

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

سجاد رجبی جلال^۱، محمد گلزار^{*۲}

تاریخ دریافت: ۲۹ دی ۹۱ تاریخ پذیرش: ۱۰ اردیبهشت ۹۲

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.

واژه‌های کلیدی: سرعت تزریق، معادله دارسی، VARTM.

۱. مقدمه

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 نسبتاً 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

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 تولیدکنندگان در صنعت

۱ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران m.golzar@modares.ac.ir

۲ استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۱- لایه توزیع (Distribution layer)

۲- لایه پریفرم (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 $h_1 \ll h_2$. فرض می‌شود که جریان کاملاً توسعه یافته است و می‌تواند به دو ناحیه اشباع (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 در نظر 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 لایه توزیع رزین (لایه ۱) و پریفرم الیاف (لایه ۲) از قانون دارسی (معادله ۱) تبعیت می‌کند.

$$\mathbf{u} = \frac{-\mathbf{K}}{\mu} \cdot \nabla P \quad (1)$$

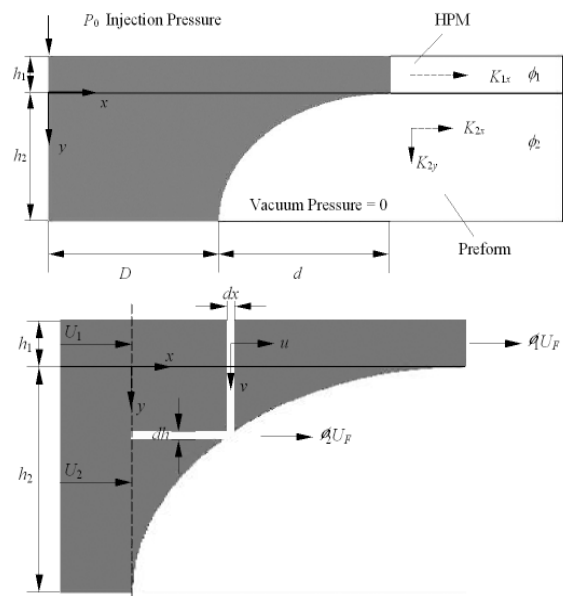
۲- در رابطه دارسی \mathbf{u} سرعت دارسی، \mathbf{k} تنسور نفوذپذیری و μ ویسکوزیته رزین می‌باشد. با تراکم‌ناپذیر در نظر گرفتن سیال و ترکیب معادله دارسی با معادله پیوستگی (معادله ۲) خواهیم داشت:

$$\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \nabla P \right) = 0 \quad (2)$$

جبهه جریان در لایه توزیع (لایه ۱) 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

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 بویوک 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

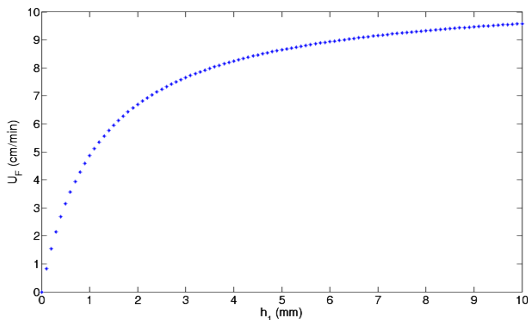


شکل (۱): مدل دو لایه جریان رزین در فرآیند VARTM

[۳]

در اینجا با اعمال فرضیات ساده کننده و برای یک هندسه ساده حلی تحلیلی برای جریان رزین در فرآیند VARTM بدست می‌آید. راه حل 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 است، در لایه چینی مواد دو لایه نفوذپذیر وجود دارد.

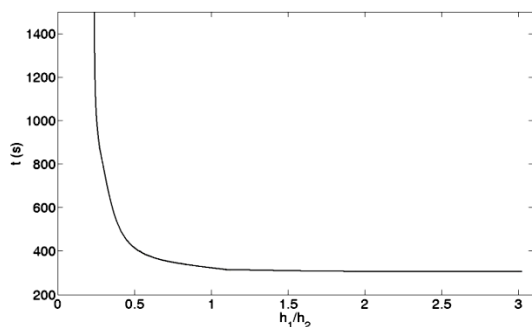
۳-۱- تاثیر ضخامت لایه توزیع در سرعت حرکت رزین



شکل (۲): تاثیر ضخامت لایه توزیع در سرعت حرکت رزین

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 لایه توزیع 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 لایه توزیع و لایه پریفرم 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 بر حسب ضخامت لایه توزیع به ضخامت لایه پریفرم

در نظر گرفته شده‌اند و در عین حال از قانون داریسی 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 داریسی 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:

$$u(x = D + d) = \phi_1 U_F \quad (3)$$

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

$$K_{2x} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + K_{2y} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

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.

$$U_2^* = \frac{U_2}{U_F} = \frac{(\phi_1 \cdot h_1 + \phi_2 \cdot h_2)}{\left(\frac{k_{1xx}}{k_{2xx}} \cdot h_1 + h_2 \right)} \quad (5)$$

$$h_1^* = \frac{h_1}{h_2} \quad (6)$$

$$D^* = \frac{D}{h_2} \quad (7)$$

$$K_{2xx}^* = \frac{K_{2xx}}{K_{1xx}} \quad (8)$$

$$K_{2yy}^* = \frac{K_{2yy}}{K_{1xx}} \quad (9)$$

$$\Gamma = \frac{U_2^*}{K_{2xx}^*} \quad (10)$$

$$\Lambda = \frac{(\phi_2 - U_2^*)}{K_{2yy}^*} \times \sqrt{\left(\frac{2K_{2yy}^*}{3h_1^*} + \frac{\phi_1 K_{2yy}^*}{\phi_2 - U_2^*} \right)} \quad (11)$$

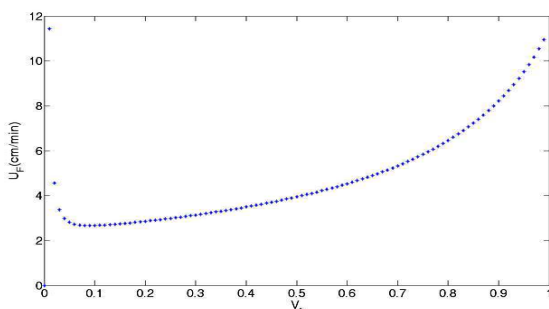
$$U_F = \frac{K_{1xx} P_0}{\mu h_2} \cdot \frac{1}{\Gamma D^* + \Lambda} \quad (12)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۲- تاثیر ضخامت لایه پریفورم در سرعت حرکت رزین

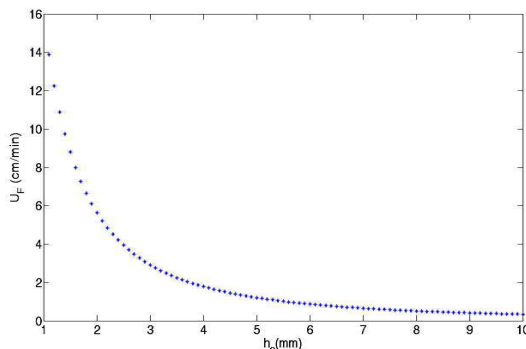
۳-۴- تاثیر درصد حجمی الیاف در سرعت حرکت رزین

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.



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

رزین

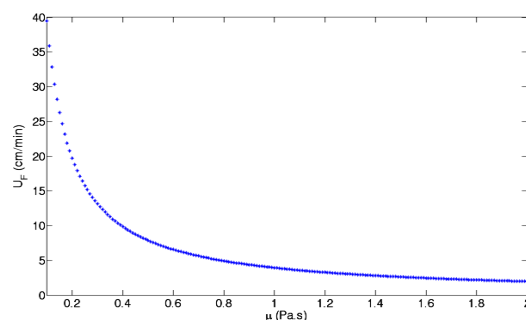


شکل (۴): تاثیر ضخامت لایه پریفورم در سرعت حرکت رزین

با توجه به شکل (۴) نتیجه گرفته می‌شود که هرچه ضخامت لایه توزیع 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 لایه توزیع و لایه پریفورم سرعت‌های بالاتری در ضخامت‌های زیاد پریفورم 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 0.1-0.5 (Pa.s) 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 ویسکوزیته رزین در سرعت حرکت رزین

۴- نتیجه گیری

درصد حجمی الیاف، افزایش میزان تخلخل لایه توزیع و افزایش خلاء به میزان حداکثر می توان حداکثر سرعت را در فرآیند بدست آورد تا در کمترین زمان بتوان قطعات بزرگ را با کیفیت مطلوبتر از روشهای دیگر تولید نمود.

با بهینه سازی پارامترهای موثر در فرآیند VARTM می توان طراحی مناسبی برای تولید قطعات بزرگ انجام داد و با حداقل مشکلات آنها را تولید کرد. از این رو در این مقاله با شبیه سازی فرآیند به این نتایج رسیده شده است که با انتخاب بهینه نسبت بین ضخامت لایه توزیع و پریفرم، کاهش ویسکوزیته، افزایش

فهرست علائم

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

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] Brusckhe, 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.