ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(8):517-525

Optimizing the Vacuum Pressure, Injection Point and Mold Temperature in RTM Process in Order to Increase the Mechanical Properties and Minimizing the Production Time

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Hafezi Shahneshin S.[1],
Fouladvand M.[1],
Alaei M.[1]

How to cite this article
Hafezi Shahneshin S, Fouladvand M, Alaei M. Optimizing the Vacuum Pressure, Injection Point and Mold Temperature in RTM Process in Order to Increase the Mechanical Properties and Minimizing the Production Time. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(8):517-525.

[1] Composite Materials Department, Materials & Manufacturing Technology Faculty, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Correspondence
Address: Composite Materials Department, Materials & Manufacturing Technology Faculty, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
Phone: -
Fax: -
mhallaee@mut.ac.ir

Article History
Received: November 08, 2020
Accepted: February 24, 2021
ePublished: July 07, 2021

ABSTRACT

The Resin transfer molding (RTM) process is a closed mold process to produce composite products in mass production. This method includes various parameters such as mold temperature, vacuum pressure, injection point, fiber volume fraction, injection pressure and so on. Parts with the desired surface quality and high properties can be achieved by controlling these parameters. In this study, the effect of input parameters of resin transfer molding process including vacuum pressure, injection point and mold temperature on mold filling time, curing time, tensile strength and flexural strength of carbon-epoxy composite was investigated. Each of the input parameter has been investigated at three levels using the RSM full factorial method. Finally, after making carbon/epoxy composite samples with this process, their evaluation in terms of filling time, curing time and mechanical properties have been investigated. The results showed that the injection point has a significant effect on the mechanical properties and production volume of the part in the Resin transfer molding process. According to the results, the optimal sample was determined by prioritization mechanical properties with mold temperature parameters of 106.7° C, vacuum pressure of 0.83 bar and injection point B (one resin input in the middle of the part and two vacuum outputs at the end of the part). Tensile strength of the sample was 546.7 MPa, flexural strength was 759.2 MPa, curing time was 7.3 minutes and mold filling time was 8.6 minutes by software.

Keywords The Resin Transfer Molding (RTM), Carbon/Epoxy Composite, Vacuum Pressure, Injection point, Mold Temperature, RSM

CITATION LINKS

[1] Resin transfer moulding. [2] An approach to couple mold design and on-line control to manufacture complex composite parts by resin transfer molding. [3] Enhancement of flow in VARTM using localized induction heating. [4] Can carbon nanotubes be used to sense damage in composites WITH VARTM. [5] Investigation of Parameters Effect Resin Movement Velocity at Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Method (VARTM). [6] 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. [7] An experimental investigation on the low velocity impact response of composite plates repaired by VARIM and hand lay-up processes. [8] Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM AerospaceSciences. [9] An Investigation on RTM Process Parameters and their Influence on Impact Failure Behavior of FRP Laminates. [10] Experimental and numerical study of the inuence of integrated load transmission elements on filling behavior in resin transfer molding. [11] Wavelet-based AE characterization of composite materials FOR VART. [12] WEI'Resin Transfer Molding (RTM) Process of a High Performance Epoxy Resin. II: Effects of Process Variables on the Physical, Static and Dynamic ZZ Mechanical Behavior.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1400.21.8.4.6]

بهینه‌سازی پارامترهای فشار خلاء، محل تزریق و دمای قالب در فرآیند RTM به منظور افزایش خواص مکانیکی و کاهش زمان تولید

سعید حافظی شاه نشین
گروه کامپوزیت، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
مجید فولادوند
گروه کامپوزیت، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
محمدحسین علایی*
گروه کامپوزیت، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده
فرآیند انتقال رزین به قالب (RTM)، فرآیندی قالب بسته است که در تیراژ بالا به کار می‌رود. این روش شامل پارامترهای مختلف از جمله دمای قالب، فشار خلأ، مکان تزریق، کسر حجمی الیاف، فشار تزریق و غیره می باشد. تنها با کنترل این پارمترها است که می‌توان به قطعات با کیفیت سطح مطلوب و خواص بالا رسید. در این تحقیق با انتخاب پارامترهای ورودی شامل فشار خلأ، محل تزریق و دمای قالب به بررسی اثر آن‌ها بر پارامترهای خروجی که شامل زمان پرشدن قالب، زمان پخت قطعه، استحکام کششی و خمشی پرداخته شده است. به این منظور هر کدام از پارامترهای ورودی در سه سطح به صورت فاکتوریل کامل مورد بررسی قرار گرفته و برای این منظور از روش طراحی آزمایش پاسخ رویه سطح (RSM) استفاده شده است. بعد از ساخت نمونه‌های کامپوزیت کربن-اپوکسی با این فرآیند، ارزیابی آن‌ها از دیدگاه زمان پرشدن، زمان پخت و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد که محل تزریق رزین تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی و تیراژ تولید قطعه در فرآیند تزریق رزین به قالب دارد. طبق نتایج، نمونه بهینه با اولویت‌بخشی بر خواص مکانیکی با پارامترهای دمای قالب ۱۰۶/۷درجه سانتی‌گراد، فشار خلأ ۰/۸۳ بار و محل تزریق B (یک ورودی رزین در وسط قطعه و دو خروجی خلأ دردو انتهای قطعه) مشخص شد که طی آن، استحکام کششی نمونه به میزان ۵۴۶/۷ مگاپاسکال، استحکام خمشی به میزان ۷۵۹/۲مگاپاسکال، زمان پخت ۷/۳ دقیقه و زمان پر شدن قالب ۸/۶ دقیقه توسط نرم‌افزار حاصل گردید.

کلیدواژه‌ها: تزریق رزین به قالب (RTM)، کامپوزیت کربن- اپوکسی، فشار خلاء، محل تزریق، دمای قالب، روش رویه سطح

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۶
*نویسنده مسئول: mhallaee@mut.ac.ir

۱- مقدمه
فرآیند قالب‌گیری انتقالی رزین(RTM) یکی از روش‌های بسیار مناسب برای ساخت قطعات کامپوزیتی کوچک تا بسیار بزرگ با اشکال پیچیده است. در این فرآیند، ماده تقویت‌کننده به صورت خشک به ابعاد مورد نظر بریده شده و یا به شکل مورد نظر پیش‌شکل داده شده و درون قالب قرار داده می‌شود. سپس قالب بسته شده و توسط گیره و یا پرس با فشار کم، محکم نگاه داشته می‌شود. رزین درون قالب تزریق شده و ضمن خیس کردن تقویت‌کننده، هوای درون محفظه قالب را پس زده و قالب را پر می‌کند. زمانی که پخت رزین کامل شد، قالب باز شده و قطعه از درون قالب استخراج و فرآیند برای تولید قطعه بعدی ادامه می‌یابد.

تحلیل فرآیند تزریق در خلأ و پیش‌بیني خواص محصول نهايي به دلیل حل هم‌زمان معادلات حرارتي، شیمیایي و مکانیکي، کار بسیار پیچیده‌ای است. به همین دلیل معمولاً عوامل مؤثر بر روش ساخت کامپوزیت به روش تزریق در خلأ به صورت تجربي بررسي مي‌شوند. تا به امروز مطالعات متعددی در خصوص فرآیند قالب‌گیری انتقالی رزین انجام شده است. به عنوان مثال در این زمینه پوتر و همکاران[1] به بررسی تأثیر زاویه قالب نسبت به افق و میزان ترکنندگی تقویت‌کننده‌ها و همچنین میزان تخلخل به دست آمده از فرآیند پرداختند. آن‌ها برای این کار از چند حالت قالب‌گیری با زوایای مختلف استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که حتی با افزایش زاویه قالب به میزان ۴۵ درجه، میزان ناحیه خشک و آغشته نشده الیاف کاسته ولی کاملا بر طرف نمی شود. علت پرنشدن کامل قالب در این حالت‌ها به علت تغییرات ضخامت الیاف در طول قالب است. اصطلاحاً به مناطقی که رزین از درون آن سریع نفوذ می‌کند مناطق مسیر جریان ساده گفته می‌شود. در تحقیقی دیگر لارنس و همکاران[2] یک کنترل فعال را برای فرآیند انتقال رزین به قالب ارائه دادند. در این تحقیق یک ابزار شبیه‌سازی پرکننده قالب برای توسعه یک روش طراحی و کنترل ایده‌آل مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها در این روش از حسگرها و محرک‌ها برای مشخص کردن آشفتگی جریان استفاده کرده و جریان رزین را مجدداً هدایت کردند تا فرآیند پرکردن قالب با موفقیت و بدون هیچ جای خالی صورت پذیرد. با کنترل جریان ورودی‌های تزریق چندگانه و با کمک بازخوردهای به دست آمده، موقعیت جریان برای رسیدن به پرشدن کامل قالب یک هندسه پیچیده به دست آمده است.

پیتچومانی و همکارش[3] برای کنترل جریان رزین در فرآیند تزریق رزین به قالب با استفاده از گرم کردن موضعي قالب سعی در کنترل میزان نقاط خشک قطعه تولیدی داشتند. در این تحقیق از سیم‌پیچ‌ها، برای دمادهی موضعی به یک قالب مستطیلی با طول ۱۲ اینچ استفاده شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دما در نقاطی که حرکت رزین به سختی انجام می‌گیرد، کاهش ویسکوزیته و افزایش شتاب در رزین اتفاق می‌افتد که این امر سبب بهبود ترکنندگی الیاف و کاهش نقاط خشک در کامپوزیت تولید شده می‌شود. در پژوهشی دیگر فیدلر و همکاران[4] گزارش کردند که با اضافه کردن ۰/۳ درصد وزنی نانو لوله کربنی(CNT) می‌توان مقاومت برشی بین‌لایه‌ای(استحکام چسبندگی میان لایه‌ای) را تا۲۰ درصد افزایش داد. با این حال، برای ساخت قطعات

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1400.21.8.4.6]

بزرگ کامپوزیتی با کسر حجمی بالاتر استفاده از CNT با مشکل مواجه شده است.

گلزار و همکارش[5] به بررسی پارامترهای مؤثر در سرعت حرکت رزین در روش انتقال رزین به قالب به کمک خلأ پرداختند. در این تحقیق تأثیر پارامترهای ضخامت لایه توزیع رزین، ضخامت پیش‌شکل، درصد حجمی الیاف و ویسکوزیته به کمک روش شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با انتخاب بهینه ضخامت لایه توزیع و پیش‌شکل، کاهش ویسکوزیته و افزایش درصد حجمی الیاف می‌توان حداکثر سرعت را در فرآیند به دست آورد، تا در کمترین زمان بتوان قطعات بزرگ را با کیفیت مطلوب‌تر از روش‌های دیگر تولید نمود. در تحقیق کیداری و همکاران[6] برای بررسی میزان حفره و درصد حجمی الیاف آزمایشی طراحی کردندکه در آن با استفاده از رزین پلی استر و الیاف شیشه هفت حالت مختلف را با استفاده از روش تزریق در خلأ مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش‌ها، فشار ورودی و خروجی و دمای قالب به عنوان متغیرهای آزمایش در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از ارزیابی نمونه‌ها نشان می‌دهد که در دمای ثابت ۳۰ درجهٔ سانتی‌گراد، با افزایش اختلاف فشار ورودی و خروجی میزان حفره‌ها در کامپوزیت کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر این با کاهش دمای قالب تحت شرایطی که اختلاف فشار ورودی و خروجی در بیشترین حالت خود باشد، میزان حفره‌ها در کامپوزیت کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. از طرف دیگر، بالاترین میزان درصد حجمی الیاف در حداکثر دمای قالب(۳۰ درجه سانتی‌گراد) و بالاترین میزان اختلاف فشار ورودی و خروجی به دست می‌آید.

آتاس و همکاران[7] مقایسه‌اي بین پاسخ ضربهٔ کامپوزیت‌هاي شیشه-اپوکسی ساخته شده به دو روش لایه چیني دستي و روش تزریق درقالب به کمک خلأ انجام داده‌اند. در هر دو روش فرآیند پخت نمونه‌ها در ابتدا با ۵۰ درجه سانتی‌گراد شروع شده، سپس با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گرادو به مدت ۱۲۰ دقیقه تکمیل شده است. آن‌ها نشان دادند به علت درصد حجمي بالاي الیاف کامپوزیت ساخته شده به روش تزریق در خلأ، قطعات ساخته شده به این روش از استحکام بالاتری برخوردار هستند و مقاومت به ضربه بیشتري را از خود نشان مي‌دهند. در پژوهشی دیگر نایک و همکاران[8] به بررسی رفتار نفوذپذیری کامپوزیت پایه پلیمر در فرآیندهای انتقال رزین به قالب و فرآیند انتقال رزین به قالب با کمک خلاء(VARTM) پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با استفاده از رزین و تقویت‌کننده یکسان و با افزایش میزان تخلخل در قطعه، نفوذپذیری نیز در هردو حالت پایدار و گذار افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش درصد حجمی الیاف به کار رفته در پیش‌شکل، تخلخل کاهش خواهد یافت. همچنین می‌توان با افزایش نرخ جریان، میزان نفوذپذیری را بهبود داده و زمان پرشدن قالب را کاهش داد.

در تحقیقی دیگر، ونگالراوو و همکاران[9] به بررسی تغییرات پارامترهای فشار تزریق و درصد حجمی الیاف در روش قالب‌گیری تزریقی و اثرات آن‌ها بر رفتار شکست ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت شیشه-پلی استر و میزان تخلخل آن‌ها پرداختند. در این تحقیق پنج فشار تزریق ۱/۹۶، ۲/۴۵، ۲/۹۴، ۳/۴۳ و ۳/۹۲ بار و سه پیش‌شکل ۴، ۵ و ۶ لایه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج آنها نشان داد که نمونه۴ لایه با فشار ۲/۴۵ بار دارای بیشترین میزان استحکام ضربه به میزان ۳۵۱/۵۸ ژول بر متر و حداقل میزان تخلخل است. برای نمونه ۵ لایه در فشار ۲/۹۴ بار بالاترین استحکام ضربه به میزان ۴۳۵/۹۴ ژول بر متر و حداقل تخلخل ایجاد شد. در نهایت در نمونه ۶ لایه حداقل تخلخل در فشار ۳/۴۳ بار حاصل شد که میزان استحکام آن نیز به میزان ۴۶۸/۱۹ ژول بر متر رسید. در نتیجه با افزایش میزان تخلخل، انرژی شکست کاهش می‌یابد. ماگاگناتو و همکاران[10] در پژوهشی به بررسی تجربی و عددی تأثیر جایگذاری اینسرت در پیش‌شکل قالب، بر رفتار پرشدن قالب در فرآیند RTM و همچنین بروز حباب و تخلخل در قطعه پرداختند. به این منظور از دو اینسرت متفاوت استفاده شد تا رفتار پرشدگی قالب و به سبب آن تغییرات در محیط اطراف اینسرت‌ها سنجیده شود. به منظور صحه‌گذاری بر نتایج شبیه‌سازی از روش CT Scan نمونه‌های ساخته شده، استفاده شده است. نتایج نشان از بروز یک تغییرشکل محلی در الیاف تقویت‌کننده در اطراف اینسرت دارد که این میزان وابسته به درصد حجمی الیاف است. با کاهش درصد حجمی الیاف، حرکت رزین تسریع یافته است که سبب افزایش درصد تخلخل در اطراف اینسرت شده است.

۲-بیان مسئله

در این تحقیق با انتخاب پارامترهای ورودی شامل فشار خلأ، محل تزریق و دمای قالب به بررسی اثر آن‌ها بر پارامترهای خروجی که شامل زمان پرشدن قالب، زمان پخت قطعه، استحکام کششی و خمشی پرداخته شده است. هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی تأثیر هر ورودی بر هر خروجی به صورت مجزا و در نهایت به دست آوردن شرایط و نمونه بهینه با اولویت بخشیدن به خواص مکانیکی قطعه ساخته‌شده می‌باشد.

۳-روش تحقیق

۳-۱ مواد اولیه

قطعات کامپوزیتی ساخته شده شامل فاز زمینه یا ماتریس و فاز تقویت‌کننده می‌باشند. تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در فرآیند انتقال رزین به قالب، شامل الیاف یا پارچه‌های بهم فشرده به شکل قالب و به نام پیش‌شکل می‌باشند. پیش‌شکل مورد استفاده در این تحقیق از جنس کربن ۱۰۰ گرمی (۱۰۰ گرم بر مترمربع) از نوع بافت Plain، با ضخامت ۰/۱۶میلی‌متر، تولید شده در شرکت بهنوژن، انتخاب شده است. پارچه کربن، ماده‌ای با نسبت استحکام

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1400.21.8.4.6]

به وزن بالاست، به طوری که استحکام آن در حد فولاد و وزن آن در حدود نصف آلومینیوم می‌باشد. لازم به ذکر است که از الیاف دیگر نظیر شیشه و کولار نیز می‌توان استفاده نمود البته درمورد کولار، بایستی قابلیت ترشوندگی سخت‌تر این الیاف را در نظر داشته و تغییراتی در سیستم ورودی‌ها و راهگاهی رزین انجام داد.

در مورد رزین، به دلیل استفاده از حرارت به عنوان یکی از متغیرهای ورودی، رزین اپوکسی نوع گرماسخت انتخاب شده است که در حرارت بالا خصوصیات مکانیکی خود را حفظ نماید و همچنین سایر نیازهای فرآیند ساخت و قطعه نهایی را تا حد امکان برآورده سازد. بنا به دلایل ذکرشده از رزین اپوکسی Araldite LY5052 و سخت‌کننده Aradur 5052 ساخت شرکت هانتسمن آلمان استفاده شده است.

به منظور ساخت نمونه‌های آزمایش، اولین و مهم‌ترین بخش فرآیند انتقال رزین به قالب، ساخت قالب است. قالب مناسب (با ورودی و خروجی مناسب) در انجام دقیق فرآیند تأثیر فراوانی دارد. یکی از این موارد مهم، زمان پرشدن قالب است که وابسته به تعداد درگاه ورودی و خروجی رزین و موقعیت آن‌ها در قسمت‌های مختلف قالب است. در تحقیق حاضر، برای ساخت کفه پایین قالب از آلومینیوم ۶۰۶۱ استفاده شده که دلیل این امر، انتقال حرارت بالای آن، برای اعمال دما در حین فرآیند می‌باشد. برای ساخت کفه بالای قالب، نیاز به ماده‌ای است که هم تحمل دمایی بالا داشته باشد و هم شفاف باشد تا بتوان روند پرشدن قالب توسط رزین را مشاهده کرد. برای این امر از شیشه سیکوریت با مقاومت دمایی ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. به دلیل اینکه خواص مکانیکی (استحکام کششی و خمشی) یکی از متغیرهای مورد نظر می‌باشد، شکل حفره قالب طبق استاندارد ASTM D3930 ساخته شده و آزمایش‌ها نیز طبق استاندارد مذکور انجام گرفته‌اند. کفه پایین قالب که با کمک نرم‌افزار SolidWorks2017 طراحی شده است در شکل۱ قابل مشاهده است

۳-۲ پارامترهای ورودی فرآیند

متغیرهای ورودی در تحقیق حاضر، دمای قالب، فشار خلاء و موقعیت تزریق رزین است. دمای قالب در هر بار انجام فرآیند، باید مقدار ثابتی داشته باشد تا درهنگام انجام فرآیند از ایجاد تنش حرارتی، جلوگیری به عمل آید. دما در فرآیند انتقال رزین به قالب در عواملی نظیر مدیریت پخت رزین، کنترل زمان ژله‌ایی شدن رزین و کنترل ویسکوزیته رزین نقش بسیار تعیین کننده‌ای

شکل ۱) کفه پایینی قالب RTM

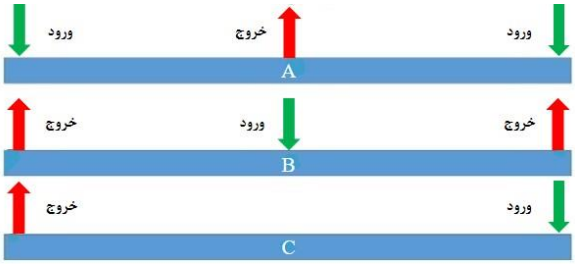
دارد[11,12]. همچنین فشار خلأ بایستی در تمام نقاط درونی قالب یکسان باشد. دلیل این امر این است که جریان حاصل شده هنگام تزریق رزین به قالب به شکل یکسان در تمام لایه‌ها پیشروی کند و تمام سطح قالب را بدون باقی گذاشتن مناطق خشک احاطه نماید. در نهایت موقعیت تزریق به عنوان یکی ازمهم‌ترین فاکتورهای ساخت قطعه به کمک فرآیند انتقال رزین به قالب به عنوان دیگر پارامتر ورودی مورد بررسی قرار گرفته است.

دماهای مورد بررسی قالب در این تحقیق شامل دماهای ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. دلیل انتخاب این دماها، بازه پیشنهادی کاتالوگ رزین مورد استفاده با کاربرد فرآیند انتقال رزین به قالب می‌باشد. فرآیند تزریق رزین به قالب فرآیندی است که در فشار پایین انجام می‌شود. در این پژوهش از یک پمپ خلأ برای دست‌یابی به فشار مورد نیاز استفاده شده است. استفاده از دمای پایین، زمان لازم برای پرشدن رزین و پخت آن را فراهم می‌کند که این امر مستلزم استفاده از فشار بالای رزین درقالب می‌باشد. متغیر فشار تزریق در این تحقیق ۰/۶، ۰/۸ و ۱ بار می‌باشد که با توجه به دماهای تزریق مشخص شده‌اند.

در نهایت در مورد موقعیت درگاه‌های ورودی و خروجی در فرآیند انتقال رزین به قالب، سه حالت کلی تزریق و مکش رزین(A، B و C) در نظر گرفته شد که در آن‌ها رنگ سبز(In) نشان‌دهنده ورودی رزین و رنگ قرمز(Out) خروجی هوا را نشان می‌دهد (شکل۲).

۳-۳ پارامتر های خروجی فرآیند

در تحقیق حاضر به منظور دستیابی به نتایج قابل اتکاء و در عین حال با کمترین تعداد آزمون، از روش طراحی آزمایش و به اختصار روش سطح پاسخ(RSM) استفاده شده است. روش سطح پاسخ به عنوان یکی از روش‌های مدل‌سازی تجربی مطرح است. در روش سطح پاسخ، سعی می‌شود تا با استفاده از یک طرح آزمایش مناسب، راهی برای تخمین برهم‌کنش‌ها، اثرات درجه دوم و حتی شکل موضعی سطح پاسخ مورد مطالعه یافته شود. در این میان اهداف خاصی به‌طور جدی دنبال می‌شوند که از مهمترین آن‌ها می‌توان به بهبود فرآیند با یافتن ورودی‌های بهینه، رفع مشکلات و نقاط ضعف فرآیند و پایدارسازی آن اشاره کرد. برای این کار از نرم‌افزار طراحی آزمایش Design Expert استفاده شده است که با توجه به تعداد پارامترها و متغیرهای هرکدام، تعداد ۱۹ آزمایش تعیین شده است (جدول ۱).



شکل ۲) سه طراحی محل ورودی رزین و خروجی هوا

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1400.21.8.4.6]

جدول ۱) طراحی آزمایش انجام گرفته در شرایط تعریف‌شده

شماره آزمایش	دمای قالب	فشار خلاء	موقعیت تزریق	شماره آزمایش	دمای قالب	فشار خلاء	موقعیت تزریق
۱	۷۰	۱	A	۱۱	۱۰۰	۰/۸	B
۲	۱۰۰	۱	B	۱۲	۷۰	۰/۶	A
۳	۱۳۰	۱	C	۱۳	۱۰۰	۰/۸	C
۴	۱۰۰	۰/۶	B	۱۴	۷۰	۱	C
۵	۱۳۰	۰/۶	A	۱۵	۱۰۰	۰/۸	B
۶	۱۰۰	۰/۸	B	۱۶	۷۰	۰/۶	C
۷	۱۳۰	۰/۶	C	۱۷	۱۳۰	۰/۸	B
۸	۱۰۰	۰/۸	B	۱۸	۱۰۰	۰/۸	B
۹	۷۰	۰/۸	B	۱۹	۱۰۰	۰/۸	A
۱۰	۱۳۰	۱	A				

۳-۴ ساخت نمونه آزمون

فرآیند انتقال رزین به قالب، با آماده‌سازی پیش‌فرم‌ها شروع می‌شود. مزیت استفاده از پیش‌شکل، جابجا نشدن پارچه در هنگام تزریق رزین به قالب و نیز بالا بردن در صد حجمی الیاف به کاربرده شده در این فرآیند است. برای تهیه پیش‌فرم بر طبق استاندارد ASTM D3039، ابتدا پارچه‌های کربن در اندازه ۲/۵×۲۵×۲۵۰ میلی‌متر و به تعداد ۱۶ لایه برای هر نمونه بریده شده‌اند. سپس با استفاده از اسپری چسباننده مخصوص به صورت موقت بر روی یکدیگر قرار گرفته و در نهایت با اعمال همزمان فشار و دما، پیش‌شکل مورد نظر ساخته شده است.

جهت ساخت نمونه‌های اصلی، پس از آن که پیش‌شکل در جای مناسب خود قرار داده شد، قالب بسته شده و آب‌بند شده است. آب‌بندکردن قالب به کمک خلأ کاملی که در فضای بین واشرهای داخلی و خارجی قالب اعمال شد، ایجاد شده که این خلاء فشار کافی را به جهت آب‌بندی اعمال کرده است. پس از بستن قالب، شرایط خلأ دیگری در فضای داخل قالب ایجاد شد که میزان آن بر مبنای طراحی آزمایش، انجام گرفته است. در این حالت قالب آماده دریافت رزین است. محل ورود رزین، از طریق لوله‌های سیلیکونی به قالب تعبیه شده‌اند (شکل۳).

در نهایت پس از پخت هر نمونه، خلأ قالب از روی آن برداشته و به جای آن، از هوای فشرده برای باز کردن قالب و خارج کردن قطعه استفاده شده است.

۳-۵ ارزیابی نمونه‌های ساخته‌شده

به منظور ارزیابی صحیح و کسب نتایج با دقت و صحت بالا، برای هر کدام از ۱۹ حالت آزمایش طراحی شده، تعداد ۶ نمونه ساخته شده است (۳ نمونه برای آزمون کشش و ۳ نمونه برای آزمون خمش) که در مجموع ۱۱۴ نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. از این طریق، تأثیر خطای انسانی و یا شرایط محیطی نیز در روش ساخت RTM مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق کفه بالایی قالب از جنس سکوریت شفاف ساخته شد تا زمان پرشدن قالب از زمان آزادسازی جریان ورودی تا زمان خیس شدن کل پیش‌شکل، به راحتی قابل اندازه‌گیری باشد. همچنین به جهت تعیین زمان پخت، از آزمون سوزن زدن به قطعه که یک روش تجربی است، استفاده شد. زمان پخت قطعه در فرآیند انتقال رزین به قالب، متغیری بسیار مهم است، چراکه تأثیر مستقیم بر تیراژ تولید دارد که این نکته، اهمیت این آزمایش را دوچندان می‌کند.

به منظور انجام آزمون کشش قبل از انجام آزمون، بر روی نمونه‌های ساخته شده تب‌های کامپوزیتی چسبانده شده است(شکل۴). اضافه‌کردن تب در ناحیه گیره‌های دستگاه کشش، با هدف کاهش تمرکز تنش در آن نواحی و جلوگیری از سر خوردن نمونه‌ها از درون فک‌های دستگاه، انجام گرفته است.

بعد از آماده‌سازی، نمونه‌های کشش بر روی دستگاه INSTRON4208 نصب و به جهت نزدیک شدن وضعیت آزمون به شرایط استاتیکی، تحت سرعت ۱/۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت (شکل ۵).

دومین آزمون انجام گرفته، آزمون خمش سه نقطه است. برای انجام این آزمون، نمونه‌ها طبق استاندارد ASTMD790-96 در ابعاد مناسب آماده شدند. براساس استاندارد مذکور به دلیل جلوگیري از سر خوردن نمونه‌ها در حین آزمایش، طول آن‌ها در هر طرف تکیه‌گاه می‌بایست حداقل ۱۰ درصد از فاصله بین دو تکیه‌گاه بلندتر باشد. به همین دلیل طول نمونه‌ها ۲۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.براي انجام آزمون خمش از دستگاه ZwickAmster HA-500 با میزان جابجایی ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه استفاده شد (شکل ۶).

شکل ۳) قالب ساخته شده جهت انجام عملیات ساخت نمونه‌ها و ارزیابی

شکل ۴) نمونه کامپوزیت کربن-اپوکسی آماده انجام آزمون به همراه تب در دو طرف آن

شکل ۵) نمونه کامپوزیتی ساخته شده تحت آزمون کشش

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1400.21.8.4.6]

شکل ۶) نمونه کامپوزیتی ساخته شده تحت آزمون خمش

۳-۶ بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند

پس از اندازه‌گیری زمان پخت رزین، زمان پرشدن قالب و انجام آزمون‌های مکانیکی، نتایج حاصل از این بررسی‌ها، به کمک نرم‌افزار DESIGN EXPERT تحلیل شده و پارامترهای بهینه برای دستیابی به خواص مکانیکی بالا و زمان ساخت پایین استخراج شدند. لازم به ذکر است که در مورد بررسی پارامتر ورودی رزین، به منظور تعریف حالت‌های مختلف به شکل عددی قابل فهم نرم‌افزار، از اعداد برای تفکیک حالت‌های مختلف استفاده شده است. به این صورت که در مورد پارامتر ورودی رزین، حالت A با (۱-)، حالت B با (۰) و حالت C با (۱) مشخص شده است.

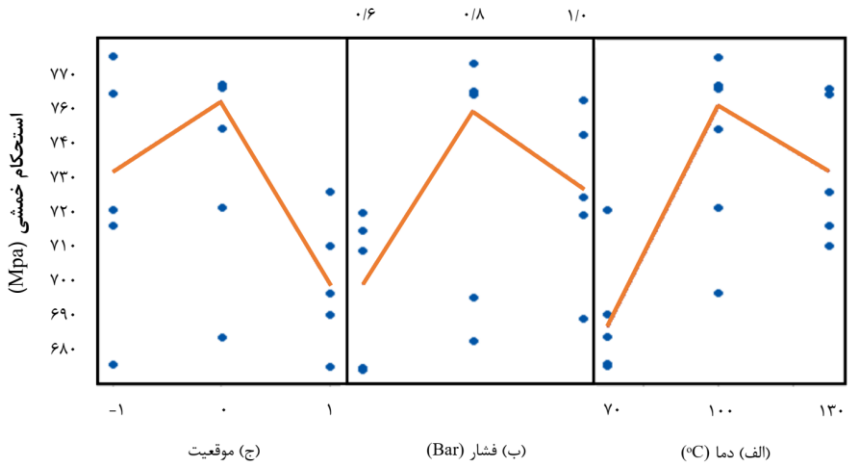
۴- نتایج و بحث

۴-۱- استحکام خمشی

در نمودار اول(شکل ۷) تأثیرپذیری استحکام خمشی از سه پارامتر ورودی دمای قالب، فشار خلاء و موقعیت تزریق نشان داده شده است. افزایش دمای فرآیند و قالب موجب افزایش پیوندهای جانبی در رزین شده که این عامل سبب بهبود خواص خمشی نمونه‌های ساخته شده می‌شود. البته ذکر این نکته ضروری است که افزایش بیش از حد دما، منجر به تخریب پلیمر، ایجاد ترک‌های ریز و به طبع آن کاهش خواص مکانیکی قطعه می‌شود (شکل ۷-الف). نتایج آزمایش‌ها نشان داد که به صورت میانگین، میزان استحکام خمشی نمونه‌ها در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۶۹۳/۹۶ مگاپاسکال، در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۷۴۹/۱۶ مگاپاسکال و در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد میزان استحکام خمشی ۷۳۶/۵ مگاپاسکال بوده است که یک کاهش در روند صعودی میزان استحکام خمشی، قابل مشاهده است.

تأثیر فشار خلاء بر میزان استحکام خمشی در (شکل ۷-ب) نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است، در مقدار فشار ۰/۶ بار، میزان استحکام خمشی ۷۰۴/۲۸ مگاپاسکال به دست آمده است که کمترین میزان این پارامتر بوده است. با افزایش فشار به ۰/۸بار استحکام خمشی به ۷۴۶/۳۷ مگاپاسکال رسیده است که بالاترین میزان در بین ۳ ورودی تحت بررسی بوده است. در ادامه و با افزایش میزان فشار به ۱ بار، این مقدار به ۷۳۱/۲ مگاپاسکال رسیده است. فشار خلاء در فرآیند انتقال رزین به قالب با استحکام نهایی قطعه ساخته شده، تا جایی که در الیاف ایجاد حباب نکند و بر جبهه جریان رزین تأثیر نگذارد، رابطه مستقیمی دارد، اما با افزایش بیش از حد این پارامتر خود یک مشکل اساسی تلقی می‌شود که این موارد به خوبی در نمودار به دست آمده قابل مشاهده هستند.

همانطور که در (شکل ۷-ج) دیده می‌شود، بالاترین استحکام خمشی نمونه را می‌توان در موقعیت B (یک ورودی رزین در وسط قالب و دو خروجی خلأ در دو انتهای قالب) مشاهده کرد. میزان استحکام خمشی به دست آمده در این شرایط ۷۴۶/۸۲ مگاپاسکال بوده است که این حالت در شکل، با عدد ۰ مشخص شده است. در این فرآیند هرچه جریان رزین همسان‌تر جاری شود، کریستال‌های رزین در امتداد هم خواهند بود و در نتیجه استحکام خمشی نیز بهبود می‌یابد. بیشترین حالت استحکام بعد از B، حالت A (دو درگاه ورودی رزین در گوشه‌ها و یک خروجی خلأ در مرکز) است که میزان آن ۷۳۰/۵ مگاپاسکال است. دلیل استحکام پایین‌تر این نمونه، وجود خط جوش در وسط قطعه می‌باشد. کمترین حالت استحکام نیز در نوع C (تزریق از یک سمت و خروج رزین در سمت دیگر) و به میزان ۷۰۴/۱۸ مگاپاسکال مشاهده شد. دلیل این امر، طولانی بودن مسیر حرکت رزین است که باعث بالا رفتن زمان پرشدن و سردشدن رزین در اواخر تزریق می‌شود که خود باعث ایجاد بیشترین درصد حباب می‌شود.



شکل ۷) نتایج استحکام خمشی نمونه‌ها بر اساس دمای قالب، فشار خلاء و موقعیت تزریق

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1400.21.8.4.6]

۴-۲ استحکام کششی

همانطور که در (شکل ۸-الف) مشاهده می‌شود، میزان استحکام کششی، روندی مشابه میزان استحکام خمشی را در اثر پارامترهای متغیر ورودی طی کرده است. به این صورت که در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین استحکام تسلیم به دست آمده که ۵۳۸ مگاپاسکال بوده است. میزان استحکام به دست آمده در دماهای ۷۰ و ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر ۴۸۷/۶۴ و ۵۲۳/۰۲ مگاپاسکال بوده است.

تغییرات روند حرکتی استحکام کششی بر طبق (شکل ۸-ب) قابل مشاهده است که بر طبق آن، میزان استحکام در هر سه فشار خلاء ۰/۶، ۰/۸ و ۱ بار به ترتیب برابر ۵۰۱/۱۴، ۵۳۴/۹۴ و ۴۱۵/۴۸ مگاپاسکال است. همانطور که مشاهده می شود، بازهم بهینه‌ترین حالت مربوط به فشار ۰/۸ بار می‌باشد.

در مورد موقعیت تزریق، بالاترین مقدار استحکام در موقعیت B و به میزان ۵۳۶/۱۱ مگاپاسکال به دست آمده است. پس از آن استحکام‌های ۵۱۷/۴۴ و ۴۹۶/۶۲ مگاپاسکال به ترتیب برای موقعیت‌های A و C حاصل شده است (شکل ۸-ج).

۴-۳ زمان پرشدن

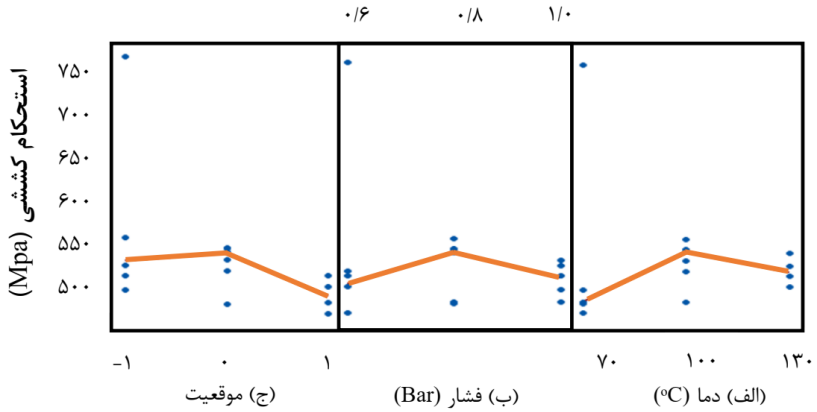
دمای قالب بر زمان پرشدن آن اثر مستقیمی دارد چراکه باعث کاهش ویسکوزیته رزین و در نتیجه افزایش سرعت تزریق به ویژه برای دماهای بالا می‌شود. البته دمای بیش از حد قالب می‌تواند باعث پخت سریع رزین و جلوگیری از پرشدن کامل قالب حتی در فشارهای خیلی بالا شود. با توجه به آزمون‌های انجام گرفته نتایج مربوط برای دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد زمان ۱۰/۹۱ دقیقه، برای دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد زمان ۹/۴۳ دقیقه و درنهایت برای دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد زمان ۷/۷۶ دقیقه تعیین شدند که روند کاهش زمان در اثر افزایش دما به خوبی قابل مشاهده است(شکل ۹-الف).

فشار خلأ نسبت معکوس با زمان پرشدن قالب دارد و تا میزان مشخصی این روند ادامه دارد که این مقدار به نوع رزین و ویژگی‌های آن وابسته است. در دماهای بالای دمای پخت(به دلیل سرعت بالای تغییر فاز رزین در این شرایط)، بایستی سرعت تزریق رزین را نیز با روند افزایشی فشار خلأ افزایش داد که این امر باعث ایجاد حباب در رزین شده و همچنین حرکت تار و پود پارچه در نواحی نزدیک به درگاه‌های ورودی رزین را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

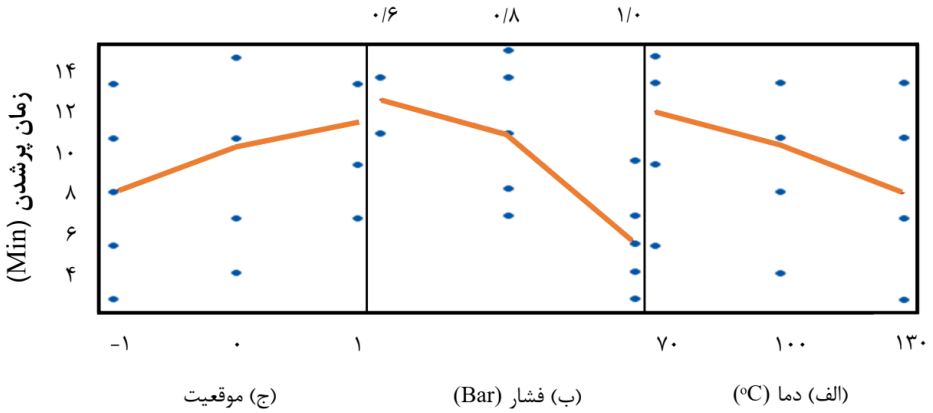
با توجه به (شکل ۹-ب) میانگین آزمون‌ها به این شرح است:

فشار ۰/۶ بار زمان ۱۱/۲ دقیقه، فشار ۰/۸ بار زمان ۱۰ دقیقه و فشار ۱ بار زمان ۶/۲ دقیقه.

محل تزریق رزین بر مبنای میزان خلاء، اثر مستقیم بر پرشدن کامل قطعه در زمان مناسب دارد. همانطور که در (شکل ۹-ج) قابل

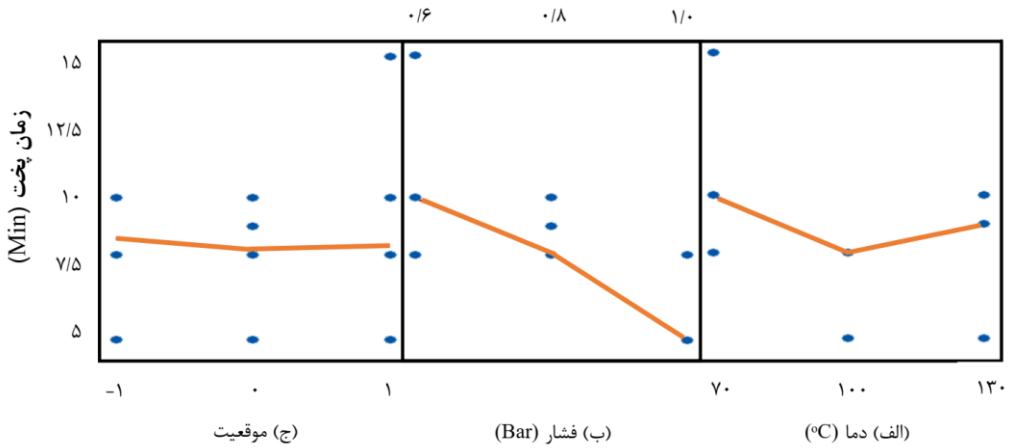


شکل ۸) نتایج استحکام کششی نمونه‌ها بر اساس دمای قالب، فشار خلاء و موقعیت تزریق



شکل ۹) نتایج زمان تزریق نمونه‌ها بر اساس دمای قالب، فشار خلاء و موقعیت تزریق

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1400.21.8.4.6]



شکل ۱۰) نتایج زمان پخت نمونه‌ها بر اساس دمای قالب، فشار خلاء و موقعیت تزریق

مشاهده است، موقعیت تزریق A به سبب دارا بودن دو ورودی برای تزریق، میزان رزین بیشتری را در زمان کمتر به قالب وارد می‌کند که سبب پرشدن زودتر قالب در این نمونه می‌شود. پس از آن نیز موقعیت‌های B و C زمان‌های بیشتری را دارا می‌باشند. نتایج برحسب انجام آزمایش‌ها نشان می‌دهند که کمترین زمان تزریق مربوط به موقعیت A بوده که زمان آن ۸ دقیقه بوده است. پس از آن موقعیت B با ۹/۴۴ دقیقه و موقعیت C با ۱۰/۴ دقیقه قرار دارند.

۴-۴ زمان پخت

در مورد زمان پخت، با افزایش دمای قالب تا دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد، زمان کاهش می‌یابد که دلیل آن ویسکوزیته پایین رزین می‌باشد. با گذر از این دما، زمان پخت شروع به افزایش می‌کند که دلیل آن پخت زودهنگام رزین و افزایش ویسکوزیته آن است. همانطور که در (شکل ۱۰-الف) نشان داده شده میزان زمان پخت در سه دمای ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر ۱۰/۲، ۷/۶۶ و ۷/۸ دقیقه است.

باتوجه به (شکل۱۰-ب) می‌توان مشاهده کرد که زمان پرشدن قالب با افزایش فشار خلاء روند کاهشی را طی می‌کند. دلیل این امر را می‌توان به دلیل کاهش نسبی دمای رزین در فشارهای خیلی بالا دانست. این تأثیر، خود علت کاهش زمان پخت قطعه می شود به شکلی که تا ۰/۸ بار کاهش دما در زمان پخت، اثر جزئی و در فشار خلأ بالاتر زمان پخت سریع تر کاهش می یابد. زمان پخت به دست آمده برای فشارهای ۰/۶، ۰/۸ و ۱ بار به ترتیب ۱۰/۶، ۸/۳۳ و ۶/۲ دقیقه است.

تعویض محل ورودی رزین با توجه به کوچک بودن قطعه، تأثیر اندکی در زمان پخت آن دارد، گرچه همانطور که در (شکل ۱۰-ج) مشاهده می شود، حالت B کمترین زمان را در بین سه موقعیت تعریف شده دارد و زمان پخت به دست آمده برای موقعیت‌های A، B و C به ترتیب ۸/۲، ۸ و ۹/۲ دقیقه تعیین شده است. البته لازم به ذکر است باتوجه به شرایط حالت A، در صورتی که از پمپ قوی‌تری استفاده می‌شد، به دلیل زودتر پرشدن قالب، زمان پرشدن کاهش می‌یافت.

۵- نتیجه‌گیری

• بر اساس نتایج به دست آمده، بالاترین استحکام خمشی در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، فشار ۰/۸ بار و در موقعیت تزریق B به دست آمده است

• در مورد استحکام کششی، بالاترین میزان مربوط به دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، فشار ۰/۸ بار و موقعیت تزریق B حاصل شده است که روندی مشابه با استحکام خمشی را طی کرده است.

• کمترین و بهترین مقادیر در مورد زمان پرشدن قالب در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، فشار ۱ بار و موقعیت تزریق A به دست آمده اند.

• در مورد زمان پخت نمونه، بهینه ترین زمان‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، فشار ۱ بار و موقعیت تزریق B حاصل شده‌اند.

• در نهایت باتوجه به داده‌های ورودی به نرم‌افزار، بهترین حالتی که برای رسیدن به بهینه‌ترین حالت ساخت نمونه و با اولویت قراردادن خواص مکانیکی پیشنهاد شد، در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲) بهینه‌ترین حالت ساخت نمونه با اولویت‌دهی به خواص مکانیکی

زمان پخت نمونه Min	زمان پر شدن قالب Min	استحکام کششی Mpa	استحکام خمشی Mpa	دمای قالب ℃	فشار خلأ Bar	نقطه تزریق
۷/۳	۸/۶	۵۴۶/۷	۷۵۹/۲	۱۰۶/۷	۰/۸۳	B

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تعارض منافع: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

سهم نویسندگان: سعید حافظی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۴۰ %)؛ مجید فولادوند (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۴۰ %)؛ محمدحسین علائی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰ %)

منابع مالی: از منابع تعیین شده جهت انجام پایان‌نامه تأمین شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1400.21.8.4.6]

منابع

1- Potter K. Resin transfer moulding. Springer Science & Business Media; 2012.
2- Lawrence JM, Hsiao KT, Don RC, Simacek P, Estrada G, Sozer EM, Stadtfeld HC, Advani SG. An approach to couple mold design and on-line control to manufacture complex composite parts by resin transfer molding. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2002;33(7):981-90.
3- Johnson RJ, Pitchumani R. Enhancement of flow in VARTM using localized induction heating. Composites science and technology. 2003;63(15):2201-15.
4- FIEDLER B, GOJNY FH, WICHMANN MH, BAUHOFER W, SCHULTE K. Can carbon nanotubes be used to sense damage in composites?. InAnnales de chimie (Paris. 1914) 2004 (Vol. 29, No. 6, pp. 81-94).
5- Rajabi Jalal S, Golzar M. Investigation of Parameters Effect Resin Movement Velocity at Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Method (VARTM). Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production. 2010;2(1):3-8.
6- Kedari VR, Farah BI, Hsiao KT. 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. 2011;45(26):2727-42.
7- Atas C, Akgun Y, Dagdelen O, Icten BM, Sarikanat M. An experimental investigation on the low velocity impact response of composite plates repaired by VARIM and hand lay-up processes. Composite Structures. 2011;93(3):1178-86.
8-Naik NK, Sirisha M, Inani A. Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM. Progress in aerospace sciences. 2014;65:22-40.
9- Vengalrao K, Kumar KP, Shanker DR, Srinivasababu N, Sateesh N. An Investigation on RTM Process Parameters and their Influence on Impact Failure Behavior of FRP Laminates. Materials Today: Proceedings. 2017;4(2):2167-73.
10-Magagnato D, Seuffert J, Bernath A, Kärger L, Henning F. Experimental and numerical study of the influence of integrated load transmission elements on filling behavior in resin transfer molding. Composite Structures. 2018;198:135-43.
11-Qi G. Wavelet-based AE characterization of composite materials. NDT & e International. 2000 ;33(3):133-44.
12- Lee CL, Wei KH. Resin transfer molding (RTM) process of a high performance epoxy resin. II: Effects of process variables on the physical, static and dynamic mechanical behavior. Polymer Engineering & Science. 2000;40(4):935-43.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-24]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1400.21.8.4.6]