

تشریح عوامل موثر بر ساخت کامپوزیت به روش تزریق در خلأ

محمد صادق سلطانی^۱، علیرضا ستوده^۲، نوید سخندانی^۳

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، sadeghsoltani100@gmail.com

۲ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

۳ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۰۵

چکیده

یکی از علوم جدید و پرکاربرد در دنیای امروز، که روزه‌روز در حال گسترش است، دانش و فناوری کامپوزیت‌هاست. بر این اساس، طراحی و شیوه ساخت کامپوزیت‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. امروزه از روش‌های مختلفی جهت ساخت کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. یکی از روش‌های ساخت کامپوزیت‌های پلیمری^۱ که طی دو دهه گذشته مورد توجه صنعتگران و محققان قرار گرفته است، ساخت کامپوزیت به روش تزریق در خلأ^۲ می‌باشد. روش تزریق در خلأ به‌عنوان روشی جهت ساخت کامپوزیت با ابعاد بزرگ و کیفیت بالا شناخته می‌شود. در این مقاله نخست مراحل ساخت، مزایا و معایب روش ساخت کامپوزیت به روش تزریق در خلأ بیان می‌شود و پس از آن نقص‌ها و چالش‌های این روش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها تأثیر میزان فشار، دما و پیشرفت‌های اخیر در این حوزه تشریح می‌گردد.

واژگان کلیدی

کامپوزیت، کامپوزیت الیافی، روش‌های ساخت کامپوزیت، روش تزریق در خلأ

۱. مقدمه

کامپوزیت‌های پلیمری به‌علت خواص منحصر به فرد خود از جمله وزن کم، هزینه اندک فرایند تولید بیشترین کاربرد را به‌عنوان زمینه^۳ در تولید مواد کامپوزیتی به‌خود اختصاص داده‌اند. کامپوزیت‌های زمینه پلیمری شامل الیاف به‌عنوان فاز تقویت‌کننده و زمینه پلیمری می‌باشند. فاز تقویت‌کننده معمولاً خواص مکانیکی یک کامپوزیت را فراهم می‌کند، در حالی که زمینه نقش اساسی در نگه‌داشتن فاز تقویت‌کننده در کنار هم و همچنین انتقال نیرو به فاز تقویت‌کننده دارد. امروزه از روش‌های متنوعی جهت ساخت کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. هم‌اکنون توجه محققان و صنعتگران

شناخت و توسعه مواد جدید با قابلیت‌های بالا، از جمله نیازهای اساسی امروز بشر و از شروط لازم برای پیشرفت فناوری محسوب می‌شود. از جمله این مواد می‌توان به کامپوزیت‌ها یا همان مواد مرکب اشاره نمود. اساساً کامپوزیت به ماده‌ای گفته می‌شود که از دو یا چند جزء سازنده تشکیل شده و اختلاط این اجزاء و تعامل با یکدیگر باعث ایجاد ساختاری می‌گردد که از لحاظ خواص مکانیکی نسبت به هر کدام از اجزاء به تنهایی برتری دارد. به بیان دیگر کامپوزیت حداقل از دو جزء تشکیل شده است، در حالی که اجزای تشکیل‌دهنده در مقیاس اتمی قرار نگرفته باشد.

به روش‌هایی است که امکان تولید انبوه قطعات را با کیفیت خوب و سرعت تولید بالا فراهم آورد تا قطعات کامپوزیتی بتوانند از نظر اقتصادی با قطعات فلزی رقابت کنند. فرایند ساخت کامپوزیت‌ها را به روش‌های مختلف طبقه‌بندی می‌کنند. بعضی آن را به دو دسته روش‌های دستی و روش‌های ماشینی تقسیم می‌کنند، اما اغلب این روش‌ها به دو دسته کلی روش‌های قالب باز^۴ و قالب بسته^۵ تقسیم می‌شود [۱]. یکی از روش‌های ساخت کامپوزیت با زمینه پلیمری که طی دو دهه گذشته مورد توجه صنعتگران و محققان قرار گرفته ساخت کامپوزیت به روش تزریق در خلأ است. روش تزریق در خلأ یک روش قالب بسته است که سبب کاهش مواد سمی و فرار می‌شود. ترکیب مزایایی چون کیفیت بالا، هزینه اولیه پایین، تکرارپذیری و ساخت قطعات بزرگ باعث برتری نسبت به روش ساخت کامپوزیت به روش دستی^۶ شده است. این روش به‌طور گسترده در ساخت قطعات بزرگ کامپوزیتی از قبیل توربین بادی، مخازن تحت فشار، پنل‌های مورد استفاده در کشتی و خودرو استفاده می‌شود [۲]. تحلیل فرایند تزریق در خلأ و پیش‌بینی خواص محصول نهایی به دلیل حل هم‌زمان معادلات حرارتی، شیمیایی و مکانیکی کار بسیار پیچیده و سخت است و معمولاً عوامل مؤثر بر روش ساخت کامپوزیت به روش تزریق در خلأ به‌صورت تجربی بررسی می‌شود.

سایمینگتون و همکاران (۲۰۰۸) در مقاله‌ای به مشکلات این روش و مزایای آن تا حدودی پرداختند و همچنین استحکام مواد ساخته‌شده در این روش را مورد بررسی قرار دادند [۳]. اتاس و همکاران (۲۰۱۱) مقایسه‌ای بین پاسخ ضربه کامپوزیت‌های ساخته شده به دو روش، یکی با روش لایه‌چینی دستی و دیگری با روش تزریق در خلأ انجام داده‌اند [۴]. آنها نشان دادند به‌علت درصد حجمی بالای الیاف، کامپوزیت ساخته‌شده به روش تزریق در خلأ از استحکام بیشتری برخوردار است و مقاومت به ضربه بیشتری از خود نشان می‌دهد. فرانکلوچی و همکاران (۲۰۱۲) فشار موینگی در هنگام تزریق رزین به الیاف در کامپوزیت جوت / ونیل استر که به روش تزریق در خلأ ساخته شده بود را اندازه‌گیری کردند و اثر نیروی موینگی بر نفوذپذیری الیاف جوت مورد تحلیل قرار گرفت [۵]. آنها دریافتند که نیروی موینگی به‌طور مشخص در الیاف طبیعی جوت بیشتر از الیاف مصنوعی است. شیماموتو و همکاران (۲۰۱۶) آثار تابش امواج ماکروویو جهت فرایند پخت مجدد کامپوزیت ساخته‌شده به روش تزریق در

خلأ را بررسی کردند [۶]. یکی از نتایج مهم این مطالعه تغییر خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف کربن / اپوکسی در اثر تغییر زمان تابش امواج ماکروویو بود.

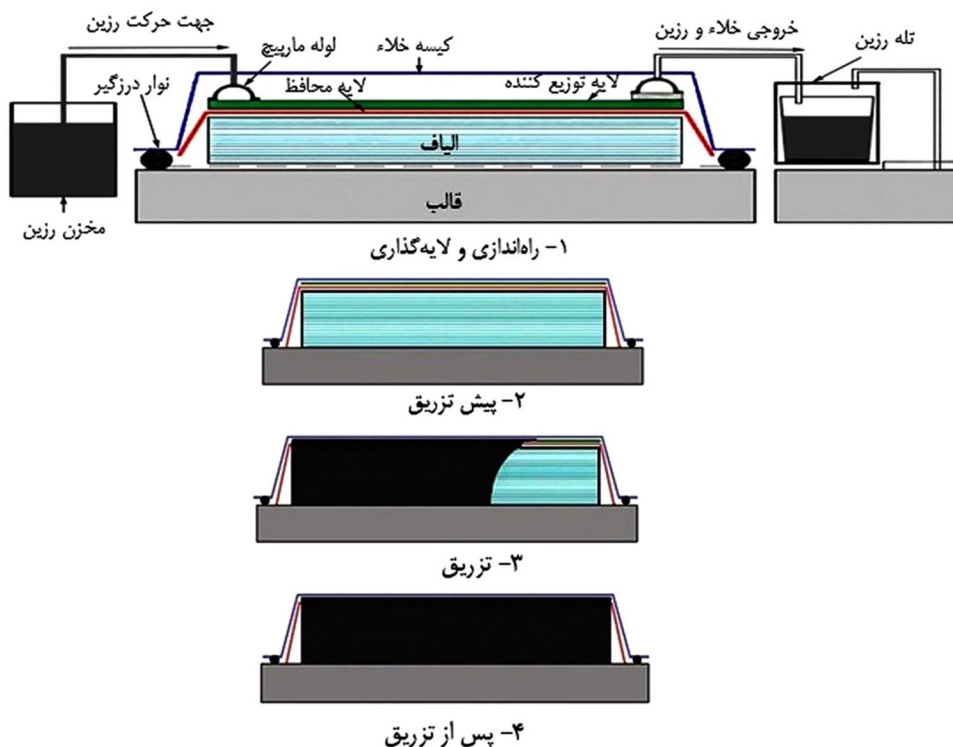
با توجه به افزایش روزافزون اهمیت کامپوزیت‌ها و همچنین روش‌های متنوع ساخت آنها، در این مقاله به توضیح و تشریح یکی از مهمترین روش‌های ساخت کامپوزیت؛ یعنی روش تزریق در خلأ پرداخته شده است. باید به این نکته توجه داشت که این روش به‌شدت در بین پژوهشگران و صنعتگران در حال گسترش است. بنابراین کمبود مقالاتی که به تشریح این روش مهم ساخت کامپوزیت پرداخته باشد، حس می‌شود.

۲. مراحل روش تزریق در خلأ

ساخت کامپوزیت به روش تزریق در خلأ را می‌توان به چهار بخش تقسیم کرد [۷]: لایه‌گذاری^۷، پیش‌تزریق^۸، تزریق^۹، پس از تزریق^{۱۰}. در شکل ۱ نمایی شماتیک از مراحل ساخت کامپوزیت به روش تزریق‌نمایش داده شده است. در مرحله لایه‌گذاری ابتدا سطح قالب باید تمیز شود و سپس سطح قالب آغشته به ماده جداکننده^{۱۱} گردد. پس از خشک‌شدن ماده جداکننده، الیاف درون قالب قرار داده می‌شود و لایه محافظ^{۱۲} را جهت جذب رزین اضافی و توزیع مناسب رزین روی الیاف پهن می‌گردد. لایه توزیع‌کننده^{۱۳} را روی لایه محافظ جهت افزایش سرعت حرکت رزین و توزیع رزین در جهات مختلف قرار داده می‌شود. جهت جلوگیری از هوای به دام افتاده در انتهای قالب باید به این نکته توجه داشت که لایه توزیع‌کننده نباید لبه‌های خروجی خلأ و همچنین دو لبه الیاف را بپوشاند. بعد از قراردادن لایه محافظ و لایه توزیع‌کننده باید با یک استراتژی مناسب لوله‌های انتقال رزین و لوله‌های خروجی خلأ را به کمک لوله مارپیچ^{۱۴} درون قالب قرار داد. پس از لایه‌گذاری و اعمال تمام موارد جانبی، کیسه خلأ^{۱۵} روی لایه‌ها و قالب قرار داده می‌شود و آنها را می‌پوشاند و یک محیط مسدود ایجاد می‌کند. اطراف کیسه خلأ به کمک نوار درزگیر به‌طور کامل آب‌بندی می‌شود. در مرحله پیش‌تزریق ورودی رزین بسته می‌شود و خلأ به کمک پمپ خلأ الیاف را فشرده می‌کند. زمان پیشنهادی جهت حداکثر فشرده‌گی الیاف در این مرحله ۲۰ دقیقه می‌باشد. پس از اتمام مرحله پیش‌تزریق، ورودی رزین باز می‌گردد و رزین به درون الیاف تزریق می‌شود. در طول مرحله تزریق فشار داخل قالب با زمان و مکان تغییر می‌کند.

به‌طور کامل پخت شده، شیر خالاً بسته می‌شود و پس از جداکردن مواد مصرفی مانند لایه محافظ، لایه توزیع‌کننده، کیسه خالاً و لوله ماریچ، قطعه از قالب خارج می‌شود.

وقتی رزین به انتهای قالب رسید، جریان ورودی رزین قطع می‌گردد. مرحله پس از تزریق شامل خارج کردن رزین اضافی و تعادل فشار رزین و ضخامت قطعه است. معمولاً وقتی رزین



شکل ۱. مراحل ساخت کامپوزیت به روش تزریق در خالاً

۶ روش تزریق در خالاً به‌علت کارکرد در محدوده بین فشار محیط (فشار یک اتمسفر) و فشار خالاً (منفی ۰/۸ اتمسفر)، لزومی به استفاده از قالب با استحکام بالا نیست، در نتیجه قیمت قالب به‌شدت کاهش پیدا می‌کند

۳. معایب و مزایای روش تزریق در خالاً

به‌طور کلی روش تزریق در خالاً برای ساخت قطعات بزرگ کامپوزیتی مانند بدنه کشتی توسعه یافته است. مزایا و معایب روش تزریق در خالاً را می‌توان به‌قرار زیر خلاصه کرد.

- | | |
|--|--|
| <p>معایب:</p> <ol style="list-style-type: none"> ۱. کسبه خالاً، لایه توزیع‌کننده، لایه محافظ و لوله‌های تزریق و خالاً به‌عنوان مواد مصرفی هستند و قابل استفاده مجدد نمی‌باشند ۲. شانس نشت هوا بسیار زیاد است و وابسته به مهارت و تجربه اپراتور، و مواد مصرفی (نوار درزگیر و کیسه خالاً) است. نشت هوا سبب ایجاد نقاط خشک و تزریق ناقص رزین می‌گردد ۳. فشار متراکم‌ساز الیاف محدود به فشار محیط (فشار یک اتمسفر) و فشار خالاً است. این محدودیت فشار | <ol style="list-style-type: none"> ۱. کاهش انتشار گازهای سمی به‌علت وجود کیسه خالاً ۲. ساخت قطعات بزرگ و پیچیده با کیفیت بالا ۳. قالب روش تزریق در خالاً، مشابه فرایند قالب باز در ساخت کامپوزیت به روش دستی است، که می‌تواند به‌راحتی برای هندسه‌های مختلف بهینه‌سازی شود ۴. رزین و کاتالیست می‌توانند به‌طور جداگانه نگهداری شوند و تنها هنگام تزریق با هم مخلوط شوند ۵. سرمایه‌گذاری اولیه جهت راه‌اندازی روش تزریق در خالاً نسبت به سایر روش‌های قالب بسته پایین‌تر است |
|--|--|

متراکم‌ساز سبب کاهش درصد الیاف در کامپوزیت می‌شود

۴. عوامل مؤثر در روش تزریق در خلاً

۴-۱. دمای قالب

انتخاب دمای قالب جهت عواملی چون مدیریت پخت رزین، کنترل زمان ژل شدن رزین^{۱۷} و کنترل ویسکوزیته رزین مؤثر است.

۴-۲. طراحی فرایند جریان

بعد از انتخاب دمای قالب، می‌توان ویسکوزیته رزین و زمان ژل شدن رزین را محاسبه کرد یا اندازه گرفت. سپس باید روی پارامترهای طراحی فرایند جریان فعالیت کرد [۸]:

۱. محل قرارگیری پورت‌های خروجی خلاً و ورودی رزین
۲. محل و اندازه خطوط توزیع جریان
۳. نوع، تعداد لایه‌ها و محل لایه توزیع‌کننده
۴. زمان باز و بسته کردن ورودی و خروجی
۵. کنترل میزان فشار خلاً در خروجی جهت هدایت رزین در مرحله تزریق

۴-۳. میزان فشردگی الیاف و کنترل درصد حجمی الیاف

میزان فشردگی الیاف در کنترل ضخامت اهمیت بسیار زیادی دارد. برای داشتن ضخامتی یکنواخت پیشنهاد می‌شود تمامی ورودی‌ها بسته شود و اجازه داده شود خروجی بعد از اتمام مرحله تزریق همچنان باز باقی بماند.

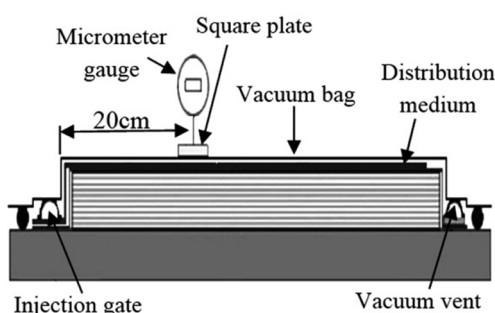
۵. نقص‌ها و چالش‌ها در روش تزریق در خلاً

نقاط خشک به نواحی از کامپوزیت اطلاق می‌شود که رزین الیاف را آغشته نکرده باشد. از جمله دلایل ایجاد نقاط خشک طراحی قالب نامناسب است که سبب می‌شود رزین به خروجی برسد قبل از اینکه تمامی هوای داخل الیاف کاملاً به‌وسیله رزین جایگزین شود. می‌توان هوای به‌دام افتاده را به آرامی به‌وسیله جریان پیوسته رزین در ورودی و باز بودن خروجی کاهش داد، اگرچه به‌دلیل محدودیت زمان ژل شدن رزین و هزینه رزین اضافی چندان مورد توجه صنعتگران نیست. از طرف دیگر، برای قالب با هندسه‌های پیچیده معمولاً از روش‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. یکی از روش‌های مناسب بهینه‌سازی جهت کاهش نقاط

خشک روش الگوریتم ژنتیک^{۱۸} است. با این روش پرشدن قالب به‌جهت مدیریت مکان و تعداد ورودی و خروجی، تعداد لایه‌های توزیع‌کننده رزین در قالب و همچنین زمان باز و بسته‌شدن پورت خروجی شبیه‌سازی می‌شود [۹-۱۰]. جانسون و پیچیماننا (۲۰۰۸) جهت کنترل جریان رزین در فرایند تزریق رزین به قالب با استفاده از گرم کردن موضعی قالب باعث کاهش ویسکوزیته و شتاب به رزین شدند و توانستند با این روش نقاط خشک در کامپوزیت را کاهش دهند [۱۱]. یکی دیگر از علت‌های نقاط خشک در کامپوزیت زمانی رخ می‌دهد که فرایند پرشدن قالب بسیار کند صورت گیرد و قبل از اینکه رزین به خروجی برسد ویسکوزیته رزین بسیار بالا رود. برای حل این مشکل معمولاً تعداد ورودی رزین و خروجی خلاً را افزایش می‌دهند یا اینکه رزین را با مقدار کمتری شتاب‌دهنده مخلوط کنند.

۶. عوامل مؤثر بر ضخامت

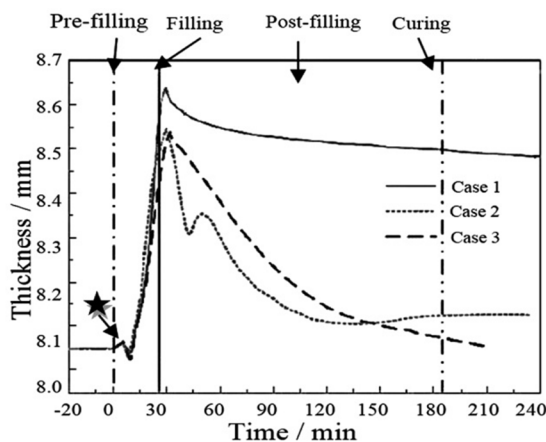
عوامل بسیاری در ضخامت نهایی کامپوزیت ساخته‌شده به روش تزریق در خلاً نقش دارد. از مهمترین عوامل مؤثر بر ضخامت قطعه ساخته‌شده به روش تزریق در خلاً می‌توان به نوع الیاف، تعداد لایه‌ها، میزان فشار خلاً ایجاد شده در خروجی و جز این‌ها اشاره کرد. در یک آزمایش یانگ و همکاران (۲۰۱۲) برای به‌دست آوردن تغییرات ضخامت، ۱۰ لایه الیاف شیشه را در یک قالب تزریق در خلاً قرار دادند و با استفاده از یک میکروگیج که در فاصله ۲۰ سانتی‌متری ورودی تعبیه شده بود، تغییرات ضخامت را در سه حالت متفاوت مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. شکل ۲ شماتیک این آزمایش را نشان می‌دهد.



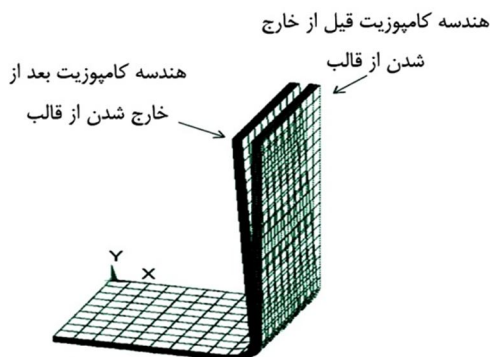
شکل ۲. نمودار تغییرات ضخامت برحسب زمان [۸]

در حالت اول شیر خروجی خلاً با غشایی پوشش داده می‌شود که توانایی عبور جریان هوا را دارد، اما جریان رزین از آن عبور نمی‌کند. به‌عبارت دیگر هوا و مواد فرار می‌توانند به‌طور پیوسته از

درصد کشیدگی رزین^۹ باشد. تنش‌های پسماند یا کرنش‌های پسماند می‌تواند به علت انقباض رزین و عدم تناسب ضریب انبساط گرمایی بین الیاف و رزین ایجاد شود. این تنش یا کرنش‌های پسماند می‌تواند باعث به هم خوردن ابعاد کامپوزیت شود. به چنین پدیده‌ای اصطلاحاً جهش کامپوزیت می‌نامند. شکل ۴ این مشکل را به وضوح نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمودار تغییرات ضخامت بر حسب زمان [۱۲]



شکل ۴. جهش در کامپوزیت [۱۳]

البته باید توجه داشت که این مشکل در قطعات منحنی شکل بروز می‌کند. در طول فرایند پخت رزین میزان انقباضات گرمایی و کشیدگی رزین باعث می‌شود که در یک قطعه کامپوزیتی ضخامت در جهت ضخامت کاهش پیدا کند، که این امر به شدت وابسته به رزین است. از طرف دیگر چون الیاف معمولاً ضریب انبساط گرمایی پایین‌تری نسبت به رزین دارند و مدول الاستیک الیاف بیشتر از رزین است، در یک ورق کامپوزیتی تغییرات ابعادی مشاهده نمی‌شود، این امر کمک می‌کند که ابعاد یک ورق در جهت طول و عرض ثابت باقی بماند. به هر حال در قطعات منحنی شکل به علت تغییرات ناهمسان ابعادی سبب می‌شود در

شیر خلأ خارج شوند، اما رزین نمی‌تواند وارد شیر خروجی شود. بعد از تکمیل فرایند تزریق رزین و پرشدن قالب از رزین، شیر ورودی رزین بسته می‌شود، اما شیر خلأ همچنان باز باقی می‌ماند تا رزین کاملاً پخت شود. در حالت دوم شیر ورودی رزین و شیر خروجی خلأ پس از اتمام تزریق و رسیدن رزین به انتهای قالب فوراً بسته می‌شود در این حالت رزین دیگر نمی‌تواند به درون الیاف تزریق شود و همچنین نمی‌تواند از شیر خروجی خارج شود. در حالت سوم پس از اتمام تزریق و رسیدن رزین به انتهای قالب شیر ورودی فوراً بسته می‌شود، اما شیر خلأ همچنان باز است تا وقتی که رزین درون قالب پخت شود. شکل ۳ تغییرات ضخامت این آزمایش را در حین فرایند پیش‌تزریق، تزریق و پس از تزریق را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ضخامت در مرحله پیش‌تزریق تقریباً یکسان است. در ابتدای مرحله تزریق زمانی که شیر ورودی رزین باز می‌شود، به علت ورود مقدار ناچیز هوا به درون قالب، ضخامت اندکی افزایش می‌یابد. در شکل این ناحیه با علامت ستاره مشخص شده است. وقتی رزین یک ناحیه را تر می‌کند در جلوی ناحیه ترشده به علت اثر روانکاری، ضخامت کاهش می‌یابد. اثر روانکاری باعث می‌شود که الیاف به‌طور مؤثرتر به هم فشرده شوند. وقتی رزین از یک ناحیه عبور کرد، ضخامت ناحیه ترشده به شدت افزایش می‌یابد که ناشی از کاهش تنش فشاری است. در ناحیه پس از تزریق فشار داخل قالب به حالت تعادل می‌رسد و ضخامت تا پخت کامل با شیب اندکی کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج یانگ و همکاران بیشترین ضخامت کامپوزیت ساخته‌شده به روش تزریق در خلأ هنگامی صورت می‌پذیرد که شیر خروجی با غشایی پوشش داده شود که این غشاء امکان خروج هوا را دارد اما امکان خروج رزین وجود ندارد.

۶. جهش در کامپوزیت‌های ساخته‌شده به روش تزریق در خلأ

برای کامپوزیت با ابعاد بزرگ، کنترل ابعادی قطعه جهت فرایند مونتاژ و کنترل تنش‌های پسماند بسیار حائز اهمیت است. در روش تزریق در خلأ چون یک طرف قالب به وسیله کیسه خلأ پوشانده می‌شود و تنها در معرض فشار اتمسفر قرار دارد، ضخامت کامپوزیت نهایی می‌تواند متفاوت از ضخامت قطعه در مرحله تزریق باشد و این امر می‌تواند به علت انقباض گرمایی رزین یا

هنگام خارج کردن قطعه از قالب، قطعه کامپوزیتی کمی به طرف داخل انحنای پیدا کند. این انحنا به داخل در کامپوزیت‌های منحنی شکل اصطلاحاً جهش کامپوزیت گفته می‌شود. معمولاً در قطعات کامپوزیتی با انحنای ۹۰ درجه، ۱ الی ۴ درجه خمش به داخل مشاهده می‌شود [۱۳]. البته باید توجه داشت که افزودن درصد‌های خاصی از شتاب‌دهنده و کاتالیزور در ایجاد پیک گرمایی بسیار مؤثر است. واکنش‌های پخت رزین‌های گرما سخت گرمازا است؛ حتی زمانی که رزین با کاتالیزور تنها و بدون حرارت پخت می‌شود، واکنش پخت گرمازا خواهد بود. لذا باید با استفاده مناسب از میزان و نوع کاتالیزور و شتاب‌دهنده از ایجاد گرمای واکنش بیش از حد جلوگیری نمود. افزایش بیش از حد دما ممکن است سبب تغییر رنگ و ایجاد ترک‌های ریز در محصول شود. دمای مخلوط رزین و کاتالیزور و شتاب‌دهنده به جهت گرمازا بودن واکنش پخت می‌تواند تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد. از موارد دیگر که باعث کاهش پیک گرمایی می‌شود، افزایش سطح است. هر چه میزان سطح افزایش یابد انتقال حرارت بیشتر خواهد شد و این امر باعث جلوگیری از پیک گرمایی خواهد شد.

۷. تأثیر میزان فشار خلأ و دمای قالب بر میزان حفره و درصد حجمی الیاف برای کامپوزیت‌های ساخته‌شده به روش تزریق در خلأ

در ساخت کامپوزیت‌ها گاهی ممکن است مقداری هوای ناخواسته در طول فرآیند ساخت کامپوزیت در داخل کامپوزیت به دام بیفتد. هوای به دام افتاده باعث ایجاد نقاط خشک می‌گردد. نقاط خشک بیشترین تأثیر منفی بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت از جمله استحکام کششی طولی، کاهش استحکام برشی عرضی و کاهش مقاومت به خستگی دارد. در میان انواع نقص‌ها در طول فرآیند ساخت کامپوزیت وجود حفره تأثیر به مراتب شدیدتری بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت می‌گذارد. برای کاهش میزان حفره در طول فرآیند تزریق رویکردهایی پیشنهاد می‌شود که از جمله آنها حباب زدایی رزین قبل از تزریق و حرکت آزادانه رزین به درون قالب است که باعث می‌شود حباب‌ها و هوای به دام افتاده به سمت خروجی هدایت یابد. تشکیل حباب در طول فرآیند تزریق در خلأ به عواملی چون میزان فشار خلأ دمای قالب و الگوی پرشدن رزین در قالب وابسته است. کیداری و همکاران (۲۰۱۱) جهت بررسی میزان حفره و درصد حجمی الیاف آزمایشی طراحی کردند

که در این آزمایش با استفاده از رزین پلی‌استر و الیاف شیشه هفت حالت مختلف را با استفاده از روش تزریق در خلأ مورد آزمایش قرار دادند [۱۴]. جدول ۱ نتایج حاصل از این آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۱ قابل مشاهده است. اگر دما ثابت باشد مثلاً دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش اختلاف فشار ورودی و خروجی میزان حفره‌ها در کامپوزیت حاصل کاهش پیدا می‌کند. همچنین با کاهش دمای قالب تحت شرایطی که اختلاف فشار ورودی و خروجی در بیشترین حالت خود باشد، مقدار حفره‌ها در کامپوزیت کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. میزان درصد حجمی الیاف زمانی که فشار ورودی ثابت باشد با افزایش اختلاف فشار که ناشی از کم کردن فشار خروجی است افزایش پیدا می‌کند. بیشترین میزان درصد حجمی الیاف را می‌توان زمانی بدست آورد که دمای قالب بیشتر شود به شرطی که فشار خروجی نیز کم باشد. در حالت کلی در روش تزریق در خلأ با افزایش میزان قدرت خلأ و افزایش دمای قالب می‌توان به بیشترین درصد حجمی الیاف رسید. باید به این نکته توجه شود که افزایش دمای قالب احتمال افزایش حفره را بیشتر می‌کند و باعث کاهش زمان ژل شدن می‌شود. معمولاً در روش تزریق در خلأ سعی می‌شود که دما افزایش نیابد و با افزایش قدرت خلأ میزان درصد حجمی الیاف را افزایش دهند و باعث کاهش حفره در قطعه کامپوزیتی شوند. البته باید توجه داشت چون در روش ساخت کامپوزیت به روش تزریق در خلأ قبل از تزریق رزین به الیاف، رزین حباب زدایی می‌شود می‌توان گفت که در روش تزریق در خلأ کمترین میزان حفره در کامپوزیت وجود دارد.

۸. مدیریت گرمایی و پخت رزین

روش تزریق در خلأ به‌عنوان روشی برای ساخت کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف در ابعاد بزرگ شناخته می‌شود. با این وجود، در بعضی از موارد ساخت کامپوزیت‌های ضخیم تنها با یک بار روش تزریق در خلأ امکان‌پذیر نیست. افزایش گرمایی در حین پخت رزین‌های ترموست و پایین‌بودن ضریب رسانش باعث می‌شود دما در یک زمان بسیار کوتاه در وسط یک کامپوزیت ضخیم به‌شدت افزایش یابد که این امر سبب تجزیه گرمایی رزین، ایجاد ترک ناشی از انبساط گرمایی، تغییر فرم یک قسمت به‌علت تغییرات غیریکنواخت گرمایی یا حتی آتش‌سوزی شود. اصطلاحاً به این پدیده پیک گرمایی گفته می‌شود. معمولاً در

رزین‌های ترموست مانند پلی‌استر و اپوکسی میزان واکنش کاتالیست و رزین به صورت نمایی با افزایش دما افزایش می‌یابد. برای جلوگیری از این پیک گرمایی، وایت و کیم (۱۹۹۶) تکنیک چندمرحله‌ای را پیشنهاد دادند [۱۵]. تکنیک چندمرحله‌ای به این صورت است که برای ساخت یک قطعه کامپوزیتی ضخیم به روش تزریق در خلأ تعداد کل الیاف‌های به کار رفته در قطعه کامپوزیتی را به چند بخش تقسیم می‌کنند. پس از ساخت یک بخش از الیاف به روش تزریق در خلأ و پخت کامل رزین، کیسه خلأ لایه محافظ و لوله‌های انتقال رزین و خروجی خلأ جدا می‌شوند و

سپس بخش بعدی الیاف را بر روی قسمت اول گذاشته می‌شوند و مجدداً مراحل روش تزریق در خلأ تکرار خواهد شد. تعداد بخش‌ها که معرف تعداد تکرار روش تزریق در خلأ است، به تعداد لایه‌ها و رزین وابسته است. با استفاده از این روش دیگر پیک گرمایی مشاهده نمی‌شود. البته باید توجه داشت که این عمل یک روش وقت‌گیر است و باعث افزایش هزینه‌های مواد مصرفی همچون کیسه خلأ و لایه محافظ می‌گردد. در حالت کلی برای ساخت کامپوزیت‌های ضخیم از روش چندمرحله‌ای استفاده می‌شود.

جدول ۱. نتایج آزمایش کیداری و همکاران [۱۴]

ردیف	فشار ورودی (بار)	فشار خروجی (بار)	دما (درجه سانتی‌گراد)	میزان حفره در مرکز (% V_v)	کسر حجمی الیاف در مرکز (% V_f)
۱	۱/۰۱۳	۰/۰۱۳	۱۴/۵	۰/۳۶	۴۴/۰
۲	۱/۰۱۳	۰/۱۶۱	۱۹/۱	۱/۶۷	۴۳/۵
۳	۱/۰۱۳	۰/۲۷۲	۲۰/۵	۲/۱۰	۳۹/۴
۴	۱/۰۳۱	۰/۰۳۱	۳۰/۰	۱/۲۲	۴۴/۱
۵	۱/۰۱۳	۰/۱۶۱	۳۰/۰	۱/۶۹	۴۲/۹
۶	۱/۰۳۱	۰/۲۷۲	۳۰/۰	۱/۹۶	۴۳/۰
۷	۱/۰۱۳	۰/۰۳۱	۴۰/۰	۱/۳۶	۴۳/۳۹

۹. پیشرفت‌های اخیر در روش تزریق در خلأ

نانوکامپوزیت‌های پلیمری به‌عنوان شاخه‌ای نوین از علم کامپوزیت‌های پلیمری، طی دو دهه اخیر مورد توجه بسیاری از محققان و صنعتگران قرار گرفته است. خواص ارتقایافته، ویژگی‌های جدید و کاربردهای چندمنظوره نانوکامپوزیت‌های پلیمری، در کنار سهولت نسبی تولید آنها با دانش کنونی بشر، قابلیت تولید صنعتی این دسته از مواد پیشرفته را فراهم نموده است. نانو ذراتی مانند نانولوله‌های کربنی و نانو خاک رس جهت بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت به کار می‌روند. روش تزریق در خلأ یک روش بسیار مهم در ساخت نانوکامپوزیت‌های پلیمری است. ترکیب الیاف با نانوذرات می‌تواند افق‌های روشی در مهندسی و علم مواد جهت تولید مواد سبک و مقاوم ایجاد کند. امروزه، استفاده از الیاف طبیعی به‌عنوان جایگزینی مناسب برای الیاف مصنوعی در بسیاری از صنایع مختلف در حال گسترش است. الیاف طبیعی دارای مزایایی از قبیل چگالی کم، قیمت ارزان

و سازگاری با محیط زیست می‌باشد. که مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. روش تزریق در خلأ به‌علت سرمایه‌گذاری اولیه اندک در ساخت کامپوزیت‌ها با کیفیت بالا و ابعاد بزرگ، یک روش مناسب جهت ساخت این بیوکامپوزیت‌ها است.

۱۰. نتیجه‌گیری

ساخت کامپوزیت به روش تزریق در خلأ که از نوع قالبگیری بسته می‌باشد، روش پیشرفته‌تری نسبت به ساخت کامپوزیت به روش قالب باز می‌باشد. در روش تزریق رزین در خلأ ابتدا الیاف در قالب قرار می‌گیرد و سپس راهگاهی از رزین به قالب کشیده می‌شود. اختلاف فشار ناشی از ایجاد خلأ باعث می‌شود که رزین به سمت راهگاه خروجی؛ یعنی راهگاهی که به پمپ خلأ متصل است هدایت شود. این روش به علت کمتر بودن بخار مونمر استایرن از روش کیسه خلأ و لایه‌چینی دستی بسیار آلودگی کمتری دارد.

ساخت، مزایا و معایب روش ساخت کامپوزیت به روش تزریق در خلأ بیان شده‌است و پس از آن نقص‌ها و چالش‌های این روش مورد بررسی قرار گرفته است. وجود مواد مصرفی در روش تزریق در خلأ از بزرگترین مشکلات این روش است و این روش بیشتر برای ساخت کامپوزیت با ابعاد بسیار بزرگ مناسب می‌باشد.

همچنین در این روش کامپوزیت حاصل کسر وزنی الیاف بیشتری نسبت به سایر روش‌های ساخت کامپوزیت دارد. در روش تزریق در خلأ به علت پیش روی رزین در الیاف حباب‌های کمتری در کامپوزیت نهایی وجود دارد. به همین علت خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ساخته شده با این روش بسیار بالاتر از ساخت کامپوزیت به روش‌های قالب باز است. در این مقاله نخست مراحل

۱۱. مآخذ

- [1] G. P. Sendeckyj, *Mechanics of Composite Materials: Composite Materials*, Elsevier, 2016.
- [2] C. Wang, G. Bai, G. Yue, B. Zhang, Compressive Strength Measurements of Single Fibers Using an Improved Automatic Control Method, *Experimental Techniques*, Vol. 40, No. 5, 2016, pp. 1369-1375.
- [3] M. C. Symington, S. Opukuro, J. L. Banks, R. A. Pethrick, Vacuum infusion of natural fibre composites for structural applications, In 13th European Conference on Composite Materials (EECM 13), 2008.
- [4] C. Atas, Y. Akgun, O. Dagdelen, B. M. Icten, M. Sarikanat, An experimental investigation on the low velocity impact response of composite plates repaired by VARIM and hand lay-up processes, *Composite Structures*, Vol. 93, No. 3, 2011, pp. 1178-1186.
- [5] F., Gastón, A. Vázquez, E. Ruiz, E. S. Rodríguez, Capillary effects in vacuum assisted resin transfer molding with natural fibers, *Polymer Composites*, Vol. 33, No. 9, 2012, pp. 1593-1602.
- [6] S. Daisuke, Y. Tominaga, Y. Hotta, Effect of microwave irradiation on carbon fiber/epoxy resin composite fabricated by vacuum assisted resin transfer molding, *Advanced Composite Materials*, Vol. 25.1, 2016, pp. 71-79.
- [7] G., Q. Bickerton, P. A. Kelly, Simulation of the reinforcement compaction and resin flow during the complete resin infusion process, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol 41.1, 2010, pp. 45-57.
- [8] R. Subbiah, Vacuum Infusion Molding of Natural Fibre Reinforced Biobased Resin Composite, PhD diss., University of Toronto, 2016.
- [9] M. Ryosuke, M. Shiota, Data assimilation through integration of stochastic resin flow simulation with visual observation during vacuum-assisted resin transfer molding: A numerical study, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 84, 2016, pp. 43-52.
- [10] M. Devillard, K. T. Hsiao, S. G. Advani, Flow sensing and control strategies to address race-tracking disturbances in resin transfer molding-part II: automation and validation, *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Vol. 36.11, 2005, pp. 1581-1589.
- [11] R. J. Johnson, R. Pitchumani, Active control of reactive resin flow in a vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process, *Journal of composite materials*, Vol. 42.12, 2008, pp. 1205-1229.
- [12] J. Yang, J. Zeng, J. Jiang, C. Peng, Compaction behavior and part thickness variation in vacuum infusion molding process, *Applied composite materials*, Vol. 19.3-4, 2012, pp. 443-458.
- [13] J. Andrew, V. Jefferson, C. Santulli, Effect of post-cure temperature and different reinforcements in adhesive bonded repair for damaged glass/epoxy composites under multiple quasi-static indentation loading, *Composite Structures*, Vol. 143, 2016, pp. 63-74.
- [14] V. R. Kedari, B. I. Farah, K. T. Hsiao, Effects of vacuum pressure, inlet pressure, and mold temperature on the void content, volume fraction of polyester/e-glass fiber composites manufactured with VARTM process, *Journal of composite materials*, Vol. 45.26, 2011, pp. 2727-2742.
- [15] S. R. White, Y. K. Kim, Staged curing of composite materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 27.3, 1996, pp. 219-227.

۱. در برخی موارد، کامپوزیت‌ها را از نظر نوع زمینه طبقه‌بندی می‌نمایند. از این دیدگاه کامپوزیت‌ها به ۳ دسته کامپوزیت‌های پلیمری، کامپوزیت‌های فلزی و کامپوزیت‌های سرامیکی تقسیم‌بندی می‌شوند.

2. VIP (vacuum infusion process).

3. Matrix

۴. در روش‌های قالب باز، قالب اصلی تنها از یک نیمه یا کفه تشکیل شده و یک طرف قطعه در تماس با قالب قرار می‌گیرد و طرف دیگر آن می‌تواند در تماس با هوا باشد.

۵. در فرآیندهای قالب بسته، قالب از دو قسمت نر و ماده یا سمبه و ماتریس یا به طور کلی کفه بالا و پایین، تشکیل می‌شود و هر دو سطح قطعه، در تماس با قالب قرار می‌گیرد.

6. Hand lay up

7. Setup and lay up

8. Pre-filling

9. Filling

10. Post - filling

۱۱. ماده جداکننده یا واکس

12. peel ply

13. Distribution medium

14. Helical tube

15. Vacuum bag

۱۶. پس از اضافه کردن کاتالیست و شتاب‌دهنده به رزین‌های گرما سخت، شبکه پلیمری این نوع رزین تکمیل می‌گردد و از حالت مایع به جامد تبدیل می‌شود، به این فرآیند پخت می‌گویند.

۱۷. زمان ژل شدن: پس از آنکه رزین با کاتالیزور و شتاب‌دهنده مخلوط شد، مدت زمانی طول می‌کشد تا رزین حالت ژله‌ای به خود بگیرد که به آن زمان ژل شدن گویند. پس از این زمان است که دمای رزین به سرعت شروع به افزایش می‌نماید.

۱۸. تکنیک جستجویی در علم رایانه برای یافتن راه‌حل تقریبی برای بهینه‌سازی و مسائل جستجو است. الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکامل است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی فرگشتی مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند. این الگوریتم برای اولین بار توسط جان هالند معرفی شد.

19. Shrinkage