مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1396، دوره 17، شماره 3، ص‌ص 405-413

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تاثیر فرآیند رشته پیچی پالتروژنی بر روی آغشتگی الیاف شیشه در میله کامپوزیتی گرمانرم

روح‌اله رستمیان دلاور[1]، محمد گلزار[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، کدپستی 111-14115، m.golzar@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 دی 1395

پذیرش: 24 بهمن 1395

ارائه در سایت: 14 فروردین 1396

کلید واژگان:

پالتروژن گرمانرم

رشته پیچی پالتروژنی

پیش‌آغشته گرمانرم

کسر حجمی حفره

میلگرد پالتروژنی گرمانرم

چکیده

اگر در فرآیند پالتروژن، الیاف ممتد تقویت‌کننده به شکل رووینگ به‌طور پیوسته از داخل قالب پالتروژن به سمت خارج آن کشیده شوند، الیاف تقویت‌کننده در محصول نهایی عموما در جهت طولی قرار می‌گیرد. برای تولید محصولات میله‌ای در این پژوهش، ابتدا پیش‌آغشته‌های شیشه-پلی‌اتیلن براساس مطالعات و پژوهش‌های پیشین تولید شدند. سپس با توجه به جداول طرح آزمایش و با استفاده از پیش‌آغشته‌های تولید شده، نمونه‌های میله‌ای ساده و تقویت شده با الیاف عرضی تولید شدند. یکی از روش‌های تقویت پروفایل‌های پالتروژنی در جهات دیگر، رشته پیچی پالتروژنی است. در تحقیق حاضر برای تقویت عرضی میله‌های پالتروژنی، مکانیزمی برای اجرای رشته پیچی پالتروژنی طراحی شده و با این روش، میله‌های کامپوزیتی همراه با الیاف عرضی تولید شده است. یکی از مسائل مهم در پالتروژن گرمانرم، آغشتگی مناسب الیاف به زمینه‌ی پلیمری محسوب می‌شود. با استفاده از آزمون سوزاندن و همچنین به کمک جابه‌جایی مایع، کسر حجمی الیاف و چگالی تجربی نمونه‌های تولید شده محاسبه شد. برای بررسی دقیق‌تر میزان آغشتگی الیاف و توزیع حفره در نمونه‌های مختلف، از سطح مقطع آن‌ها عکس‌های میکروسکوپی گرفته شد. با بررسی‌های صورت گرفته، مشخص شد که حجم الیاف آغشته شده به ماتریس گرمانرم با روش رشته پیچی پالتروژنی بالاتر رفته است، همچنین این نمونه‌ها با کاهش کسر حجمی حفره مواجه شده‌اند.

Effect of pull-winding process in thermoplastic composite rod on the impregnation of glass fiber

Rouhollah Rostamian Delavar, Mohammad Golzar*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, m.golzar@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 November 2016
Accepted 12 February 2017
Available Online 03 April 2017

Keywords:
Thermoplastic Pultrusion
Pull-winding
Thermoplastic Prepreg
Void Content
Thermoplastic Composite Rod

ABSTRACT

In the pultrusion process, continuous fibers reinforcements in roving forms are drawn through a pultrusion die. Therefore, the fibers reinforcements in the final product are generally oriented in the longitudinal axis. In this research, for manufacturing of composite rods, on the basis of previous studies and researches, the E-glass fiber-polyethylene prepregs were produced firstly. Then, due to the Design of Experiments (DOE), the pultruded rods with unidirectional and helically-wound layers were produced by using the prepregs. In this study, mechanism of the pull-winding process is created as a secondary process during the main process to improve the mechanical and physical properties in the other directions. One of the most important issues in the thermoplastics pultrusions is the fibers impregnation quality with the polymer base. The fiber volume fractions of the productions are found by the burn tests. The density of the specimens is found by the liquid displacement method. The microscopic images were taken from cross-section of the pultruded rods to investigate the fiber impregnation and the void distribution. Due to the surveys conducted, the fiber volume fractions in the pultruded rods was increased, using the pull-winding technique, and also the void content of these rods was decreased.

1- مقدمه

پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف[1] یا همان کامپوزیت‌ها، معمولا به‌عنوان مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند، مخصوصا در مواقعی که مشخصات خاصی مورد نیاز باشد که توسط فلز محقق نگردد. امروزه کامپوزیت‌ها به‌دلیل بهبود خواص مکانیکی، افزایش چشمگیر نسبت استحکام به وزن و افزایش نسبت سفتی به وزن، جایگاه ویژه‌ای را در تولید پیدا کرده‌اند [1]. از جمله نقاط ضعف کامپوزیت‌ها در حال حاضر، می‌توان به هزینه‌های تولید بالا و زمان فرآیند زیاد آن‌ها اشاره کرد. بنابراین یکی از تمرکزهای اصلی پروژه‌های تحقیق و توسعه، برای کاهش هزینه تولید و زمان چرخه تولید می‌باشد. یکی از راه‌های کاهش هزینه و زمان تولید، استفاده از ماتریس‌های گرمانرم به جای ماتریس‌های گرماسخت است [2].

توجه زیادی در استفاده از پلیمرهای گرمانرم برای ساخت مواد کامپوزیتی وجود دارد، زیرا پلیمرهای گرمانرم در مقایسه با پلیمرهای

[1] Fiber Reinforced polymers-FRPs

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

R. Rostamian Delavar, M. Golzar, Effect of pull-winding process in thermoplastic composite rod on the impregnation of glass fiber, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 405-413, 2017 (in Persian)

گرماسخت پتانسیل بالایی برای ارائه چقرمگی شکست بهتر، ازدیاد طول بیشتر تا لحظه شکست، فرآیند سریع‌تر، عمر مفید نامحدود مواد اولیه و بازیافت پذیری دارند، همچنین از نظر زیست محیطی سالم‌تر می‌باشند [3-5]. یکی از عوامل محدود کننده برای استفاده گسترده‌تر از مواد گرمانرم، گرانروی بسیار بالای رزین مذاب گرمانرم نسبت به رزین‌های گرماسخت است، که باعث دشوار شدن آغشتگی در شبکه متراکم الیاف می‌شود [3]. استفاده از کامپوزیت‌های گرمانرم با عملکرد مطلوب، در صورتی متداول خواهد شد که هزینه‌ها از طریق توسعه روش‌های تولید مقرون به صرفه، کاهش یابد [6]. در فرآیند توسعه این نوع پلیمر می‌بایست تلاش بیشتری برای کاهش میزان حفره در کامپوزیت نمود [5].

یکی از روش‌های تولید مواد کامپوزیتی، پالتروژن می‌باشد. پروفایل‌های پالتروژنی در برنامه‌های کاربردی طیف بسیار گسترده‌ای از سازه‌ها را به تدریج به خود اختصاص داده‌اند. آزادی در طراحی پالتروژن بخش عمده‌ای از دلیل موفقیت آن به‌شمار می‌رود، که خواص منحصر به فردی در پلاستیک‌های تقویت شده به‌وجود می‌آورند [1]. اگرچه پالتروژن در ارائه‌ی توانایی خاص برای توسعه و بهبود طراحی الیاف موفق بوده است، مانند قسمت‌ها و بخش‌هایی که به منظور افزایش خواص مشخصی مانند خواص برشی بین لایه‌ای از آن‌ها استفاده کرده است، اما در برخی قسمت‌ها در طراحی الیاف عملکرد ضعیفی داشته است، مانند خواص مکانیکی عرضی که با تغییر صفحه‌ی الیاف می‌توان خواص برشی عرضی را تقویت کرد [7].

رشته پیچی پالتروژنی ترکیبی از دو روش پالتروژن ساده و رشته پیچی است، که اغلب برای ساخت لوله‌های با استحکام بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش برای تقویت مارپیچ یا عرضی پروفایل از الیاف ممتد رایج استفاده می‌کند، که باعث افزایش استحکام پیچشی و حلقوی پروفایل می‌شود. این تکنولوژی به‌صورت مستقل به دستگاه پالتروژن متصل می‌شود تا با تغذیه الیاف ممتد با زوایای مختلف نسبت به محور اصلی پروفایل، باعث تقویت لایه‌های الیاف تک جهته شود. تجهیزات اصلی رشته پیچی پالتروژنی شامل دو سر چرخنده می‌شود، که در خلاف جهت یکدیگر بر روی یک محور تو خالی می‌چرخند. الیاف می‌توانند با جهات خاص مورد نظر برای تقویت محصول به‌کار گرفته شوند [8]. فناوری رشته پیچی پالتروژنی تولید طیف گسترده‌ای از محصولات، از نظر اشکال هندسی و خواص گوناگون همراه با کیفیت تثبیت عالی را در قالب فرآیندی پیوسته امکان‌پذیر می‌نماید، که تنها با تغییرات جزئی در خط تولید می‌توان به این تنوع محصول دست یافت [9].

یکی از عیوب اصلی در مواد کامپوزیتی، وجود حفره‌ها است. همان‌طور که انتظار می‌رود، تاثیر منفی بر روی عملکرد مکانیکی قطعه کامپوزیتی خواهند گذاشت. در نتیجه بهینه سازی روش‌های ساخت مواد کامپوزیتی برای کاهش میزان حفره در محصول، امری ضروری است [10]. برنت و همکاران بر روی توسعه مدل تثبیت کامپوزیت‌های گرمانرم پایه کامینگلد[1] تحقیقاتی انجام داده‌اند. با افزایش زمان یا دمای فرآیند، مقدار حفره باقی‌مانده در قطعه بعد از تثبیت کاهش یافت. با زمان فرآیند یکسان، کسر حجمی حفره با افزایش فشار کاهش یافت. اما از یک فشار بحرانی به بعد، کسر حجمی حفره با افزایش فشار افزایش یافت. به دلیل این‌که با افزایش فشار، کسر حجمی الیاف افزایش می‌یابد و نفوذپذیری با کاهش مواجه می‌شود [3].

پیتچومانی و همکاران بر روی توسعه استحکام سطحی، تثبیت حفره و رشد آن در فرآیند تاو/ گرمانرم با تثبیت درون خطی مطالعاتی انجام دادند. با استفاده از مطالعات پارامتری در فرآیند تثبیت، از نظر میزان آغشتگی، چسبندگی و میزان نهایی حفره در محصول انجام شد. همچنین مشخص شده است که افزایش دمای قالب به بهبود کیفیت آغشتگی محصول نهایی کمک شایانی می‌کند، اما اگر محصول بعد از خروج از قالب به صورت طبیعی و با جریان همرفتی سرد شود، میزان حفره نهایی افزایش می‌یابد. برای کاهش میزان حفره نهایی در محصول، بیشترین نکته حائز اهمیت سرد شدن محصول همراه با نیروی تراکم بوده است. با افزایش سرعت خط تولید مشاهده می‌شود که برای یک نیروی تثبیت، استحکام اتصال سطحی با کاهش مواجه می‌شود [6].

اخیرا تحقیقاتی بر روی تولید میله‌های کامپوزیتی شیشه-پلی‌اتیلن به روش پالتروژن و با استفاده از پیش‌آغشته‌ها، انجام شده است. با انجام آزمون‌هایی برای تعیین استحکام خمشی و برشی این نوع میله‌ها مشخص شد که با افزایش دمای قالب، آغشتگی و در نتیجه استحکام خمشی و مدول خمشی بهبود می‌یابد. همچنین افزایش سرعت کشنده و در نتیجه کاهش ماندگاری پیش‌آغشته‌ها درون قالب، منجر به کاهش استحکام خمشی و برشی می‌شود [11]. هاگسترند و همکاران بر روی اثر میزان حفره‌ها بر روی خواص خمشی تیر ساخته شده از روش قالب‌گیری تحت فشار با استفاده از کامینگلدهای شیشه/ پلی‌پروپیلن، مطالعاتی انجام داده‌اند. با تغییر زمانی که مواد در قالب تحت فشار هستند، می‌توان تیرهایی با میزان حفره 1 تا 14 درصد تولید کرد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، حفره‌ها یک اثر منفی بر روی مدول و استحکام خمشی داشتند، به گونه‌ای که هر دوی آن‌ها با افزایش هر 1 درصد حفره، تقریبا 1.5 درصد با کاهش مواجه شدند [10].

فردریخ و همکاران، روابط بین مکانیسم آغشتگی، کیفیت تثبیت و نتایج خواص مکانیکی کامپوزیت پلی‌اتراترکتون/ الیاف کربن[2] ساخته شده از نخ‌های هیبریدی را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند. کیفیت نمونه‌ها عمدتا از طریق مطالعات میکروسکوپی ریزساختارهای مواد و همچنین خواص مکانیکی با استفاده از آزمون خمش عرضی، ارزیابی شد. یک مدل برای توصیف کیفی آغشتگی و فرآیند تثبیت توسعه داده شد، که تغییرات حفره در طول تثبیت و همچنین زمان، دما و فشار موردنیاز برای رسیدن به تثبیت نهایی را پیش‌بینی کند [12].

جود و رایت به این نتیجه رسیدند که مقاومت برشی بین لایه‌ای به ازای افزایش هر درصد از کسر حجمی حفره، در حدود 4 تا 7 درصد کاهش می‌یابد [13]. وارنا و همکاران در طی تحقیقاتی ثابت کرده‌اند که خواص کششی، برشی، خمشی و فشاری با افزایش کسر حجمی حفره کاهش می‌یابند [14]. ساکاکوچی و همکاران، برای بررسی اثر ساختارهای میکرو-بریدینگ و حالت‌های مختلف فرآیند بر روی خواص مکانیکی و میزان آغشتگی آن‌ها، با استفاده از نخ‌های میکرو-برید شده[3] کامپوزیت تک جهته شیشه/ پلی‌آمید- نایلون ساختند. کسر حجمی حفره برای بررسی کیفیت آغشتگی تعیین شد، که با افزایش زمان نگه‌داری و اعمال فشار کاهش یافت [15].

این مقاله براساس پژوهش‌های انجام شده یاد شده بالا در زمینه اثر حباب بر خواص مکانیکی به دنبال کاهش حباب به‌منظور بالا بردن خواص مکانیکی است. برای رسیدن به این هدف، روش رشته پیچی در پالتروژن به عنوان روشی مکمل فرض شده است. روش پژوهش مبتنی بر کار تجربی و آزمایشگاهی است، که فرآیند را بهبود و محصول با کیفیت مناسب تهیه

[1] Comingled

[2] CF/PEEK

[3] Micro-braided yarns

می‌شود. برای صحت‌سنجی فرض یاد شده چگالی، درصد حجمی الیاف و درصد حجمی حفره ها برای محصول ساده پالتروژن و محصول با تقویت عرضی تولید شده با رشته پیچی پالتروژنی مقایسه می‌شوند.

2- مواد

برای تولید نمونه کامپوزیتی الیاف شیشه به‌عنوان تقویت‌کننده، و ماتریس پلیمری از نوع گرمانرم استفاده شده است. ابتدا برخی خواص و ویژگی‌های عمومی مواد اولیه ارائه می‌شود. ابتدا خواص مکانیکی الیاف شیشه (شیشه-E) به‌عنوان الیاف تقویت‌کننده و سپس خواص پلی‌اتیلن سنگین که به عنوان پلیمر گرمانرم است معرفی می‌شوند.

2-1- الیاف شیشه

این نوع الیاف معمولا برای تولید محصولی مهندسی و کم هزینه در نظر گرفته می‌شود [16]. قطر یک فیلامنت[1] شیشه از 3 تا 24 میکرومتر است. برای تولید محصولات سازه‌ای پالتروژنی اغلب از قطر 17 میکرومتر استفاده می‌شود. خواص متداول الیاف شیشه در ادامه آمده است [17]. در جدول 1 مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف شیشه-E مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است. خواص مکانیکی برای الیاف برای گزارش نوع الیاف آمده است و در محاسبات این پژوهش به‌کار نرفته است. الیافی که برای تولید پیش‌آغشته استفاده شده است، از نوعی روینگ با تکس 2400 g/km می‌باشد.

الیاف به‌کار رفته برای رشته پیچی پالتروژنی از همان کلاس E، اما با قطر و تکس کم‌تر است. با پایین آمدن قطر و تکس، آغشتگی الیاف بهبود می‌یابد. هرچقدر قطر و تکس الیاف کم‌تر باشد، با انعطاف‌پذیری بیشتر باعث می‌شود فرآیندپذیری آن در محصول پالتروژنی بهبود پیدا کند و در نتیجه خواص مکانیکی محصول افزایش یابد. قطر فیلامنت این نوع شیشه در حدود 10 میکرومتر و تکس الیاف 60 g/km می‌باشد، که در نوع خود بسیار نادر است [19].

2-2- پلیمر

یکی از متنوع‌ترین محصولات پلاستیکی، پلی‌اتیلن است. پلی‌اتیلن‌ها از خانواده‌ی الفین‌ها با فرمولاسیون مختلف هستند [16]. پلی‌اتیلن سنگین 86 درصد (کمتر یا بیشتر) از محصولات پلی‌اتیلنی را تشکیل می‌دهند، که تقریبا 75 درصد آن‌ها در سازه‌های کامپوزیت به‌کار برده می‌شوند. از مزایای عمومی محصولات پلی‌اتیلنی به قیمت پایین نسبت به خواص، تبدیل آسان، مقاومت به ضربه، جذب کم آب، چگالی پایین (حتی پلی‌اتیلن سنگین)، عایق الکتریکی خوب، ضریب اصطکاک پائین، سهولت در جوش‌کاری و ماشین‌کاری برای کلاس‌های صلب، مقاومت مناسب در برابر انرژی بالای تابش، بی‌اثری فیزیولوژیکی، و تطبیق پذیری با روش‌های متنوع فرآیندهای مختلف می‌توان اشاره کرد [20].

در این تحقیق از پلی‌اتیلن چگالی بالا[2] 5620 (کلاس تزریقی از محصولات شرکت پتروشیمی اراک) با شاخص جریان مذاب[3] 2gr/10min (تحت استاندارد ASTM D1238، در دمای $190\,^{\circ}C$ با وزنه‌ی 2.16 کیلوگرمی) استفاده شده است، که یک نوع پلی‌اتیلن با ویسکوزیته پایین و در نتیجه با سیالیت بالا محسوب می‌شود. برخی مشخصات این نوع پلی‌اتیلن در زیر آمده است (جدول 2). ویژگی مکانیکی ماتریس برای یادآوری آمده است

جدول 1 مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف شیشه-E [18]

Table 1 Mechanical and Physical Properties of E-glass

چگالی (g/cm^3)	مدول کششی (GPa)	استحکام کششی (MPa)	بیشترین ازدیاد طول (٪)
2.57	72.5	3400	2.5

و از سازنده آن گزارش می‌شود.

3- آزمایش‌های تجربی

براساس مطالعات صورت گرفته و تجربیات پیشین برای تولید نهایی، ابتدا پیش‌آغشته‌های الیاف شیشه/ پلی‌اتیلن تولید شدند. سپس با توجه به جداول طرح آزمایش و با استفاده از پیش‌آغشته‌های تولید شده، نمونه‌های میله‌ای ساده و میله‌ای تقویت شده با الیاف عرضی تولید شدند.

برای تعیین کسر جرمی الیاف و کسر حجمی حفره مطابق با استانداردها، از آزمون‌های تجربی استفاده شده است، که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

3-1- تولید پیش‌آغشته

در مطالعات پیشین ثابت شده است که استفاده از پیش‌آغشته‌ها برای تولید محصول نهایی، افزایش کسر حجمی الیاف در زمینه‌ی گرمانرم را در پی خواهد داشت [22,19]. بنابراین، ابتدا با استفاده از قالب ساخته شده و روش طراحی شده برای تولید پیش‌آغشته، پیش‌آغشته‌ها ساخته شده‌اند. در مرحله‌ی دوم تولید، از پیش‌آغشته‌های ساخته شده برای تولید محصول نهایی استفاده شده است. برای آغشته سازی بهتر، از دو روش ترکیبی استفاده شده است: 1- استفاده از فشار خارجی مذاب برای آغشته‌سازی، 2- به‌کارگیری محفظه مذاب نشان داده شده (شکل 1). برای رسیدن به حالت پایدار، می‌بایست دور ماردون را قبل از شروع آغشته‌سازی به مقداری مناسب تنظیم شود تا همواره مقدار ناچیزی مذاب از دهانه خروجی 3 خارج شود. با این روش، فشار مذاب داخل محفظه کمی بالاتر از فشار محیط می‌شود و پرشدگی محفظه از مذاب را تضمین می‌کند .به محض ورود روینگ به محفظه‌ی مذاب، ابتدا با شیارهای بخش 4 تماس می‌یابد. به‌منظور نشان دادن نقش شیارها بر کیفیت آغشته‌سازی، بخش 4 به گونه‌ای ساخته شده است که تعداد شیارها از صفر تا 3 متغیر باشد . بعد از عبور روینگ از این شیارها و آغشتگی نسبی، در ادامه این الیاف آغشته شده از چهار پین به قطر 10 میلی‌متر که به‌صورت زیگزاگی در محفظه قرار گرفته‌اند عبور می‌کنند. بعد از اتمام آغشته‌سازی، الیاف شیشه از داخل بخش 6 -قالب استوانه‌ای به قطر داخلی 2 میلی‌متر در خروجی قالب که تعیین‌کننده‌ی قطر نهایی پیش‌آغشته است- عبور می‌کنند. در تحقیق حاضر، این روش آغشته‌سازی که در آن از دو روش به‌صورت همزمان استفاده شده، "آغشته‌سازی هیبریدی" نامیده شده است [18].

جدول 2 مشخصات فیزیکی و مکانیکی HDPE 5620*

Table 2 Mechanical and Physical Properties of HDPE 5620

چگالی (g/cm^3)	شاخص جریان مذاب (gr/10 min)	استحکام کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)	مدول خمشی (GPa)
0.957	1.9-2.1	22	0.9	1

* تمامی مشخصات آورده شده در این جدول، از شرکت پتروشیمی اراک اقتباس شده است.

[1] Filament
[2] HDPE
[3] Melt Flow Index

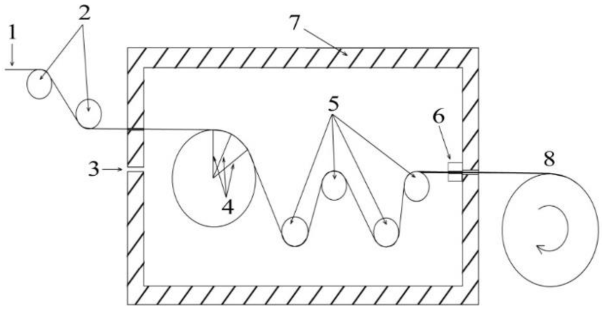

Fig 1. Schematic of impregnation system that used to produce prepreg

شکل 1 شماتیک سامانه آغشته‌سازی پیاده‌سازی شده در این تحقیق: 1- روینگ شیشه، 2- پین‌های پخش‌کننده‌ی الیاف، 3- خروجی مذاب اضافی از محفظه، 4- شیارهای عبور مذاب برای آغشته‌سازی الیاف شیشه، 5- پین‌های آغشته‌سازی، 6- دای استوانه‌ای با قطر داخلی 2 میلی‌متر، 7- محفظه مذاب، 8- جمع‌آوری الیاف شیشه‌ی آغشته شده [21,18].

با در نظر گرفتن تاثیر پارامترهای مختلف بر روی آغشتگی، بهترین حالت برای تولید محصول پیش‌آغشته در نظر گرفته شده است. برای داشتن آغشتگی مناسب دمای قالب باید در حدود $190°C$ تنظیم شود، همچنین سرعت خطی پیچیدن الیاف باید برابر 5.02 mm/min باشد [22].

3-2- تولید نمونه‌های میله‌ای

با توجه به پژوهش‌های پیشین در رابطه با تولید محصول لوله‌ای با استفاده از پیش‌آغشته‌ها و همچنین قالب طراحی شده، برای تولید نمونه‌های میله‌ای در این تحقیق، پارامترهای مناسب در نظر گرفته شده است [22]. مهم‌ترین پارامترهایی که برای بررسی و مقایسه‌ی خواص موردنظر در این تحقیق در نظر گرفته شده، دمای قالب، سرعت خطی کشنده و همچنین تعداد پیش‌آغشته‌ها بوده است.

3-2-1- دمای قالب

حرارت‌دهی نامناسب مواد پلیمری گرمانرم (پلیمر موجود در پیش‌آغشته‌ها) موجب افت خواص مکانیکی آن‌ها می‌شود، بنابراین می‌بایست بهترین محدوده‌ی دمایی را برای تولید نمونه‌ها در نظر گرفت. به همین منظور، دو دمای متفاوت در محدوده‌ی دمای ذوب پلی‌اتیلن، یعنی $195°C$ و $220°C$ تنظیم شده است تا با توجه به خطای اندازه‌گیری دستگاه کنترل دما، شرایط دمایی مطلوبی حاصل شود.

3-2-2- سرعت کششی

انتخاب سرعت کششی در تولید محصولات پالتروژنی، مخصوصا هنگام استفاده از زمینه‌های گرمانرم– به‌دلیل محدوده‌ی دمایی- از اهمیت بسیاری برخوردار است. زمان ماندگاری پیش‌آغشته‌ها در قالب ارتباط مستقیمی با سرعت کششی دارد. برای تولید نمونه‌های میله‌ای، از کم‌ترین فرکانس‌ها برای ایجاد حداقل سرعت‌های کششی به ترتیب در 5.84 mm/s و 6.22 mm/s استفاده شده است.

3-2-3- تعداد پیش‌آغشته‌ها

با توجه به اینکه در محصولات کامپوزیتی، وظیفه تحمل نیروها بر عهده الیاف به کار رفته است، یکی از مهم‌ترین پارامترها برای تولید نمونه‌ی مطلوب، تعداد پیش‌آغشته‌های استفاده شده است. به بیان بهتر، اگر فرض بر این باشد که بهترین آغشتگی -با توجه به رعایت سایر پارامترها- در نمونه حاصل می‌شود، هر چقدر درصد حجمی الیاف استفاده شده در نمونه بیشتر باشد، خواص فیزیک و مکانیکی نیز متناسب با آن بهبود می‌یابد. با توجه به مساحت سطح مقطع هر پیش‌آغشته ($2.83\ mm^2$) و همچنین مساحت خروجی قالب ($54.2\ mm^2$)، تعداد 20 پیش‌آغشته در هر نمونه‌ی نهایی برای مقایسه‌ی درصد حجمی حفره در نظر گرفته شده است.

3-2-4- طرح آزمایش

در این پژوهش از دو پارامتر برای تولید و بررسی کسر حجمی حفره در نمونه‌ها استفاده شده است. طرح آزمایش این تحقیق در جدول 3 آورده شده است [23,22,19]. درباره پارامترهای موثر دیگر مانند قطر و تعداد پیش‌آغشته‌ها، مطالعه خوبی انجام و چاپ شده ست که در این‌جا از آن‌ها استفاده شد. از مهم‌ترین پارامترها، دمای قالب و سرعت کشنده مورد بررسی قرار گرفتند. برای انتخاب دمای قالب، دماهایی در نظر گرفته شد که میله به‌طور کامل قالب را پر کرده بود و پیش آغشته‌ها به‌طور کل پس از ذوب یکپارچه شده بودند. در انتخاب سرعت کشنده دو محدودیت وجود دارد؛ یکی خود کشنده است که برای سرعت های به‌خصوصی قابل تنظیم بود، دیگر این‌که در سرعت های بالا آغشتگی کمتر می‌شود.

با توجه به اهداف تعیین شده در این تحقیق برای مقایسه‌ی مناسب‌تر، جدولی مشابه با جدول فوق برای تولید نمونه‌های میله‌ای همراه با الیاف عرضی طراحی شده است (جدول 4). با بررسی و مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از جداول طرح آزمایش، می‌توان تاثیر رشته پیچی پالتروژنی بر روی خواص موردنظر را در نمونه‌های نهایی مشاهده کرد.

3-2-5- تولید میله‌ی ساده

پیش‌آغشته‌ها به‌صورت چهار دسته‌ی پنج‌تایی از انتهای قالب وارد می‌شوند و بعد از آن که دمای قالب به میزان دلخواه رسید، قسمت نری قالب با حفظ قرینگی قسمت نری نسبت به قسمت مادگی، به وسیله‌ی پیچ‌های آلن بسته می‌شود. پیش‌آغشته‌ها به‌وسیله‌ی سیم رابط به کشنده متصل می‌شوند، بعد از گذشت چند ثانیه–به‌منظور پیش‌گرم شدن پیش‌آغشته‌ها- با سرعت تعیین شده کشیده می‌شوند.

جهت جلوگیری از شوک حرارتی پیش‌آغشته‌ها-که ناشی از ورود ناگهانی آن‌ها به محیط آزمایشگاهی است- یک المنت تسمه‌ای به وسیله‌ی پیچ نگهدارنده به خروجی قالب متصل شده است، که حداکثر دمای $250°C$ را تولید می‌کند و 1 سانتی‌متر از نظر شعاعی با نمونه فاصله دارد. بعد از آن نمونه به سمت کالیبراتور (قالب دوم) کشیده می‌شود و با عبور از انتهای آن قطر نمونه تنظیم می‌شود (شکل 2).

زمانی که محصول از قالب گرم خارج می‌شود -با توجه به هندسه انتهای قالب اصلی- تقریبا به شکل لوله‌ای است، لذا کالیبراتور نقش قالب ثانویه را نیز به عهده دارد. قطر کمتر در قسمت خروجی نسبت به قسمت ورودی آن باعث فشرده شدن پیش‌آغشته‌ها به یکدیگر می‌شود و در نتیجه پیش‌آغشته‌ها

جدول 3 طرح آزمایش برای تولید نمونه‌های میله‌ای ساده

Table 3 Design of Experiments (DOE) to produce pultruded rods with unidirectional layers

نمونه	دمای قالب ($°C$)	سرعت خطی کشنده (mm/s)
S1	195	6.22
S2	195	5.84
S3	220	6.22
S4	220	5.84

جدول 4 طرح آزمایش برای تولید نمونه‌های میله‌ای تقویت شده

Table 4 Design of Experiments (DOE) to produce pultruded rods with helically-wound layers

نمونه	دمای قالب (^{o}C)	سرعت خطی کشنده (mm/s)
SW1	195	6.22
SW2	195	5.84
SW3	220	6.22
SW4	220	5.84

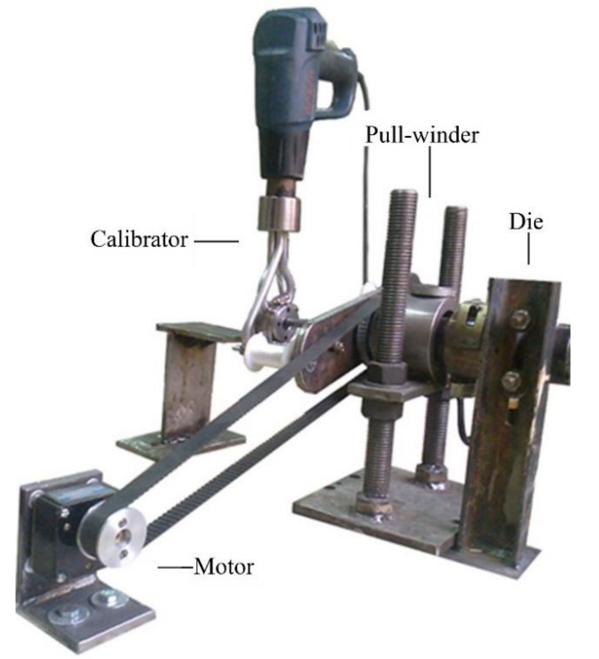

Fig 2. The arrangement of 1st and 2nd pultrusion die, pull-winder and its motor

شکل 2 نحوه‌ی قرارگیری قالب، دستگاه تابنده، موتورگیربکسی و کالیبراتور (قالب دوم) به همراه سشوار

به محصولی میله‌ای تبدیل می‌گردند. دمای سطحی نمونه در زمان خروج از قالب اولیه با دمای ذوب پلیمر تقریبا برابر است. بنابراین با احتساب نیروی کششی کشنده و همچنین تنش‌های برشی به وجود آمده در زمان خروج از قالب، محصول دچار اعوجاج و تورم می‌شود. در نتیجه اگر از کالیبراتور استفاده نشود، کیفیت سطح محصول تولید شده نیز چندان مطلوب نخواهد بود.

جریان هوای گرم در "شکل 3" به تصویر درآمده است. کالیبراتور به گونه‌ای طراحی شده است که جریان هوای گرم در جهت عکس حرکت کشنده و به سمت قالب باشد، تا با ایجاد حرارت لازم از جامد شدن پلیمر سطحی پروفایل جلوگیری کند. همچنین در سمت دیگر آن با ایجاد سوراخی دقیق (هم‌اندازه با قطر نهایی پروفایل)، امکان تولید پروفایلی با کیفیت سطحی مطلوب فراهم شده است.

6-2-3- تولید میله همراه با الیاف عرضی

نقش اصلی و اساسی الیاف عرضی در افزایش خواص مکانیکی نظیر استحکام خمشی و برشی میله دیده می‌شود. با توجه به پیوسته بودن فرآیند پالتروژن، بهترین و ساده ترین راه برای تولید نمونه‌هایی همراه با تقویت عرضی الیاف ممتد، استفاده از تابنده‌ی الیاف است. برای این منظور در این تحقیق، دستگاه تابنده الیاف با دو قرقره الیاف طراحی و ساخته شده است.

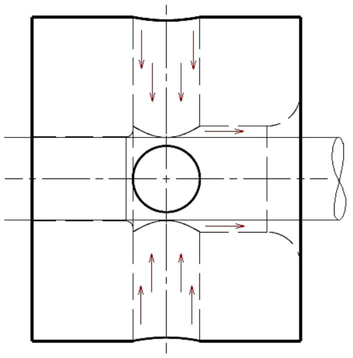

Fig 3. Hot air flow inside the calibrator (2nd pultrusion die)

شکل 3 جریان هوای داغ داخل کالیبراتور در نمای برش خورده از آن

مکانیزم چرخش دستگاه براساس انتقال قدرت موتور گیربکسی به واسطه‌ی تسمه به پولی دستگاه تابنده است. برای آغشتگی بهتر الیاف خشکی که بر روی دستگاه تابنده قرار گرفته‌اند، مناسب‌ترین مکان قرارگیری آن دقیقا بعد از خروجی قالب است. درون شفت توخالی دستگاه تابنده، المنت تسمه‌ای به خروجی قالب متصل است و پلیمر سطحی پروفایل را تا زمان رسیدن به الیاف تابنده، در حالت خمیری نگه می‌دارد (شکل 4).

در "شکل 5"، قسمتی از نمونه‌ی تولید شده به روش رشته پیچی پالتروژنی نشان داده شده است. قطر نهایی نمونه به‌طور متوسط 7.6 میلی‌متر می‌باشد.

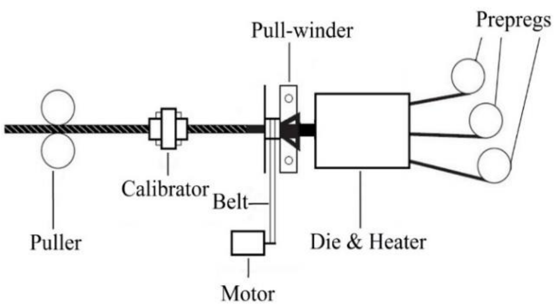

Fig 4. Production of pultruded rods with helically-wound layers in schematic diagram

شکل 4 شماتیک تولید میله‌ی تقویت شده با لایه‌های عرضی

Fig 5. Pultruded rod with helically-wound fibers

شکل 5 نمونه‌ی میله‌ای تقویت شده با الیاف عرضی

3-2-7- تعیین کسر جرمی و حجمی الیاف و کسر حجمی حفره

برای تعیین مقدار حفره در نمونه‌ی موردنظر، ابتدا می‌بایست کسر جرمی و حجمی الیاف را مطابق با استاندارد D 2734–94 و روابط (1) و (2) محاسبه نمود. کسر حجمی الیاف به‌کار رفته در ماده‌ی کامپوزیتی را می‌توان با استفاده از آزمون سوزاندن و یا آزمایش انحلال در اسید به‌دست آورد. در این آزمایش، ابتدا نمونه‌ای از محصول مطابق با استاندارد وزن شده، سپس پلیمر آن با استفاده از کوره سوزانده شده است. نسبت وزن الیاف خشک باقی‌مانده به وزن اولیه‌ی محصول (قبل از سوزاندن)، نشان دهنده‌ی کسر جرمی الیاف است. با استفاده از این داده‌ها و رابطه‌ی (3)، چگالی تئوری نمونه به‌دست می‌آید [24].

$$W_f = \frac{w_f}{w_c} \quad (1)$$

$$V_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} W_f \quad (2)$$

$$\rho_{ct} = \frac{100}{\left(\frac{W_m}{\rho_m} + \frac{W_f}{\rho_f}\right)} \quad (3)$$

برای تعیین چگالی تجربی در این آزمایش، ابتدا نمونه‌ای از محصول مطابق با استاندارد وزن شده، سپس چگالی نمونه‌ی مذکور به کمک روش جابه‌جایی – نمونه را هم در هوا و هم در آب می‌توان وزن کرد- و طبق رابطه‌ی (4)، محاسبه شده است [24].

$$\rho_{ce} = \frac{1}{(w_c - w_i)} \rho_w \quad (4)$$

به کمک چگالی تئوری و چگالی تجربی محاسبه شده، می‌توان کسر حجمی حفره را داخل نمونه با استفاده از رابطه‌ی (5) محاسبه نمود [24].

$$V_v = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ce}}{\rho_{ct}} \quad (5)$$

3-2-8- عکس میکروسکوپی

برای بررسی دقیق‌تر نمونه‌ها با استفاده از عکس‌های میکروسکوپی، از هر محصول به اندازه‌ی مشخصی نمونه‌برداری شد. نمونه‌های کامپوزتی در داخل قالب‌های کوچکی قرار داده شده و به کمک رزین اپوکسی در داخل قالب جای گرفتند. نمونه‌ها بعد از پخت رزین برای قرار گرفتن بر روی میز میکروسکوپ، در اندازه‌های مشخصی بریده شدند. سپس به کمک کاغذهای سمباده از P600 تا P2500، سطح آن‌ها پولیش داده شد.

4- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به جداول طرح آزمایش و نمونه‌های تولید شده، با استفاده از روابط موجود و همچنین اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش‌های مطرح شده در بخش قبل، نتایج آن‌ها در این بخش مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

4-1- چگالی و کسر جرمی الیاف

چگالی تئوری و تجربی در جدول 5 برای تمامی نمونه خلاصه شده است. درصد انحراف در اندازه گیری چگالی تجربی از سه تا هفت صدم درصد است. با بررسی چگالی‌های تجربی، مشخص می‌شود افزایش نیروی تراکم در زمان تثبیت نمونه‌ها، باعث افزایش چگالی تجربی نمونه‌ها شده است. الیافی که توسط دستگاه تابنده الیاف به دور پروفایل تابیده می‌شوند، نیروی تراکم لازم را ایجاد می‌کنند. افزایش چگالی تجربی با کاهش کسر حجمی حفره در نمونه‌ها رابطه‌ی مستقیم دارد، که در بخش بعدی به آن پرداخته می‌شود.

چنان‌چه پیش‌تر بیان شده است، برای محاسبه‌ی کسر حجمی الیاف از کسر جرمی آن در روابط استفاده می‌شود. کسر جرمی الیاف با استفاده از رابطه‌ی (1) و آزمون سوزاندن پلیمر محاسبه شده است. با مقایسه‌ی کسرهای جرمی نمونه‌های میله‌ای ساده و تقویت شده، مشاهده می‌شود که با توجه به تعداد 20 پیش‌آغشته‌ی وارد شده به قالب، تغییری ناچیز در کسر جرمی الیاف در حدود 1 درصد رخ داده است (شکل 6Error! Reference source not found.).

4-2- کسر حجمی الیاف

برای محاسبه‌ی کسر حجمی الیاف، ابتدا می‌بایست چگالی نمونه‌ی مورد نظر را با روش جابه‌جایی مایع محاسبه نمود (جدول 5)، سپس می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (2) کسر حجمی الیاف آن نمونه را پیدا کرد. با توجه به این‌که کسر حجمی الیاف تاثیر زیادی در خواص مختلف پروفایل دارد، سعی بر آن است که با استفاده از مقادیر به‌دست آمده در این قسمت در مورد رابطه‌ی کسر حجمی الیاف و خواص موردنظر، تحلیل‌های مناسبی انجام شود.

با توجه به ثابت بودن حجم ورودی الیاف – تعداد 20 پیش‌آغشته- تفاوت در کسر حجمی الیاف می‌تواند ناشی از دو علت عمده باشد؛ 1- کسر حجمی حفره، 2- جریان بازگشتی پلیمر مذاب. در ادامه به مبحث کسر حجمی حفره پرداخته می‌شود.

با توجه به این‌که مانند حالت قبلی، تعداد 20 پیش‌آغشته در تولید میله‌ی مرکزی استفاده شده است، افزایش کسر حجمی الیاف با اضافه شدن الیاف عرضی مشاهده می‌شود. کسر حجمی حفره و جریان بازگشتی پلیمر مذاب در داخل قالب می‌تواند شرایط مختلفی را در کسر حجمی الیاف به وجود بیاورد.

با وجود این‌که کسر جرمی الیاف در نمونه‌های میله‌ای ساده و تقویت شده تغییر چندانی نداشته است، اما همان‌طور که در "شکل 7" مشاهده می‌شود، کسر حجمی الیاف تا 3 درصد افزایش داشته است.

جدول 5 چگالی تجربی و تئوری نمونه‌های میله‌ای ساده و تقویت شده

Table 5 Experimental and theoretical density of the pultruded rods with unidirectional and helically-wound layers

نمونه	چگالی تئوری (g/cm^3)	چگالی تجربی (g/cm^3)
S1	1.68	1.50 ± 0.03
SW1	1.68	1.58 ± 0.07
S2	1.68	1.51 ± 0.04
SW2	1.68	1.59 ± 0.06
S3	1.67	1.58 ± 0.07
SW3	1.67	1.63 ± 0.04
S4	1.67	1.59 ± 0.03
SW4	1.67	1.64 ± 0.05

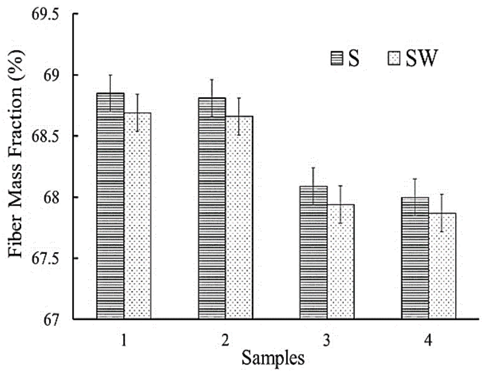

Fig 6. Comparison of the fiber mass fraction of the pultruded rods with unidirectional and helically-wound layers

شکل 6 مقایسه‌ی کسر جرمی الیاف در نمونه‌های میله‌ای ساده و تقویت شده

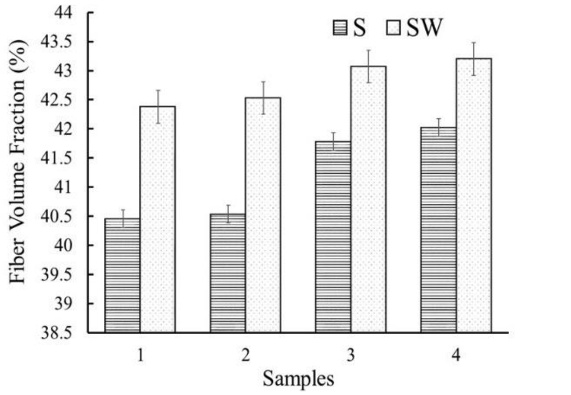

Fig 7. Comparison of the fiber volume fraction of the pultruded rods with unidirectional and helically-wound layers

شکل 7 مقایسه‌ی کسر حجمی الیاف در نمونه‌های میله‌ای ساده و تقویت شده

4-3-کسر حجمی حفره

درصد حجمی حفره یکی از پارامترهایی است که هم در میزان آغشتگی محصول و هم در خواص فیزیکی و مکانیکی ماده‌ی کامپوزیتی تاثیر به‌سزایی دارد. کسر حجمی حفره نمونه‌ها با استفاده از رابطه‌ی (5) محاسبه شده است.

دمای قالب مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار در کیفیت فرآیند و محصول محسوب می‌شود. افزایش دما، باعث کاهش ویسکوزیته‌ی مذاب می‌شود و در نتیجه فرآیندپذیری بهتر پلیمر مذاب را در پی خواهد داشت. اگرچه کسر حجمی الیاف با افزایش دمای قالب در سرعت ثابت کشنده افزایش می‌یابد، اما به‌دلیل آغشتگی بهتر الیاف به زمینه‌ی پلیمری مذاب، حجم حفره‌های به وجود آمده با کاهش قابل توجهی همراه می‌شود.

سرعت خطی کشنده یکی از پارامترهای مهم طراحی آزمایش در تحقیق حاضر محسوب می‌شود. با توجه به مقادیر به‌دست آمده می‌توان مشاهده کرد که در دمای ثابت با افزایش سرعت خطی کشنده، به‌علت زمان کم‌تر برای نفوذ ماتریس در بین الیاف و همچنین به‌دلیل جریان بازگشتی پلیمر مذاب، افزایش کسر حجمی حفره و آغشتگی نامناسبی را در پی خواهد داشت، بنابراین حفره‌های بیشتری در بین فیلامنت‌های الیاف شکل می‌گیرند.

در مقایسه با لوله‌های تولید شده به همین روش و با همین تعداد پیش‌آغشته [22]، به میزان 26 تا 32 درصد افزایش کسر حجمی الیاف و البته کاهش شدید کسر حجمی حفره تا 85 درصد مشاهده می‌شود. این مقدار کاهش بی‌سابقه در کسر حجمی حفره به شرایط متفاوت تولید نمونه وابسته است، که به‌عنوان مثال می‌توان به دمای قالب، سرعت خطی کشنده و مهم‌تر از آن‌ها ساخت و طراحی کالیبراتور مناسب برای تولید نهایی اشاره کرد.

با مقایسه‌ی دو به دو کسر حجمی حفره در نمونه‌های میله‌ای ساده و تقویت شده در "شکل 8"، می‌توان مشاهده کرد که علت افزایش چگالی تجربی و همچنین کسر حجمی الیاف، کاهش 1.5 تا 4.5 درصدی کسر حجمی حفره بوده است. بخش عمده‌ی این تغییرات، موجب افزایش و یا کاهش کسر حجمی ماتریس در نمونه‌ی نهایی شده است.

برای مقایسه مقدار کسر حجمی حفره از آزمایش تجربی با مقادیر تئوری می‌توان از شبیه‌سازی عددی پدیده آغشتگی استفاده کرد، که نیاز به پارامترهای فرآیندی زیادی دارد و تغییرات جزیی در قالب یا فرآیند شبیه‌سازی را پیچیده یا غیرممکن می‌کند. البته شبیه‌سازی‌ها معمولا مقدار درصد حفره را کمتر از مقدار تجربی پیش‌بینی می‌کنند و حتی آغشتگی را کامل یا درصد حباب در محصول را صفر محاسبه می‌کنند. برای مقایسه شبیه‌سازی مرجع [25] در این‌جا استفاده و مقدار درصد حفره را برای حالت میله ساده کمتر از یک سوم تجربی پیش‌بینی می‌کند.

4-4- نتایج عکس‌های میکروسکوپی

عکس‌های میکروسکوپی برای بررسی دقیق‌تر آغشتگی، مرزها و توزیع الیاف در ماتریس و همچنین حفره‌ها بسیار مناسب هستند. مشاهده‌ی این نوع عکس‌ها و نتایج آن کمک خواهد کرد که تحلیل بهتری از آزمون‌های انجام شده در بخش‌های قبلی صورت پذیرد. به‌دلیل تعدد عکس‌های میکروسکوپی گرفته شده، در این بخش مهم‌ترین پارامترها به ترتیب در بدترین و بهترین شرایط در نظر گرفته شده- با توجه به پارامترهای مهم مطرح شده در قسمت طرح آزمایش- بررسی می‌شوند. در این پژوهش برخلاف مرجع [26] تخریبی در الیاف مشاهده نشد.

همان‌گونه که در "شکل 9" مشاهده می‌شود، با سرعت خطی بالای کشنده و همچنین دمای پایین قالب، آغشتگی الیاف شیشه به شکل نامناسبی انجام گرفته است. در تحلیل این نمونه که در پایین‌ترین دما و بالاترین سرعت خطی کشنده تولید شده است باید گفت که در سرعت کششی بالاتر، زمان ماندگاری پیش‌آغشته در داخل قالب کاهش می‌یابد، بنابراین پلیمر گرمانرم پیش‌آغشته کاملا در ناحیه دمایی مذاب خود قرار نمی‌گیرد و در نتیجه زمینه‌ی پلیمری پروفایل کامپوزیتی نفوذ کم‌تری در بین الیاف شیشه خواهد داشت.

با بالا رفتن دمای قالب تا $220^{\circ}\mathrm{C}$ و همچنین پایین آمدن سرعت خطی کشنده تا 5.84 mm/s، آغشتگی مناسب‌تری نسبت به شرایط دیگر تولید نمونه حاصل شده است. در "شکل 10" میزان حفره‌ها، توزیع الیاف و همچنین آغشتگی مناسب نمونه موردنظر نشان داده شده است.

اگر پیش‌آغشته‌ها زمانی که در داخل قالب بین دو قسمت نری و مادگی قالب قرار می‌گیرند، فرصت کافی برای رسیدن به نقطه‌ی ذوب پلیمر داشته باشند، پلیمر پیش‌آغشته‌ها به راحتی در بین الیاف شیشه نفوذ می‌کند. همچنین پلیمر موجود در پیش‌آغشته‌های تشکیل‌دهنده‌ی میله‌ی کامپوزیتی بعد از خروج از قالب، مرزهای بین آن‌ها را به شکلی مناسب و با کم‌ترین حجم حفره پر می‌کنند.

عکس میکروسکوپی زیر در "شکل 11"، قسمتی از نمونه‌ی SW1 می‌باشد. توزیع و فشردگی الیاف در این نمونه، در مقایسه با نمونه‌ی S1 که بدون الیاف عرضی تولید شده است کاملا قابل مشاهده می‌باشد. این نمونه در

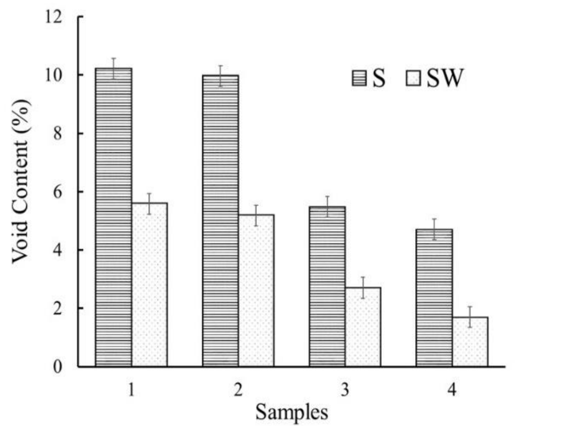

Fig 8. Comparison of the void content of the pultruded rods with unidirectional and helically-wound layers

شکل 8 مقایسه‌ی کسر حجمی حفره در نمونه‌های میله‌ای ساده و تقویت شده

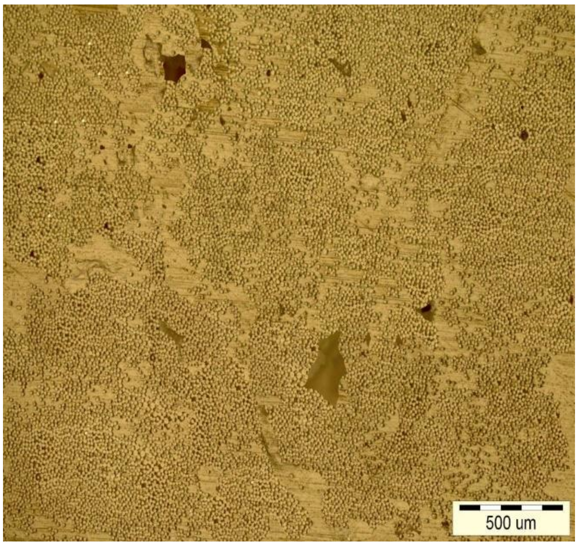

Fig 9. The voids in the cross section of S1 in microscopic view

شکل 9 حفره‌های ایجاد شده در مقطع نمونه‌ی 1S در نمای میکروسکوپی

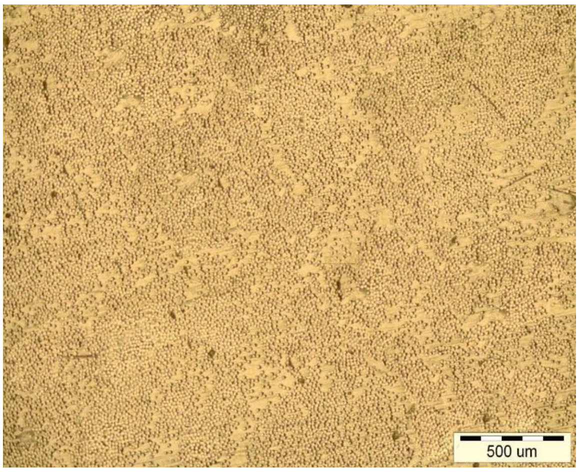

Fig 10. Impregnation and distribution of the fiber in S4

شکل 10 آغشتگی و توزیع مناسب الیاف نمونه‌ی S4

پایین‌ترین دما و بالاترین سرعت خطی کشنده در جدول طرح آزمایش تولید شده است. وجود حفره‌ها در این نمونه می‌تواند ناشی از سرعت کششی بالاتر و در نتیجه زمان ماندگاری پیش‌آغشته‌ها در داخل قالب باشد، بنابراین پلیمر گرمانرم موجود در پیش‌آغشته‌ها کاملا در ناحیه دمایی مذاب خود قرار نگرفته و در نتیجه نفوذ کم‌تری در بین الیاف شیشه داشته است. در مقایسه با "شکل 9" به‌راحتی می‌توان مشاهده کرد که حفره‌های وسیع موجود در نمونه‌ی S1، در این نمونه به صورت معدودتری درآمده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده در قسمت‌های قبلی از نظر درصد حجمی الیاف و همچنین درصد حجمی حفره‌ها، با بالاترین دمای قالب ($220°C$) و پایین‌ترین سرعت خطی کشنده (5.84 mm/s)، همان‌طور که در "شکل 12" نشان داده شده است، نمونه‌ی SW4 آغشتگی مناسب‌تری نسبت به دیگر نمونه‌های تولید شده دارد. میزان بسیار کم حفره‌ها، توزیع مناسب الیاف و همچنین آغشتگی بسیار مطلوب نمونه‌ی SW4 کاملا مشخص است.

بعد از خروج پیش‌آغشته‌ها از داخل قالب و قبل از آن‌که پلیمر مذاب کاملا از حالت خمیری خارج شود و شکل جامدی به خود بگیرد، الیاف عرضی بلافاصله توسط دستگاه تابنده به دور میله‌ی کامپوزیتی تابانده می‌شوند.

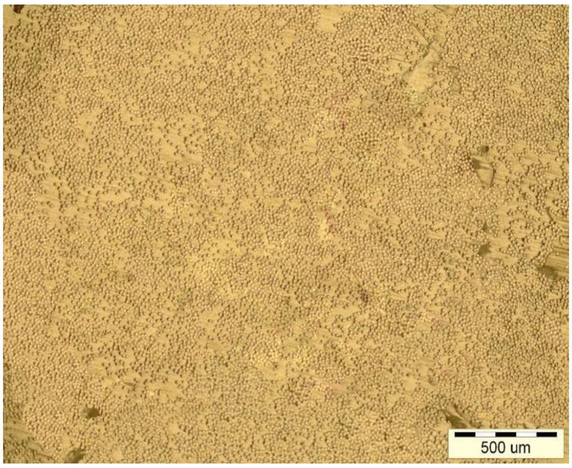

Fig 11. Microscopic view of the SW1

شکل 11 نمای میکروسکوپی از نمونه‌ی SW1

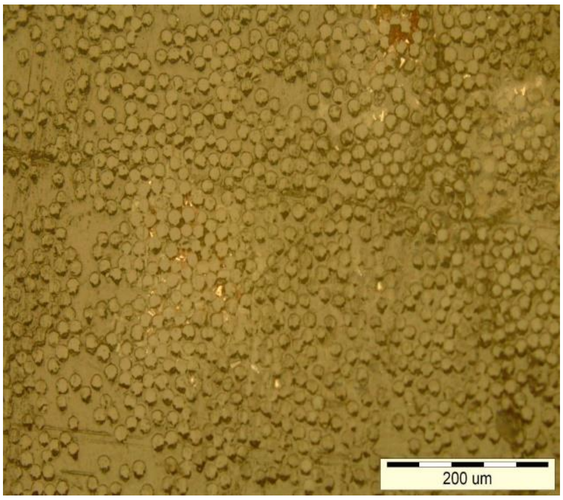

Fig 12. Good impregnation of glass fiber in SW4 at the higher magnifications in the microscopic image

شکل 12 آغشتگی بسیار عالی الیاف شیشه در نمونه‌ی SW4 در بزرگنمایی بالای عکس میکروسکوپی

نیروهای شعاعی و به سمت مرکز این الیاف در هنگام پیچیدن، الیاف درون پیش‌آغشته‌ها را کاملا به هم نزدیک می‌کند و به همین دلیل توزیع مناسبی از الیاف در سطح مقطع ایجاد می‌شود. زمانی که سرعت خطی کشنده به کمترین حد خود برسد، گشتاور دستگاه تابنده به بیشترین میزان خود می‌رسد. در این حالت بیش‌ترین زاویه الیاف نسبت به محور اصلی ایجاد می‌شود و علاوه‌بر این‌که نیروی مناسبی برای تراکم بیشتر الیاف پیش‌آغشته فراهم می‌کند، خود نیز با توجه به زاویه‌ی مناسب به وجود آمده (نزدیک به 90 درجه)، خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه را در جهت عرضی بهبود می‌یابد.

5- نتیجه گیری

در این مقاله اثر تقویت عرضی یک محصول در فرآیند پالتروژن بررسی شده است. هدف یافتن روشی برای اجرای تجربی تقویت عرضی و مقایسه آن با حالتی است که الیاف در امتداد خط پالتروژن هستند. برای این منظور قالب، دستگاه تابنده الیاف و کالیبراتور برای تولید محصولات میله‌ای طراحی و ساخته شد. محصول میله‌ای با شرایط متفاوت دمای قالب و سرعت کشنده در

دو حالت ساده و تقویت شده در جهت عرضی، با کیفیت مناسبی تولید شد. تقویت عرضی پیش‌آغشته‌های شیشه/ گرمانرم به روش رشته پیچی پالتروژنی، با بهبود خواصی مانند چگالی و درصد حجمی حفره همراه بوده است. یافته‌های این مقاله در زیر خلاصه شده است:

- با وجود ثابت ماندن چگالی تئوری، چگالی تجربی میله‌های تقویت شده با الیاف عرضی ممتد نسبت به نمونه‌های میله‌ای ساده، افزایش 3 تا 5 درصدی داشته است.
- با توجه به تکس پایین الیاف شیشه برای تقویت عرضی محصول میله‌ای، کسر جرمی الیاف کامپوزیت تغییر بسیار ناچیزی (در حدود 1 درصد) کرد. ولی کسر حجمی الیاف 1 تا 3 درصد افزایش یافته است.
- دلیل اصلی افزایش چگالی تجربی نمونه‌ها، کاهش حجم حفره‌ها بوده است. کاهش 45 تا 64 درصد از کسر حجمی حفره، نشانه‌ای از آغشتگی مناسب الیاف است.
- عکس‌های میکروسکوپی گرفته شده از نمونه‌های مختلف، آغشتگی مناسب نمونه‌های همراه با الیاف عرضی را نسبت به نمونه‌های ساده تایید می‌کند.

6- فهرست علائم

S	نمونه میله‌ای ساده
SW	نمونه میله‌ای همراه با الیاف عرضی
V	کسر حجمی (٪)
w	جرم (g)
W	کسر وزنی (٪)

علائم یونانی

ρ	چگالی ($g.cm^{-3}$)

زیرنویس‌ها

c	کامپوزیت خشک
ce	تجربی
ct	تئوری
f	الیاف
i	کامپوزیت داخل سیال
m	ماتریس
v	حفره
w	آب یا سیال

7- مراجع

[1] D. V. Rosato, D. V. Rosato, *Reinforced plastics handbook*, Third Edition, pp. 16-345, Concord: Elsevier, 2004.

[2] J. Schäfer, N. Hawelka, T. Gries, Continious production of braided parts with thermoplastic matrices, *16th european conference on composite materials*, Seville, Spain, June 22-26, 2014.

[3] N. Bernet, V. Michaud, P. Bourban, J. Manson, An impregnation model for the consolidation of thermoplastic composites made from commingled yarns, *Journal of Composite Materials*, Vol. 33, No. 8, pp. 751-772, 1999.

[4] A. Miller, N. Dodds, J. Hale, A. Gibson, High speed pultrusion of thermoplastic matrix composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 29, No. 7, pp. 773-782, 1998.

[5] M. Stefanovska, B. Samakoski, S. Risteska, G. Maneski, Influence of some technological parameters on the content of voids in composite during on-line consolidation with filament winding technology, *International Journal of Chemical, Biomolecular, Metallurgical, Materials Science and Engineering*, Vol. 8, No. 5, pp. 398-402, 2014.

[6] R. Pitchumani, S. Ranganathan, R. Don, J. Gillespie, M. Lamontia, Analysis of transport phenomena governing interfacial bonding and void dynamics during thermoplastic tow-placement, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 39, No. 9, pp. 1883-1897, 1996.

[7] T. Starr, *Pultrusion for engineers*, pp. 281-283, New York: Elsevier, 2000.

[8] G. Akovali, *Handbook of composite fabrication*, pp. 153-155, Exeter: iSmithers Rapra Publishing, 2001.

[9] C. Dispenza, P. Fuschi, A. Pisano, Mechanical testing and numerical modelling of pull-wound carbon-epoxy spinnaker poles, *Composites science and technology*, Vol. 62, No. 9, pp. 1161-1170, 2002.

[10] P.-O. Hagstrand, F. Bonjour, J.-A. Månson, The influence of void content on the structural flexural performance of unidirectional glass fibre reinforced polypropylene composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 36, No. 5, pp. 705-714, 2005.

[11] R. Rostamian, *Effect of Transverse Reinforcement on Tensile and Shear Properties in Pultrusion Process Using GF/PE Prepregs*, Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2015. (in Persian فارسی)

[12] L. Ye, K. Friedrich, J. Kästel, Y.-W. Mai, Consolidation of unidirectional CF/PEEK composites from commingled yarn prepreg, *Composites science and technology*, Vol. 54, No. 4, pp. 349-358, 1995.

[13] N. C. Judd, W. Wright, Voids and their effects on the mechanical properties of composites- an appraisal, *Sampe Journal*, Vol. 14, No. 1, pp. 10-14, 1978.

[14] J. Varna, R. Joffe, L. A. Berglund, T. Lundström, Effect of voids on failure mechanisms in RTM laminates, *Composites Science and technology*, Vol. 53, No. 2, pp. 241-249, 1995.

[15] M. Sakaguchi, A. Nakai, H. Hamada, N. Takeda, The mechanical properties of unidirectional thermoplastic composites manufactured by a micro-braiding technique, *Composites Science and Technology*, Vol. 60, No. 5, pp. 717-722, 2000.

[16] J. Murphy, *The reinforced plastics handbook*, Second Edition, pp. 42-69, New York: Elsevier, 1998.

[17] L. C. Bank, *Composites for construction: structural design with FRP materials*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

[18] A. Zolfaghari, *Manufacturing hybrid wood plastic composites with continuous fiber and evaluation of their mechanical properties*, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2013. (in Persian فارسی)

[19] B. Ataei, *Effect of Impregnation in Pultrusion Process of GF/PP SBS Hybrid Fiber on Flexural and Shear Property*, Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2014. (in Persian فارسی)

[20] M. Biron, *Thermoplastics and thermoplastic composites*, Second Edition, pp. 72-198, Waltham: William Andrew, 2012.

[21] A. Zolfaghari, A. H. Behravesh, A. Adli, M. TabkhPaz Sarabi, Continuous glass fiber reinforced wood plastic composite in extrusion process: Feasibility and processing, *Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 32, No. 1, pp. 52-60, 2013. (in Persian فارسی)

[22] M. Tutunchi, *Design and manufacture of circular pultrusion section HDPE/GF(Roving)*, Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2013. (in Persian فارسی)

[23] H. Ghorbani, B. Ataee, M. Golzar, Investigation of Impregnation in a Pultrusion die for glass/polypropylene composite wire, *3rd International Conference on Composites: Characterization, Fabrication and Application (CCFA-3)*, Tehran, Iran, Dec. 18-19, 2012.

[24] A. K. Kaw, *Mechanics of composite materials*, Second Edition, pp. 204-215, New York: CRC press, 2005.

[25] H. Ghorbani, M. Golzar, A. H. Behravesh, Modeling of impregnation in the pultrusion of thermoplastic composites, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 1, pp. 31-41, 2016. (in Persian فارسی)

[26] M. Golzar, H. Hedayati, Green Kenaf Fibre/Starch Composite Manufactured by Pultrusion, *4th International Conference on Multifunctional, Hybrid and Nanomaterials*, Sitges, Spain, March 9-13, 2015.