

بهبود روش ساخت پوسته بال هواپیما از جنس مواد مرکب

سجاد رجبی جلال^۱ و محمد گلزار^۲

بخش مکانیک مهندسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹ / ۹ / ۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹ / ۷ / ۴

چکیده

در این مقاله روش انتقال رزین به داخل قالب به کمک خلاء (VARTM) به عنوان جایگزینی مناسب برای روشهای موجود برای ساخت پوسته بال هواپیما معرفی شده است. برای این منظور، قطعاتی توسط روش VARTM و دست ساخته و از لحاظ خواص مکانیکی، سرعت ساخت و هزینه مورد مقایسه قرار گرفته اند. قطعات ساخته شده به روش VARTM دارای درصد حباب کمتر و درصد حجمی بالاتر نسبت به روش دستی بوده و افزایش درصد حباب در قطعات باعث کاهش خواص مکانیکی شده است. همچنین، با بهینه سازی پارامترهای موثر در روش VARTM می توان سرعت ساخت را در این روش نسبت به روش دستی افزایش داد.

واژه های کلیدی: مواد مرکب، پوسته بال هواپیما، خواص مکانیکی، VAR

Important of Composite Material Aircraft Wing Skin Manufacturing

S. Rajabi – Jalal¹ & M. Golzar²

Mech. Eng. Group
Engineering Dep't.
Tarbiat – Modarres Univ.

ABSTRACT

In this article, an innovative method for filling the aircraft wings, farms with resin (using VARTM) is presented. This method is a suitable alternative for manual methods. Certain parts are made using both methods and their mechanical properties, speed of their production, and their cost have been compared. The ones made by VARTM have less bubbles and thus more volume fraction. This leads to better mechanical properties. Also, by optimizing the effective properties in VARTM, the production speed is increased compared to the manual method.

Keywords: Composite Material, Aircraft Wing Skin, Mechanical property, VAR.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد (نویسنده پاسخگو): s.rajabi@modares.ac.ir

^۲ استادیار

۱- مقدمه

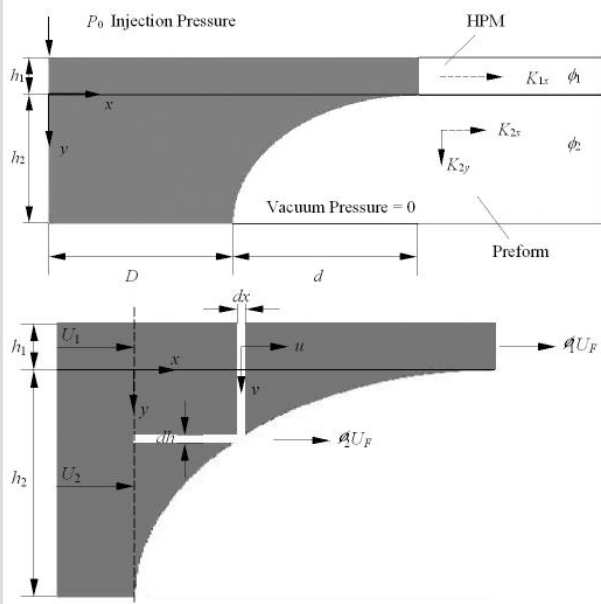
هم اکنون در اکثر شرکتهایی که در زمینه ساخت مواد مرکب در ابعاد بزرگ فعالیت دارند هنوز از فرآیند دستی به دلیل کم هزینه بودن، استفاده می شود که کیفیت این قطعات پایین بوده و میزان آن به مهارت فردی بستگی دارد و برای قطعات حساس، مثل بال هواپیما و پره های توربین بادی، در بعضی از کشورها از روش پیش آغشته ها^۱ در دستگاه اتوکلاو استفاده می کنند که این روش دارای کیفیت خوب ولی هزینه زیاد می باشد.

یکی از روش های تولید مواد مرکب ها، فرآیند قالبگیری با انتقال رزین یا (RTM)^۲، می باشد که زیر مجموعه دسته وسیع تری بنام قالبگیری مایعی مواد مرکب، (LCM)^۳ است. این فرآیند برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۴۰ توسط نیروی دریایی ایالات متحده برای ساخت قایق هایی از جنس پلاستیکهای تقویت شده با الیاف شیشه استفاده شد. در اوایل دهه ۱۹۵۰ در انگلستان صنایع گوناگونی از فرآیند RTM بعنوان روشی پیشرفته تر نسبت به روش لایه گذاری 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 می گردد. مزایای ویژه و منحصر بفرد فرآیند RTM سبب شده است که امروزه مورد توجه بیشتر تولیدکنندگان در صنعت مواد مرکب قرار گیرد. تاکنون شکل های متنوعی از فرآیند RTM ارائه و مورد استفاده قرار گرفته است که مهمترین آنها فرآیند قالبگیری با انتقال رزین بکمک اعمال خلاء یا (VARTM)^۴، می باشد.

بر خلاف فرآیند های RTM سنتی که با استفاده از قالب های نسبتاً صلب انجام می شوند، در فرآیند VARTM از یک نیمه انعطاف پذیر استفاده می شود. نیمه کف قالب، صلب بوده و کیسه های خلاء بر روی آن نصب می شوند. با توجه به انعطاف پذیری قالب فشار اتمسفر و تغییرات فشار رزین در شکل اولیه، سبب فشردگی شکل اولیه و تغییر

ضخامت آن در شرایط مختلف می گردد. در این فرآیند مکش در مقایسه با فشار تزریق، نقش عمده ای در حرکت جریان در شکل اولیه الیاف دارد. از این رو، فرآیند VARTM برای قالبگیری قطعات بزرگ مواد مرکبی مفید خواهد بود. بنابراین، مدلسازی و شبیه سازی فرآیند و بهینه سازی پارامترهای آن نقش عمده ای در اجرای فرآیند ایفا می کند. بنابراین، ما با بهبود پارامترهای موثر در فرآیند VARTM سعی داریم با کاهش مهارت فردی و کاهش تعداد نفرات و بالا بردن سرعت تولید، هزینه را کاهش دهیم و کیفیت را با مکانیزه شدن فرآیند که باعث کاهش حباب و افزایش درصد حجمی و در نهایت افزایش خواص مکانیکی می شود را افزایش دهیم.

در این رابطه تحقیقاتی انجام شده است. از جمله در رابطه با شبیه سازی فرآیند VARTM، آقای سجاد رحبی جلال و محمد گلزار در رابطه با شبیه سازی فرآیند و تاثیر تراکم الیاف در سرعت حرکت رزین تحقیقات خود را انجام داده اند و به این نتیجه رسیده اند که با افزایش تراکم الیاف سرعت حرکت رزین افزایش می یابد [۱]. میچل در زمینه مدلسازی و شبیه سازی فرآیند VARTM برای پره های توربین بادی تحقیقات خود را انجام داده است [۲]. آلفرد و همکارانش در رابطه با توسعه مدل و آنالیز فرآیند VARTM تحقیقات خود را انجام داده اند [۳]. رنلینگ و همکارانش در رابطه با مدلسازی و شبیه سازی فرآیند VARTM با معادل قرار دادن نفوذپذیری تحقیقات خود را انجام داده اند [۴]. آقای آدوانی و همکارانش حلی تحلیلی را برای مدل جریان در فرآیند VARTM بدست آورده و آن را با مدل کامپیوتری مورد مقایسه قرار داده است [۵]. و در رابطه با خواص مکانیکی تحقیقات کاو نشان داد که کاهش ۲ تا ۱۰ درصدی خواص مکانیکی عموماً با افزایش هر یک درصد حباب گزارش شده است [۶]. محاسبات جود و رایت نشان داد به ازای هر ۴ درصد حباب در مواد مرکبی ۷ درصد از استحکام برشی آن کاسته می شود [۷]. تحقیقات وارنا و همکارانش نشان داد خواص کششی، فشاری، خمشی و برشی مواد مرکب های پلیمری با افزایش درصد حباب، کاهش می یابد [۸]. رامش و همکارش اثرات حباب در مواد مرکبی را مورد بررسی قرار دادند که نشان از کاهش



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

لایه توزیع رزین (لایه ۱) لایه ای است که رزین در آن جریان یافته و در قسمت جبهه جریان، رزین از این لایه با جریان عرضی به داخل لایه شکل اولیه (لایه ۲) نفوذ می کند. مدلسازی جریان رزین را هم می توان به صورت دوبعدی و هم سه بعدی در نظر گرفت. در مدلسازی دو بعدی جریان رزین در ضخامت قطعه، یکنواخت در نظر گرفته می شود [۱۱]. در اینجا مدلسازی به صورت دو بعدی در نظر گرفته شده است و فرض می شود 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 می شود. قانون بقای جرم و قانون دارسی در حل مسأله به کار می روند. پس از آن معادلات حاصله بی بعدسازی شده و پس از حل شدن، شکل جبهه جریان و سرعت حرکت ناحیه اشباع بدست می آید.

جریان رزین از داخل یک فضای متخلخل مثل لایه توزیع رزین (لایه ۱) و شکل اولیه الیاف (لایه ۲) از قانون دارسی (معادله ۱) تبعیت می کند.

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

خواص مکانیکی بود [۹]. نیناک کانزر و همکارانش نشان دادند که با افزایش میزان خلأ و اجازه دادن به خروج حباب ها و رزین بعد از اتمام عملیات تزریق، میزان حباب ها در قطعات مواد مرکبی کاهش می یابد [۱۰].

در این تحقیق، ابتدا پارامترهای موثر در روش VARTM توسط حلی تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته شده است و برای این منظور نمونه هایی برای بررسی این پارامترها به صورت عملی ساخته شده و با تئوری موجود مورد مقایسه قرار گرفته شده است. همچنین خواص مکانیکی این قطعات با روش دستی نیز مورد مقایسه قرار گرفته شده است و برای شناسایی مشکلات ساخت قطعات پیچیده، قطعاتی با ابعاد متوسط ساخته شده است. و در نهایت با بررسی و بهبود پارامترهای موثر در روش VARTM به صورت تئوری و عملی و رفع کلیه مشکلات ساخت در قطعات پیچیده و با کسب تجربه کافی برای ساخت قطعات توسط این روش، پوسته بال ۹ متری با موفقیت کامل ساخته شده و مقایسه ای با نمونه دستی انجام شده است.

۲- استخراج معادلات

در اینجا با اعمال فرضیات ساده کننده و برای یک هندسه ساده حلی تحلیلی برای جریان رزین در فرآیند VARTM بدست می آید. راه حل مزبور نقش متغیرهای مختلف فرآیند و تعامل آنها را حین فرآیند توضیح می دهد. در واقع حل تحلیلی نه تنها به مطالعه و بهینه سازی پارامتریک مسأله می پردازد بلکه دید بهتری در رابطه با افزایش مقیاس فرآیند و پارامترهای مواد برای قطعات بزرگ می دهد. همچنان که در شکل ۱ نشان داده شده است، در لایه چینی مواد دو لایه نفوذ پذیر وجود دارد:

- ۱- لایه توزیع^۱
- ۲- لایه شکل اولیه^۲

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

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

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

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

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

در روابط فوق U_F سرعت جبهه جریان، U_2 سرعت رزین در لایه شکل اولیه ناحیه اشباع، P_0 فشار و کیوم، h_1 ضخامت لایه توزیع، h_2 ضخامت شکل اولیه، ϕ_1 ضریب تخلخل در لایه توزیع، ϕ_2 ضریب تخلخل در شکل اولیه، d طول جبهه جریان - ناحیه با جریان عرضی، D طول ناحیه اشباع - ناحیه بدون جریان عرضی، K_{1xx} ضریب نفوذپذیری در جهت جریان در لایه توزیع، K_{2xx} ضریب نفوذپذیری در جهت جریان در لایه شکل اولیه، K_{2yy} ضریب نفوذپذیری در جهت عمود بر جریان (جهت ضخامت) می باشد.

۳- روش تحقیق

۳-۱- مواد بکار رفته

در این تحقیق، مشخصات مواد بکار رفته و پارامترهای مورد نیاز برای شبیه سازی در جداول ۳-۱ آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات رزین استفاده شده در تستها.

شماره نمونه ها	نوع رزین	دانسیته رزین (g/cm^3)	Viscosity at 25°C (mPas)
1-7	Epoxy (Epolam 2015)	1.1	650
8-10	Epoxy (Renlam M-1)	1.1	1200

در رابطه دارسی u سرعت دارسی، k تنسور نفوذپذیری و μ ویسکوزیته رزین می باشد. با تراکم ناپذیر در نظر گرفتن سیال و ترکیب معادله دارسی با معادله پیوستگی خواهیم داشت:

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

جبهه جریان در لایه توزیع (لایه ۱) به صورت یکنواخت در نظر گرفته می شود [5]. در ناحیه اشباع در لایه های ۱ و ۲ به ترتیب جریان U_1 و U_2 می باشد که به صورت یک بعدی در نظر گرفته شده اند و در عین حال از قانون دارسی تبعیت می کنند. فرض می شود که جبهه جریان به طول d شکل خود را به صورت ثابت حفظ می کند و با سرعت یکنواخت افقی U_F حرکت می کند. U_F سرعت مشاهده شده رزین است و سرعت دارسی نمی باشد. u_{12y} سرعت عرضی رزین از لایه ۱ به لایه ۲ است. u_{1x} سرعت افقی در ناحیه جبهه جریان در لایه ۱ می باشد، با اعمال این شرایط مرزی داریم:

$$u_{1x}(x = D + d) = \phi_1 U_F. \quad (3)$$

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

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

بعد از بی بعد سازی و با اعمال شرایط مرزی معادلات حل شده و در نهایت سرعت حرکت رزین بصورت استخراج شده است:

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

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

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

جدول (۲): مشخصات شکل اولیه.

شماره نمونه ها	دانسیتة سطحی الیاف بافته شده (g/m^2)	درصد حجمی الیاف	h_2 (m) $\times 10^{-3}$	h_1 (m) $\times 10^{-3}$
1	200	۴۸.۱	2.55	0
2				0.7
3				1.4
4				2.1
5				2.8
6				4.9
7				7.7
8	100	۴۳.۳	2.5	1.4
9	200	۴۸.۱	2.55	1.4
10	600	54.1	2.7	1.4

برای عبور رزین و سرعت بخشیدن به حرکت رزین، وکیوم بگ، چسب مناسب برای آب بندی، لوله تزریق، رابط، فشار سنج، پمپ وکیوم و مخزن اطمینان برای جلوگیری از ورود رزین به داخل پمپ برای ساخت قطعات توسط روش VARTM و از قلم مو و غلتک برای ساخت توسط روش دستی استفاده شده است و همچنین از وسایل جانبی از قبیل دستگاه برش برای برش نمونه های تستی نیز استفاده شده است.

۳-۳- روش انجام کار

در آزمایشات انجام شده بر روی خواص مکانیکی ابتدا قطعات با الیافی با تراکم های $100 g/m^2$ ، $200 g/m^2$ و $600 g/m^2$ ، با روش VARTM و دستی ساخته شده است و درصد حجمی الیاف با استفاده از استاندارد ASTM D2584-68 [12] و میزان وجود حباب با استفاده از استاندارد ASTM D2384-68 [13] در نقاط مختلف قطعه ساخته شده به روش VARTM و دستی اندازه گیری شده و مورد بحث قرار گرفته شده است و همچنین مقاومت کششی با استفاده از استاندارد ISO 527-4 [14] بدست آورده شده و در نهایت مقایسه ای بین این دو انجام شده است.

در آزمایشات انجام شده بر روی پارامترهای موثر در فرآیند VARTM ابتدا تاثیر تراکم الیاف برای تراکمهای الیاف ۱۰۰، ۲۰۰ و ۶۰۰ گرمی مورد بررسی قرار گرفته شده است و سپس تاثیر نسبت ضخامت لایه توزیع به ضخامت لایه شکل اولیه و ویسکوزیته رزین در نمونه ۲۰۰ گرمی مورد بررسی قرار گرفته شده است که هدف از این آزمایشات تعیین تاثیر تراکم الیاف، نسبت ضخامت لایه توزیع به ضخامت لایه شکل اولیه و تعیین تاثیر ویسکوزیته رزین در سرعت حرکت رزین می باشد. همچنین تاثیر نسبت افزایش ضخامت لایه توزیع به ضخامت لایه شکل اولیه در زمان پر شدن قالب، طول جبهه جریان و ضرایب نفوذپذیری نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است.

برای انجام این کار ابتدا نمونه ها در ابعاد 350×50 میلیمتر و در ضخامت $2/55-2/75$ میلیمتر تهیه شده است و سرعت حرکت رزین در حین فرآیند اندازه گیری شده است که این سرعت حاصل از فرآیند با تئوری ارائه شده نیز مقایسه شده است. به دلیل متفاوت بودن تراکم الیاف و

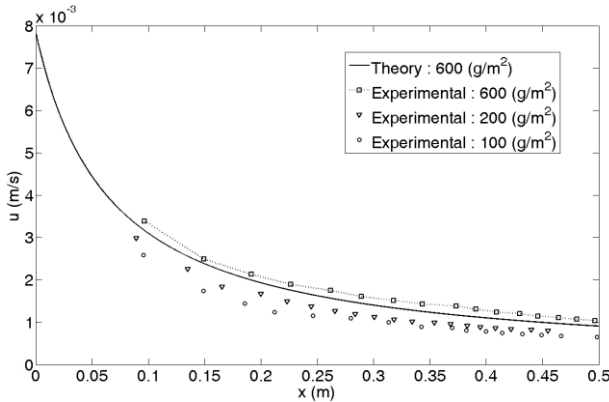
جدول (۳): مشخصات ضرایب نفوذپذیری.

شماره نمونه ها	K_{1xx} (cm^2) $\times 10^{-6}$	K_{2xx} (cm^2) $\times 10^{-6}$	K_{2yy} (cm^2) $\times 10^{-6}$
1	776	5.2	0.4
2			0.25
3			0.15
4			0.12
5			0.1
6			0.035
7			0.025
8		8.5	0.5
9		5.2	0.4
10		3.2	0.3

الیاف مورده استفاده در این تحقیق، الیاف E-Glass و با چگالی $2.5(g/cm^3)$ و میانگین قطر الیاف ۱۲ میکرومتر می باشد و لایه توزیع به کار برده شده دارای درصد تخلخل ۸۰ درصد می باشد و خلاء ایجاد شده توسط پمپ 0.8 bar- نسبی می باشد...

۳-۲- تجهیزات به کار رفته

برای ساخت قطعات علاوه بر اینکه از قالب، جداکننده، الیاف و رزین استفاده شده است از لایه توزیع بر روی شکل اولیه

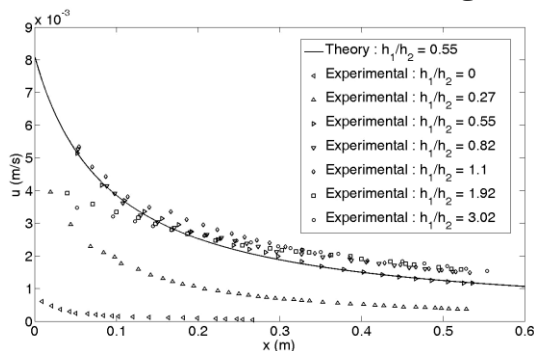


شکل (۲): نتایج مسافت - سرعت حرکت رزین حاصل از تئوری و آزمایش در اثر تغییر تراکم الیاف.

۴-۲- تاثیر ضخامت لایه توزیع در سرعت حرکت رزین

یکی از موضوعات بسیار مهم در سرعت حرکت رزین نسبت ضخامت لایه توزیع به لایه شکل اولیه می باشد بنابراین یافتن نسبت بهینه می تواند در بالا بردن سرعت حرکت رزین در ساخت قطعات بزرگ کمک کند.

با توجه به شکل ۳ نتیجه گرفته می شود که تا یک حدی از نسبت ضخامت لایه توزیع به ضخامت لایه شکل اولیه تغییرات سرعت زیاد می باشد ولی بعد از آن تغییرات بسیار جزئی می شود، بنابراین بهترین محدوده این نسبت بین ۰/۵-۱ می باشد یعنی با توجه به شکل ۴ اگر این نسبت کمتر از ۰/۵ باشد زمان پر شدن قالب به شدت افزایش می یابد و اگر بیشتر از ۱ باشد زمان پر شدن قالب بسیار جزئی تغییر می کند.



شکل (۳): نتایج مسافت - سرعت حرکت رزین حاصل از تئوری و آزمایش در اثر تغییر ضخامت لایه توزیع در الیاف ۲۰۰ گرمی.

ضخامت لایه توزیع در نمونه ها، مقدار نفوذپذیری نیز متفاوت بوده و در نتیجه سرعت حرکت رزین در آنها متفاوت می باشد.

برای مقایسه سرعت حرکت رزین در عمل و تئوری، ابتدا می بایست سرعت حرکت رزین در تئوری را محاسبه کنیم برای انجام این کار نیاز به ضریب نفوذپذیری داریم که مقدار آن را توسط روش هندسی بصورت زیر می توان محاسبه کرد:

$$K = \frac{D_f^2 (1 - V_f)^3}{16k V_f^2}, \quad (13)$$

$$\phi = 1 - V_f. \quad (14)$$

در روابط فوق K ضریب نفوذ پذیری، V_f درصد حجمی الیاف، D_f قطر الیاف، k ثابت کازنی-کارمن و ϕ ضریب تخلخل است. بعد از آزمایشات انجام شده مقدار ثابت k برای الیاف بافته شده 0.01 و برای لایه توزیع 1.65 بدست آورده شده است.

از روابط فوق ضرایب نفوذ پذیری K_{1xx} و K_{2xx} محاسبه می شود ولی ضریب نفوذ پذیری K_{2yy} را از طول جبهه جریان و با استفاده از رابطه (۱۵) بدست آورده می شود.

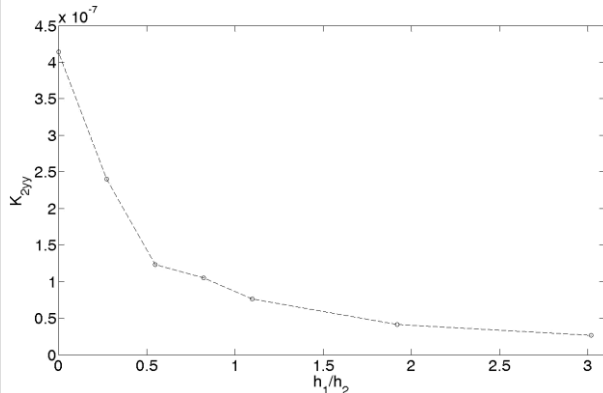
۴- نتایج و بحث

$$K_{2yy} = \left(\frac{3h_1 K_{1xx}}{d} \left(\sqrt{\frac{\phi_1}{\phi_2 - U_2^*} + \frac{2}{3h_1^*}} \right) - \sqrt{\frac{\phi_1}{\phi_2 - U_2^*}} \right)^2 \quad (15)$$

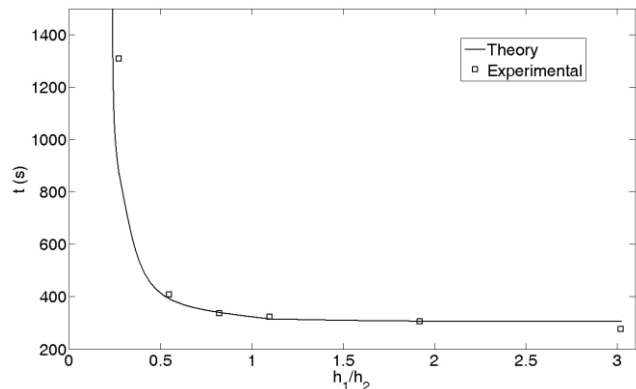
۴-۱- بررسی تاثیر تراکم الیاف در سرعت حرکت رزین

به دلیل اینکه پوسته بال از الیافی با تراکمهای مختلف ساخته شده است بنابراین بررسی تاثیر تراکم الیاف در سرعت حرکت رزین مهم می باشد.

با توجه به شکل ۲ نتیجه گرفته می شود که هر چه تراکم الیاف بیشتر باشد درصد حجمی الیاف و ضریب نفوذ پذیری بیشتر شده و در نتیجه سرعت حرکت رزین نیز افزایش می یابد که این به دلیل افزایش گام بین الیاف، در تراکم های بالاتر می باشد.



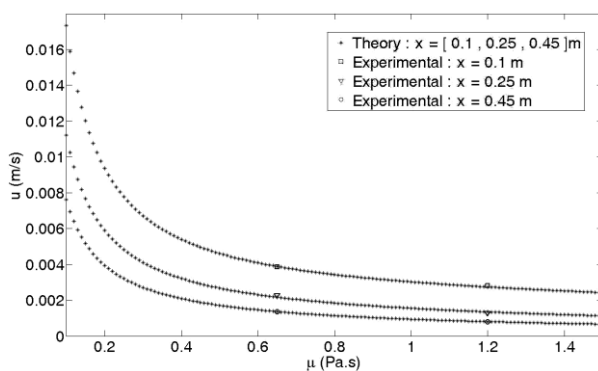
شکل (۶): تاثیر نسبت ضخامت لایه توزیع به لایه شکل اولیه در ضریب نفوذپذیری ضخامت لایه شکل اولیه.



شکل (۴): زمان پر شدن قالب بر حسب ضخامت لایه توزیع به ضخامت لایه شکل اولیه.

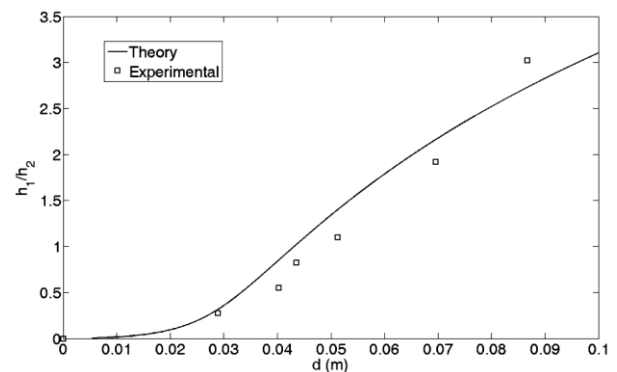
۴-۳- تاثیر ویسکوزیته در سرعت حرکت رزین

دانستن محدوده ویسکوزیته در این فرآیند در انتخاب رزین و همچنین در بالا بردن سرعت حرکت رزین موثر می باشد. با توجه به شکل ۷ هر چه ویسکوزیته افزایش یابد سرعت حرکت رزین کاهش می یابد، با توجه به آزمایشات و تجربیات بدست آمده توصیه می کنیم که ویسکوزیته رزین کمتر از 0.18 (Pa.s) باشد در غیر این صورت سرعت حرکت رزین به شدت کاهش می یابد. البته رزینهایی که دارای ویسکوزیته های بالایی می باشند را می توان توسط مواد رقیق کننده ای مخلوط کرد و ویسکوزیته آن را کاهش داد ولی آزمایشات نشان داده است که خواص مکانیکی تا حدودی کاهش می یابد.



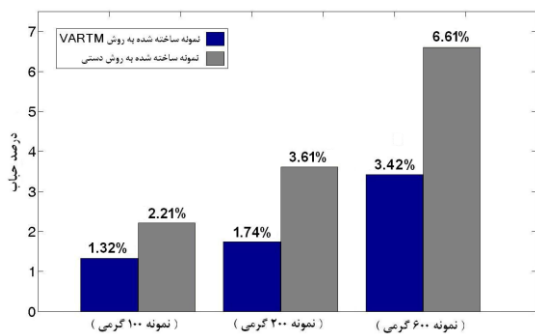
شکل (۷): تاثیر ویسکوزیته رزین در سرعت حرکت رزین.

با افزایش ضخامت لایه توزیع، طول جبهه جریان نیز افزایش می یابد (شکل ۵)، این موضوع به دلیل این است که نسبت افزایش سرعت در لایه توزیع بیشتر از لایه شکل اولیه است یا به عبارت دیگر نفوذپذیری در ضخامت لایه کاهش می یابد (شکل ۶) و این موضوع در انتهای مسیر امکان پر شدن بعضی از نقاط شکل اولیه را فراهم می سازد و همچنین مقدار رزین در ضخامت های زیاد لایه توزیع بیشتر نیاز می باشد چون رزین زیادی باید از قالب عبور کند تا بتواند کل ایفای انتهای مسیر را آغشته به رزین کند. و در نمونه آزمایشی یک نوع ناپیوستگی در پر شدن رزین ایجاد می شود که این موضوع باعث می شود حتی بعضی از قسمتهای ایفای میانی نیز به سختی پر شود.



شکل (۵): تاثیر نسبت ضخامت لایه توزیع به لایه شکل اولیه در طول جبهه جریان در نمونه ۲۰۰ گرمی.

که زمان ژل شدن رزین به اندازه کافی زیاد نیست و حبابها فرصت کافی برای خارج شدن از قالب را پیدا نمی کنند و تجمعی از این حبابها در محل مکش باقی می ماند، حال چنانچه زمان ژل شدن رزین به اندازه کافی زیاد باشد کلیه حبابها فرصت کافی برای خروج از قالب را دارند و در این حالت درصد حباب در کل قطعه یکنواخت می شود.



شکل (۹): درصد حباب در نمونه های ساخته شده به روش VARTM و دستی.

همچنین افزایش هر یک درصد حباب در قطعات، مقاومت کششی را از ۳-۸ درصد در قطعات تست شده کاهش داده است و همچنین به دلیل بالا بودن درصد حجمی الیاف در قطعات ساخته شده به روش VARTM، استحکام کششی به وزن آن نیز نسبت به روش دستی بیشتر می باشد (جدول ۴).

جدول (۴): نتایج حاصل از اندازه گیری خواص مکانیکی.

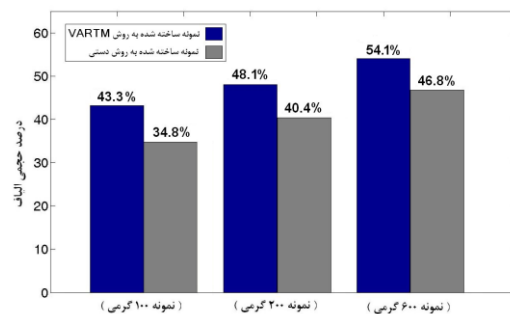
نمونه ها	درصد حجمی الیاف	درصد حباب	استحکام کششی (MPa)	استحکام کششی به وزن (MPa/g)
۱۰۰ گرمی با روش VARTM	43.3	1.32	238.3	81.19
۱۰۰ گرمی با روش دستی	34.8	2.21	225.69	65.27
۲۰۰ گرمی با روش VARTM	48.1	1.74	215.47	81.79
۲۰۰ گرمی با روش دستی	40.4	3.61	191.35	63.86
۶۰۰ گرمی با روش VARTM	54.1	3.42	259.83	70.55
۶۰۰ گرمی با روش دستی	46.8	6.61	210.24	51.39

۴-۴- بررسی کیفیت قطعات تولید شده به روش

VARTM

برای نشان دادن کیفیت قطعات ساخته شده به روش VARTM نسبت به روش دستی، خواص مکانیکی قطعات از قبیل درصد حجمی الیاف، درصد حباب، استحکام کششی و تاثیر میزان حباب در مقاومت کششی مورد بررسی قرار گرفته شده است.

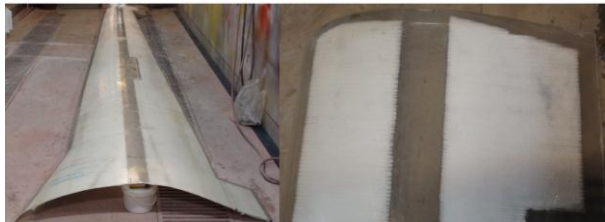
با توجه به شکل ۸ درصد حجمی الیاف در قطعات ساخته شده به روش VARTM نسبت به روش دستی، بیشتر می باشد که این تفاوت در نمونه های ۱۰۰ گرمی ۲۰ درصد، نمونه ۲۰۰ گرمی ۱۶ درصد و نمونه ۶۰۰ گرمی ۱۴ درصد افزایش درصد حجمی الیاف در نمونه های ساخته شده به روش VARTM نسبت به روش دستی می باشد از اینرو دارای وزن کمتری نیز می باشند.



شکل (۸): درصد حجمی الیاف در نمونه های ساخته شده به روش VARTM و دستی.

با توجه به شکل ۹ نتیجه گرفته می شود که درصد حباب در نمونه های ساخته شده با روش VARTM نسبت به روش دستی کمتر است که این تفاوت در نمونه های ۱۰۰ گرمی ۴۰ درصد، نمونه ۲۰۰ گرمی ۵۲ درصد و نمونه ۶۰۰ گرمی ۴۸ درصد کاهش حباب ساخته شده به روش VARTM نسبت به روش دستی می باشد و همچنین در نمونه های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۶۰۰ گرمی، به ترتیب با افزایش درصد حباب مواجه هستیم و این به علت افزایش گامهای بین الیاف است که رزین نتوانسته به طور کامل آنها را پر کند.

معمولا درصد حباب در اطراف محل تزریق نسبت به محل مکش کمتر است و درصد حباب با حرکت به سمت محل مکش رفته رفته افزایش می یابد این به آن دلیل است



شکل (۱۱): پوسته ۹ متری ساخته شده به روش VARTM.

از لحاظ وزنی پوسته بال ساخته شده به روش VARTM نسبت به روش دستی حدود ۲۰ درصد کاهش وزن داشته است بنابراین به دلیل کاهش حباب و کاهش وزن در این روش، استحکام ویژه پوسته ساخته شده با روش VARTM بالاتر از روش دستی بوده است.

۵- نتیجه گیری

فرآیند VARTM به دلیل مکانیزه شدن، قابلیت کنترل خوب خواص مکانیکی قطعه تولید شده با استفاده از شکل اولیه مناسب، کیفیت مناسب در هر دو طرف قطعه، کاهش چشمگیر میزان حباب در قطعه، کنترل مطلوب محیطی، بالا بودن درصد حجمی الیاف و غیره باعث شده که استفاده از این فرآیند جایگاه ویژه ای در صنعت مواد مرکب پیدا کند و همچنین 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.

مراجع

1. Rajabi, S. and Golzar, M. "Effect of Woven Fabric Density and Distribution Media on Vartm Filling Process", *Experimental Techniques and Design in Composite Materials*. Vol. 30, 2009.
2. Michael, S. "Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades", Ph.D. Dissertation, Mech. Eng., 2003.
3. Alfred, C., Donald, G., Romesh, C., Zafer, G., and John, J. "Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM), Model Development, Verification, and Process Analysis", Ph.D. Dissertation, Materials Engineering Science, 2000.
4. Renliang, C., Chensong, D., Zhiyong, L., Chuck, Z., and Ben, W. "Flow Modeling and Simulation for Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process with the Equivalent Permeability Method", *Polymer*

۴-۵- ساخت پوسته بال ۹ متری

با بررسی و بهبود پارامترهای موثر در روش VARTM به صورت تئوری و عملی و رفع کلیه مشکلات ساخت در قطعات پیچیده و با کسب تجربه کافی برای ساخت قطعات توسط این روش، پوسته بال ۹ متری با موفقیت کامل ساخته شده و مقایسه ای از لحاظ زمانی، کیفیت و وزنی نسبت به پوسته بال ساخته شده توسط روش دستی انجام شده است. با توجه به ساعات کاری فرآیند ها، به این نتیجه رسیده شده است که زمان تولید توسط روش VARTM نصف زمان روش دستی شده است و این به دلیل آن است که با بهبود پارامترهای تزریق، سرعت را تا حد امکان افزایش داده ایم و همچنین تعداد نفرات کمتری در زمان اجرای فرآیند نیاز می باشد (شکل ۱۰) که این موضوع خود باعث کاهش هزینه می شود.



شکل (۱۰): تزریق رزین در ساخت پوسته بال ۹ متری.

همچنین، به دلیل حذف مهارت فردی و مکانیزه کردن سیستم، کیفیت حاصله نسبت به روش دستی بهتر بوده است و آغشته شدن الیاف با رزین به حدی در این روش عالی صورت گرفته است که رگه های الیاف در قطعه مشاهده نمی شود (شکل ۱۱) ولی در روش دستی این رگه ها بسیار دیده می شود و این به دلیل آغشته نشدن کامل تارهای الیاف با رزین می باشد.

- Composites, Vol. 25, No. 2, 2004.
5. Bruce, K., Fink, K., Roopesh, M., John, W., Gillespie, J., Suresh, G., and Advani, "An Analytical Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) Flow Model", Army Research Laboratory, ARL-TR-2354, 2000.
 6. Autark, and Kaw, "Micromechanical Analysis of Lamina", Mechanics of Composite Material, 2nd Ed., Taylor and Francis, 2006.
 7. Judd, N., and Wright, W. "Voids and their effects on the Mechanical Properties of Composites-an Appraisal", SAMPE J, Vol. 14, No. 1, pp. 10-14, 1978.
 8. Varna, J., Joffe, R., Berglund, LA., and Lundstrom, TS., "Effect of Voids on Failure Mechanisms in RTM Laminates" Compos Sci. Tech., Vol. 53, No. 2, pp. 231-249, 1995.
 9. Hansong, H., and Ramesh, T., "Effects of Void Geometry on Elastic Properties of Unidirectional Fiber Reinforced Composites, Department of Aerospace Engineering" Texas A&M University, 736B HR Bright Building, College Station, TX, USA, 2005.
 10. Kuentzer, N.P., Simacek, G., and Advani, S., "Correlation of Void Distribution to VARTM Manufacturing Techniques", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38, No. 3, 2007.
 11. Brusckke, M.V., and Advani, S.G., "A Finite Element/Control Volume Approach to Mold Filling in Anisotropic Porous Media", Polymer Composites, Vol. 11, pp. 398-405, 1990.
 12. ASTM D2584-02. "Standard Test for Ignition Loss of Cured Reinforced Resin", 2002.
 13. ASTM D2734-94, "Test Methods for Void Content of Rein", 1994.
 14. ISO527-4 "International Standard, Plastics-Determination of Tensile Properties", Part 4: Test Condition for Isotropic and Orthotropic Fiber-Reinforced Plastic Composites, 1997.