



Optimizing Parameters Affecting the Output Fibers of Thermoplastic Polyactic Acid Filament Machine Reinforced with Continuous Carbon Fibers

Payam Pourrabia¹, Rouhollah Hosseini ^{2*}, Seyed Mohsen Mousavi-Kani ³

¹ M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

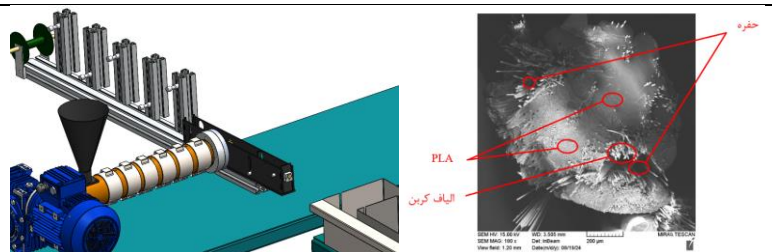
² Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

³ Researcher, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Increase in interfacial shear strength between fibers and matrix
- Minimization of filament collection and impregnation speeds as optimal parameters
- Lateral spreading of carbon fibers

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 13 February 2025

Received in revised form: 11 March 2025

Accepted: 1 December 2024

Available online: 11 April 2025

*Correspondence:

r.hosseini.mech@gmail.com

How to cite this article:

P. Pourrabia, R. Hosseini, S.M. Mousavi-Kani. Optimizing parameters affecting the output fibers of thermoplastic Polyactic Acid Filament machine reinforced with continuous carbon fibers. Journal of Aerospace Mechanics. 2025; 21(1):29-45.

Keywords:

Composite material

Extruder

Interfacial Shear Strength

Filament collection speed

Impregnation Speed

ABSTRACT

The fused deposition modeling (FDM) or material extrusion method is one of the most popular techniques for 3D printing. Given the challenges in producing 3D-printed parts with high mechanical strength and adequate surface quality, this study focuses on optimizing the parameters affecting the output fibers of a newly developed filament extruder, which has the capability of producing reinforced composite filaments. The optimization process involves evaluating parameters such as polymer melting temperature, filament collection speed, water bath temperature, and impregnation speed, and their effects on interfacial shear strength (IFSS). Statistical methods, such as design of experiments (DOE) and analysis of variance (ANOVA), were employed for this purpose. The results confirmed uniform impregnation of fibers and matrix through scanning electron microscope (SEM) images. It was also demonstrated that an increase in temperature does not necessarily lead to an increase in IFSS, and there is a risk of thermal degradation of the matrix. Moreover, low-viscosity melt can compromise geometric stability, indicating that temperatures above 230°C are not optimal for filament impregnation. Consequently, the optimal conditions for producing composite filaments with continuous carbon fibers and polylactic acid (PLA) resin were determined to be a melting temperature of 190°C, water bath temperature of 50°C, filament collection speed of 2 rpm, and impregnation speed of 1 rpm.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC) license.

Publisher: Imam Hossein University

© Authors





بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر الیاف خروجی دستگاه فیلامنت‌ساز ترموپلاستیک پلی‌لاکتیک اسید تقویت‌شده با الیاف پیوسته کربنی

پیام پورریعاً^۱، روح‌اله حسینی^{۲*}، سید محسن موسوی کانی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۳ پژوهشگر، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران

برجسته‌ها

- افزایش مقاومت برشی سطحی میان الیاف و ماتریس
- کمینه بودن مقادیر سرعت جمع‌آوری فیلامنت و آغشته‌سازی به‌عنوان پارامتر بهینه
- گسترش جانبی الیاف کربن

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۲

ارائه برخط: ۱۴۰۳/۰۱/۲۲

*نویسنده مسئول:

r.hosseini.mech@gmail.com

کلیدواژه‌ها:

مواد مرکب

اکسترودر

مقاومت برشی سطحی

سرعت جمع‌آوری فیلامنت

سرعت آغشته‌سازی

چکیده

روش لایه نشانی مذاب یا تهیه مواد به‌صورت ذوب‌شده یکی از روش‌های محبوب برای چاپ سه‌بعدی است. با توجه به چالش‌های موجود در تولید قطعات سه‌بعدی با استحکام مکانیکی بالا و کیفیت سطح مناسب، این تحقیق به بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر الیاف خروجی دستگاه فیلامنت‌ساز جدیدی پرداخته است که توانایی تولید فیلامنت‌های کامپوزیتی تقویت‌شده را دارا می‌باشد. بهینه‌سازی فرآیند شامل بررسی پارامترهایی نظیر دمای ذوب پلیمر، سرعت جمع‌آوری فیلامنت، دمای حمام آب و سرعت آغشته‌سازی برای دستگاه فیلامنت‌ساز و تأثیر آن بر مقدار مقاومت برشی سطحی است که با استفاده از روش‌های آماری مانند طراحی آزمایش و تحلیل واریانس انجام شده است. نتایج نشان داد که تصاویر میکروسکوپ الکترونی آغشته‌گی یکنواخت الیاف و ماتریس را تأیید کرد. همچنین نشان داده شد که لزوماً افزایش دما سبب افزایش مقاومت برشی سطحی نمی‌شود و خطر تخریب حرارتی ماتریس وجود دارد. بعلاوه مذاب با ویسکوزیته پایین می‌تواند پایداری هندسی را مختل کند و مشخص شد که دمای بالای ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد دمای بهینه برای آغشته‌سازی فیلامنت نیست. در نتیجه شرایط بهینه فرآیند تولید فیلامنت کامپوزیتی با الیاف کربن پیوسته و رزین پلی‌لاکتیک اسید شامل دمای ذوب ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، دمای حمام آب ۵۰ درجه سانتی‌گراد سرعت کشش ۲ دور در دقیقه و سرعت آغشته‌سازی ۱ دور در دقیقه به دست آمد.



۱- مقدمه

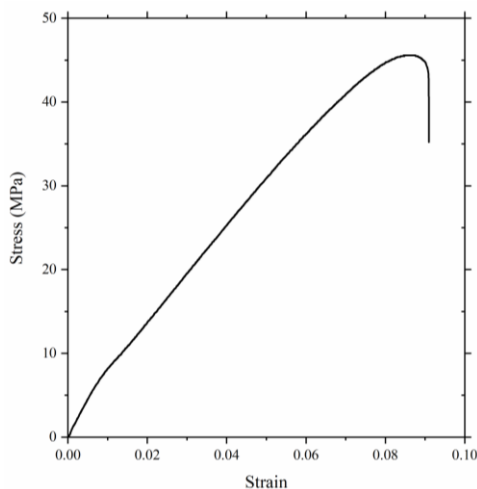
امروزه مواد مرکب در کنار ساخت افزایشی به‌ویژه نمونه‌سازی به روش چاپ سه‌بعدی به‌طور گسترده در مهندسی مکانیک، عمران، خودرو، پزشکی، مواد غذایی، پوشاک و برداشت انرژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱]. روش لایه نشانی مذاب یکی از روش‌های ساخت افزایشی است که به دلیل تولید نمونه‌های انعطاف‌پذیر و ساخت سریع، هزینه کم و تنوع مورد استفاده و مقاومت بالای آن‌ها یکی از روش‌های محبوب در چاپ نمونه‌های سه‌بعدی محسوب می‌شود [۲]. در حال حاضر، این روش به شکل گسترده‌ای در ساخت نمونه‌ها و همچنین در ترکیب با روش‌های عددی همچون روش اجزای محدود و بهینه‌سازی به کار گرفته می‌شود. در این فرآیند، یک رشته به‌عنوان ماده تغذیه، در حالت نیمه مذاب به داخل نازل دستگاه هدایت می‌شود و سپس بر اساس جی-کد نوشته‌شده، در مختصات تعیین‌شده قرار گرفته و به لایه پیشین ماده پیوند می‌خورد [۳]. به‌طور معمول پلیمر مورد استفاده در روش لایه نشانی مذاب، پلی‌لاکتیک اسید می‌باشد. به دلیل ماهیت لایه‌لایه بودن و نیز چسبندگی ضعیف بین رشته‌ها در یک لایه و نیز چسبندگی ضعیف بین لایه‌ها در یک قطعه و نیز وجود حفره‌ها، قطعه چاپ‌شده با روش لایه نشانی مذاب در مقایسه با قطعه‌ای که با روش‌های سنتی مانند ماشین‌کاری و یا تزریق پلاستیک ساخته شده است از استحکام و دقت ابعادی کمتری برخوردار است [۴]. روش‌های متعددی برای افزایش استحکام مواد پیشنهاد شده‌اند. یکی از کارآمدترین روش‌ها در تقویت محصولات پلیمری، استفاده از الیاف پیوسته است که به‌منظور تولید ماده‌ای مرکب به کار می‌رود. این روش به طرز چشمگیری منجر به بهبود خواص مکانیکی، به‌ویژه خواص کششی می‌شود [۵]. افزودن الیاف پیوسته مانند شیشه، کولار یا کربن به محصول در حین ساخت، امکان تولید ماده‌ای مرکب با استحکام فوق‌العاده را فراهم می‌آورد [۶]. این الیاف نه تنها باعث افزایش استحکام می‌شوند، بلکه با کاهش پدیده‌هایی مانند انقباض و اعوجاج، ثبات ابعادی بهتری در محصولات نهایی ایجاد می‌کنند. این ویژگی‌ها به دلیل کاهش میزان پلیمر در ساختار نهایی محصول است [۷]. بودیانورو و همکاران [۸] به طراحی، ساخت و آزمایش عملکرد دستگاه

اکستروژن-پالترژن برای تولید ورق‌های کامپوزیت ترموپلاستیک تقویت‌شده با الیاف کربن پرداختند. ایشان نشان دادند که نیروی برشی بین الیاف و ماتریس در این کامپوزیت به‌طور میانگین ۱۱/۰۵ مگاپاسکال است که کیفیت اتصال خوبی را نشان می‌دهد. این نتیجه با نمونه‌های مشابه که از الیاف کربن و پلی‌پروپیلن استفاده شده‌اند مقایسه شد و نشان داد که این روش بهبود کیفیت اتصال را به همراه داشته است. همچنین درصد حجمی الیاف در نمونه‌های تولیدشده حدود ۲۰/۳ درصد بوده است که با استفاده از روش‌های چندلایه می‌توان این مقدار را افزایش داد. فریرا و همکاران [۹] به توسعه فرآیند پالترژن برای تولید فیلامنت‌های کامپوزیتی ترموپلاستیک تقویت‌شده با الیاف کربن و پلی‌پروپیلن جهت استفاده در چاپ سه‌بعدی پرداختند. نام‌برندگان موفق به تولید فیلامنت‌هایی با درصد حجمی الیاف میانگین ۴۳/۷۶ درصد و مقدار فضای خالی ۶/۹۷ درصد شدند. ایشان با افزایش مقدار پلی‌پروپیلن در فیلامنت‌ها این مقدار فضای خالی را کاهش دادند و این امر به بهبود کیفیت کلی فیلامنت انجامید. از طرف دیگر، افزایش مقدار الیاف کربن موجب افزایش استحکام و سختی فیلامنت‌ها شد، اما در برخی موارد موجب افزایش فضای خالی و کاهش کیفیت پیوند الیاف و ماتریس پلیمر شد. اوسون و همکاران [۱۰] عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های چاپ‌شده سه‌بعدی تولیدشده با استفاده از فیلامنت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن پیوسته که از طریق آغشته سازی مذاب به دست آمده‌اند را مورد مطالعه قرار دادند و یک خط آغشته سازی پلیمر طراحی کردند تا فرم‌های پیش آغشته از فیلامنت‌های ترموپلاستیک تقویت‌شده با الیاف پیوسته با نسبت‌های مختلف الیاف تولید کند. سپس با انجام آزمون کشش و خمش سه‌نقطه‌ای بر نمونه‌های چاپ‌شده با فیلامنت تولیدشده نشان دادند که حداکثر استحکام کششی ۵۴۴ مگاپاسکال و حداکثر استحکام خمشی ۳۱۰ مگاپاسکال برای نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن با نسبت الیاف ۴۰ درصد به دست آمد. عرفان و همکاران [۱۱] گسترش جانبی الیاف از طریق روش‌های مکانیکی را بررسی کردند. آن‌ها الیاف شیشه‌ای را در معرض یک سری حرکات‌های متناوب قرار دادند که به‌موجب آن عرض الیاف به میزان ۲۰۰ الی ۲۵۰ درصد

این الیاف دارای مقاومت کششی بالای ۳۵۳۰ مگاپاسکال و مدول کششی ۲۳۰ گیگاپاسکال و چگالی ۱/۷۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب هستند. همچنین پلیمر پلی‌لاکتیک اسید به‌عنوان ماتریس مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۱ خواص مواد استفاده‌شده برای ساخت فیلامنت را نشان می‌دهد. خواص مربوط به پلی‌لاکتیک اسید با انجام آزمون کشش به دست آمد که در شکل ۱ نمودار تنش کرنش مربوط به آن نشان داده شده است.

جدول (۱): خواص مواد استفاده‌شده برای ساخت فیلامنت توسط دستگاه [۱۲]

ماده	ویژگی	مقدار
الیاف کربن (TORAYCA T300 3K)	قطر رشته کربن (μm)	۷
	چگالی (g/cm^3)	۱/۷۶
	استحکام کششی (MPa)	۳۵۳۰
	مدول کششی (GPa)	۲۳۰
	وزن در هر ۱۰۰۰ متر (gr)	۱۹۸
پلی‌لاکتیک اسید	چگالی (g/cm^3)	۱/۲۴
	دمای ذوب ($^{\circ}\text{C}$)	۱۹۰-۱۵۰
	مدول کششی (MPa)	۸۸۰/۴
	استحکام کششی (MPa)	۴۵/۳



شکل (۱): نمودار تنش کرنش مربوط به پلی‌لاکتیک اسید.

۲-۱- بهینه‌سازی دستگاه

هدف از این پژوهش، بهینه‌سازی دستگاه فیلامنت‌سازی است که خروجی آن فیلامنت به قطر ۰/۸ میلی‌متر می‌باشد. جهت

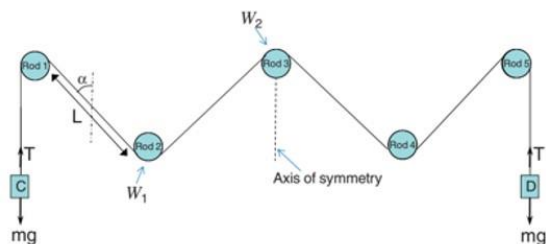
افزایش یافت. افزایش عرض مجموعه‌ها به میزان ۳۵۰ الی ۴۵۰ درصد مشاهده شد. اثر تعداد میله‌ها، زوایا و فاصله‌های بین آن‌ها و هندسه نسبی آن‌ها بر میزان گسترش الیاف مورد بررسی قرار گرفت. فیلامنت کامپوزیتی در واقع خوراک اصلی و مواد اولیه دستگاه ساخت افزایشی می‌باشد که می‌تواند استحکام قطعات ساخته‌شده با دستگاه ساخت افزایشی را تا حد زیادی افزایش دهد. برای تولید فیلامنت کامپوزیتی جهت استفاده در چاپگر سه‌بعدی کامپوزیتی با الیاف پیوسته، دو روش رایج قابل استفاده است. در روش اول، نازل به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که طی فرآیند ساخت قطعه سه‌بعدی، الیاف و پلیمر هم‌زمان با هم ترکیب‌شده و قطعه شکل می‌گیرد. در روش دوم، از دستگاه فیلامنت‌ساز به‌عنوان مرحله‌ای پیش از چاپ استفاده می‌شود؛ به این صورت که فیلامنت‌هایی با الیاف پیوسته کربنی در آن دستگاه تولید می‌گردند. سپس این فیلامنت‌های تولیدشده به‌طور مستقیم در چاپگر سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله، روش دوم به‌عنوان مبنای طراحی و ساخت چاپگر سه‌بعدی کامپوزیتی با الیاف پیوسته انتخاب شده است.

در تحقیق حاضر، به تولید و بهینه‌سازی فیلامنت تقویت‌شده به کمک الیاف پیوسته تقویت‌شده با کربن پرداخته شد. این دستگاه برای اولین بار در کشور مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد، اما بهبود کیفیت نخ تولیدشده و نمونه‌های چاپ‌شده توسط این دستگاه به‌صورت جزئی و دقیق بررسی نشده است. فیلامنت تولیدشده به‌عنوان مواد اولیه دستگاه ساخت افزایشی مورد استفاده می‌باشد که می‌تواند استحکام قطعات ساخته‌شده با دستگاه ساخت افزایشی را تا حد زیادی افزایش دهد. هدف از انجام این تحقیق بهینه‌سازی سیستم آغشته‌سازی الیاف پیوسته و پلیمر، بررسی تجربی اثر پارامترهای تأثیرگذار دستگاه فیلامنت‌ساز از جمله دمای اکسترودر و حمام آب و سرعت جمع‌آوری فیلامنت و آغشته‌سازی بر فیلامنت می‌باشد.

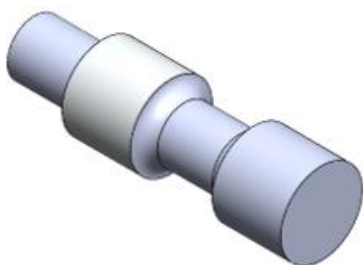
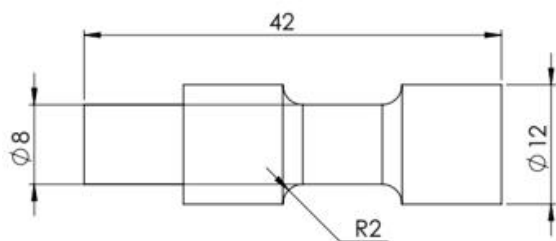
۲- ملاحظات تجربی

برای انجام این تحقیق از یک دسته الیاف کربنی با ۳۰۰۰ (3K) رشته که هر یک از الیاف آن قطری معادل ۷ میکرومتر دارند، از شرکت توریکا به‌عنوان الیاف پیوسته استفاده شد.

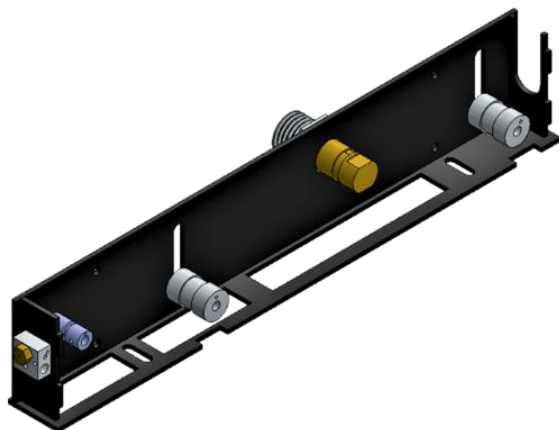
چهار پین درون واحد آغشته ساز تعبیه شده که قطر سه پین اول ۱۶ میلی متر و قطر پین آخر ۸ میلی متر است.



شکل (۲): نمودار ضخامت دولایه به زاویه تحریک [۱۱].



شکل (۳): نقشه طراحی پین پخش کننده (ابعاد برحسب میلی متر).



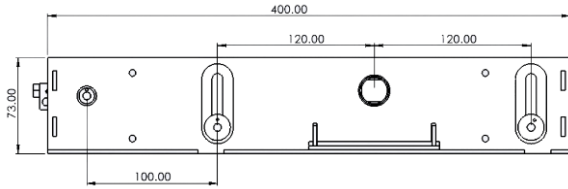
شکل (۴): نمای داخل قالب آغشته سازی.

افزایش کیفیت فیلامنت تولیدی توسط دستگاه فیلامنت ساز واحد آغشته ساز جدیدی طراحی شد. فرآیند آغشته سازی شامل دو بخش اصلی است: واحد اکستروژن (مخلوط پلیمری) و واحد پالترژن که خود شامل گسترش الیاف و قالب آغشته سازی است که در ادامه بررسی می شوند. در واحد اکستروژن از یک اکسترودر تک پیچی استفاده شد. در این واحد وظیفه پیچ اکسترودر، فقط رساندن مذاب پلاستیک به استخر آغشته سازی و خارج کردن آن از پین آغشته ساز است. به منظور گرم کردن و ذوب شدن پلیمر، سه منطقه حرارتی روی سیلندر وجود دارد که به صورت الکتریکی حرارت لازم را تأمین می کنند. واحد گسترش الیاف به عنوان روشی برای کاهش زمان نفوذ عرضی رزین در دسته های الیاف استفاده می شود. یک مدل نظری برای پهن شدن جانبی فیلامنت ها توسط ویلسون پیشنهاد شده است [۱۳]. ویلسون کل الیاف های موجود در دسته را به عنوان یک پیوستار در نظر گرفت و یک رابطه برای عرض بسته، پس از گسترش، در اولین میله استخراج کرد. عرض (W_1) بسته در مرکز اولین میله به صورت زیر پیش بینی شد:

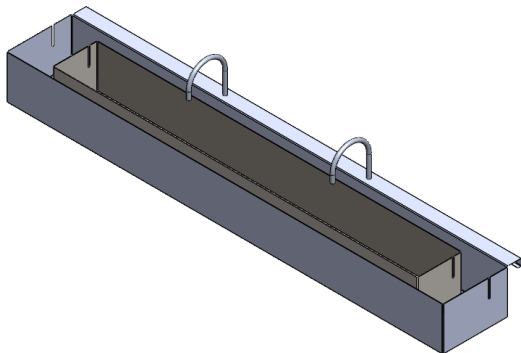
$$W_1 = 12AL \cos \alpha \quad (1)$$

در رابطه (۱)، A مساحت مقطع عرضی بسته الیاف، α زاویه ای است که بین عمود و نقطه ثابت ایجاد می شود و L طول بسته الیاف از نقطه ثابت تا نقطه تماس مماسی با اولین میله است. با توجه به رابطه ویلسون و با تعمیم دادن آن، برای طراحی واحد گسترش الیاف از ۵ پین استفاده شد که دارای قابلیت تغییر فاصله در راستای طولی و عرضی برای ایجاد تغییر قدرت کشش و پخش کنندگی بهتر الیاف می باشد به این شکل که مطابق آرایش نشان داده شده در شکل ۲ الیاف تحت کشش به صورت متناوب از بالا و پایین میله ها عبور می کند. سطوح پین ها برای جلوگیری از آسیب رساندن به الیاف در اثر نیروهای وارده به خوبی صیقل داده شدند و پس از آن وارد قالب آغشته سازی می شود. قطر داخلی و خارجی پین ها به ترتیب برابر با ۸ و ۱۲ میلی متر در نظر گرفته شد. شکل ۳ پین به همراه نقشه طراحی آن را نشان می دهد.

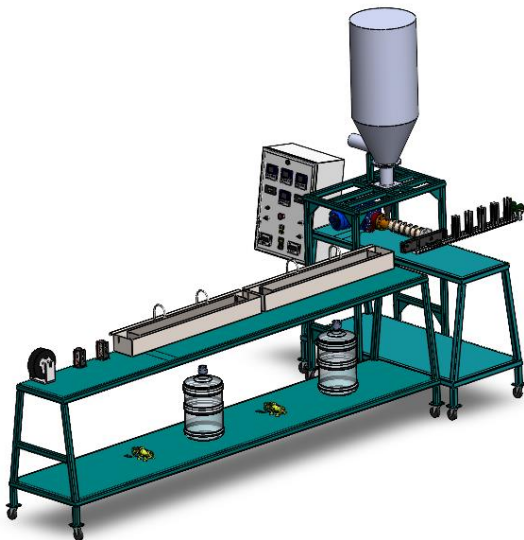
پخش شدن الیاف با عبور از روی پین ها بهبود قابل توجهی پیدا می کند، همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است،



شکل (۵): نمای جانبی واحد آغشته‌سازی و موقعیت قرارگیری پین‌ها (ابعاد برحسب میلی‌متر).



شکل (۶): حمام آب دوجداره ساخته‌شده.



شکل (۷): مدل کامل دستگاه بهینه‌شده.

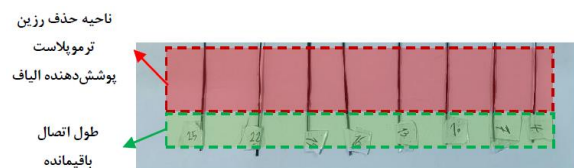
۲-۲- اندازه‌گیری و آزمون کشش نمونه

در این تحقیق، برای اندازه‌گیری استحکام برشی بین سطحی بین الیاف کربن و ماتریس ترموپلاستیک، از یک آزمون کشش دسته‌ای استفاده شد که برگرفته از روش‌های زانداروف و همکاران [۱۴]، چاندران و همکاران [۱۵]، چن و همکاران [۱۶] و ساکای و همکاران [۱۷] بود.

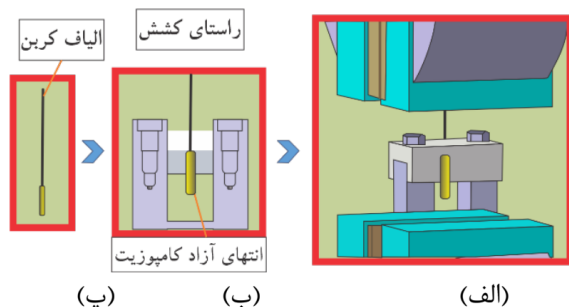
تنها هدف پین اولیه پیش‌گرم کردن دسته الیاف است. پین ثانویه (پین آغشته‌ساز) که توسط نازل واسط به اکسترودر (واحد اکستروژن) متصل شده است پلیمر را از طریق سوراخ‌های شعاعی که از مرکز پین به سمت بیرون امتداد می‌یابد، وارد دسته الیاف می‌کند که از طریق آن‌ها پلیمر ذوب‌شده را به سمت الیاف جهت می‌دهد. تعداد کل ۵ سوراخ شعاعی با قطر ۶۰۰ میکرومتر به‌طور منظم در امتداد سطحی که الیاف باهم تماس دارند پراکنده می‌شوند. پین سوم در بخش قالب اشباع برای ایجاد تغییرشکل برشی در دسته‌های الیاف آغشته شده برای اطمینان از آغشته شدن همگن بیشتر الیاف اضافه شد. پین چهارم نیز برای هم‌مرکز کردن الیاف آغشته شده با نازل خروجی تعبیه شده است. با توجه به طرح شکل ۵، فاصله بین پین پیش‌گرم‌کننده الیاف (در ورودی) و پین آغشته ساز ۱۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین ابعاد کلی قالب آغشته‌ساز و موقعیت قرارگیری پین‌ها نسبت به یکدیگر نشان داده شده است. در نهایت الیاف توسط غلتک جمع‌کننده طراحی شده از قالب اشباع خارج می‌شود. فیلامنت تولیدشده پس از خروج از نازل قالب اشباع، برای رفع حالت شکنندگی و حفظ سطح مقطع خروجی، باید از حمام آب گرم و سرد عبور کند تا گرادیان دمایی به سرعت کاهش نیابد و به صورت یکنواخت از دمای بالا به دمای محیط برسد. هر دو حمام به شکل دوجداره ساخته شده به این شکل که جداره بیرونی به طول ۱/۵ متر و جداره داخلی به طول ۱ متر طراحی شد. جداره داخلی از آب پر شده و فیلامنت تولیدشده از آن عبور می‌کند. جداره خارجی جهت نگهداری و هدایت آب سرریز شده از جداره داخلی به مخزن آب استفاده می‌شود. شکل ۶ حمام آب ساخته شده را نشان می‌دهد.

از آنجاکه پلی‌لاکتیک اسید یک پلیمر آب‌دوست می‌باشد، تمایل به جذب رطوبت موجود در محیط دارد. این اتفاق موجب شکننده شدن پلی‌لاکتیک اسید و در نتیجه کاهش انعطاف‌پذیری فیلامنت تولیدی با استفاده از آن می‌شود. به همین منظور گرانول پلی‌لاکتیک اسید به مدت ۱ ساعت تحت دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد درون دستگاه رطوبت‌گیر قرار گرفت تا رطوبت جذب شده از محیط از بین رفته و پس از آن جهت تولید فیلامنت کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۷ مدل کامل دستگاه بهینه شده را نشان می‌دهد.

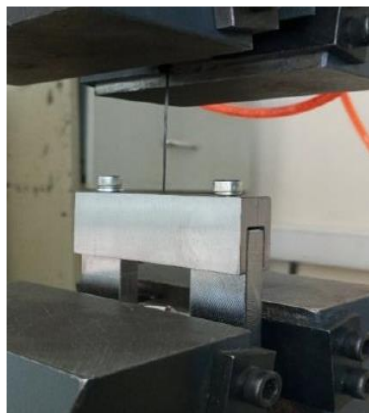
میکروسکوپ الکترونی تصویربرداری انجام گرفت. به منظور دستیابی به بررسی دقیق تر در مقیاس میکروسکوپی، تصویربرداری الکترونی با بزرگنمایی ۱۸۰ برابر تا ۵۰۰۰ برابر از سطح مقطع فیلامنت صورت پذیرفت.



شکل (۸): آماده سازی نمونه ها جهت انجام آزمون کشش.



شکل (۹): (الف) نمونه آزمون کشش؛ (ب) فیکسچر انجام آزمون؛ (پ) اجرای آزمون کشش [۱۸].



شکل (۱۰): انجام آزمون کشش نمونه توسط دستگاه کشش سنتام ۱۵ تن و فیکسچر طراحی شده.

۳- طراحی آزمایش

مورد اصلی در حل مسائل با چند متغیر این است که نیاز است یک فرآیند را با ورودی‌ها یا متغیرهای آزمایشی که عوامل نامیده می‌شوند و با متغیرهای خروجی اندازه‌گیری شده که پاسخ‌ها نامیده می‌شوند، ارزیابی شود. با در نظر گرفتن سه

در این آزمون، یک دسته الیاف کربن که به طور جزئی در پوشش‌های ماتریسی قرار داشت، کشیده شد. طول اتصال ماتریس بر روی دسته الیاف، مطابق با معادله (۲) محاسبه شد.

$$l_b = \frac{\sigma_f \times d}{4\tau} \quad (2)$$

که در آن σ_f نشان دهنده استحکام کششی نهایی الیاف در نقطه شکست است، d قطر دسته الیاف و استحکام برشی طول اتصال با نماد τ نشان داده می‌شود. نمونه به صورت عمودی در یک قاب فلزی با طراحی خاص قرار گرفت و روکش ماتریسی در قسمت بالایی نمونه تحت کشش جدا شد تا فقط الیاف باقی بماند. مقدار IFSS از حاصل تقسیم حداکثر بار اعمال شده بر مساحت تماس، مطابق با معادله (۳) تعیین شد.

$$\tau = \frac{F}{\pi d \times l_b} \quad (3)$$

که در آن F نیروی ماکزیمم اندازه‌گیری شده برای جدایش، d قطر میانگین دسته الیاف و l_b طول اتصال است. در اینجا، قطر دسته الیاف تنها به عنوان یک مقدار میانگین از نمونه‌برداری محصول اندازه‌گیری می‌شود. قبل از آزمایش 'IFSS'، رشته الیاف به طول ۵۰ میلی‌متر بریده شد و رزین ترموپلاست پوشش دهنده الیاف حذف شد و تنها یک طول اتصال در حدود ۵ میلی‌متر باقی ماند. این ۵ میلی‌متر طول اتصال باقی مانده به عنوان یک انتهای آزاد عمل می‌کند تا در مقابل کشش الیاف در فیکسچر تست مقاومت کند (شکل ۸). به منظور کشش نمونه آماده شده، فیکسچر مخصوصی طراحی گردید که در آن یک سوراخ مرکزی به قطر ۰/۷ میلی‌متر برای بیرون کشیدن الیاف از قسمت کامپوزیتی درون آن تعبیه شد (شکل ۹). دستگاه آزمون کشش ۱۵ تن ساخت شرکت سنتام، برای انجام این آزمایش مورداستفاده قرار گرفت. اجرای آزمون کشش برای همه نمونه‌ها به روش کنترل جابه‌جایی و با نرخ جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه بر روی ۳۰ نمونه با طول ۵۰ میلی‌متر انجام شد (شکل ۱۰).

۳-۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

برای ارزیابی ساختار مورفولوژیکی و بررسی شرایط آغشتگی بین الیاف و ماتریس، از سطح مقطع نمونه‌ها با استفاده از

¹ Interfacial Shear Strength

از دمای ذوب، دمای مربوط به منطقه سوم دمایی و المنت نصب‌شده مجاور پین آغشته‌ساز می‌باشد و سایر مناطق دمایی (منطقه دمایی ۱ و ۲) روی سیلندر اکسترودر ثابت و به ترتیب برای مقادیر ۱۳۵ و ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شدند. طراحی کامل آزمایش توسط روش مکعب مرکزی تعیین‌شده است که در جداول ۳ ارائه شده است. این جدول شامل ۲۴ آزمایش منحصربه‌فرد و ۶ آزمایش تکراری می‌باشد. در نهایت و در ادامه، برای ارزیابی شرایط بهینه برای مقاومت برشی سطحی به‌عنوان شاخصی از کیفیت نمونه، از تحلیل واریانس (ANOVA) و ترسیم خطوط کانتور استفاده شده است. جدول تحلیل واریانس به‌منظور نمایش نتایج آزمون واریانس مورد استفاده قرار می‌گیرد. این جدول شامل منبع تغییرات، مجموع مربعات، درجه آزادی، میانگین مربعات، مقدار F (آماره) و مقدار p می‌باشد. اگر مقدار F بزرگ باشد و مقدار p کوچک‌تر از ۰/۰۵ باشد، این نتیجه نشان می‌دهد که تفاوت معناداری بین میانگین گروه‌ها وجود دارد.

حالت مختلف برای دمای ذوب پلیمر، سرعت جمع‌آوری فیلامنت، دمای حمام آب و در نهایت سرعت آغشته‌سازی به‌عنوان ورودی (عوامل) و مقدار مقاومت برشی سطحی (IFSS) به‌عنوان خروجی (پاسخ) به نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۳ و با استفاده از روش سطح پاسخ از نوع طراحی مکعب مرکزی، طراحی آزمایش انجام شد تا بتوان بهترین پارامترها را به دست آورد. تحلیل داده‌های طراحی آزمایش با کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۳، انجام شد. برای فیلامنت‌های تولیدشده با استفاده از دستگاه فیلامنت‌ساز در بخش تنظیمات نرم‌افزار طراحی ۳ سطحی با ۴ فاکتور و به همراه ۶ نقطه مرکزی مورد استفاده قرار گرفت و برای اجرای آن ۳۰ آزمایش مورد نیاز بود. نقاط مرکزی در واقع نقاط تکرار آزمایش هستند و برای اطمینان از صحت آزمایش استفاده می‌شوند. جدول ۲ کدگذاری برای هر سطح عامل که در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۳ استفاده شده است را همراه با سطوح واقعی ارائه می‌دهد. در جدول ۲ سطوح و فاکتورهای مربوط به فیلامنت‌های تولیدشده را مشاهده می‌کنید و منظور

جدول (۲): سطوح و فاکتورهای مربوط به فیلامنت‌های تولیدشده

فاکتورها	کد فاکتورها	سطوح فاکتورها		
		پایین (-۱)	وسط (۰)	بالا (+۱)
دمای ذوب (°C)	A	۱۹۰	۲۱۰	۲۳۰
دمای حمام آب (°C)	B	۴۰	۵۰	۶۰
سرعت جمع‌آوری فیلامنت (mm/min)	C	۲	۴	۶
سرعت آغشته‌سازی (RPM)	D	۱	۳	۵

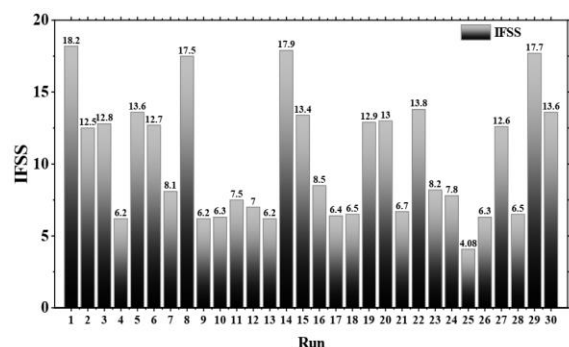
جدول (۳): طراحی آزمایش چهار فاکتور با سه سطح برای فیلامنت‌های تولیدشده

آزمایش	A	B	C	D
۱	۲۳۰	۶۰	۲	۱
۲	۱۹۰	۶۰	۶	۵
۳	۱۹۰	۴۰	۲	۵
۵	۲۱۰	۶۰	۴	۳
۶	۱۹۰	۴۰	۶	۱
۷	۱۹۰	۴۰	۶	۵
۸	۲۳۰	۶۰	۶	۱
۹	۲۳۰	۴۰	۲	۵

ادامه جدول (۳).

آزمایش	A	B	C	D
۱۰	۲۱۰	۵۰	۴	۳
۱۱	۲۱۰	۵۰	۴	۳
۱۲	۲۳۰	۶۰	۶	۵
۱۳	۲۱۰	۵۰	۴	۱
۱۴	۲۱۰	۵۰	۴	۳
۱۵	۲۳۰	۴۰	۲	۱
۱۶	۱۹۰	۶۰	۲	۱
۱۷	۲۱۰	۵۰	۲	۳
۱۸	۲۱۰	۵۰	۴	۳
۱۹	۲۱۰	۵۰	۴	۳
۲۰	۲۳۰	۵۰	۴	۳
۲۱	۱۹۰	۵۰	۴	۳
۲۲	۲۱۰	۵۰	۴	۵
۲۳	۱۹۰	۴۰	۲	۱
۲۴	۲۳۰	۴۰	۶	۱
۲۵	۲۳۰	۴۰	۶	۵
۲۶	۲۱۰	۵۰	۶	۳
۲۷	۲۱۰	۵۰	۴	۳
۲۸	۱۹۰	۶۰	۲	۵
۲۹	۲۱۰	۴۰	۴	۳
۳۰	۲۳۰	۶۰	۲	۵

سرعت جمع‌آوری فیلامنت و آغشته‌سازی ۱ دور بر دقیقه تولیدشده است.



شکل (۱۱): مقادیر IFSS حاصل از آزمون کشش.

۴- بررسی نتایج

شکل ۱۱ نتایج آزمون IFSS را برای ۳۰ نمونه نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، نقاط مرکزی دارای مقادیر IFSS، ۶/۲، ۶/۳، ۶/۴، ۶/۵ و ۶/۳ مگاپاسکال هستند؛ بنابراین می‌توان گفت که آزمایش‌ها قابل اعتماد هستند.

با توجه به شکل ۱۱ حداکثر IFSS مربوط به نمونه شماره ۱ با مقدار ۱۸/۲ مگاپاسکال بود. نتایج آزمایش نشان داد که کیفیت پیوند بین الیاف-ماتریس در حد مطلوب است. بیشترین مقدار IFSS به دست آمده مربوط به نمونه‌ای است که در دمای ذوب ۲۳۰، دمای حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد و

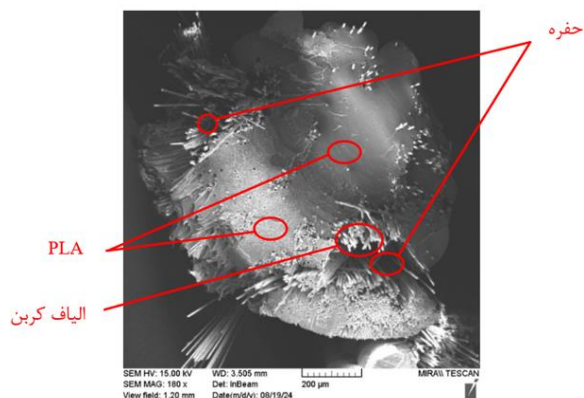
۴-۱- تحلیل واریانس نتایج طراحی آزمایش

جدول ۴ تحلیل واریانس برای مدل سطح پاسخ درجه دوم IFSS را نشان می‌دهد. این روش برای شناسایی معنادار بودن مدل و پارامترهای آن استفاده می‌شود که معنادار بودن نتایج به‌دست‌آمده را تعیین می‌کند. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، مقدار p مدل رگرسیون کمتر از 0.05 است که به این معناست که مدل در سطح معناداری $\alpha = 5\%$ معنادار است. احتمال وقوع چنین مقدار بالای F به دلیل نویز تنها 0.01 درصد است. ضرایب عاملی که تأثیر معناداری بر مدل دارند عبارت‌اند از: A (دمای ذوب)، C (سرعت کشش)، D (سرعت آغشته‌سازی)، AC (تعامل بین دمای ذوب و سرعت کشش)، AD (تعامل بین دمای ذوب و سرعت آغشته‌سازی)، A^2 و D^2 ، زیرا مقدار p آن‌ها کمتر از 5% است. $6/34$ درصد احتمال وجود دارد که مقدار F ، عدم برازش بزرگ به دلیل نویز رخ دهد و عدم برازش غیر معنی‌دار نشانه خوبی است. عدم برازش معنی‌دار نشان می‌دهد که ممکن است مشارکت‌هایی در رابطه بین رگرسیون و پاسخ وجود داشته باشد که توسط مدل در نظر گرفته نشده است؛ بنابراین، مقدار p غیر معنی‌دار نشان می‌دهد که مدل مناسب است و به خوبی با داده‌های تجربی تطابق دارد. علاوه بر این، اعتبار مدل می‌تواند بر اساس ضریب تعیین (R^2) و برازش مدل F تأیید شود.

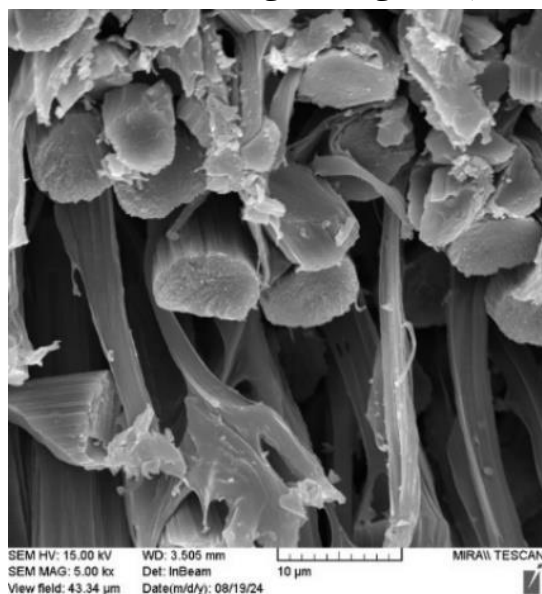
جدول ۵ اندازه‌گیری آماری از کیفیت مدل را نشان می‌دهد. مقدار R^2 برابر با $99/9$ درصد است که نشان می‌دهد مدل دقیق است و مقدار R^2 تعدیل‌شده برابر با $99/81$ درصد است. دقت کافی نسبت سیگنال به نویز را تعیین می‌کند. نسبت بیش از 4 بهینه است. در اینجا، نسبت $108/49$ نشان‌دهنده یک سیگنال مؤثر است. از این مدل می‌توان برای هدایت فضای طراحی استفاده کرد. با استفاده از داده‌های ارائه‌شده در شکل ۱۱، مدل‌های درون‌یابی که بهترین تقریب را برای مقادیر IFSS و نمونه‌های آزمایشی داشتند، انتخاب شدند. تابع توانی نشان داده‌شده در معادله (۴) برای پیش‌بینی مقادیر IFSS به دست آمد.

این یافته نشان می‌دهد که افزایش دما تأثیر مستقیمی بر کاهش ویسکوزیته پلی‌لاکتیک اسید مذاب دارد و به‌طور قابل‌توجهی کیفیت آغشتگی را بهبود می‌بخشد. همچنین، با توجه به اینکه سرعت 1 دور بر دقیقه به‌عنوان سرعتی پایین برای جمع‌آوری فیلامنت تولیدی محسوب می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که هرچه سرعت جمع‌آوری کمتر باشد، الیاف زمان بیشتری برای آغشتگی بهتر خواهند داشت. در سرعت آغشته‌سازی 1 دور بر دقیقه نیز بیشترین مقدار IFSS به دست آمد، علت این پدیده می‌تواند افزایش زمان ماندن پلیمر در مجاورت دمای بالای اکسترودر و کاهش ویسکوزیته آن و در نهایت نفوذ مناسب در دسته‌های الیاف باشد.

از آنجاکه پیوند پلیمر با الیاف کربن برای بهبود خواص مکانیکی کلی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن بسیار حائز اهمیت است، دستیابی به آغشتگی یکنواخت‌تر ضروری به نظر می‌رسد. به همین دلیل، برای بررسی نفوذ پلیمر، نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری و تصاویر میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، فیلامنت‌های تولیدشده در این پژوهش دارای ترکیبی نسبتاً یکنواخت از الیاف کربن و پلیمر هستند. شکل‌های ۱۲ و ۱۳، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع الیاف و میزان آغشتگی بین الیاف و ماتریس را در بزرگنمایی‌های مختلف نمایش می‌دهد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی ترکیب یکنواختی از الیاف و پلیمر را نشان داده که این مسئله بیانگر کارایی مکانیسم آغشته‌سازی است، به‌ویژه در نواحی سطح پین که به دلیل باز شدن تارهای الیاف، آغشتگی بهتری رخ داده است. با این حال، همان‌طور که در تصاویر نیز مشاهده می‌کنید، برخی فضاهای خالی هنوز قابل‌رؤیت است. علت این پدیده می‌تواند به ویسکوزیته بالای ماتریس پلیمر مربوط باشد؛ به‌طوری‌که مذاب پلاستیک به دلیل چسبندگی بالا قادر به نفوذ در تمام حفرات میان الیاف نیست. با توجه به تصاویر، به‌جز برخی نقاط ذکرشده، میزان آغشتگی در سایر نقاط الیاف رضایت‌بخش است و این خود نشان‌دهنده اثربخشی مکانیسم آغشته‌سازی، به‌ویژه در نواحی سطح پین به دلیل بازشدگی تارهای الیاف، می‌باشد.



شكل (۱۲): تصوير ميكروسكوپ الكتروني از آغشتگي مناسب ميان الياف و ماتريس با بزرگنمايي 180x.



شكل (۱۳): تصوير ميكروسكوپ الكتروني از آغشتگي مناسب ميان الياف و ماتريس با بزرگنمايي 5.0kx.

جدول (۴): نتايج آناليز واريانس براي مقادير IFSS

مقدار-p	مقدار-F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع تغییرات
> 0.0001	1072/40	37/26	14	521/62	مدل
0.0140	7/74	0/2689	1	0/2689	A
> 0.0001	3140/90	109/13	1	109/13	C
> 0.0001	57/56	2/00	1	2/00	D
> 0.0001	2806/73	97/52	1	97/52	AC
0.0223	6/49	0/2256	1	0/2256	AD
> 0.0001	3144/91	109/27	1	109/27	A ²
0.0039	11/58	0/4023	1	0/4023	D ²
		0/0347	15	0/5212	باقیمانده
0.0634	3/31	0/0453	10	0/4528	عدم برازش
		0/0137	5	0/0683	خطای خالص

جدول (۵): مقادیر آماری مدل پیش‌بینی‌شده برای آزمون IFSS و محاسبه مقادیر آن

R ²	R ² تعدیل‌شده	R ² پیش‌بینی‌شده	دقت کافی
۰/۹۹۹۰	۰/۹۹۸۱	۰/۹۹۵۲	۱۰۸/۴۹۳۲

برای نشان دادن رابطه بین چندین متغیر مستقل (ورودی‌ها) و یک متغیر وابسته (خروجی) به کار می‌روند. هدف این نمودارها این است که تأثیر متغیرهای مستقل را بر روی متغیر پاسخ (مانند استحکام، بازده یا عملکرد) تجسم کنند و به بهینه‌سازی سیستم یا فرآیند کمک کنند. در ادامه برخی از نمودارهای سطح پاسخ حاصل از اندرکنش پارامترهای اثرگذار بر مقدار IFSS را مشاهده می‌کنید.

شکل ۱۶ نمودار سطح را نشان می‌دهد که برای بررسی اثر تعاملی دمای ذوب (A) و دمای حمام آب (B) بر IFSS در سرعت جمع‌آوری فیلامنت ۴ دور بر دقیقه و سرعت آغشته سازی ۳ دور بر دقیقه مناسب هستند. بر اساس نمودار، بالاترین مقدار IFSS (۱۳ مگاپاسکال) در دمای ذوب ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و برای دمای حمام آب ۵۰ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. در مقابل، کمترین مقدار IFSS (۶/۲ مگاپاسکال) در دمای ذوب ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد و برای دمای حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است.

شکل ۱۷ نمودار سطح را نشان می‌دهد که برای بررسی اثر تعاملی دمای ذوب (A) و سرعت جمع‌آوری فیلامنت (C) بر IFSS در دمای حمام آب ۵۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت آغشته سازی ۳ دور بر دقیقه مناسب هستند. بالاترین مقدار IFSS (۱۷/۳ مگاپاسکال) در دمای ذوب ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد برای سرعت جمع‌آوری فیلامنت ۲ دور بر دقیقه ثبت شده است، در حالی که کمترین مقدار IFSS (۴/۰۸ مگاپاسکال) در دمای ذوب ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد برای سرعت جمع‌آوری فیلامنت ۶ دور بر دقیقه ثبت شده است.

شکل ۱۸ نمودار سطح را نشان می‌دهد که برای بررسی اثر تعاملی دمای ذوب (A) و سرعت آغشته سازی (D) بر IFSS در سرعت جمع‌آوری فیلامنت ۴ دور بر دقیقه و دمای حمام آب ۵۰ درجه سانتی‌گراد مناسب هستند. بالاترین مقدار IFSS (۱۳ مگاپاسکال) در سرعت آغشته سازی ۳ دور بر دقیقه و دمای ذوب ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است، در حالی که کمترین مقدار IFSS (۶/۳ مگاپاسکال) در سرعت آغشته سازی

$$IFSS = 6.39 - 0.1222 \times A - 2.46 \times C - 0.3333 \times D - 2.47 \times AC + 0.1188 \times AD + 6.49 \times A^2 + 0.3940 \times D^2 \quad (۴)$$

در این معادله، IFSS، A، B، C و D به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت برشی سطحی، دمای ذوب، دمای حمام آب، سرعت جمع‌آوری فیلامنت و سرعت آغشته سازی هستند که اثرات و اهمیت آماری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۴- نمودارهای تشخیصی برای مقادیر IFSS

برای ارزیابی مدل می‌توان از نمودارهای تشخیصی مانند نمودار احتمال نرمال استفاده کرد. شکل ۱۴ یک توزیع احتمالی نرمال در مقابل باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد. نمودار باقیمانده‌ها به خط مستقیم نزدیک است که نشان می‌دهد تطابق خوبی با توزیع نرمال دارد.

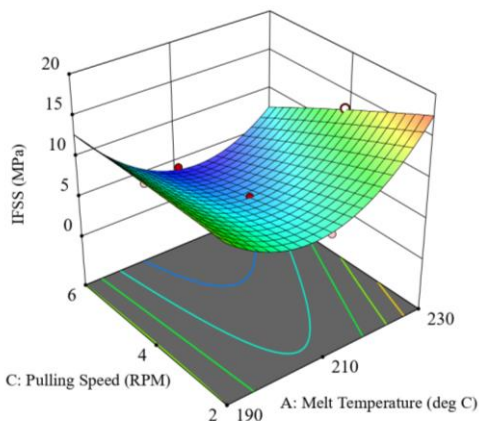
شکل ۱۵ نمودار آشفتگی شامل اثر شرایط فرآیندی بر IFSS را نشان می‌دهد. این نمودار تغییرات پاسخ را به‌عنوان هر متغیر که از مرکز فضای طراحی حرکت می‌کند به تصویر می‌کشد. در اینجا، سرعت جمع‌آوری فیلامنت تأثیر منفی بر IFSS دارد، زیرا با افزایش سرعت جمع‌آوری فیلامنت، مقدار IFSS کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش سرعت آغشته سازی مقادیر IFSS به‌صورت جزئی کاهش می‌یابد. افزایش دمای ذوب پلیمر تا نقطه مرکزی سبب کاهش مقادیر IFSS و پس‌از آن افزایش آن می‌شود. دمای حمام آب اثر معناداری روی مقادیر IFSS ندارد. نتایج آزمون ضریب رگرسیون نشان می‌دهد که A تأثیر درجه دوم و نه خطی بر IFSS دارد.

۳-۴- بررسی اثرات عوامل مختلف بر مقادیر IFSS

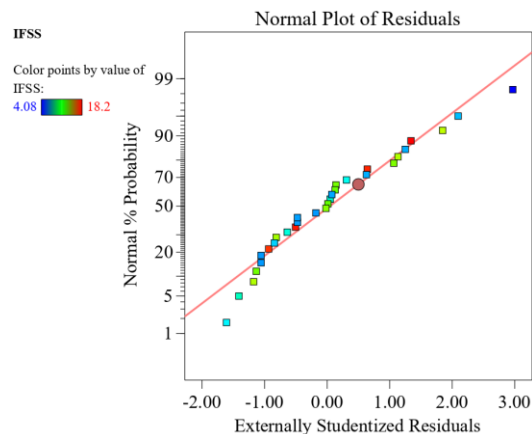
با استفاده از روش سطح پاسخ

نمودارهای سطح پاسخ به‌عنوان یک ابزار گرافیکی در تحلیل آماری و مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نمودارها

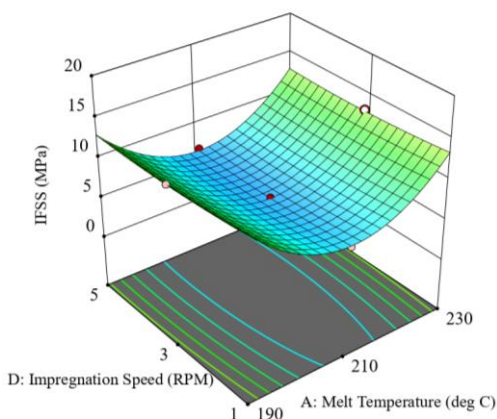
۳ دور بر دقیقه و دمای ذوب ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است.



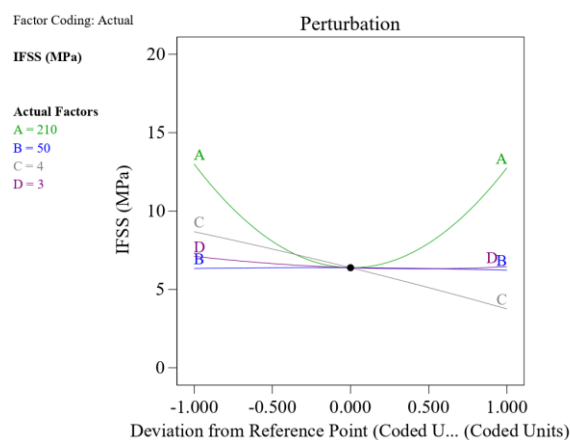
شکل (۱۷): نمودار سطح پاسخ مربوط به اثر تعاملات دمای ذوب و سرعت جمع‌آوری فیلامنت بر IFSS.



شکل (۱۴): نمودار نرمال باقیمانده‌ها.



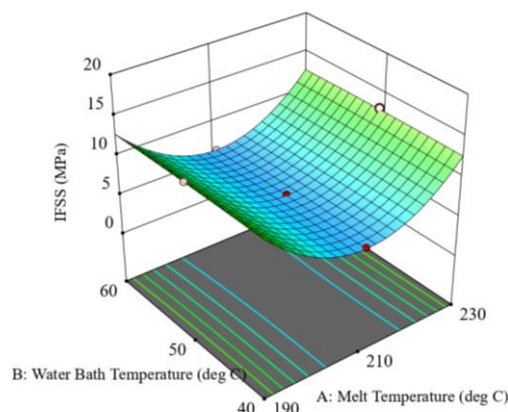
شکل (۱۸): نمودار سطح پاسخ مربوط به اثر تعاملات دمای ذوب و سرعت آغشته‌سازی بر IFSS.



شکل (۱۵): نمودار آشفتگی نشان‌دهنده تأثیر تمام عوامل بر مقادیر IFSS در نقطه میانی فضای طراحی.

۴-۴- شرایط بهینه برای مقدار IFSS

بر اساس نتایج تحلیل واریانس و نمودارهای تغییرات، C (سرعت کشش)، D (سرعت آغشته‌سازی)، AC (تعامل بین سرعت کشش و دمای ذوب و سرعت کشش) و A^2 تأثیرگذارترین پارامترها بر IFSS است. می‌توان IFSS بالایی را با اعمال حداقل سرعت کشش (۲ دور در دقیقه) و حداقل سرعت آغشته‌سازی (۱) دور در دقیقه) به دست آورد. دما حمام آب تأثیر چندانی ندارد و برابر با ۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. در این شرایط، با توجه به اثرات مربوط به دمای ذوب، مقدار آن باید در حداقل یا حداکثر مقدار خودتنظیم شود تا IFSS افزایش یابد. برای توصیف این فرضیه‌ها، نیاز به انجام مراحل بهینه‌سازی است؛ این مراحل به جستجوی ترکیبی از سطوح



شکل (۱۶): نمودار سطح پاسخ مربوط به اثر تعاملات دمای ذوب و دمای حمام آب بر IFSS.

با ویسکوزیته پایین زمان و فضای کافی برای بهبود کیفیت آغشتگی به دسته‌های الیاف که در شرایط کشش بهینه هستند، پیدا می‌کند. سرعت جمع‌آوری فیلامنت پایین نیز زمان تماس بین دسته‌های الیاف و قطر پین را افزایش می‌دهد و در نتیجه مذاب پلاستیک درون دسته الیاف به‌طور بهتری توزیع می‌شود. دمای بالا زبری سطح الیاف را افزایش می‌دهد و باعث بهبود قفل‌شدگی مکانیکی بین ماتریس و الیاف شده که این امر بهبود چسبندگی بین سطحی را به دنبال دارد. باین‌حال، دمای ذوب بیش‌ازحد مجاز می‌تواند باعث تخریب مواد ترموپلاستیک شود [۱۹].

در آزمایش فوق، استفاده از دماهای بالا می‌تواند باعث بهبود مقدار IFSS شود؛ اما برخی مشکلات احتمالی نیز با کاربرد دماهای بالای ذوب وجود دارد. یانگ [۲۰] گزارش کرده است که اگرچه استحکام چسبندگی داخلی در دماهای بالای ذوب افزایش می‌یابد، خطر تخریب حرارتی ماتریس نیز باید در نظر گرفته شود. علاوه بر این، مذاب با ویسکوزیته پایین می‌تواند پایداری هندسی را مختل کند. قطر مقطع نمونه تولیدشده در مقایسه با نمونه‌هایی که در دماهای پایین‌تر پردازش شدند انحراف زیادی از قطر قالب (۲ میلی‌متر) داشت. پایداری هندسی در فرآیند تولید عامل مهمی است که بر کیفیت محصول تأثیر می‌گذارد.

بنابراین، شرایط بهینه فرآیند تولید فیلامنت کامپوزیتی با الیاف کربن پیوسته و رزین پلی‌لاکتیک اسید شامل دمای ذوب ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، دمای حمام آب ۵۰ درجه سانتی‌گراد سرعت کشش ۲ دور در دقیقه و سرعت آغشته سازی ۱ دور در دقیقه به دست آمد.

پارامترها کمک می‌کند که هم‌زمان الزامات مربوط به پاسخ و پارامترها را برآورده کند.

جدول ۶ تجزیه و تحلیل بهینه‌سازی را در دماهای ذوب حداقل و حداکثر نشان می‌دهد. نتایج بهینه‌سازی در دمای ذوب حداقل (۱۹۰ درجه سانتی‌گراد) پیش‌بینی IFSS را به میزان ۱۳/۶۵۷ مگاپاسکال با سطح مطلوبیت تقریباً ۱ (۹۹/۸ درصد) به دست می‌دهد. تنظیم دمای ذوب در موقعیت حداکثر (۲۳۰ درجه سانتی‌گراد) نتایج IFSS بالایی به میزان ۱۸/۱۱ مگاپاسکال با سطح مطلوبیت ۰/۹۰۸ (۹۰/۸ درصد) به همراه دارد. سطح مطلوبیت رویکردی است که برای بهینه‌سازی پارامترها در سیستم‌های پیچیده استفاده می‌شود. مقادیر سطح مطلوبیت بین ۰ و ۱ قرار دارند. زمانی که پارامترها پاسخ نامطلوبی ارائه می‌دهند، مقدار ۰ به آن‌ها اختصاص داده می‌شود، در حالی که مقدار ۱ نشان‌دهنده عملکرد بهینه برای پارامترهای موردبررسی است.

چهار آزمایش اضافی با استفاده از متغیرهایی که منجر به پیش‌بینی IFSS شدند، برای تأیید صحت پاسخ بهینه پیش‌بینی شده انجام شد. جدول ۷ نتایج آزمایش‌های تأییدی را نشان می‌دهد؛ این نتایج بیش از ۹۰٪ پاسخ بهینه پیش‌بینی شده را تأیید می‌کنند که نشان می‌دهد روش طراحی مکعب مرکزی یک روش مؤثر برای بهینه‌سازی فرآیند اکستروژن-پالترژن کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با کربن است.

در دماهای بالای ذوب، ویسکوزیته مذاب کاهش می‌یابد و به دنبال آن، مذاب پلاستیک به راحتی بین دسته‌های الیاف نفوذ می‌کند. با کاهش سرعت جمع‌آوری فیلامنت، مذاب پلاستیک

جدول (۶): مقادیر بهینه پارامترها مربوط به آزمون IFSS

فاکتورها	A	B	C	D	IFSS (Mpa)	مطلوبیت
مقادیر	۲۳۰	۵۰	۲	۱	۱۸/۱۱۱	۰/۹۹۸
	۱۹۰	۵۰	۲	۱	۱۳/۶۵۷	۰/۹۰۸

جدول (۷): نتایج برای آزمون صحت‌سنجی مقادیر IFSS

فاکتورها	A	B	C	D	Avg IFSS (MPa)	پاسخ
	۲۳۰	۵۰	۲	۱	۱۹/۴۴۶	
	۱۹۰	۵۰	۲	۱	۱۵/۱۲۴	

(۲) اثر پارامترهای فرآیند بر فیلامنت کامپوزیتی تولیدشده و مقدار IFSS نشان داد که با کاهش سرعت جمع‌آوری فیلامنت، مذاب پلاستیک با ویسکوزیته پایین، زمان و فضای کافی برای بهبود کیفیت آغشته‌گی به دسته‌های الیاف که در شرایط کشش بهینه هستند، پیدا می‌کند و مشخص شد که کمترین مقدار سرعت جمع‌آوری فیلامنت (۲) دور بر دقیقه) بهترین شرایط را رقم می‌زند.

(۳) استحکام چسبندگی داخلی برای فیلامنت کامپوزیتی در دماهای بالای ذوب افزایش می‌یابد، اما در این محدوده دمایی خطر تخریب حرارتی ماتریس وجود دارد. همچنین، مذاب با ویسکوزیته پایین می‌تواند پایداری هندسی را مختل کند و مشخص شد که دمای ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد دمای بهینه برای آغشته سازی فیلامنت نیست.

(۴) شرایط بهینه فرآیند تولید فیلامنت کامپوزیتی با الیاف کربن پیوسته و رزین پلی‌لاکتیک اسید شامل دمای ذوب ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، دمای حمام آب ۵۰ درجه سانتی‌گراد سرعت کشش ۲ دور در دقیقه و سرعت آغشته سازی ۱ دور در دقیقه به دست آمد.

۶- مراجع

[1] Lee JY, An J, Chua CK. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied Materials Today*. 2017;7:120-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004>

[2] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KT, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018;143:172-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>

[3] Yao T, Ye J, Deng Z, Zhang K, Ma Y, Ouyang H. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. *Composites Part B: Engineering*. 2020;188:107894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107894>

[4] Ning F, Cong W, Qiu J, Wei J, Wang S. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced

به‌منظور صحت سنجی نتایج به‌دست‌آمده به بررسی برخی تحقیقات مشابه با این موضوع می‌پردازیم. کیم و همکاران [۲۱] نیز از روش نیتروژن مایع برای افزایش زبری سطح الیاف استفاده کرده‌اند و بهبود قابل توجهی در استحکام برشی بین لایه‌ای (ILSS) و استحکام کششی الیاف مشاهده شده است. چن و همکاران [۲۲] با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی تجمع ذرات، ترکیب بهینه‌ای از متغیرهای فرآیند تزریق را برای حداقل کردن تغییرات حرارتی و تغییرشکل شناسایی کردند. بودیانورو و همکاران [۲۳] فیلامنت‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن و ماتریس پلی‌پروپیلن را با استفاده از روش اکستروژن-پولتروودینگ تولید کردند. آن‌ها تأثیر متغیرهای فرآیندی شامل دمای ذوب، سرعت کشش، تعداد پین‌های پخش‌کننده و اصلاح سطحی الیاف را بر کیفیت آغشته‌گی بررسی کردند. نتایج نشان داد که اصلاح سطحی الیاف با نیتروژن مایع به دلیل افزایش زبری سطح الیاف، باعث بهبود قابل توجه در استحکام برشی بین‌سطحی می‌شود. همچنین، استفاده از سه پین پخش‌کننده و سرعت کشش پایین کیفیت آغشته‌گی را بهبود بخشید. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تنظیم دقیق این پارامترها برای دستیابی به فیلامنت‌های با خواص مکانیکی بهینه ضروری است. مقایسه این مطالعات نشان می‌دهد که تنظیم دقیق سرعت کشش می‌تواند نقش کلیدی در بهبود کیفیت آغشته‌گی و استحکام مکانیکی فیلامنت‌ها داشته باشد. مقاله ما نیز با تأکید بر این پارامتر، کیفیت آغشته‌گی و استحکام مکانیکی بهینه‌ای را گزارش کرده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر الیاف خروجی دستگاه فیلامنت‌ساز ترموپلاستیک پلی‌لاکتیک اسید تقویت‌شده با الیاف پیوسته کربنی انجام شده است. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق عبارت‌اند از:

(۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی ترکیب نسبتاً یکنواخت از الیاف و کربن را نشان دادند و این مورد خود نشان‌دهنده کارایی مکانیسم آغشته سازی، بخصوص آغشته سازی روی سطح پین به علت بازشدگی تارهای الیاف می‌باشد.

- Science and Technology. 2000;14(3):381-98. **DOI:** <https://doi.org/10.1163/156856100742663>
- [15] Chandran MS, Padmanabhan K. Microbond fibre bundle pullout technique to evaluate the interfacial adhesion of polyethylene and polypropylene self reinforced composites. *Applied Adhesion Science*. 2019;7:1-22. **DOI:** <https://doi.org/10.1186/s40563-019-0121-z>
- [16] Cech V, Janecek P, Lasota T, Bursa J. A fiber-bundle pull-out test for surface-modified glass fibers in GF/polyester composite. *Composite Interfaces*. 2011;18(4):309-22. **DOI:** <https://doi.org/10.1163/092764411X570879>
- [17] Sakai M, Matsuyama R, Miyajima T. The pull-out and failure of a fiber bundle in a carbon fiber reinforced carbon matrix composite. *Carbon*. 2000;38(15):2123-31. **DOI:** [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00067-1](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00067-1)
- [18] Bagherzadeh A, Hosseini R, Naddaf OA, Baradaran RA. Investigating the Effect of Extruder Temperature and Filament Collection Speed on the Impregnation Quality of PLA Filament Reinforced with Continuous Carbon Fibers. *Aerospace Mechanics*. 2023; 19(3):47-59. **DOI:** <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1402.19.3.4.3>
- [19] Wu Q, Li M, Gu Y, Wang S, Wang X, Zhang Z. Reaction of carbon fiber sizing and its influence on the interphase region of composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015;132(18). **DOI:** <https://doi.org/10.1002/app.41917>
- [20] Yang TC. Effect of extrusion temperature on the physico-mechanical properties of unidirectional wood fiber-reinforced polylactic acid composite (WFRPC) components using fused deposition modeling. *Polymers*. 2018;10(9):976. **DOI:** <https://doi.org/10.3390/polym10090976>
- [21] Chen X, Xie H, Chen H, Zhang F. Optimization for CFRP pultrusion process based on genetic algorithm-neural network. *International Journal of Material Forming*. 2010;3:1391-9. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/s12289-010-0684-5>
- [22] Kim H, Truong B, Buongiorno J, Hu LW. On the effect of surface roughness height, wettability, and nanoporosity on Leidenfrost phenomena. *Applied Physics Letters*. 2011;98(8). **DOI:** <https://doi.org/10.1063/1.3560060>
- [23] Budiyanoro C, Rochardjo HS, Nugroho G. Effects of processing variables of extrusion-pultrusion method on the impregnation quality of thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*. 2015;80:369-78. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
- [5] Kutz M. *Applied plastics engineering handbook: processing and materials*. William Andrew; 2011.
- [6] Köhler T, Röding T, Gries T, Seide G. An overview of impregnation methods for carbon fibre reinforced thermoplastics. *Key Engineering Materials*. 2017;742:473-81. **DOI:** <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.74.2.473>
- [7] Ren F, Yu Y, Cao M, Li Y, Xin C, He Y. Effect of pneumatic spreading on impregnation and fiber fracture of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2017;36(21):1554-63. **DOI:** <https://doi.org/10.1177/0731684417718085>
- [8] Budiyanoro C, Rochardjo HS, Nugroho G. Design, manufacture, and performance testing of extrusion-pultrusion machine for fiber-reinforced thermoplastic pellet production. *Machines*. 2021;9(2):42. **DOI:** <https://doi.org/10.3390/machines9020042>
- [9] Ferreira F, Fernandes P, Correia N, Marques AT. Development of a pultrusion die for the production of thermoplastic composite filaments to be used in additive manufacture. *Journal of Composites Science*. 2021;5(5):120. **DOI:** <https://doi.org/10.3390/jcs5050120>
- [10] Uşun A, Gümrük R. The mechanical performance of the 3D printed composites produced with continuous carbon fiber reinforced filaments obtained via melt impregnation. *Additive Manufacturing*. 2021;46:102112. **DOI:** <https://doi.org/10.1177/0021998311424624>
- [11] Irfan MS, Machavaram VR, Mahendran RS, Shotton-Gale N, Wait CF, Paget MA, Hudson M, Fernando GF. Lateral spreading of a fiber bundle via mechanical means. *Journal of Composite Materials*. 2012;46(3):311-30. **DOI:** <https://doi.org/10.1177/0021998311414947>
- [12] Torayca T300S Data Sheet. Toray Industries. Available from: Toray official documentation.
- [13] Wilson S. Lateral spreading of fibre tows. *Journal of Engineering Mathematics*. 1997;32:19-26. **DOI:** <https://doi.org/10.1023/A:1004253531061>
- [14] Zhandarov S, Pisanova E, Schneider K. Fiber-stretching test: a new technique for characterizing the fiber-matrix interface using direct observation of crack initiation and propagation. *Journal of Adhesion*

composite filaments. *Polymers*. 2020;12(12):2833.
DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12122833>