Archive of SID

بررسی تاثیر پارامترهای موثر در سرعت حرکت رزین در روش انتقال رزین به داخل قالب به کمک خلاء (VARTM)

سجاد رجبی‌جلال[۱]، محمد گلزار[۲]

چکیده

در این مقاله ابتدا فرآیند با حل تحلیلی شبیه‌سازی شده است و سپس پارامترهای موثر در سرعت حرکت رزین از جمله تاثیر ضخامت لایه توزیع، ضخامت پریفرم، درصد حجمی الیاف و ویسکوزیته مورد بررسی قرار گرفته شده است و به این نتایج رسیده شده است که با انتخاب بهینه نسبت بین ضخامت لایه توزیع و پریفرم، کاهش ویسکوزیته، افزایش درصد حجمی الیاف می‌توان حداکثر سرعت را در فرآیند بدست آورد تا در کمترین زمان بتوان قطعات بزرگ را با کیفیت مطلوبتر از روشهای دیگر تولید نمود. بنابراین با بهینه‌سازی پارامترهای موثر در فرآیند VARTM می‌توان طراحی مناسبی برای تولید قطعات بزرگ انجام داد و با حداقل مشکلات آنها را تولید کرد.

کلمات کلیدی: سرعت تزریق، معادله دارسی، VARTM

فهرست علائم			
طول ناحیه اشباع- ناحیه بدون جریان عرضی (m)	D	فشار وکیوم (pa)	P_0
طول جبهه جریان- ناحیه با جریان عرضی (m)	d	سرعت رزین در لایه‌توزیع ناحیه اشباع(m/s)	U_1
ضخامت (m)	h	سرعت رزین در لایه‌پریفرم ناحیه اشباع (m/s)	U_2
ضخامت لایه‌توزیع (m)	h_1	سرعت جبهه جریان (m/s)	U_F
ضخامت پریفرم (m)	h_2	سرعت دارسی (m/s)	u
ضریب نفوذپذیری (m^2)	K	سرعت عرضی رزین از لایه‌توزیع به لایه‌پریفرم (m/s)	u_{12y}
ضریب نفوذپذیری در جهت جریان در لایه‌توزیع (m^2)	K_{1xx}	سرعت افقی در ناحیه جبهه جریان در لایه‌توزیع (m/s)	u_{1x}
ضریب نفوذپذیری در جهت جریان در لایه‌پریفرم (m^2)	K_{2xx}	ویسکوزیته رزین (pa.s)	μ
ضریب نفوذپذیری در جهت عمود بر جریان (جهت ضخامت) (m^2)	K_{2yy}	ضریب تخلخل در لایه‌توزیع	ϕ_1
ثابت کازنی- کارمن	K	ضریب تخلخل در پریفرم	ϕ_2
طول نمونه (m)	L	اختلاف فشار (pa)	ΔP

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشگاه تربیت مدرس

www.SID.ir

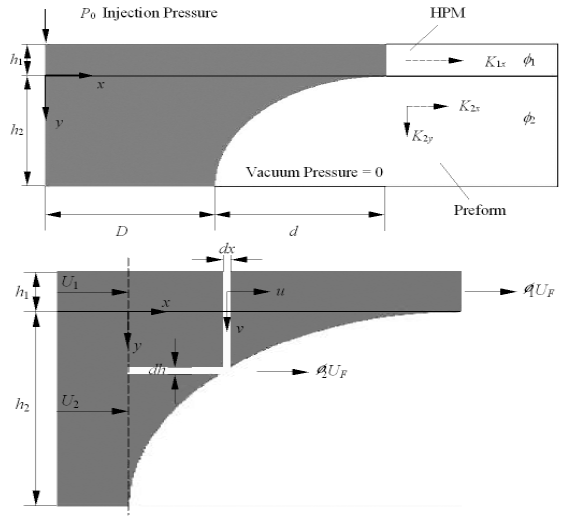
Archive of SID

۱- مقدمه

یکی از روش‌های تولید کامپوزیت‌ها، فرآیند قالبگیری با انتقال رزین یا Resin Transfer Molding (RTM)، می‌باشد که زیر مجموعه دسته وسیع‌تری بنام قالبگیری مایعی مواد کامپوزیتی، Liquid Composite Molding (LCM) است. این فرآیند برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۴۰ توسط نیروی دریایی ایالات متحده برای ساخت قایق‌هایی از جنس پلاستیکهای تقویت شده با الیاف شیشه استفاده شد. در اوایل دهه ۱۹۵۰ در انگلستان صنایع گوناگونی از فرآیند RTM بعنوان روشی پیشرفته‌تر نسبت به روش لایه‌گذاری دستی استفاده کردند. در اوایل دهه هفتاد نیز از این فرآیند به شکلی محدود جهت ساخت قطعات مورد استفاده در نیروی دریایی استفاده شد. اما رشد چشمگیر و روز افزون استفاده از RTM به اواسط دهه هشتاد بر می‌گردد. مزایای ویژه و منحصر بفرد فرآیند RTM سبب شده است که امروزه مورد توجه بیشتر تولید کنندگان در صنعت کامپوزیت قرار گیرد. تاکنون شکلهای متنوعی از فرآیند RTM ارائه و مورد استفاده قرار گرفته است. مهمترین آنها فرآیند قالبگیری با انتقال رزین به کمک اعمال خلاء یا Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)، می‌باشد.

بر خلاف فرآیندهای RTM سنتی که با استفاده از قالب‌های نسبتا صلب انجام می‌شوند، در فرآیند VARTM از یک نیمه انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود. نیمه کف قالب، صلب بوده و کیسه‌های خلاء بر روی آن نصب می‌شوند. با توجه به انعطاف‌پذیری قالب فشار اتمسفر و تغییرات فشار رزین در پریفرم، سبب فشردگی پریفرم و تغییر ضخامت آن در شرایط مختلف می‌گردد. در این فرآیند مکش خلاء در مقایسه با فشار تزریق، نقش عمده‌ای در حرکت جریان در پریفرم الیاف دارد. از این رو، فرآیند VARTM برای قالبگیری قطعات بزرگ کامپوزیتی مفید خواهد بود. بنابراین مدلسازی و شبیه‌سازی فرآیند و بهینه‌سازی پارامترهای آن نقش عمده‌ای در اجرای فرآیند ایفا می‌کند که در این رابطه تحقیقاتی انجام شده است از جمله آقای میچل در زمینه مدلسازی و شبیه‌سازی فرآیند VARTM برای پره‌های توربین بادی تحقیقات خود را انجام داده‌اند [۱]. آقای آلفرد و همکارانش در رابطه با توسعه مدل و آنالیز فرآیند VARTM تحقیقات خود را انجام داده‌اند [۲]. آقای رنلینگ و همکارانش در رابطه با مدلسازی و شبیه‌سازی فرآیند VARTM با معادل قرار دادن نفوذپذیری تحقیقات خود را انجام داده‌اند [۳]. آقای بریوک حلی تحلیلی را برای مدل جریان در فرآیند VARTM بدست آورده و آن را با مدل کامپیوتری مورد مقایسه قرار داده است [۴].

۲- استخراج معادلات



شکل (۱): مدل دو لایه جریان رزین در فرآیند VARTM [۳]

در اینجا با اعمال فرضیات ساده کننده و برای یک هندسه ساده حلی تحلیلی برای جریان رزین در فرآیند VARTM بدست می‌آید. راه‌حل مزبور نقش متغیرهای مختلف فرآیند و تعامل آنها را حین فرآیند توضیح می‌دهد. در واقع حل تحلیلی نه تنها به مطالعه و بهینه‌سازی پارامتریک مسأله می‌پردازد بلکه دید بهتری در رابطه با افزایش مقیاس فرآیند و پارامترهای مواد برای قطعات بزرگ می‌دهد. همچنان که در شکل ۱ نشان داده شده است، در لایه‌چینی مواد دو لایه نفوذپذیر وجود دارد.

۱- لایه‌توزیع (Distribution layer)

۲- لایه‌پریفرم (Structural layer)

لایه توزیع رزین (لایه ۱) لایه‌ای است که رزین در آن جریان یافته و در قسمت جبهه جریان، رزین از این لایه با جریان عرضی به داخل لایه پریفرم (لایه ۲) نفوذ می‌کند. لایه توزیع بسیار نازک‌تر از لایه پریفرم می‌باشد $h_1 << h_2$. فرض می‌شود که جریان کاملاً توسعه یافته است و می‌تواند به دو ناحیه اشباع

www.SID.ir

Archive of SID

(بدون جریان عرضی) و ناحیه جبهه جریان (با جریان عرضی) تقسیم شود. مدلسازی جریان رزین را هم می‌توان به صورت دو بعدی و هم سه بعدی درنظر گرفت. در مدلسازی دو بعدی جریان رزین در ضخامت قطعه، یکنواخت در نظر گرفته می‌شود [۵]. در اینجا مدلسازی به صورت دو بعدی در نظر گرفته شده است و فرض می‌شود که جریان توسعه یافته به دو قسمت ۱- ناحیه اشباع (بدون جریان عرضی رزین) و ۲- ناحیه جبهه جریان (با جریان عرضی رزین از لایه ۱ به لایه ۲) تقسیم می‌شود. قانون بقای جرم و قانون دارسی در حل مسأله به کار می‌روند. پس از آن معادلات حاصله بی بعدسازی شده و پس از حل شدن، شکل جبهه جریان و سرعت حرکت ناحیه اشباع بدست می‌آید.

جریان رزین از داخل یک فضای متخلخل مثل لایه‌توزیع رزین (لایه ۱) و پریفرم الیاف (لایه ۲) از قانون دارسی (معادله ۱) تبعیت می‌کند.

$$u = \frac{-K}{\mu}.\nabla P \qquad (۱)$$

۲- در رابطه دارسی u سرعت دارسی، k تنسور نفوذپذیری و μ ویسکوزیته رزین می‌باشد. با تراکم‌ناپذیر در نظر گرفتن سیال و ترکیب معادله دارسی با معادله پیوستگی (معادله ۲) خواهیم داشت:

$$\nabla.\left(\frac{K}{\mu}.\nabla P\right) = 0 \qquad (۲)$$

جبهه جریان در لایه توزیع (لایه۱) به صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود [۴]. در ناحیه اشباع در لایه‌های ۱ و ۲ به ترتیب جریان U_1 و U_2 می‌باشد که به صورت یک بعدی درنظر گرفته شده‌اند و در عین حال از قانون دارسی تبعیت می‌کنند. فرض می‌شود که جبهه جریان به طول d شکل خود را که با رابطه h_F بدست می‌آید به صورت ثابت حفظ می‌کند و با سرعت یکنواخت افقی U_F حرکت می‌کند. U_F سرعت مشاهده شده رزین است و سرعت دارسی نمی‌باشد. $u_{12y}(v)$ سرعت عرضی رزین از لایه ۱ به لایه ۲ است. $u_{1x}(u)$ سرعت افقی در ناحیه جبهه جریان در لایه ۱ می‌باشد و با اعمال شرایط مرزی، در معادله ۳ داریم:

$$u(x = D + d) = \phi_1 U_F \qquad (۳)$$

با توجه به این که رزین سیالی تراکم‌ناپذیر است، با استفاده از معادله پیوستگی و قانون دارسی در لایه ۲، معادله حاکم برای توزیع فشار بدست می‌آید (معادله ۴).

$$K_{2x}\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + K_{2y}\frac{\partial^2 P}{\partial_{y^2}} = 0 \qquad (۴)$$

بعد از بی بعدسازی و با اعمال شرایط مرزی معادلات حل شده و در نهایت سرعت حرکت رزین (معادله ۱۲) به صورت زیر استخراج شده است.

$$U_2^* = \frac{U_2}{U_F} = \frac{\left(\phi_1.h_1 + \phi_2.h_2\right)}{\left(\frac{k_{1xx}}{k_{2xx}}.h_1 + h_2\right)} \qquad (۵)$$

$$h_1^* = \frac{h_1}{h_2} \qquad (۶)$$

$$D^* = \frac{D}{h_2} \qquad (۷)$$

$$K^*_{2xx} = \frac{K_{2xx}}{K_{1xx}} \qquad (۸)$$

$$K^*_{2yy} = \frac{K_{2yy}}{K_{1xx}} \qquad (۹)$$

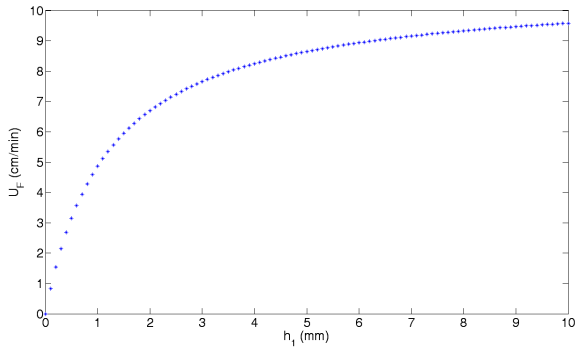
$$\Gamma = \frac{U_2^*}{K^*_{2xx}} \qquad (۱۰)$$

$$\Lambda = \frac{(\phi_2 - U_2^*)}{K^*_{2yy}} \times \sqrt{\left(\frac{2K^*_{2yy}}{3h^*_1} + \frac{\phi_1 K^*_{2yy}}{\phi_2 - U^*_2}\right)} \qquad (۱۱)$$

$$U_F = \frac{K_{1xx} P_0}{\mu h_2}.\frac{1}{\Gamma D^* + \Lambda} \qquad (۱۲)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر ضخامت لایه‌توزیع در سرعت حرکت رزین



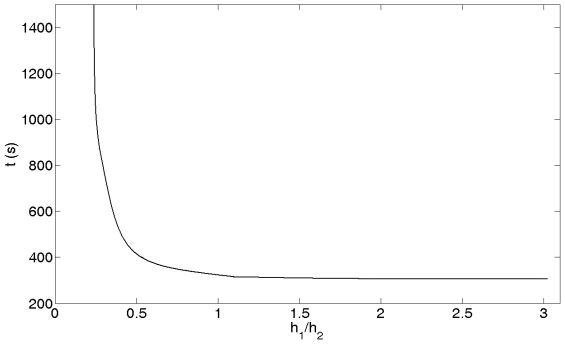
شکل (۲): تاثیر ضخامت لایه‌توزیع در سرعت حرکت رزین

www.SID.ir

Archive of SID

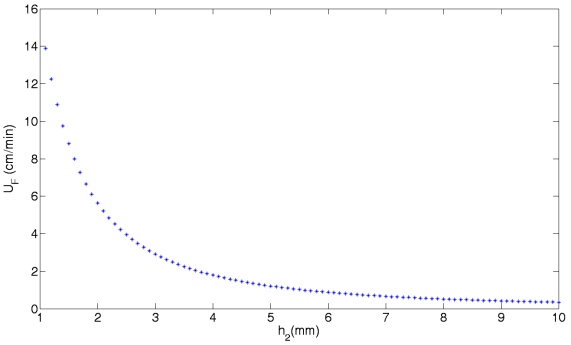
با توجه به شکل (۲) نتیجه گرفته می‌شود که هر چه ضخامت لایه توزیع افزایش یابد سرعت حرکت رزین نیز افزایش می‌یابد تا جایی که تغییرات سرعت بسیار ناچیز می‌گردد و افزایش ضخامت لایه توزیع باعث نیاز لایه‌توزیع به رزین زیادی برای تولید قطعه خواهد شد که این موضوع از لحاظ هزینه مقرون به صرفه نخواهد بود و همچنین افزایش حجم رزین داخل فرآیند باعث افزایش افت فشار می‌شود بنابراین بعد از یک حدی سرعت دوباره کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل (۳) بهترین محدوده نسبت بین ضخامت لایه‌توزیع و لایه‌پریفرم بین ۰/۵ تا ۱ می‌باشد یعنی اگر این نسبت کمتر از ۰/۵ باشد زمان پر شدن قالب به شدت افزایش می‌یابد و اگر بیشتر از ۱ باشد زمان پر شدن قالب بسیار جزئی تغییر می‌کند.



شکل (۳): زمان پر شدن قالب برحسب ضخامت لایه توزیع به ضخامت لایه پریفرم

۳-۲- تاثیر ضخامت لایه‌پریفرم در سرعت حرکت رزین

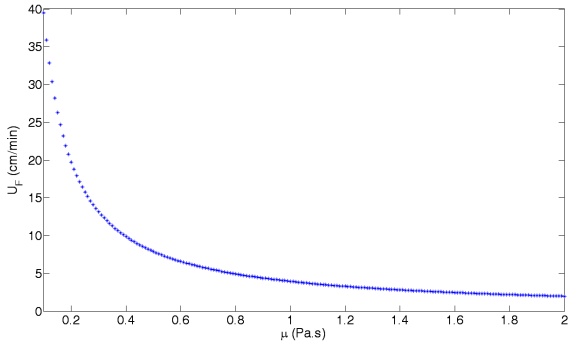


شکل (۴): تاثیر ضخامت لایه‌پریفرم در سرعت حرکت رزین

با توجه به شکل (۴) نتیجه گرفته می‌شود که هرچه ضخامت لایه‌توزیع افزایش یابد سرعت حرکت رزین کاهش می‌یابد البته این سرعت با یک ضخامت ثابت لایه توزیع بدست آورده شده است یعنی می‌توان با رعایت نسبت بهینه بین لایه‌توزیع و لایه-پریفرم سرعت‌های بالاتری در ضخامت‌های زیاد پریفرم گرفت.

۳-۳- تاثیر مقدار ویسکوزیته در سرعت حرکت رزین

با توجه به شکل (۵) نتیجه گرفته می‌شود که هر چه ویسکوزیته افزایش یابد سرعت حرکت رزین کاهش می‌یابد بنابراین بهترین محدوده برای ویسکوزیته رزین (Pa.s) 0.1-0.5 می‌باشد البته رزینهایی که دارای ویسکوزیته‌های بالایی می‌باشند را می‌توان توسط مواد رقیق کننده‌ای مخلوط کرد و ویسکوزیته آن را کاهش داد ولی آزمایشات نشان داده است که خواص مکانیکی تا حدودی کاهش می‌یابد.



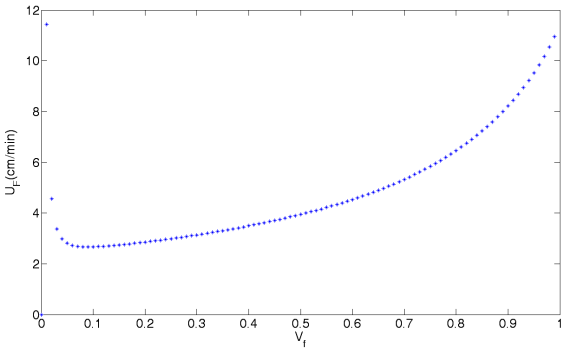
شکل (۵): تاثیر ویسکزیته رزین در سرعت حرکت رزین

۳-۴- تاثیر درصد حجمی الیاف در سرعت حرکت رزین

با توجه به شکل (۶) نتیجه گرفته می‌شود که هرچه درصد حجمی الیاف افزایش یابد سرعت حرکت رزین افزایش می‌یابد این به دلیل آن است که حجم رزین مورد نیاز کمتر می‌باشد و درصد حجمی الیاف با افزایش تراکم الیاف بیشتر می‌شود ولی میزان حباب‌ها نیز به نسبت افزایش تراکم، افزایش می‌یابد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۶): تاثیر درصد حجمی الیاف در سرعت حرکت رزین

۴- نتیجه گیری

با بهینه‌سازی پارامترهای موثر در فرآیند VARTM می‌توان طراحی مناسبی برای تولید قطعات بزرگ انجام داد و با حداقل مشکلات آنها را تولید کرد. از این رو در این مقاله با شبیه‌سازی فرآیند به این نتایج رسیده شده است که با انتخاب بهینه نسبت بین ضخامت لایه‌توزیع و پریفرم، کاهش ویسکوزیته، افزایش درصد حجمی الیاف، افزایش میزان تخلخل لایه‌توزیع و افزایش خلاء به میزان حداکثر می‌توان حداکثر سرعت را در فرآیند بدست آورد تا در کمترین زمان بتوان قطعات بزرگ را با کیفیت مطلوبتر از روشهای دیگر تولید نمود.

مراجع

1- Michael S., "Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades", Industrial Ph.D. Dissertation, Special Report NO. 50, Institute of Mechanical Engineering, Danish Academy of Technical Sciences, January 2003.
2- Alfred C., Donald G., Romesh C., Zafer G., John J., "Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) Model Development, Verification, and Process Analysis", Doctor of Philosophy in Materials Engineering Science, 2000.
3- Renliang C., Chensong D., Zhiyong L., Chuck Z., Ben W., "Flow Modeling and Simulation for Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process With the Equivalent Permeability Method", Polymer Composites, Vol. 25, No. 2, April 2004.
4- Bruce K., Fink K., Roopesh M., John W., Gillespie J., Suresh G., "Advani. An Analytical Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) Flow Model", Army Research Laboratory, ARL-TR-2354, October 2000.
5- Bruschke, M. V., and S. G. Advani., "A Finite Element/Control Volume Approach to Mold Filling in Anisotropic Porous Media", Polymer Composites, Vol. 11, pp. 398-405, 1990.

www.SID.ir