

تحلیل مرحله پرشدن در فرایند قالبگیری انتقالی رزین با پوسته قالب منعطف به کمک خلاء با احتساب اثرات لوله تزریق

محمود مهرداد شکریه^۱ و سیدرسول آتشی پور^۲

آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۲/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۱/۲۵)

چکیده

فرایند قالبگیری انتقالی رزین که زیرمجموعه دسته وسیع تر قالبگیری مایعی است، از جمله فرایندهای مهم تولید کامپوزیت های پلیمری محسوب می شود. به منظور بهبود این فرایند و افزایش کیفیت تولید، تاکنون روش های اصلاحی متنوعی ارائه شده که یکی از مهمترین آنها فرایند قالبگیری انتقالی رزین به کمک خلاء با پوسته قالب منعطف می باشد. به دلیل انعطاف پذیری پوسته قالب، جریان رزین داخل قالب سبب فشردگی ایفای پیش شکل داده شده و تغییر ضخامت آن می شود. این پدیده بر تمامی پارامترهای فرایند تاثیر می گذارد. به منظور دستیابی به نتایج واقعی تر و مدل سازی دقیق فرایند در مرحله پرشدن، در این مقاله معادلات حاکم بر مرحله پرشدن قالب های طویل، با احتساب اثرات انعطاف پذیری پوسته قالب و ایفای پیش شکل داده شده و همچنین افت اصطکاکی و گرانشی لوله تزریق بصورت تحلیلی حل شده است. سپس، نتایج عددی حاصل از تحلیل حاضر با مدل های قبلی و آزمایشات موجود در این زمینه مورد مقایسه قرار گرفته و برخی از نتایج سودمند ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده بهبود مدل سازی فرایند نسبت به مدل های قبلی و همخوانی بهتر با نتایج تجربی می باشد. همچنین، نشان داده شده که صرف نظر کردن از لوله تزریق در مدل سازی فرایند قالبگیری انتقالی رزین با پوسته قالب منعطف، در مقایسه با فرایند قالبگیری انتقالی رزین با قالب های ستنی از خطای بیشتری برخوردار خواهد بود.

واژه های کلیدی: فرایند قالبگیری انتقالی رزین به کمک خلاء، پوسته قالب منعطف، قطعات طویل کامپوزیتی، لوله تزریق رزین، کسر حجمی ایفای

Analysis of Mold Filling Stage in Vacuum Assisted Resin Transfer Molding with Flexible Tools, Considering Resin Injection Tube

M.M. Shokrieh and S.R. Atashipour

Composites Research Lab., Mech. Eng. Dept., Iran Univ. of Science & Tech.

ABSTRACT

Resin transfer molding, that is a sub-branch of liquid composite molding, is one of the manufacturing methods of polymeric composites. Various modification has been presented to improve this process and enhance the product quality. One of the most important modified suggestions is the vacuum assisted resin transfer molding process with flexible tools. Because of the flexibility of tools, resin flow in the mold compact the fiber preform and consequently the thickness of the preform is varied. This phenomenon will affect all process parameters. In order to achieve more actual results and a proper modeling of the mold filling stage, in this article, the governing equations of the molding of a large part incorporating flexibility of tools, gravitational effects, and also friction losses have been solved analytically. Then, numerical results have been compared with other models and existing experimental results. It has been shown that neglecting injection tube in modeling of resin transfer molding process with flexible tools has more errors in comparison with RTM process, using traditional molds.

Keywords: Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process, Flexible Tools, Large Composite Parts, Injection Tube, Fiber Volume Fraction

Archive of SID

فهرست علائم

L_p	طول الیاف پیش‌شکل داده شده داخل قالب در راستای گرادیان فشار
W_p	عرض الیاف پیش‌شکل داده شده
L_t	طول لوله تزریق رزین
L_v	فاصله عمودی مخزن رزین تا محل الیاف پیش‌شکل داده شده در ابتدای قالب
P_0	فشار خلاء داخل قالب
P_r	فشار رزین در محل مخزن
h_0	کمترین ضخامت ممکن الیاف، پس از اعمال خلاء نسبی و فشرده شدن
φ	نسبت تخلخل الیاف
\overline{K}	تانسور نفوذپذیری الیاف
p	فشار رزین در محیط متخلخل الیاف پیش‌شکل داده شده
\vec{u}	بردار سرعت رزین در محیط متخلخل الیاف پیش‌شکل داده شده
\vec{g}	بردار شتاب جاذبه زمین
ρ	چگالی رزین
μ	ویسکوزیته رزین
t	متغیر زمان
h	ضخامت متغیر الیاف پیش‌شکل داده شده
x_1	متغیر مکانی در راستای طولی قالب
x_2	متغیر مکانی در راستای عرضی قالب
g_1	تصویر بردار شتاب جاذبه زمین در راستای x_1
g_2	تصویر بردار شتاب جاذبه زمین در راستای x_2
K_{11}	نفوذپذیری صفحه‌ای الیاف پیش‌شکل داده شده در راستای x_1
K_{22}	نفوذپذیری صفحه‌ای الیاف پیش‌شکل داده شده در راستای x_2
v^f	کسر حجمی الیاف
v_0^f	بیشترین کسر حجمی ممکن الیاف
P_{atm}	فشار اتمسفر
P_{comp}	تنش نرمال فشاری الیاف فشرده شده
ε	کرنش نرمال فشاری الیاف پیش‌شکل داده شده در راستای ضخامت
E	ضریب تناسب الاستیک
h^*	ضخامت اولیه الیاف پیش‌شکل داده شده قبل از قرار گرفتن داخل قالب
$(P_0)_{cr}$	فشار بحرانی خلاء
k	ثابت نفوذپذیری
\vec{u}	سرعت متوسط جریان رزین در لوله تزریق
R	قطر لوله تزریق رزین
P_i	فشار رزین ورودی در ابتدای قالب
$S(t)$	طول جریان رزین از محل روزنه تزریق

Archive of SID

۱ مقدمه

قالب نسبتاً صلب نر و ماده استفاده می‌شود، در این فرایند اصلاحی، تنها یک نیمه مادگی قالب وجود دارد و به جای نیمه رویی قالب از یک پوسته منعطف با مقاومت خمشی ناچیز استفاده می‌شود. مراحل چرخه تولید در این روش اصلاحی عبارتند از: ۱- الیاف پیش‌شکل داده شده پریفورم که به شکل قالب و قطعه تولیدی می‌باشد، به همراه مواد هسته، بصورت خشک داخل نیمه مادگی قالب قرار داده می‌شود. ۲- پوشش انعطاف‌پذیر قالب یا کیسه خلاء بر سطح رویی الیاف پیش‌شکل داده شده و قالب قرار داده شده و کاملاً آب‌بندی می‌شود. ۳- خلاء نسبی بر تمام فضای داخلی پوشش اعمال شده و موجب فشردگی الیاف پیش‌شکل داده شده می‌گردد. این خلاء نسبی موجب می‌شود تا بدون آنکه نیاز به فشار تزریق بالا باشد، رزین از محل مخزن به داخل الیاف جریان یابد. ۴- پس از اشباع کامل الیاف از رزین، عملیات پخت و جدایش انجام می‌شود.

امکان استفاده از فشارهای تزریق پایین در این فرایند، سبب کاهش هزینه‌های ابزاری شده است. از آنجاکه قسمت اعظم هزینه تمام شده قطعات کامپوزیتی در فرایندهای قالبگیری انتقالی رزین مربوط به هزینه‌های ابزاری و قالب است، در این نوع فرایند اصلاحی، هزینه‌های تولید به شکل چشمگیری کاهش یافته است. همچنین فشار پایین تزریق و فشردن الیاف، مانع از وقوع پدیده‌های نامطلوبی نظیر شسته شدن الیاف می‌گردد.

امروزه این فرایند به دلیل مزایای زیاد، از مقبولیت بسیار زیادی در میان صنعتگران و تولیدکنندگان عرصه کامپوزیت‌های پلیمری در سرتاسر دنیا برخوردار شده است. برخی از این مزایا به شرح زیر می‌باشد [۳ و ۴]:

- ۱- قابلیت کنترل خوب خواص مکانیکی قطعه تولید شده، با استفاده از الیاف پیش‌شکل داده شده مناسب،
- ۲- چرخه زمانی کوتاه در مقایسه با فرایندهایی مانند رشته‌پیچی که امکان کنترل خوب بر روی آرایش الیاف وجود دارد،
- ۳- پایین بودن محدوده فشار تزریق که این مسئله امکان استفاده از قالب‌ها و تجهیزات جانبی ارزان قیمت را میسر می‌سازد،

۴- سطح مهارت مورد نیاز جهت اپراتور پایین می‌باشد،

یکی از روش‌های ساخت سازه‌های کامپوزیتی پایه پلیمر، فرایند قالبگیری انتقالی رزین، RTM^1 می‌باشد که زیرمجموعه دسته وسیع‌تر قالبگیری مایعی مواد کامپوزیتی، LCM^2 است. بطور کلی فرایند RTM از چهار مرحله مجزا تشکیل می‌شود. ۱- بریدن و شکل دادن الیاف در محفظه قالب و سپس نگه داشتن الیاف و نهایتاً بسته شدن قالب با قرار گرفتن نیمه رویی قالب. ۲- تزریق رزین درون قالب به نحوی که همه فضای خالی بین الیاف را پر کرده و الیاف از رزین اشباع شود. ۳- پخت رزین و تشکیل ماتریس و ۴- جدا شدن قطعه از قالب و عملیات پرداخت نهایی. نخستین بار این فرایند در اوایل دهه ۱۹۴۰ توسط نیروی دریایی ایالات متحده برای ساخت قایق‌های پلاستیکی تقویت شده با الیاف شیشه مورد استفاده قرار گرفت [۱-۲]. پس از گذشت حدود یک دهه، برخی از صنایع، از فرایند RTM به‌عنوان روشی پیشرفته‌تر نسبت به روش لایه‌گذاری دستی استفاده کردند. با این وجود، این فرایند در آن زمان نتوانست مقبولیت مطلوب را در میان صنعتگران پیدا کند. علت اصلی این موضوع را می‌توان عواملی نظیر هزینه‌های زیاد تولید قطعات کامپوزیتی به این روش، زمان نسبتاً طولانی چرخه تولید و برخی از عیوب و مشکلات فرایند در مرحله پرشدن از جمله جابجایی الیاف و به هم ریختن آنها در قالب اشاره نمود. بنابراین، از آن زمان به بعد، پیشرفت‌های زیادی بر روی مواد و فرایند در راستای بهبود آن انجام شد و انواع اصلاحی متنوعی از این فرایند ارائه شد. یکی از مهمترین این انواع اصلاحی، فرایند قالبگیری انتقالی رزین به کمک خلاء با بهره‌گیری از پوسته قالب منعطف، $VARTM^3$ ، است. تاریخچه این فرایند مربوط به حدود ۲۰ سال قبل در بلژیک می‌باشد [۳]. در این فرایند با بهره‌گیری از تجهیزات خلاء، پوسته قالب منعطف و الیاف پیش‌شکل‌داده شده‌ای که اصطلاحاً پریفورم نامیده می‌شوند، دسته وسیعی از عیوب مربوط به فرایند سنتی RTM حذف شده و مدت زمان چرخه تولید به شکل چشمگیری کاهش یافته است. برخلاف فرایند سنتی RTM که از دو نیمه

Archive of SID

پرشدن فرایند VARTM را تحلیل نمودند. پاراناس^۷ و والش^۸ [۱۳]، یک مدل تحلیلی برای جریان رزین در فرایند VARTM ارائه نمودند که در آن جبهه جریان جزئی و تشکیل حفره و حباب منظور شده است. سانگ^۹ [۱۴]، یک تحلیل پاسخ-بسته برای مرحله پرشدن الیاف پیش‌شکل داده شده در فرایند VARTM ارائه نمود. وی در تحلیل خود اثر مدل‌های مختلف فشردگی الیاف پیش‌شکل داده شده را بر جریان یک‌بعدی رزین بررسی کرد. شکریه و آتشی‌پور [۱۵]، جریان شعاعی رزین را در محیط متخلخل الیاف پیش‌شکل داده شده در فرایند VARTM با پوسته قالب منعطف مورد مطالعه قرار دادند. لی^{۱۰} و همکاران [۱۶] پدیده تغییر ضخامت در فرایند VARTM با پوسته قالب منعطف را بصورت عددی و انجام آزمایش مدل نمودند.

با وجود مطالعات گسترده انجام شده برای تحلیل مرحله پرشدن در فرایند VARTM، اما در اغلب کارهای مذکور اثرات لوله تزریق در نظر گرفته نشده است. دلگلیس^{۱۱} و همکاران [۱۷] نشان دادند که شبیه‌سازی‌های ارائه شده توسط اغلب محققین، تخمین دقیقی از زمان پرشدن فرایند RTM در قالب‌های سنتی براساس روش تزریق فشار ثابت ارائه نمی‌دهند و پیش‌بینی الگوی جریان، مخصوصاً در ابتدای ورود رزین به قالب، دارای خطا می‌باشد. ایشان برای حذف این خطا که ناشی از نادیده گرفتن لوله تزریق رزین می‌باشد، پیشنهاد کردند که در ابتدای ورود رزین به داخل قالب از فرض نرخ جریان ثابت استفاده شود. یقیناً این خطا در مدلسازی فرایند VARTM نیز وجود خواهد داشت. اگرچه یون و همکاران [۱۸] یک روش تحلیلی برای مدل‌سازی فرایند VARTM در قالب‌گیری قطعات طولی کامپوزیتی با احتساب لوله تزریق ارائه نمودند، با این وجود، اثرات مربوط به انعطاف‌پذیری پوسته قالب را در تحلیل خود لحاظ نکردند. براین اساس، در این مقاله مرحله پرشدن قطعات طولی کامپوزیتی در فرایند VARTM با احتساب اثرات مربوط به انعطاف‌پذیری پوسته قالب و همچنین افت

۵- امکان تولید قطعات وسیع و طولی کامپوزیتی به شکل بسیار کارآمد و ارزان قیمت،

۶- عدم انتشار مواد شیمیایی در محیط بدلیل بسته بودن قالب،

۷- امکان استفاده از انواع مختلف رزین و الیاف پیش شکل داده شده،

۸- بازده بیشتر و صرفه‌جویی در هزینه مواد و کارگر و

۹- امکان کاهش درصد حفره و حباب تا حد بسیار ناچیز از طریق کنترل پارامترهای فرایند.

این عوامل سبب استفاده وسیع این فرایند در حوزه‌های مختلفی نظیر صنایع دریایی، هوافضا، خودروسازی، حمل و نقل، برق و الکترونیک، تجهیزات ورزشی و مخازن آب شده است [۵].

در میان مراحل مختلف فرایند VARTM، مرحله پرشدن یا جریان رزین در محیط متخلخل الیاف، از اهمیت و حساسیت ویژه‌ای برخوردار بوده و سهم عمده‌ای از کاهش مدت زمان چرخه تولید، مربوط به این مرحله است. تاکنون مطالعات عددی زیادی در راستای شبیه‌سازی این مرحله در فرایند VARTM انجام شده است که از آن جمله می‌توان به کارهای سان^۱ و همکاران [۶] و چن^۲ و همکاران [۷] با استفاده از روش المان محدود (FEM)، دانگ^۳ [۸] با استفاده از روش المان محدود حجم کنترل (CVFEM)، و هان^۴ و همکاران [۹] و آپیسون^۵ و همکاران [۱۰] براساس روش حجم محدود (FVM) اشاره نمود. مطالعات کاربردی گسترده‌ای نیز برپایه شبیه‌سازی‌های عددی فرایند در مرحله پرشدن انجام شده است. به عنوان نمونه می‌توان بهینه‌سازی فرایند جهت ساخت قطعات وسیع کامپوزیتی نظیر پره توربین و بدنه قایق [۱۱] را نام برد.

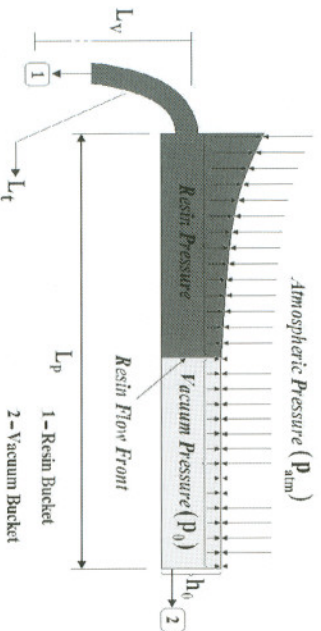
مطالعات تحلیلی و تجربی محدودی در رابطه با این فرایند اصلاحی انجام شده است. لویاتنیکوف^۶ و همکاران [۱۲]، با فرض وجود یک پوسته قالب منعطف، مرحله

7-Parnas
8-Walsh
9-Song
10-Li
11-Deleglise

1-Sun
2-Chen
3-Dong
4-Han
5-Acheson
6-Lopatnikov

رزین، فشار داخل محفظه قالب و نتیجتاً ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده افزایش می‌یابد.

بهم‌طور مدل‌سازی مرحله پرشدن در فرایندهای RTM و VARTM، می‌توان این مرحله را مستقل از مرحله پخت و معادلات مربوط به آن در نظر گرفته و تحلیل نمود. چراکه عملیات پخت پس از اتمام مرحله تزریق و پرشدن شروع می‌شود [۱۹].



شکل (۱): پیشروی رزین درون محیط متخلخل الیاف پیش‌شکل داده شده، در فرایند اصلاح‌شده.

اغلب مطالعات صورت گرفته در راستای مدل‌سازی مرحله پرشدن در فرایندهای RTM و VARTM، با استفاده از مدل جریان داریسی انجام شده است که بر پایه این مدل، از معادلات پیوستگی و جریان داریسی به‌صورت روابط زیر استفاده می‌شود [۱۹]:

$$\nabla \cdot (\rho \phi \vec{u}) + \frac{\partial (\rho \phi)}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

$$\vec{u} = -\frac{\bar{K}}{\mu} (\nabla p - \rho \vec{g}). \quad (2)$$

در روابط بالا، ϕ نسبت تخلخل الیاف، K تانسور نفوذپذیری الیاف، P فشار رزین، u بردار سرعت رزین در محیط متخلخل الیاف و g شتاب جاذبه می‌باشد. ρ و μ نیز به‌ترتیب، چگالی و ویسکوزیته رزین بوده و متغیر زمان می‌باشد. لویانتیکوف و همکاران [۱۲۱]، این اساس معادلات مدل جریان داریسی، معادله حاکم در فرایندهای اصلاح‌شده با پوسته قالب منعطف را بدست آوردند. این معادله را می‌توان برحسب پارامترهای معرفی شده و ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده، h_0 ، به شکل زیر بازنویسی نمود:

امساکاکی و گرانسی، ناشی از لوله تزریق، تحلیل شده است. جمله دستاوردهای این مقاله می‌توان به همخوانی بهتر نتایج تحلیل حاضر با داده‌های تجربی نسبت به مطالعات موجود قبلی اشاره نمود. علاوه بر این، نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که خطای ناشی از حذف اثرات مربوط به لوله تزریق در فرایند VARTM نسبت به فرایند RTM در قالب‌های سنتی بیشتر است.

۲- معادلات حاکم بر فرایند

برخلاف فرایندهای RTM سنتی که با استفاده از دو نیمه قالب نسبتاً صلب انجام می‌شوند، در فرایند VARTM جدید از یک نیمه قالب نسبتاً صلب به همراه یک پوسته قالب منعطف استفاده می‌شود. الیاف پیش‌شکل داده شده داخل نیمه قالب قرار داده می‌شود. پوسته انعطاف‌پذیر روئی، تحت تاثیر جلاء ایجاد شده از طریق کیسه‌های مربوطه، الیاف پیش‌شکل داده شده را داخل قالب فشرده می‌سازد. سپس روزه‌های تزریق باز شده و رزین تحت فشار اتمسفر، به داخل محیط متخلخل الیاف پیش‌شکل داده شده جریان می‌یابد. از این رو، مشکل جابجایی و شسته شدن الیاف در این شکل از فرایند وجود نداشته و می‌توان از آن برای قالبگیری قطعات بسیار وسیع و طولی کامپوزیتی استفاده نمود. انعطاف‌پذیری پوسته منعطف روئی و اختلاف فشار محیط داخل و خارج، سبب تغییرات ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده در شرایط مختلف می‌گردد. تغییرات ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده بر تمامی پارامترها از قبیل فشار، دبی، سرعت پیشروی جبهه جریان، کسر حجمی الیاف و نفوذپذیری آن تاثیر می‌گذارد.

در شکل ۱، الیاف پیش‌شکل داده شده به‌طول L_p و عرض W_p نشان داده شده است که از طریق یک لوله به‌طول L_r ، تحت تزریق قرار گرفته است. فرض می‌شود که جلاء ایجاد شده در داخل قالب دارای فشار جزئی P_0 بوده و رزین با فشار ثابت P_r در محل مخزن که به فاصله عمودی L_r ، پایین‌تر از سطح قالب قرار گرفته به داخل آن تزریق می‌شود. نواحی خشک الیاف پیش‌شکل داده شده تا ضخامت کمینه h_0 فشرده شده‌اند. با پیشروی

Archive of SID

حالت کلی می‌توان رابطه زیر را بین تنش فشاری الیاف پیش‌شکل داده شده و میزان فشردگی آن بیان نمود:

$$P_{comp} = E(h)|\varepsilon| = E(h) \cdot \left(\frac{h^* - h}{h^*} \right), \quad (7)$$

که در آن، ε کرنش نرمال فشاری الیاف پیش‌شکل داده شده در راستای ضخامت بوده و h^* ضخامت اولیه الیاف پیش‌شکل داده شده قبل از قرار گرفتن داخل قالب می‌باشد. E نیز ضریب تناسب الاستیک است که در حالت کلی یک ضریب غیر ثابت است که تابعی از ضخامت الیاف می‌باشد. در این حالت است که تنش فشاری الیاف صفر بوده و ضخامت آن دارای بیشترین مقدار ممکن است. با استفاده از رابطه (۶) مقدار تنش موثر بر الیاف پیش‌شکل داده شده برای ایجاد ضخامت h_0 چنین بدست می‌آید:

$$P_{comp}|_{h=h_0} = P_{atm} - P_0. \quad (8)$$

تا به امروز آزمایشات گسترده‌ای برای مشخص نمودن رفتار فشردگی الیاف توسط محققان مختلف انجام شده و مدل‌های زیادی ارائه شده است [۲۰ و ۲۱]. یکی از مهمترین این مدل‌ها، مدل تابع توانی می‌باشد که کسر حجمی الیاف را به تنش فشاری الیاف پیش‌شکل داده شده ارتباط می‌دهد [۲۱]:

$$v^f = AP_{comp}^B, \quad (9)$$

که در آن، A و B دو عدد ثابت بوده و از داده‌های تجربی بدست می‌آیند. اگرچه رابطه (۹) در کل یک رابطه غیر خطی است، اما می‌توان آن را با دقت مناسبی متشکل از دو ناحیه خطی برای تغییر شکل‌های کوچک و یا تغییر شکل‌های خیلی بزرگ دانست [۲۱]. با جایگذاری روابط (۶) و (۴) در رابطه (۹) تابع تغییرات ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده، h ، برحسب فشار رزین، p ، چنین بدست می‌آید:

$$h = \frac{v_0^f h_0}{A(P_{atm} - p)^B}. \quad (10)$$

این رابطه برای مقادیر واقعی برای ثوابت A و B ، یک رابطه تقریباً خطی را بین ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده و تنش فشاری آن نتیجه می‌دهد. براین اساس، در تحلیل حاضر از فرض رابطه خطی تنش نرمال فشاری با تغییر شکل‌های الیاف استفاده شده است. لذا با ارضای

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1} \{hK_{11}(\varphi)\} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} \{hK_{22}(\varphi)\} \frac{\partial p}{\partial x_2} \right) - \rho \left(g_1 \frac{\partial}{\partial x_1} \{hK_{11}(\varphi)\} + g_2 \frac{\partial}{\partial x_2} \{hK_{22}(\varphi)\} \right) - \mu \frac{\partial}{\partial t} (h\varphi) = 0, \quad (3)$$

که در آن، x_1 و x_2 متغیرهای مکانی به ترتیب در راستای طولی و عرضی قالب بوده و g_1 و g_2 به ترتیب تصویر بردار شتاب جاذبه در راستاهای x_1 و x_2 می‌باشد. K_{11} و K_{22} نیز نفوذپذیری در راستاهای x_1 و x_2 است. همانگونه که پیشتر گفته شد، با تغییر ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده، کسر حجمی الیاف نیز تغییر خواهد یافت. فرض می‌شود مقدار حجمی الیاف در هر سطح مشخص از الیاف، قبل و بعد از فشردگی همواره ثابت باقی بماند. بنابراین می‌توان کسر حجمی الیاف، v^f ، را بازای هر ضخامت دلخواه الیاف پیش‌شکل داده شده با رابطه زیر بیان نمود:

$$v^f h = v_0^f h_0, \quad (4)$$

که در آن، v_0^f بیشترین کسر حجمی الیاف در حداکثر فشردگی الیاف پیش‌شکل داده شده با ضخامت h_0 می‌باشد. مسلماً این فشردگی حداکثر مربوط به زمانی است که الیاف خشک قبل از تزریق رزین از طریق اعمال خلاء فشرده شده‌اند. به‌طور کلی رابطه زیر بین نسبت تخلخل و کسر حجمی الیاف وجود دارد:

$$\varphi + v^f = 1. \quad (5)$$

با توجه به اینکه الیاف پیش‌شکل داده شده و محیط بیرون تنها با یک پوسته منعطف با مقاومت خمشی ناچیز جدا شده است، فشار اتمسفر و فشار رزین، مستقیماً بر فشردگی الیاف پیش‌شکل داده شده تاثیرگذار خواهند بود. از این رو لازم است که رابطه مناسبی بین ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده و فشار رزین بدست آید. با استفاده از شکل ۱، به‌سادگی خواهیم داشت:

$$p + P_{comp} = P_{atm}, \quad \text{ناحیه تر} \quad (6)$$

$$P_0 + P_{comp} = P_{atm}, \quad \text{ناحیه خشک}$$

که در آن، P_{atm} و P_{comp} به ترتیب، فشار اتمسفر و تنش فشاری اعمال شده از طرف الیاف فشرده شده است. در

Archive of SID

$$K(h) = k \frac{v_0^f h_0}{h} \left(\frac{h}{v_0^f h_0} - 1 \right)^3 \quad (17)$$

با توجه به رابطه (۱۷)، نفوذپذیری الیاف پیش‌شکل داده شده، تنها تابعی از ضخامت آن خواهد بود. براین اساس، با استفاده از روابط (۱۵)، می‌توان معادله دیفرانسیل رابطه (۳) را برای جریان در قالب‌های افقی به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left(hK_{11}(h) \frac{\partial h}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(hK_{22}(h) \frac{\partial h}{\partial x_2} \right) - \left(\frac{h_0 \mu}{E - P_{atm} + P_0} \right) \frac{\partial h}{\partial t} = 0. \quad (18)$$

مقدار افت فشار ناشی از جریان رزین با سرعت متوسط \bar{u} در یک لوله تزریق به طول L_t ، قطر R و طول عمودی L_v ، از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۸]:

$$P_i = P_r - (\rho g L_v + \frac{8\mu}{R^2} L_t \bar{u}), \quad (19)$$

که در آن، P_i فشار رزین، درست در محل اتصال لوله تزریق به قالب است.

۳- حل معادلات حاکمه برای تحلیل جریان رزین در قالب‌های طویل

همانطور که پیشتر گفته شد، فرایند قالبگیری انتقالی رزین به کمک خلاء با پوسته قالب منعطف، یک فرایند مناسب برای قالبگیری قطعات وسیع و طویل کامپوزیتی است. به منظور تحلیل مرحله تزریق رزین و پرشدن قالب-های طویل، می‌توان با دقت مناسبی فرض جریان یک بعدی را در نظر گرفت. برپایه این فرض، معادله (۱۸) به شکل زیر ساده می‌گردد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h(x,t) K_{11}(h(x,t)) \frac{\partial h(x,t)}{\partial x} \right) - \left(\frac{h_0 \mu}{E - P_{atm} + P_0} \right) \frac{\partial h}{\partial t} = 0. \quad (20)$$

در رابطه بالا می‌توان با دقت بالایی از جمله مربوط به نرخ تغییرات ضخامت در مقابل جمله دیگر معادله صرف‌نظر نمود، زیرا علاوه بر کند بودن تغییرات ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده، جمله مذکور دارای یک ضریب بسیار

شرط (۸) در رابطه (۷)، رابطه بین h^* و h_0 چنین بدست می‌آید:

$$h^* = \frac{E}{E - P_{atm} + P_0} h_0. \quad (11)$$

با حذف h^* از رابطه حاصله در رابطه (۷)، به رابطه زیر می‌رسیم:

$$P_{comp} = E - \frac{1}{h_0} (E - P_{atm} + P_0) h, \quad (12)$$

که در آن، E مقدار متوسط سفتی فشاری الیاف پیش-شکل داده شده است. با جایگذاری رابطه (۱۲) در معادله (۶)، رابطه زیر برای فشار رزین حاصل می‌گردد:

$$p = -(E - P_{atm}) + \frac{1}{h_0} (E - P_{atm} + P_0) h. \quad (13)$$

بنابراین برای حالتی که تنش فشاری الیاف پیش‌شکل داده شده با تغییر شکل آن رفتار خطی دارد، فشار رزین درون قالب نیز رفتاری خطی با ضخامت خواهد داشت که با رابطه (۱۳) بیان می‌شود. با دقت در رابطه (۱۳) مشاهده می‌شود که در یک فرایند اصلاحی قالبگیری انتقالی رزین به کمک خلا با پوسته قالب منعطف، برای فشار خلاء، یک مقدار بحرانی کمینه به صورت رابطه زیر وجود دارد:

$$(P_0)_{Cr} = P_{atm} - E. \quad (14)$$

با استفاده از رابطه (۱۳)، مشتقات جزئی فشار رزین، برحسب مشتقات جزئی ضخامت چنین بدست می‌آید:

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{1}{h_0} (E - P_{atm} + P_0) \frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2. \quad (15)$$

تاکنون محققان مدل‌های مختلفی را بر پایه داده‌های تجربی برای تشریح رفتار نفوذپذیری الیاف ارائه نموده‌اند [۲۳ و ۲۲]. یکی از قدیمی‌ترین مدل‌های ارائه شده رابطه معروف کازنی-کارمن است. این مدل به علت سادگی و در عین حال همخوانی مناسب با داده‌های تجربی در جدیدترین تحلیل‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رابطه برحسب کسر حجمی الیاف به شکل زیر بیان می‌شود [۲۴]:

$$K(v^f) = k \frac{(1 - v^f)^3}{(v^f)^2}, \quad (16)$$

که در آن ثابت k به مشخصه‌های ذاتی الیاف بستگی دارد. جایگذاری رابطه (۴) در رابطه (۱۶) چنین نتیجه می‌دهد:

Archive of SID

$$\bar{u} = -\frac{W_p(E - P_{atm} + P_0)}{\pi R^2 h_0 \mu} \Pi(t). \quad (28)$$

نهایتا با جایگذاری رابطه بالا در رابطه (۱۹) خواهیم داشت:

$$P_i = P_r - \rho g L_V + \frac{8 \mu L_t W_p (E - P_{atm} + P_0)}{\pi R^4 h_0 \mu} \Pi(t), \quad (29)$$

رابطه بالا نشان می‌دهد که برای یک فرایند تزریق فشار ثابت واقعی که در آن فشار رزین در محل مخزن، P_r ، ثابت است، فشار سیال در محل روزنه تزریق، P_i ، نسبت به زمان متغیر خواهد بود. بنابراین فرض ثابت بودن فشار رزین در محل روزنه تزریق دارای خطا می‌باشد، چراکه این فرض علاوه بر نادیده گرفتن افت اصطکاکی و گرانشی لوله تزریق، سرعت بی‌نهایت رزین را در ابتدای فرایند نتیجه می‌دهد. با جایگذاری رابطه (۲۹) در رابطه (۲۳)، می‌توان حد پایین انتگرال رابطه (۲۱) را چنین محاسبه نمود:

$$h|_{x=0} = \alpha + \beta \Pi(t), \quad (30)$$

که در آن، ثوابت α و β بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\alpha = \left(1 + \frac{P_r - P_0 - \rho g L_V}{E - P_{atm} + P_0} \right) h_0, \quad (31)$$

$$\beta = \frac{8 L_t W_p}{\pi R^4}.$$

با استفاده از رابطه (۳۰)، رابطه (۲۱) را چنین بازنویسی می‌کنیم:

$$\int_{h(x,t)}^{\alpha + \beta \Pi(t)} h K(h) dh = -x \Pi(t). \quad (32)$$

با توجه به حضور تابع مجهول $\Pi(t)$ در حدود انتگرال رابطه (۳۲)، برای انجام ادامه روند حل مساله، لازم است از یک مدل نفوذپذیری مناسب مانند مدل کازنی-کارمن استفاده شود. براین اساس، جایگذاری رابطه (۱۷) در معادله (۳۲) و حل معادله حاصله نسبت به تابع ضخامت، h ، چنین نتیجه می‌دهد:

$$h = v_0^f h_0 + \sqrt[4]{\left(\alpha + \beta \Pi(t) - v_0^f h_0 \right)^4 + \frac{4 (v_0^f h_0)^2 x \Pi(t)}{k}}. \quad (33)$$

شرط مرزی دیگر، مربوط به فشار در محل جبهه جریان است:

$$P|_{x=S(t)} = P_0, \quad (34)$$

کوچک می‌باشد. بنابراین، دو بار انتگرالگیری از طرفین معادله (۲۰)، به رابطه انتگرالی زیر می‌انجامد:

$$\int_{h(0,t)}^{h(x,t)} h K(h) dh = x \Pi(t), \quad (21)$$

که در آن، $\Pi(t)$ یک تابع مجهول برحسب متغیر زمان است. اولین شرط مرزی مساله مربوط به مقدار فشار در محل روزنه تزریق است که با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$P|_{x=0} = P_i. \quad (22)$$

با استفاده از رابطه (۱۳)، می‌توان شرط مرزی مذکور را به صورت رابطه زیر بازنویسی نمود:

$$h|_{x=0} = \left(\frac{E - P_{atm} + P_i}{E - P_{atm} + P_0} \right) h_0. \quad (23)$$

به منظور تحلیل مساله براساس مفهوم واقعی فرایند تزریق فشار ثابت و حذف خطاهای مرتبط با آن لازم است اثرات لوله تزریق رزین در تحلیل منظور گردد. از آنجا که رزین-های کامپوزیتی تراکم‌ناپذیرند، انتظار می‌رود که مقدار حجمی رزین خارج شده از لوله تزریق، با مقدار وارد شده به داخل الیاف پیش‌شکل داده شده در محل روزنه ورودی یکسان باشد؛ یعنی:

$$\pi R^2 \bar{u} = W_p \left(h|_{x=0} \right) \left(1 - v^f|_{x=0} \right) \left(u|_{x=0} \right). \quad (24)$$

با مشتق‌گیری جزئی از طرفین رابطه (۲۱) نسبت به متغیر x ، رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\Pi(t)}{h K(h)}. \quad (25)$$

از جایگذاری رابطه بالا در رابطه (۱۵)، گرادیان فشار چنین بدست می‌آید:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = (E - P_{atm} + P_0) \frac{\Pi(t)}{h_0 h K(h)}. \quad (26)$$

جایگذاری رابطه (۲۶) در معادله دارسی (۲) برای جریان یک بعدی در محیط متخلخل الیاف با کسر حجمی v^f به رابطه زیر می‌انجامد:

$$h(1 - v^f) u = -\frac{(E - P_{atm} + P_0)}{h_0 \mu} \Pi(t). \quad (27)$$

اکنون می‌توان با جایگذاری رابطه بالا در رابطه (۲۴)، سرعت متوسط رزین در لوله تزریق را با رابطه زیر بیان

Archive of SID

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\psi_1}{\psi_2}\right)^4 \left(\frac{dS}{dt}\right)^4 - 4\left(\frac{\psi_1}{\psi_2}\right)^3 \left(\frac{dS}{dt}\right)^3 \\ & + 6\left(\frac{\psi_1}{\psi_2}\right)^2 \left(\frac{dS}{dt}\right)^2 - 4\left(\frac{\psi_1}{\psi_2}\right) \left(\frac{dS}{dt}\right) \\ & - \left(\frac{\psi_3}{\psi_2}\right)^4 \left(\frac{dS}{dt}\right) S(t) - \left(\frac{\psi_4}{\psi_2}\right)^4 + 1 = 0, \end{aligned} \quad (41)$$

که در آن، ثوابت ψ_1 تا ψ_4 چنین تعریف شده‌اند:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \frac{8L_t W_p}{\pi R^4} \left(\frac{h_0 \mu (1 - \nu_0^f)}{E - p_{atm} + p_0} \right), \\ \psi_2 &= (1 - \nu_0^f) + \left(\frac{P_r - P_o - \rho g L_V}{E - P_{atm} + P_0} \right), \\ \psi_3 &= \sqrt[4]{\frac{4}{k} (\nu_0^f)^2 \left(\frac{\mu (1 - \nu_0^f)}{E - p_{atm} + p_0} \right)}, \\ \psi_4 &= (1 - \nu_0^f). \end{aligned} \quad (42)$$

با توجه به بزرگی مقدار متوسط سفتی فشاری الیاف پیش‌شکل داده شده و کوچک بودن مقادیر عددی و اسکوزیته و همچنین ضخامت کمینه الیاف پیش‌شکل داده شده، ثابت ψ_1 عدد بسیار کوچکی است. از این رو می‌توان با دقت بالایی از جملات دارای ضرایب مذکور با توان بالا در مقابل سایر جملات معادله (۴۱) صرف‌نظر نمود که نتیجتاً به رابطه زیر می‌انجامد:

$$t = \frac{(\psi_2)^4}{(\psi_2)^4 - (\psi_4)^4} \left(4 \left(\frac{\psi_1}{\psi_2} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\psi_3}{\psi_2} \right)^4 S \right) S. \quad (43)$$

فرض می‌شود که در مبدا زمان، جبهه جریان درست به ابتدای قالب رسیده باشد. این مقدار مرزی در رابطه (۴۳) ارضا شده است. رابطه (۴۳) یک تخمین مناسب برای پیشروی جریان در قالب‌های طویل کامپوزیتی در یک فرایند VARTM با احتساب اثرات لوله تزریق، براساس مفهوم واقعی فرایند تزریق فشار ثابت می‌باشد. در تحلیل مرحله پرشدن در فرایند مورد بررسی، بجز رفتار پیشروی جبهه جریان، حصول یک شناخت نسبی از رفتار پارامترهای مهم سیستم از جمله تغییرات ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده، فشار و سرعت جریان رزین در نقاط مختلف قالب در حین فرایند، ضروری به‌نظر می‌رسد. با

که در آن، $S(t)$ ، طول جریان رزین از محل روزنه ورودی می‌باشد. با بهره‌گیری از رابطه (۱۳) می‌توان رابطه بالا را به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$h|_{x=S(t)} = h_0. \quad (35)$$

به منظور ارضای این شرط مرزی، رابطه (۳۵) را در رابطه (۳۳) جایگذاری می‌کنیم که به رابطه زیر بین تابع طول جریان و تابع مجهول $\Pi(t)$ بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} & (\alpha + \beta \Pi(t) - \nu_0^f h_0)^4 \\ & + \frac{4}{k} (\nu_0^f h_0)^2 \Pi(t) S(t) = [h_0 (1 - \nu_0^f)]^4. \end{aligned} \quad (36)$$

اما، با جایگذاری رابطه (۳۳) در رابطه (۲۷)، و استفاده از رابطه (۴) به رابطه سرعت جریان رزین به‌عنوان تابعی از دو متغیر موقعیت و زمان خواهیم رسید:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{E - p_{atm} + p_0}{h_0 \mu} \times \\ & \frac{\Pi(t)}{\sqrt[4]{(\alpha + \beta \Pi(t) - \nu_0^f h_0)^4 + \frac{4(\nu_0^f h_0)^2 x \Pi(t)}{k}}}. \end{aligned} \quad (37)$$

به‌منظور تعیین تابع طول جریان، می‌توان از شرط رابطه زیر بین دو پارامتر طول جریان رزین و سرعت آن استفاده کرد:

$$u|_{x=S} = (1 - \nu_0^f) \frac{dS}{dt}. \quad (38)$$

با جایگذاری روابط (۳۶) و (۳۷) در رابطه (۳۸)، معادله دیفرانسیل زیر حاصل می‌گردد:

$$S'(t) + \gamma \Pi(t) = 0, \quad (39)$$

که در آن:

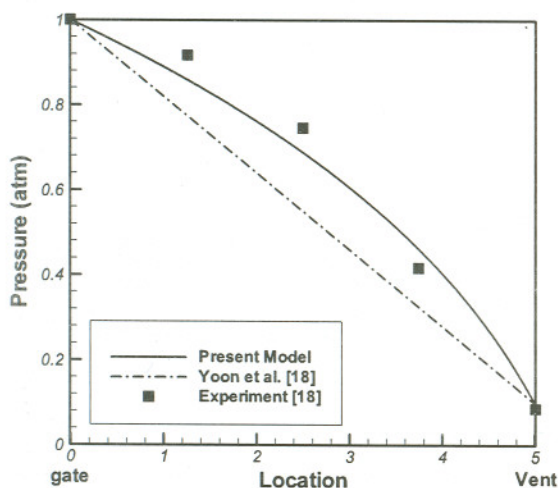
$$\gamma = \frac{E - p_{atm} + p_0}{h_0^2 \mu (1 - \nu_0^f)}. \quad (40)$$

با حذف تابع $\Pi(t)$ از معادلات (۳۶) و (۳۹) و جایگذاری ثوابت α و β از رابطه (۳۱)، یک معادله دیفرانسیل غیر خطی بر حسب $S(t)$ بدست می‌آید:

Archive of SID

حجمی الیاف 50% بوده و ثابت نفوذپذیری کازنی-کارمن مرتبط با آن $k = 7.706 \times 10^{-10}$ می‌باشد. قطعات مورد آزمایش دارای عرض 25.4 cm ، طول 4.37 m و ضخامت 4 mm می‌باشند. ایشان از رزین اپوکسی استفاده نمودند. ویسکوزیته این رزین بطور متوسط برابر با $0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ بوده و دارای چگالی $1335 \text{ kg}/\text{m}^3$ می‌باشد. برای تزریق از یک لوله به قطر 1 cm استفاده نمودند تا افت اصطکاکی درون لوله کاهش یابد. طول این لوله 8.74 m بوده و طول عمودی آن 4.37 m می‌باشد. با ایجاد خلاء با فشار تقریبی 0.1 اتمسفر در محل روزنه خروجی، رزین با فشار اتمسفر در محل مخزن به داخل الیاف پیش‌شکل داده شده تزریق می‌شود.

در شکل ۲، پروفیل فشار رزین در راستای طولی قالب، درست در لحظه‌ای که روزنه ورودی بسته شده و عملیات تزریق به پایان رسیده است، دیده می‌شود.



شکل (۲): فشار رزین برحسب فاصله از محل روزنه تزریق.

تحلیل انجام شده توسط یون و همکاران، به دلیل نادیده گرفتن اثرات مربوط به انعطاف‌پذیری الیاف پیش‌شکل داده شده و پوسته قالب در مرحله پرشدن، توزیع خطی فشار را در طول قالب نتیجه می‌دهد. در این شکل، به خوبی دیده می‌شود که توزیع غیرخطی فشار که از تحلیل حاضر بدست آمده همخوانی خوبی با داده‌های

استفاده از معادله دیفرانسیل رابطه (۴۱) می‌توان رابطه بین $S(t)$ و $S'(t)$ را چنین بدست آورد:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{(\psi_2)^4 - (\psi_4)^4}{4(\psi_1)(\psi_2)^3 + (\psi_3)^4 S(t)} \quad (44)$$

با جایگذاری رابطه بالا در معادله (۳۹)، تابع مجهول $\Pi(t)$ به صورت رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Pi(t) = -\frac{1}{\gamma} \frac{(\psi_2)^4 - (\psi_4)^4}{4(\psi_1)(\psi_2)^3 + (\psi_3)^4 S(t)} \quad (45)$$

با ترکیب روابط (۴۵) و (۳۳)، تابع تغییرات ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده حاصل می‌گردد. از جایگذاری رابطه حاصله در روابط (۱۳) نیز تابع توزیع فشار بدست می‌آید:

$$p = C_1 + \sqrt{C_2^4 + C_3^4} x \quad (46)$$

در رابطه بالا ثوابت C_1 تا C_3 به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C_1 = -(E - P_{atm}) + (E - P_{atm} + P_0)v_0^f, \quad (47)$$

$$C_2 = \frac{1}{h_0}(E - P_{atm} + P_0)(\alpha + k\beta\eta^2 - v_0^f h_0),$$

$$C_3 = \frac{1}{h_0}(E - P_{atm} + P_0)\sqrt{2(v_0^f h_0)\eta},$$

که در آن، ضرایب α ، β و γ با روابط (۳۱) و (۴۰) بیان شده و η چنین تعریف می‌شود:

$$\eta = \sqrt{\frac{h_0^2 \mu (1 - v_0^f)}{k(E - P_{atm} + P_0)} \left(\frac{(\psi_2)^4 - (\psi_4)^4}{4(\psi_1)(\psi_2)^3 + (\psi_3)^4 S} \right)} \quad (48)$$

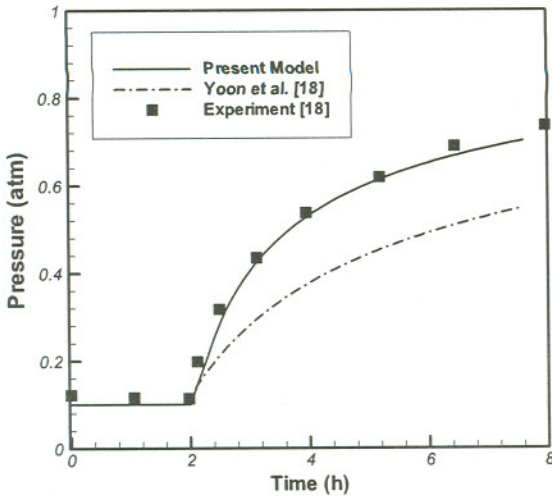
همچنین، با جایگذاری روابط مذکور در رابطه (۲۷) و استفاده از رابطه (۴)، تابع تغییرات سرعت جریان رزین حاصل می‌گردد.

۴- بحث و بررسی نتایج عددی

در این قسمت به منظور بررسی نتایج عددی حاصل از تحلیل حاضر و همچنین مقایسه آن‌ها با تحلیل‌های مشابه و نتایج تجربی موجود، از یک مثال کاربردی استفاده شده است. یون و همکاران [۱۸]، برای بررسی صحت تحلیل خود، یکسری آزمایش‌ها را بر روی مرحله پرشدن قالب‌های طویل کامپوزیتی براساس فرایند VARTM انجام دادند. بدین منظور از الیاف پیش‌شکل داده شده تهیه شده از Airweave N10 محصول شرکت صنایع Coastline استفاده نمودند. الیاف مذکور دارای مقدار متوسط کسر

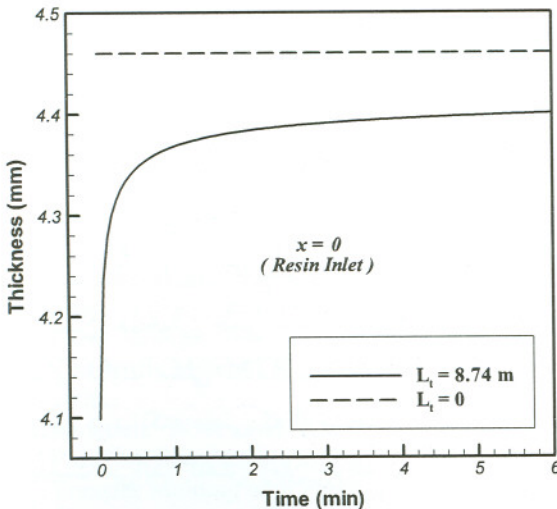
Archive of SID

بدست می‌آید، اختلاف قابل توجه نتایج حاصل از تحلیل انجام شده توسط یون و همکاران با نتایج تجربی می‌باشد که ناشی از نادیده گرفتن اثرات مربوط به انعطاف‌پذیری پوسته قالب و الیاف پیش‌شکل داده شده می‌باشد.



شکل (۴): تغییرات فشار رزین برحسب زمان در نقطه‌ای به فاصله ۲۱۹ سانتی متر از ابتدای قالب.

در شکل ۵، نمودار تغییرات ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده در محل روزنه ورودی برحسب زمان نشان داده شده است.



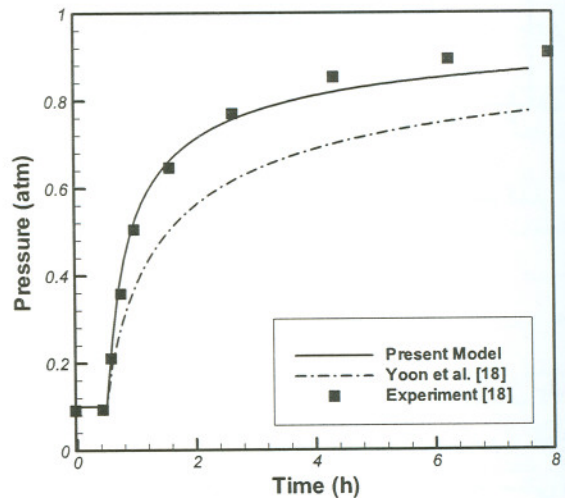
شکل (۵): افزایش ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده در ابتدای قالب در محل روزنه تزریق برحسب زمان.

تجربی مربوط به ۵ حسگر در طول قالب دارد. در جدول ۱ نیز مقایسه‌ای بین مقادیر تجربی و عددی فشار در محل ۳ حسگر میانی ارائه شده است. اعداد داخل پرانتز، درصد خطای هر مدل نسبت به داده‌های تجربی متناظر می‌باشد که نشان دهنده بهبود قابل توجه نتایج در مدل حاضر نسبت به مدل مرجع [۱۸] است.

جدول (۱): مقایسه مقادیر فشار تجربی با مدل‌های تحلیلی.

	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
Experiment [18]	0.91	0.75	0.42
Present Model	0.86 (-5.5 %)	0.69 (-8.0 %)	0.46 (9.5 %)
Yoon et al. [18]	0.77 (-15.4 %)	0.56 (-25.3 %)	0.33 (-21.4 %)

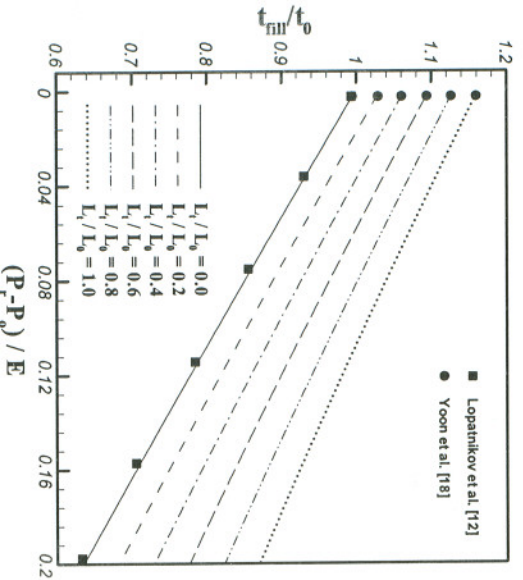
در شکل‌های ۳ و ۴ تغییرات فشار درون قالب نسبت به زمان، بر اساس تحلیل حاضر، نتایج آزمایش و تحلیل ارائه شده توسط یون و همکاران ترسیم شده است.



شکل (۳): تغییرات فشار رزین برحسب زمان در نقطه‌ای به فاصله ۱۰۹ سانتی متر از ابتدای قالب.

شکل ۳ مرتبط با داده‌های ثبت شده توسط یک حسگر می‌باشد که در فاصله ۱۰۹ سانتی‌متری از محل روزنه تزریق قرار گرفته است. شکل ۴ نیز مرتبط با نتایج تجربی بدست آمده از یک حسگر است که ۲۱۹ سانتی‌متر از محل روزنه تزریق فاصله دارد. در هر دو شکل، همخوانی بسیار مناسبی بین نتایج تحلیل حاضر با داده‌های تجربی قابل مشاهده است. نکته مهمی که از مشاهده شکل‌های ۳-۴

رزین، به دلیل افت فشار، زمان پرشدن افزایش می‌یابد. نمودارهای شکل ۶ نشان می‌دهند که نادیده گرفتن اثرات لوله تزریق رزین در فرایند VARTM، موجب خطای بیشتری نسبت به فرایند سنتی RTM در تخمین زمان پر شدن می‌گردد. بدیهی است که برای هر دو فرایند اصلاح-شده جدید و فرایند سنتی، خطای مذکور ناشی از یک تخمین پایین زمان پرشدن است.



شکل (۶): زمان پر شدن برحسب پارامتری بعد فشار تزریق.

۵- نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های متداول ساخت قطعات کامپوزیتی پایه پلیمر، دسته فرایندهای RTM است. تا به امروزه انواع اصلاحی مختلفی در راستای حذف معایب فرایند سنتی و افزایش کیفیت و سرعت تولید ارائه شده است. از جمله مهمترین انواع اصلاحی این فرایند، که امروزه از مقبولیت زیادی بین تولیدکنندگان عرصه کامپوزیت برخوردار است، روش قالبگیری انتقالی رزین به کمک خلاء یا بهره‌گیری از پوسته قالب منعطف و الیاف پیش‌شکل داده شده‌ای که اصلاً پریفورم نامیده می‌شود، می‌باشد. در این مقاله، مرحله تزریق رزین و پرشدن قالب، به‌عنوان مهمترین مرحله از این فرایند برای قالبگیری قطعات طولی کامپوزیتی تحلیل شد. برخلاف مطالعات مشابه موجود قبلی، در این مقاله اثرات مربوط به انعطاف‌پذیری پوسته قالب و الیاف پیش‌شکل داده شده به‌همراه تاثیرات لوله

در فرایند شکل، دیده می‌شود که قبل از ورود رزین به داخل قالب ($t = 0$)، ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده در محوطه تزریق، به دلیل اعمال خلاء کمترین مقدار را داشته و با ورود رزین به داخل قالب سریعاً زیاد می‌شود و به‌صورت حدی تا مقدار بیشینه خود در انتهای فرایند افزایش می‌یابد. این در حالی است که صرف‌نظر کردن از اثرات لوله تزریق رزین، مقدار ثابت ضخامت الیاف پیش‌شکل داده شده در ابتدای قالب با گذشت زمان را نتیجه می‌دهد که یک تخمین بالا نیز محسوب می‌شود (شکل ۵). مسأله‌ت این تخمین بالا، نادیده گرفتن افت فشار درون لوله تزریق است.

به‌منظور بررسی تاثیر لوله تزریق بر زمان پرشدن در فرایند VARTM، در شکل ۶ نمودار تغییرات زمان پرشدن بی‌بعد برحسب پارامتر فشار بی‌بعد برای چند حالت مختلف ترسیم شده است. علاوه بر این، در دو حالت خاص، این نمودارها با مقادیر موجود در مراجع مقایسه شده است. مقدار L_0 برابر با $8.74m$ بوده و طول عمودی لوله تزریق رزین برابر صفر در نظر گرفته شده است. همچنین پارامتر t_0 در این نمودار رابطه ارائه شده توسط آچیمون و همکاران [۱۰] برای زمان پرشدن در فرایند سنتی RTM و بدون احتساب اثرات لوله تزریق رزین است که به صورت زیر می‌باشد:

$$t_0 = \frac{\mu(\nu_0^f L_p)^2}{2k(1-\nu_0^f)^2(P_p - P_0)} \quad (۴۹)$$

با دقت در نمودارهای این شکل دیده می‌شود که در حالت خاصی که از اثرات لوله تزریق رزین در فرایند VARTM صرف‌نظر می‌شود، نتایج حاصل از تحلیل حاضر برای زمان پرشدن، همخوانی مناسبی با نتایج حاصل از تحلیل مرجع [۱۲] دارد. علاوه بر این، در حالت خاص دیگری که اجزای فرایند صلب باشند، نتایج عددی تحلیل حاضر برای زمان پرشدن، همخوانی خوبی با مقادیر مشابه در مرجع [۱۸] برای فرایند سنتی RTM با احتساب اثرات لوله تزریق رزین دارد. نکته مهمی که از مشاهده نمودارهای شکل ۶ بدست می‌آید، کاهش زمان چرخه تولید در فرایندهای اصلاح‌شده جدید، در مقایسه با فرایند سنتی می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش طول لوله تزریق

Archive of SID

3. Hank Yeagley, RTM on a Diet, CF Composites Fabrication, pp. 24-27 and 42, 2002.
4. Advani, S.G., Brusckke, M.V., and Parnas, R.S., "Resin Transfer Molding Phenomena in Polymeric Composites", Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing, Elsevier Science, 1994.
5. Poter, K., "Resin Transfer Molding", Springer, Chapman & Hall, New York, 1997.
6. Sun X., Li, S. and Lee L.J., "Mold Filling Analysis in Vacuum-assisted Resin Transfer Molding, Part I: SCRIMP Based on a High-permeable Medium, Polymer Composites, Vol. 19, No. 6, pp. 807-817, 1998.
7. Chen, R., Dong, C., Liang, Z., Zhang C., and Wang B., "Flow Modeling and Simulation for Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process with the Equivalent Permeability Method, Polymer Composites, Vol. 25, No. 2, pp. 146-164, 2004.
8. Dong, C., "An Equivalent Medium Method for the Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process Simulation", J. Composite Materials, Vol. 40, No. 13, pp. 1193-1213, 2006.
9. Han, K., Jiang, S., Zhang, C., and Wang, B., "Flow Modeling and Simulation of SCRIMP for Composites", Manufacturing Composite, Part A 31, pp.79-86, 2000.
10. Acheson J.A., Simacek, P., and Advani S.G., "The Implications of Fiber Compaction and Saturation on Fully Coupled VARTM Simulation. Compos., Part A 35, pp. 159-169, 2004.
11. Brouwer W.D., Van Herpt, E.C.F.C., and Labordus, M., "Vacuum Injection Moulding for Large Structural Applications, Composites, Part A", Applied Science and Manufacturing, Vol. 34, No. 1, pp. 551-558, 2003.
12. Lopatnikov, S., Simacek, P., Gillespie, J., and Advani S.G., "A Closed form Solution to Describe Infusion of Resin under Vacuum in Deformable Fibrous Porous Media", Modeling and Simulation in Materials Science and Eng., Vol. 12, No. 2, pp. S191-S204, 2004.
13. Parnas R.S. and Walsh S.M., "Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding Model", Polymer Composite, pp. 478-485, 2005.
14. Song, Y.S., "Mathematical Analysis of Resin Flow through Fibrous Porous Media", Appl. Composite Material, Vol. 13, No. 1, pp. 335-343, 2006.
15. Shokrieh, M.M. and Atashipour, S.R., "Resin Flow in Fiber Preform in Vacuum Assisted Resin Transfer Molding with Flexible Tools", Iranian J. Polymer Science and Tech., Vol. 21, No. 3, pp. 329-338, 2007.
16. Li, J., Zhang, C., Liang, R., Wang, B., and Walsh, S., "Modeling and Analysis of Thickness

توزیع در تحلیل صورت گرفته منظور شد. از جمله مهمترین نتایج و دستاوردهای حاصل از این تحلیل می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- توزیع فشار رزین بدست آمده در تحلیل حاضر، در راستای طولی قالب به صورت یک تابع غیرخطی است که در مقایسه با توزیع فشار خطی منتهی از تحلیل های مشابه، همخوانی بهتری با نتایج تجربی دارد.
- با وجود اختلاف چشمگیر تحلیل های مشابه در پیش-بینی تغییرات فشار رزین برحسب زمان با نتایج تجربی، نتایج حاصل از تحلیل حاضر همخوانی بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. این مساله به دلیل اثرات مربوط به انعطاف پذیری اجزای فرایند است.
- با وجود اینکه همه تحلیل های مشابه مقدار ثابتی را برای ضخامت الیاف پیش شکل داده شده در محل روزنه تزریق در مرحله پرشدن فرایند نتیجه می دهند، براساس تحلیل حاضر ضخامت الیاف پیش شکل داده شده در محل مذکور از مقدار کمینه خود در ابتدای عمل تزریق با سرعت بالایی افزایش یافته و به صورت حدی تا پایان مرحله تزریق به مقدار بیشینه خود نزدیک می شود.
- قالبگیری در فرایند اصلاحی جدید، جهت ساخت قطعات کامپوزیتی، در مقایسه با فرایند سنتی سریع تر است.
- مقدار پیش بینی شده برای زمان پرشدن براساس تحلیل هایی که اثرات مربوط به لوله تزریق در آنها لحاظ نمی شود، یک تخمین پایین می باشد.
- مقدار خطای ناشی از نادیده گرفتن تاثیرات لوله تزریق رزین در تحلیل فرایند اصلاحی جدید بیشتر از مقدار خطای مذکور در فرایند سنتی می باشد.

مراجع

1. Wilks C.E. and Crosky A., "Fabrication of Fiber Reinforced Plastics, Using Resin Transfer Molding", Materials Forum, 1996, Vol. 20, No. 1, pp. 207-218, 1994..
2. Rudd C.D., Long A.C., Kendall K.N., and Mangin C.G., "Liquid Moulding Technologies; Resin Transfer Moulding, Structural Reaction Injection Moulding and Related Processing Techniques", Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 1997.

Archive of SID

- Gradient and Variations in Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding Process”, *Polymer Composites*, Vol. 29, No. 5, pp. 473-482, 2005.
17. Deleglise, M., Binetruy, C., and Krawczak, P., “Solution to Filling Time Prediction Issues for Constant Pressure Driven Injection in RTM”, *Composites Part A*, Vol. 36, No. 3, pp. 339-344, 2005.
 18. Yoon, M.K., Baidoo, J., Gillespie, J.W., and Heider, D., “Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) Process Incorporating Gravitational Effects: A Closed-form Solution”, *J. Composite Materials*, Vol. 39, No. 1, pp. 2227-2242, 2005
 19. Shojaei, A., Ghaffarian S.R.S., and Karimian M.H., “Modeling and Simulation Approaches in the Resin Transfer Molding Process: A Review”, *Polymer Composites*, Vol. 24, No. 4, pp. 525-544, 2003.
 20. Chen, B., Lang, E.J., and Chou, T.W., “Experimental and Theoretical Studies of Fabric Compaction Behavior in Resin Transfer Molding”, Vol. 317, No's. 1-2, pp. 188-196, 2001.
 21. Hammond, V.H., Loos, A.C., Dexter, H.B., and Hasko, G.H., “Verification of a 2-D Infiltration Model for the Resin Transfer Molding Process” NASA Reports, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., 1993.
 22. Gebart B.R., “Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM”, *J. Composite Material*, Vol. 26, No. 8, pp. 1100-1133, 1992.
 23. Brusckke, M.V. and Advani, S.G., “Flow of Generalized Newtonian Fluids Across a Periodic Array of Cylinders”, *J. Rheology*, Vol. 37, No. 3, pp. 479-498, 1993
 24. Sullivan, R.R., “Further Study of the Flow of Air through Porous Media”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 13, No. 1, p. 725, 1942
 25. Li, J., "Modeling, Design and Control of Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) For Thickness Variation Reduction", *SID*, PhD Dissertation, Mech. Eng. Dep't., College of Eng., Florida State Univ., USA, pp. 1-168, 2006.