است مشکل را بطور کامل حل کند که البته کمی عجیب بنظر می‌رسد و این یکی از تفاوت‌های اساسی ساخت قطعات کامپوزیتی به روش RTM (که الیاف پیشاپیش داخل قالب قرار داده می‌شود) یا سایر روشهای ساخت پلیمرها نظیر فرایند تزریق



شکل ۵- منحنی تغییرات دما بر حسب زمان برای رزین پلی‌استر.

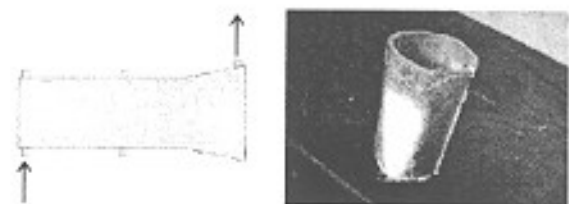
ساخت نمونه

سطوح داخلی دو کفه قالب و همچنین مندرل موم و فیلم زده شده و دو لایه الیاف شیشه نمدی در داخل قالب قرار داده شده و سپس قالب با بیج و مهره بسته شد. ابتداء منفذ شماره ۱ (گوشه پایینی قالب) برای تزریق و انتهای کفه دیگر (شماره ۵) به عنوان محل خروج هوا در نظر گرفته شد (سایر منافذ بسته بودند). اولین قالبگیری برای تعیین فشار تزریق، حجم رزین مورد نیاز و اندازه گیری زمان پر شدن قالب صورت گرفت که این موارد پس از قالبگیری معین شد. فشار ۰/۴ bar و زمان پر شدن کمتر از ۵ دقیقه بود.

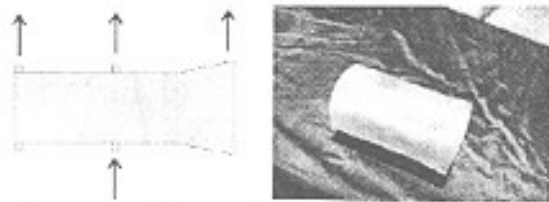
در دومین قالبگیری پس از تنظیم فشار به میزان معین، محل تزریق مانند اولین قالبگیری منفذ شماره ۱ و محل خروج هوا منفذ شماره ۵ در نظر گرفته شد. سپس، رزین تزریق شد و پس از پر شدن قالب و خروج مقداری از رزین از محل خروج هوا، آزمایش متوقف و جریان رزین قطع شد. قطعه تولیدی از این آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که قسمت نازک قطعه کاملاً عاری از رزین است. با توجه به طولانی بودن یا حداقل کافی بودن زمان تزریق و کم بودن فشار تزریق بنظر می‌رسد که افزایش زاویه قالب بتواند مشکل را حل کند.

بررسی زاویه قالب

در این مرحله چند قالبگیری صورت گرفت و هر بار زاویه قالب اندکی



شکل ۶- قطعه تولیدی به همراه نمایش محل‌های تزریق و خروج هوا.



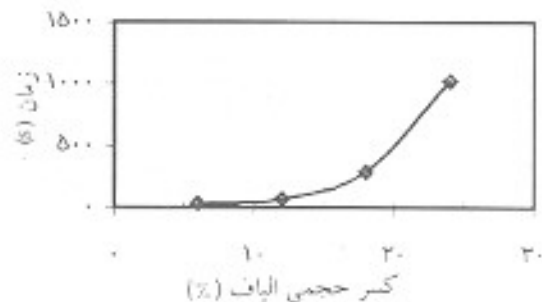
شکل ۱۰ - قطعه تولیدی به همراه نمایش محل‌های خروج هوا و ورود رزین.

کردن آنها تکرار شد. در قسمتی که قطعه ضخیم‌تر است نواری باریک از الیاف به عرض ۲ cm و به اندازه دو دور روی مندرول قرار داده شد که بدین ترتیب، اختلاف تغییرات مقدار الیاف در طول قالب به حداقل می‌رسد. محل تزریق این بار منفذ شماره ۵ و محل خروج هوا منفذ شماره ۱ در نظر گرفته شد. با این انتخاب، تاثیر مسیر جریان آسان‌گستر خواهد شد، زیرا حتی اگر مسیر جریان آسان وجود داشته باشد، رزین سریعاً قسمت ضخیم‌تر را پر خواهد کرد و در امتداد لوله پیش می‌رود تا به محل خروج هوا برسد. در صورتی که در حالت قبل به محض رسیدن رزین به قسمت ضخیم‌تر، جریان به سرعت در این ناحیه پیش می‌رود و به محل خروج هوا می‌رسد، بدون آنکه سایر قسمت‌ها را آغشته سازد. شکل ۹ قطعه حاصل از این آزمایش را که قطعه‌ای سالم است نشان می‌دهد. این آزمایش‌ها چند بار دیگر نیز تکرار شد و نتایج یکسانی حاصل گردید.

سومین منفذی که می‌تواند به عنوان محل تزریق در نظر گرفته شود مرکز قالب (منفذ شماره ۲) است. در مراجع مختلف اشاره شده است که غالباً بهترین محل تزریق، مرکز هندسی قالب است و علت آن نیز سریع‌تر پر شدن قالب است که البته این امر برای تولید انبوه و قطعات بزرگ اهمیت دارد.

در قالب‌گیری بعدی، منفذ شماره ۲ به عنوان محل تزریق و منافذ شماره ۳، ۴ و ۵ به عنوان محل‌های خروج هوا در نظر گرفته شد. پس از خروج رزین تقریباً بدون حباب هوا از محل‌های خروج (منفذ ۳، ۴ و ۵) آزمایش متوقف شد. قطعه حاصل از این آزمایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است که قطعه‌ای تقریباً سالم است. ولی در سطح بالایی آن یعنی ناحیه بین منافذ ۳ و ۴ و همچنین ناحیه بین منافذ ۴ و ۵ دارای حباب‌های فراوان است. این امر احتمالاً ناشی از آن است که رزین می‌تواند از منافذ شماره ۳، ۴ و ۵ بیرون آید، بدون اینکه رزین و هوای واقع شده در ناحیه بین آنها حرکتی داشته باشد (شکل ۱۱). اما، در قطعه نمایش داده شده در شکل ۹ تمام محفظه قالب در مسیر جریان است و در نتیجه حباب‌های هوا با جریان رزین خارج می‌شوند (شکل ۱۲).

محل بعدی که برای تزریق رزین در نظر گرفته شد، منفذ شماره ۴ است. اگر قالب مسطح مورد استفاده قرار می‌گرفت تنها منفذ

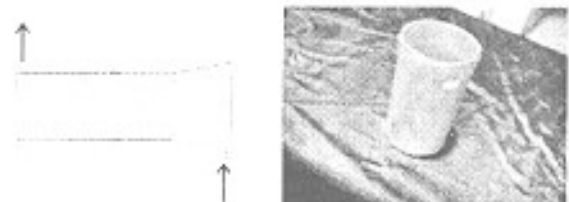


شکل ۸ - افزایش زمان پر شدن قالب بر حسب کسر حجمی الیاف.

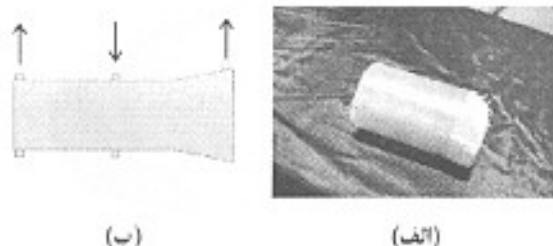
گرم‌تر مه‌است. علت پر نشدن قالب در این حالت‌ها ناشی از تغییر مقدار الیاف در طول قالب است. اصطلاحاً به مناطقی که رزین از درون آن سریع نفوذ می‌کند مناطق مسیر جریان آسان (easy flow path) می‌گویند [۸]. هنگامی که رزین در طول قالب پیش می‌رود و به قسمت ضخیم قالب می‌رسد، سریع‌تر در این محیط نفوذ می‌کند و با حداقل مقاومت الیاف، به علت تخلخل زیاد آن، مواجه می‌شود. پس از آن به سرعت به محل خروج هوا می‌رسد و هوا در نواحی قسمت‌های نازک‌تر قالب، که درصد الیاف بیشتری دارد، حبس می‌شود. برای تایید این مطالب، اثر مقدار الیاف بر زمان پر شدن قالب بررسی شد.

بررسی اثر مقدار الیاف بر زمان پر شدن قالب افزایش مقدار الیاف در قالب و کاهش تخلخل باعث کم شدن نفوذپذیری الیاف و طولانی شدن زمان پر شدن قالب می‌شود، اما حد این تابعیت موضوعی است که باید بررسی شود. بدین‌منظور چند آزمایش صورت گرفت و فقط تعداد لایه‌های الیاف تغییر کرد و زمان پر شدن قالب در شرایط ثابت اندازه‌گیری شد (شکل ۸). این نتایج نشان می‌دهد که افزایش اندک مقدار الیاف باعث کاهش بسیار زیاد در میزان نفوذپذیری الیاف و سرعت نفوذ می‌شود.

تزریق از سایر نقاط به منظور حذف پدیده مسیرهای جریان آسان آزمایش بار دیگر به منظور حذف مسیرهای جریان آسان یا حداقل کم



شکل ۹ - قطعه تولیدی به همراه نمایش محل تزریق (منفذ شماره ۵) و محل خروج هوا (منفذ شماره ۱).



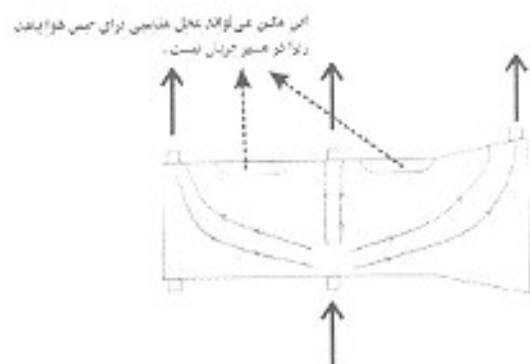
شکل ۱۳- قطعه تولیدی: (الف) محل تزریق منفذ شماره ۴ و (ب) منافذ ۲ و ۵ برای خروج هوا (ب).

مستعد حبس هوا، تغییرات فشار در طول قالب و زمان پرشدن قالب است.

از کارهای تجربی این گونه نتیجه‌گیری می‌شود که تنها منافذ شماره ۲ و ۵ برای تزریق مناسب‌اند و از بین این دو، منفذ شماره ۵ به علت عدم امکان حبس هوا مناسبتر است. با توجه به این که تنها این دو منفذ می‌توانند بهترین محل‌های تزریق باشند و سایر نقاط کاملاً نامناسب‌اند، تصمیم گرفته شد که تنها دو وضعیت یاد شده (شکل‌های ۹ و ۱۰) با نرم‌افزار LCM Plot ارزیابی شوند. در این بررسی از مسیر جریان آسان و تغییرات درصد حجمی در طول قالب چشمپوشی شد، زیرا این تغییرات اثری در بررسی دو وضعیت موردنظر ندارد. قالب موردنظر به صورت استوانه‌ای دو بعدی با نرم‌افزار ترسیم و شبکه‌بندی شد که نمای آن در شکل ۱۴ ارائه شده است. نفوذپذیری ایفاب برابر $10^{-9} \text{ m}^2 / 2 \times 16$ ، فشار تزریق $1/4 \text{ bar}$ (فشار مطلق) و فشار محل‌های خروج هوا برابر 1 bar در نظر گرفته شد. در شکل ۱۵ پیشرفت جبهه جریان رزین درون قالب برای شرایط قالب‌گیری شکل ۹ و در شکل ۱۶ همین موارد برای قطعه مورد اشاره در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

تصویر از بالای قالب برای دو وضعیت قالب‌گیری موردنظر پس از پرشدن قالب در دو شکل ۱۵ ج و ۱۶ ج ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از کارهای تجربی در این بررسی نیز دقیقاً تکرار و تایید می‌شود. بدین معنی که شرایط قالب‌گیری در شکل ۹ منجر به حبس هوا نخواهد شد، ولی در شکل ۱۰ حبس هوا در بین راه‌های خروج هوا (منافذ ۳، ۴ و ۵) مشاهده می‌شود.

معمولاً، برای طراحی و ساخت قالب آگاهی از تغییرات فشار و میزان وسعت این نواحی لازم است. تغییرات فشار در قالب باعث تغییر ضخامت قطعه خصوصاً در نواحی با فشار بالا و در نتیجه دقت ابعادی کمتر در آن نقاط، شستشوی ایفاب و غیره خواهد شد. در نتیجه تغییرات فشار در طول قالب برای دو وضعیت مورد نظر بررسی شد که نتایج آن در دو شکل ۱۷ و ۱۸ ارائه شده است. شکل‌های گویای آن است که فشار تزریق پس از طی مسیر اندکی کاملاً افت می‌کند. همچنین، پیش‌بینی

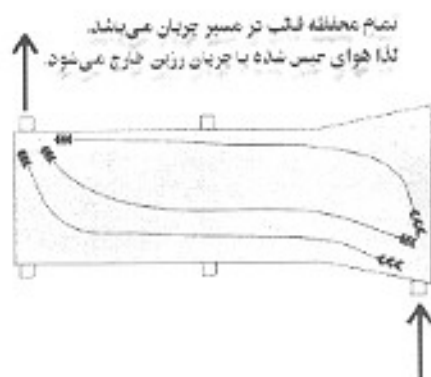


شکل ۱۱- چگونگی مسیر جریان و نمایش مناطق مستعد حبس هوا برای شرایط قالب‌گیری قطعه نشان داده شده در شکل ۱۰.

مرکزی، منفذ شماره ۴ (مرکز کفه بالایی) بود، اما در این حالت می‌توان دایره‌گذرنده از منافذ شماره ۴ و ۲ را به عنوان مرکز قالب در نظر گرفت. در این قالب‌گیری تزریق از منفذ شماره ۴ صورت گرفت و منافذ شماره ۲ و ۵ به عنوان محل‌های خروج هوا انتخاب شد. نتیجه حاصل از این آزمایش، قطعه نشان داده شده در شکل ۱۳ است. ملاحظه می‌شود که گوشه‌های قالب، عاری از رزین است و می‌تواند بدین علت باشد که رزین پس از رسیدن به سطح پایینی و کناری قالب مانع از خروج هوا به بیرون شده است.

شبیه‌سازی عددی

یکی از اهداف بررسی نظری فرایند، تعیین محل بهینه برای تزریق رزین و امکان بررسی حبس هوا قبل از ساخت قالب است. این کار با استفاده از نرم‌افزار LCMF lot صورت گرفت. این نرم‌افزار معادله حرکت (قانون دارسی) را به روش اجزای محدود حل کرده و موارد متعددی را بررسی می‌کند. این موارد شامل نمایش جبهه رزین با زمان، پیش‌گویی مناطق



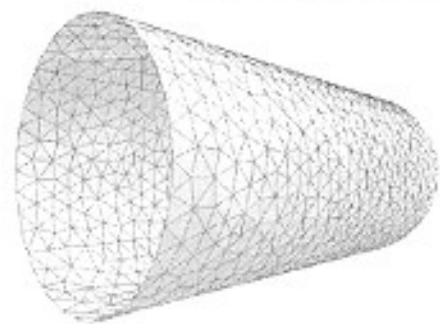
شکل ۱۲- چگونگی مسیر جریان و نمایش نقاط مستعد حبس هوا برای شرایط قالب‌گیری قطعه نشان داده شده در شکل ۹.

اهمیت انتخاب مرکز هندسی قطعه را به عنوان محل تزریق برای کاهش زمان پرشدن قالب و در نتیجه کاهش زمان یک چرخه قالبگیری نشان می‌دهد.

نتیجه گیری

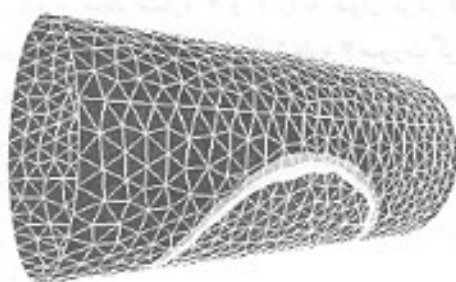
- شناسایی کامل رفتار و خصوصیات مواد اولیه نظیر نفوذپذیری و تخلخل ایاف، تغییرات گراژیوی مخلوط رزین با زمان و دما از نیازمندیهای اولیه است. مثلا شناخت و درک صحیح رابطه نفوذپذیری ایاف با تخلخل (شکل ۸) جوابگوی بسیاری از مشکلات قطعات تولیدی است.

- انتخاب مناسب محل‌های تزریق رزین و خروج هوا تاثیری شگرف

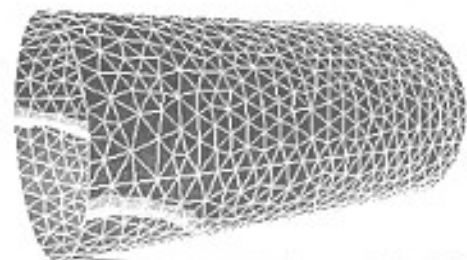


شکل ۱۴ - نمایی از شبکه ایجاد شده در قالب.

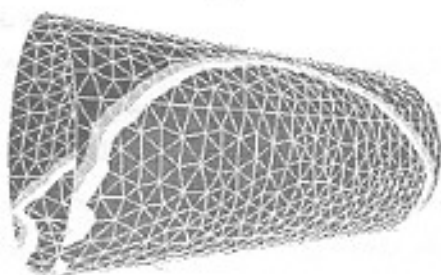
می‌شود که زمان پرشدن قالب با شرایط قالبگیری شکل ۹، بیش از ۱/۵ برابر زمان پرشدن قالب با شرایط قالبگیری شکل ۱۰ باشد. این امر،



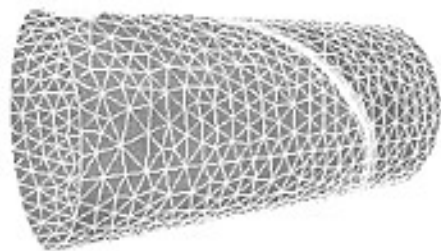
(الف) - تصویر از روبرو



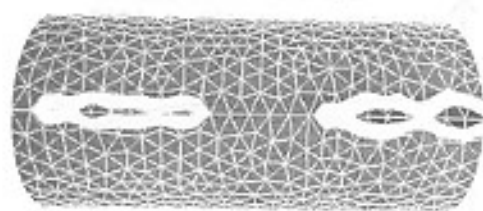
محل تزریق رزین
(الف) - تصویر از روبرو



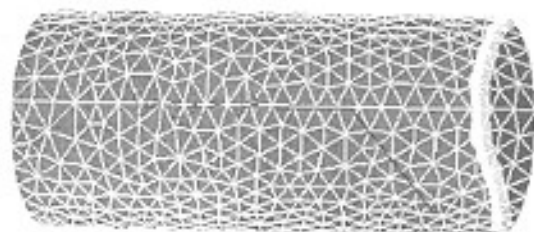
(ب) - تصویر از روبرو



(ب) - تصویر از روبرو



(ج) - تصویر از بالا



(ج) - تصویر از بالا

شکل ۱۶ - نمایش جبهه پیش‌رونده رزین طی پرشدن قالب برای شرایط قالبگیری شکل ۱۰ در مراحل: (الف) اولیه، (ب) میانی و (ج) پایانی فرایند پرشدن قالب.

شکل ۱۵ - نمایش جبهه پیش‌رونده رزین طی پرشدن قالب برای شرایط قالبگیری شکل ۹ در مراحل: (الف) اولیه، (ب) میانی و (ج) پایانی فرایند پرشدن قالب.

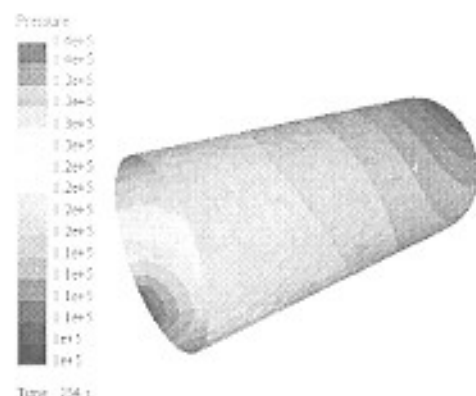
فرایند بکار برد و در نتیجه به ایده‌هایی برای طراحی دست یافت.

قدردانی

بدین‌وسیله از مسئولان مجتمع پامهدی (عج)، صنایع منتظر المهدی (عج) به دلیل حمایت مالی از این طرح بویژه آقایان مهندس آل بویه، مهندس گوهربخش و مهندس امیری تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Johnson C. F., Resin Transfer Moulding; *Composite Material Technology*; Malik P. K. and Newman S. (Eds.), Hanser, New York, 149-78, 1990.
2. Rudd C. D., Long A. C., Kendall K.N. and Mangin C.G.E.; *Liquid Moulding Technologies*; Woodhead, Cambridge, England, 1-37, 1997.
3. Palstech Thermoset Technatic; *RTM Today*; 1-8, Autumn 1998.
4. *Matrasur Composites, An Matrasur RTM Concept*; 1-12, 1998.
5. Rudd C.D., Resin Transfer Moulding, *Handbook of Polymer-Fiber Composites*; Jones F.R. (Ed.), Longman Scientific and Technical, UK, 192-200, 1994.
6. *RTM Today; Reinforced Plastics*; Autumn 1997.
- 7- فصیحی دستجردی علی، بهشتی محمدحسین، تعیین شرایط بهینه ساخت قطعات کامپوزیتی به روش RTM، مجموعه مقالات اولین کنفرانس علمی - کاربردی سازمان صنایع هوا- فضا ۱۷-۱۴ شهریور ۱۳۷۹، جلد هشتم، مواد و ساخت (۱)، تهران، ۱۴۱ - ۱۳۰.
8. Potter K.; *Resin Transfer Moulding*; Chapman & Hall U. K., 1-141, 1997.
9. Hayward J. S. and Harris B., Effect of Process Variables on The Quality of RTM Moulding; *SAMPE J.*; 26, 3, 39, 43, 1990.
10. Hayward J. S. and Harris B., The Effect of Vacuum Assistance in Resin Transfer Moulding; *Composite Manufacturing*, 1, 3, 161-6, 1990.
11. *Tooling for Resin Transfer Molding*, Scott Bader Company, August 1997.
12. Kendall K. N. & Rudd C. D., Owrn M. J. and Middleton

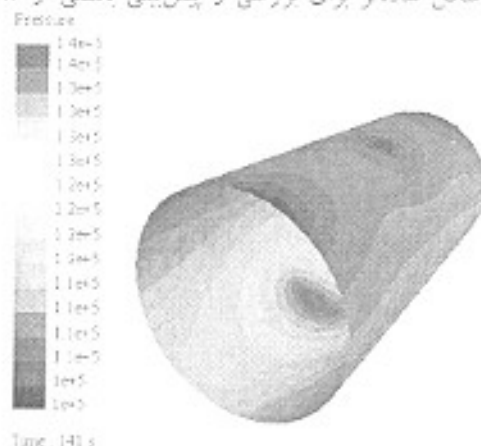


شکل ۱۷ - تغییرات فشار در طول قالب برای شرایط قالبگیری شکل ۹.

بر کیفیت قطعات تولیدی در فرایند RTM دارد. در بسیاری از قالبها خصوصاً قالبهای پیچیده براحتی نمی‌توان مسیرهای جریان آسان را حذف کرد، از این رو باید قبل از ساخت قالب به این گونه مسیرها توجه و سعی کرد اثر آن بر جریان بر شدن قالب کم شود. محل قالب همچنین تاثیر زیادی بر زمان پر شدن قالب و در نتیجه زمان یکت چرخه قالبگیری دارد.

از میان پنج محل ایجاد شده برای تزریق در قالب مورد استفاده در این تحقیق، تنها دو منفذ ۵ و ۲ (کفه مربوط در پایین فرامی‌گیرد) برای تزریق مناسب است و از بین این دو، در صورت عدم اعمال خلاء در منفذ ۵، این منفذ به علت قرارگیری تمام نقاط محفظه قالب در مسیر جریان و در نتیجه عدم حبس هوا در قالب مناسبتر است.

مدلسازی فرایند قبل از طراحی و ساخت در اغلب موارد باعث صرف هزینه کمتر و پیشینی شرایط فرایند است. هرچند در بسیاری از موارد خصوصاً هنگامی که قالب و شرایط فرایند پیچیده است کمتر می‌توان از این امر بهره جست. ولی، شاید بتوان در این حالتها نیز مسئله را به چند شکل ساده‌تر برای بررسی و پیشینی بعضی از متغیرهای



شکل ۱۸ - تغییرات فشار در طول قالب برای شرایط قالبگیری شکل ۱۰.

1998.

15. 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, 1993, 329-42.

۱۶ - فصیحی دستجردی علی، بررسی تجربی و تئوری متغیرهای فرایند RTM، پایان نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه پلیمر ایران، ۸۵-۸۳، ۱۳۷۹.

V., Characterization of the Resin Transfer Moulding Process; *Composite Manufacturing*; **3**, 4, 235-49, 1992.

13. Chen Y. F. and Stelson K. A., Prediction of Filling Time and Vent Locations for Resin Transfer Molds; *J. Composite Mater.*; **31**, 11, 1141-61, 1997.

14. Golestanian H. and El-gizawy A. S., Physical and Numerical Modeling of Mold Filling in Resin Transfer Moulding; *Polym. Composites*; **19**, 4, 395-407, August