



## Investigating the Effect of Extruder Temperature and Filament Collection Speed on the Impregnation Quality of PLA Filament Reinforced with Continuous Carbon Fibers

Adel Bagherzadeh<sup>1</sup>, Rouhollah Hosseini<sup>2\*</sup>, Alireza Naddaf Oskouei<sup>3</sup>, Ahmad Baradaran Razzaz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

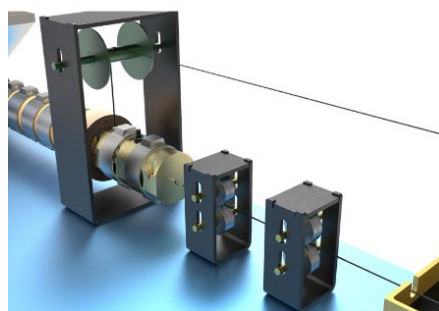
<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

### HIGHLIGHTS

- Increasing the shear strength between the fiber plate and the matrix
- Optimization of impregnation of carbon fibers
- Improving the quality of the thermoplastic parts of 3D printing by means of filament reinforced with continuous carbon fibers

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 14 January 2023

Received in revised form: 27 January 2023

Accepted: 7 March 2023

Available online: 7 March 2023

\*Correspondence:

[r.hosseini.mech@gmail.com](mailto:r.hosseini.mech@gmail.com)

#### How to cite this article:

A. Bagherzadeh, R. Hosseini, A.N. Oskouei, A. B. Razzaz. Investigating the effect of extruder temperature and filament collection speed on the impregnation quality of PLA filament reinforced with continuous carbon fibers. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2023; 19(3):47-59.

#### Keywords:

Composite

Extruder temperature

Interfacial shear strength

Filament collection speed

Composite continuous fibers

### ABSTRACT

The fused deposition modeling (FDM) is an emerging technology for producing parts with high flexibility in design. Considering the low strength of the parts produced with PLA filament, the use of composites reinforced with continuous carbon fibers can solve this defect and increase the mechanical characteristics of the above produced parts. Therefore, an attempt has been made to design and build a prototype of a filament machine with the ability to produce continuous fiber filament with the structure of polymer filament (PLA) and carbon fiber reinforcement. In order to optimally use the produced product (carbon filament-PLA), the experimental effect of the melting temperature of the polymer filament and also the filament collection speed on the surface shear resistance of the product produced by this device was investigated. In this research, factors such as fiber surface roughness, the degree of impregnation between fibers and matrix, the influence of the temperature of the impregnation unit, and the speed of filament exit from the machine have been investigated and evaluated. The results of investigations carried out by electron microscope images on the samples have confirmed the relative increase in fiber surface roughness in the fiber preparation stage using acetic acid and the high quality of carbon fiber impregnation by PLA melt. Also, by using Taguchi's experimental design, filaments were produced and then the produced samples were evaluated in the laboratory. By examining the experimental results, among the conditions considered by Taguchi method, the best melting temperature is 190 C° and the best collection speed is 1 rpm.



## بررسی اثر دمای اکسترودر و سرعت جمع‌آوری فیلامنت بر کیفیت آغستگی فیلامنت PLA تقویت‌شده به کمک الیاف پیوسته کربن

عادل باقرزاده<sup>۱</sup>، روح‌اله حسینی<sup>۲\*</sup>، علیرضا نداف اسکوئی<sup>۳</sup>، احمد برادران رزاز<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

### برجسته‌ها

- افزایش مقاومت برشی بین‌صفحه‌ای الیاف و ماتریس
- بهینه‌سازی آغستگی الیاف کربن
- بهبود کیفیت قطعات ترموپلاستیک لایه نشانی مذاب به‌وسیله فیلامنت تقویت‌شده با الیاف پیوسته کربن

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

\*نویسنده مسئول:

r.hosseini.mech@gmail.com

کلیدواژه‌ها:

کامپوزیت

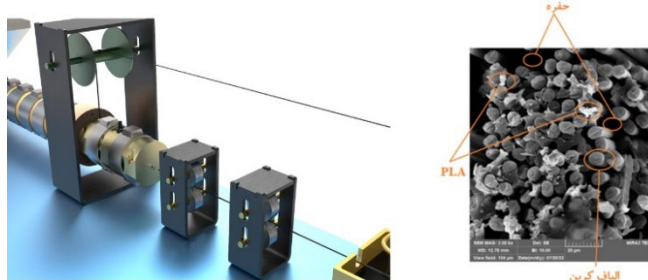
دمای اکسترودر

مقاومت برش سطحی

سرعت جمع‌آوری فیلامنت

الیاف پیوسته کامپوزیتی

### چکیده گرافیکی



### چکیده

لایه نشانی مذاب یک فناوری نوظهور برای تولید قطعات با انعطاف بالا در طراحی می‌باشد. با توجه به استحکام پایین قطعات تولیدی با فیلامنت PLA، استفاده از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته کربن می‌تواند این نقیصه را برطرف کند و باعث افزایش مشخصات مکانیکی قطعات تولیدی فوق گردد. لذا نسبت به طراحی و ساخت یک نمونه دستگاه فیلامنت‌ساز با توانایی تولید فیلامنت الیاف پیوسته با ساختار فیلامنت پلیمری (PLA) و الیاف تقویت‌کننده کربنی اقدام شده است. جهت به‌کارگیری مطلوب محصول تولیدشده (فیلامنت کربن-PLA)، تأثیر تجربی اثر دمای ذوب فیلامنت پلیمری و نیز سرعت جمع‌آوری فیلامنت بر مقاومت برش سطحی محصول تولیدشده توسط این دستگاه بررسی گردید. در این پژوهش عواملی مانند زبری سطح الیاف، میزان آغستگی بین الیاف و ماتریس، تأثیر دمای واحد آغشته‌سازی و نیز سرعت خروج فیلامنت از دستگاه موردبررسی و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌های انجام‌شده توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی بر روی نمونه‌ها، مؤید افزایش نسبی زبری سطح الیاف در مرحله‌ی آماده‌سازی الیاف با استفاده از اسید استیک و کیفیت بالای آغستگی الیاف کربن به‌وسیله مذاب PLA بوده است. همچنین با بهره‌گیری از طراحی آزمایش به روش تاگوچی، اقدام به تولید فیلامنت کرده و سپس نمونه‌های تولیدی در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. با بررسی نتایج آزمایشگاهی از بین حالات در نظر گرفته‌شده توسط روش تاگوچی، بهترین دمای ذوب، دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و بهترین سرعت جمع‌آوری، سرعت ۱ دور در دقیقه به‌دست آمده است.

## ۱- مقدمه

فرآیند لایه‌نشانی مذاب در دهه‌های اخیر به‌عنوان وسیله‌ای جایگزین برای رسیدگی به سازه‌های پیچیده با انعطاف‌پذیری طراحی عالی و بدون تشکیل قالب توسعه‌یافته است [۱]. به کمک این روش امکان تولید قطعه با شکل‌های هندسی پیچیده در زمان کوتاه وجود دارد. از آنجایی که در فرآیند لایه‌نشانی مذاب هر لایه با قرارگیری رشته‌هایی در کنار یکدیگر شکل می‌گیرد، هر لایه، متشکل از رشته‌ها، فصل مشترک بین رشته‌ها (اتصال بین رشته‌ها) و حفره‌هایی در فصل مشترک بین رشته‌ها است [۲] و رفتارهای مکانیکی نسبتاً کم‌کمپوزیت‌های چاپ‌شده سه‌بعدی به دلیل ماتریس ضعیف و بکر و تخلخل ذاتی فناوری مدل‌سازی لایه‌نشانی مذاب است [۱]. لذا، با محدودیت‌های ذکرشده نمی‌توان از این فناوری برای ساخت قطعات پیچیده که تحت بارهای چند محوری قرار دارند، استفاده نمود و کاربرد این روش تنها به بحث مدل‌سازی محدود می‌گردد. با این تفاسیر، استحکام‌بخشی به قطعات تولیدشده توسط این روش می‌تواند افق جدیدی را در حوزه‌های کارکردی این فرآیند ایجاد نماید [۳]. نیاز به هزینه کم، انعطاف‌پذیری طراحی و فرآیندهای تولید خودکار در صنعت باعث توسعه FDM شده است به‌طوری‌که محققین درصدد رفع مشکلات استحکامی محصولات حاصل از این روش برآمده‌اند [۴]. روش‌های متفاوتی برای استحکام‌بخشی مطرح هستند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت است از بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند، افزودن مواد پرکننده (الیاف کوتاه، نانو الیاف، پودر فلز و ...) و استفاده از الیاف پیوسته در بستر فیلامنت پلیمری. نتایج حاصل از افزودن مواد پرکننده، نشان می‌دهد که افزودن مواد پرکننده سبب تغییر چشمگیری در خواص مکانیکی نمی‌شود. همچنین افزودن ذرات پرکننده ممکن است سبب ترد شدن و شکنندگی فیلامنت، ایجاد فضاهای خالی و تمرکز تنش در قطعه تولیدی و گرفتگی نازل شود. یکی از جدیدترین و مؤثرترین روش‌ها در استحکام‌بخشی به محصولات پلیمری، افزودن الیاف پیوسته به آن به‌منظور تولید محصولی مرکب است که به‌طور شگرف و جهشی سبب افزایش خواص مکانیکی به ویژه خواص کششی می‌گردد [۵]. دسته‌بندی الیاف بر اساس نوع

ساختارهای آن‌ها دسته‌بندی می‌شود. الیاف که توسط رزین کنار هم نگه‌داشته می‌شود، استحکام کششی بالایی را ایجاد می‌کند و خواص محصول نهایی مانند استحکام و سفتی را بهبود می‌بخشد. از آنجایی که این خواص باعث کاهش وزن کامپوزیت می‌شوند، در بسیاری از زمینه‌ها مطلوب‌ترین خواص هستند. حجم الیاف، معماری و جهت‌گیری از نکات اساسی در تعیین خواص سفتی و استحکام هستند [۶]. از طرفی، از تئوری‌های مربوط به مواد مرکب پلیمری با الیاف پیوسته این استنباط می‌شود که اگر درصد حجمی الیاف از یک مقدار بحرانی بیشتر باشد، استحکام کششی ماده مرکب از ماتریس بیشتر می‌گردد [۷]. وجود الیاف علاوه بر افزایش استحکام، سبب کاهش پدیده انقباض، اعوجاج و پایداری ابعادی مطلوب‌تر در محصولات نهایی می‌شود که دلیل این امر کاهش میزان پلیمر در محصول نهایی است [۸]. همچنین نمونه‌های تولیدشده با استفاده از فرآیند لایه به لایه کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته دارای استحکام کششی بالایی هستند که در مقایسه با نمونه‌های تهیه‌شده با روش یک‌بار انباشته‌شده ۶۸/۸ درصد بهبود یافته است [۹].

عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های تولیدشده با روش لایه‌نشانی مذاب در تعدادی از مطالعات، از جمله کشش [۱۰، ۱۱، ۱۲] و فشاری [۱۳ و ۱۴]، برشی [۱۶ و ۱۷]، خمشی [۱۰، ۱۷] و ضربه [۱۹]، شکست بین لایه‌ای [۱۰] و خستگی [۲۰] بررسی شده است. با تغییر تعداد لایه‌های الیاف، انواع الیاف و الگوهای پرکننده، خواص مکانیکی متفاوتی به دست آمد. به‌طور کلی میزان استحکام و مدول کامپوزیت‌های تولیدشده با روش لایه‌نشانی مذاب تقویت‌شده با الیاف پیوسته کربن تفاوت زیادی با روش‌های مشابه تقویت نشده توسط الیاف دارند.

به‌منظور ساخت یک دستگاه چاپگر سه‌بعدی کامپوزیتی با الیاف پیوسته دو روش رایج را می‌توان مورد استفاده قرار داد. یکی اینکه نازل به‌گونه‌ای طراحی گردد که در حین ساخت قطعه سه‌بعدی، الیاف و پلیمر با یکدیگر ممزوج شده و قطعه شکل گیرد. در روش دیگر می‌توان از دستگاه فیلامنت‌ساز به‌عنوان مرحله قبل از چاپ استفاده کرده و فیلامنت‌های با الیاف پیوسته کربنی را در آن دستگاه ایجاد نمود. سپس فیلامنت‌های ساخته‌شده را به‌صورت مستقیم در چاپگر

و در نهایت نمونه‌های تولیدی در آزمایشگاه و توسط فیکسچر خاص طراحی‌شده مورد ارزیابی قرار گرفتند.

## ۲- کلیات تحقیق

### ۲-۱- کسر حجم فیبر

مدول الاستیسیته در راستای فیبر را می‌توان با رابطه (۱) بیان نمود [۲۵]:

$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (1)$$

به‌طوری‌که  $E_1$  مدول الاستیسیته کامپوزیت،  $E_f$  و  $E_m$  به ترتیب مدول الاستیسیته الیاف و ماتریس و  $V_f$  کسر حجمی الیاف است. فرض اصلی در این فرمول این است که کرنش‌ها در جهت الیاف در ماتریس و فیبر یکسان هستند. هنگامی که مواد در امتداد جهت فیبر کشیده می‌شوند، ماتریس و الیاف به‌صورت یکسان کشیده می‌شوند. با توجه به رابطه (۱)، خاصیت مدول الاستیسیته کامپوزیت، به‌صورت خطی به نسبت حجمی الیاف بستگی دارد [۲۵]. افزایش کسر حجمی الیاف، نسبت بار تحملی الیاف و در نتیجه کل بار تحمل شده توسط کامپوزیت را افزایش می‌دهد. به‌صورت تئوری، الیاف با مقطع استوانه‌ای تا کسر حجمی ۹۰٪ می‌توان کنار هم قرار داد، ولی در عمل حداکثر به کسر حجمی الیاف ۸۰٪ می‌توان دست‌یافت. در بیشتر از این مقدار، ماتریس نمی‌تواند الیاف را پوشش داده و مرطوب کند. در بیشتر موارد، مدول الیاف بسیار بزرگ‌تر از مدول ماتریس است. پس جمله اول فرمول شماره (۱)، بر جمله دوم غالب است و سهم ماتریس در مدول طولی مرکب را ناچیز می‌کند. این نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته کامپوزیت یک ویژگی تحت سلطه الیاف است. همچنین باید توجه داشت که نسبت حجمی الیاف نمی‌تواند به صد در صد برسد [۲۶].

### ۲-۲ الیاف و ماتریس

برای انجام این تحقیق، گرانول PLA به‌عنوان ماتریس و فیبر کربن T700SC 3K به‌عنوان الیاف تقویت‌کننده پیوسته فیلامنت در نظر گرفته شدند. پس از بررسی اثر چند اسید متداول روی الیاف، یک اسید به‌عنوان عامل زبر کننده الیاف

سه‌بعدی مورد استفاده قرار داد. در این مقاله از این روش به‌عنوان مبنای طراحی و ساخت چاپگر سه‌بعدی کامپوزیتی با الیاف پیوسته استفاده شده است.

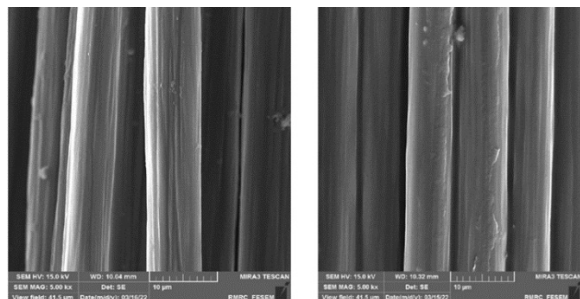
نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که دمای ذوب اکسترودر و فرآیند کشش الیاف پیوسته مورد استفاده در چاپگرهای کامپوزیتی، به‌طور قابل توجهی بر کیفیت فیلامنت خروجی اثرگذار است [۲۱ و ۲۲].

از آنجایی که مواد ترموپلاستیک دارای انرژی سطحی کم و بالطبع پیوند ضعیفی با الیاف هستند [۲۳]، با استفاده از تغییر شیمیایی، سطوح الیاف حکاکی می‌شوند تا استحکام پیوند و دوام الیاف کامپوزیت بهبود یابد [۲۴]. در این پژوهش، اثر حکاکی روی الیاف کربن برای چند اسید مختلف با استفاده از تصویربرداری الکترونی مورد بررسی قرار گرفته شده است.

با توجه به پیشینه پژوهش، ملاحظه می‌گردد که استفاده از الیاف کربن با رزین ترموپلاست به‌منظور ساخت انواع سازه‌های کامپوزیتی، از موضوعات جدید و گلوگاه‌های نو در پیش روی پژوهشگران می‌باشد که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. این کار در سطح ایران تقریباً بدیع می‌باشد و پژوهش‌چندانی در این حوزه به چشم نمی‌خورد. لذا نحوه آماده‌سازی الیاف، طراحی و ساخت دستگاه فیلامنت‌ساز رشته کربن با الیاف پیوسته و بررسی اثر دما و سرعت در کیفیت فیلامنت خروجی، از جمله خلأهای پژوهشی هستند که می‌توانند به‌عنوان نوآوری کار حاضر، مطرح شوند.

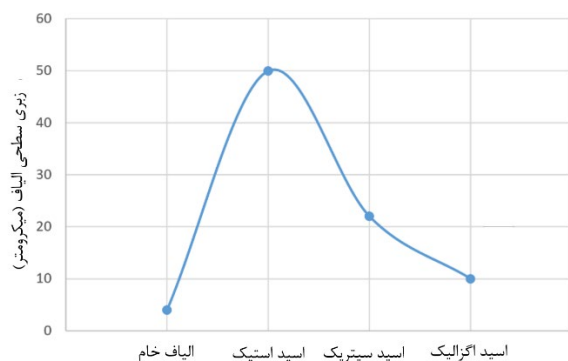
در پژوهش پیش رو، تأثیر دمای ذوب فیلامنت پلیمری و سرعت جمع‌آوری فیلامنت بر مقاومت برش سطحی محصول تولیدشده توسط این دستگاه بررسی گردیده است. برای این منظور از الیاف کربن 3k استفاده گردیده و عواملی مانند زبری سطح الیاف، میزان آغستگی بین الیاف و ماتریس، تأثیر دمای واحد آغشته‌سازی و نیز سرعت خروج فیلامنت از دستگاه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌های انجام‌شده توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که مکانیسم طراحی‌شده برای آغستگی الیاف کربن توسط ماتریس PLA تا حد بسیار زیادی مؤثر واقع شده است. سپس اقدام به تولید فیلامنت در دماها و سرعت‌های مختلف نموده

به مذاب PLA مناسب نیستند. همچنین شکل ۲ نشان می‌دهد که بیشترین تأثیر زبری الیاف کربن 3K در غوطه‌وری اسید استیک است که این موضوع با مقالات و نتایج تحقیقات سایر محققان مطابقت دارد [۳۱].



(ب) (الف)

شکل (۱): تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی از (الف) نمونه خام الیاف کربنی 3K (ب) الیاف کربنی 3K پس از شست‌وشو با اسید استیک.



شکل (۲): مقایسه نتایج زبری نسبی میانگین حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه خام و سه نمونه غوطه‌ور در اسید.

### ۳-۲- ساخت دستگاه فیلامنت‌ساز

به منظور ساخت الیاف کربن آغشته به رزین ترموپلاست و ایجاد یک رشته کربن یکنواخت و البته پیوسته، نیاز به طراحی و ساخت دستگاه فیلامنت‌سازی به منظور ذوب کردن گرانول‌ها در مراحل مختلف و ممزوج کردن آن‌ها با نخ کربن بود. عملکرد دستگاه فیلامنت‌ساز به گونه‌ای است که ابتدا گرانول‌های پلاستیک وارد اکسترودر می‌شوند. سپس در اثر حرارت بالا و حرکت پیچ اکسترودر به مذاب تبدیل می‌شوند. مواد مذاب پس از خروج از اکسترودر وارد استخری می‌شوند

انتخاب شده است که این عمل در مواد کامپوزیتی برای بهبود سازگاری بین رزین و ماده معدنی استفاده می‌شود و به طور قابل توجهی استحکام خمشی و استحکام کششی را بهبود می‌بخشد. خواص مواد ترکیب شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): خواص مواد استفاده شده برای ساخت فیلامنت استخراج شده از اطلاعات شرکت سازنده [۲۷ و ۲۸].

ماده	ویژگی	مقدار	واحد
الیاف کربن (T700SC 3K)	قطر رشته کربن	۷	$\mu\text{m}$
	چگالی	۱/۸	$\text{g/cm}^3$
	استحکام کششی	۳۹۵۰	MPa
PLA	چگالی	۱/۲۴	$\text{g/cm}^3$
	دمای ذوب	-۱۵۰	
	[۲۹]	۱۹۰	
	استحکام تسلیم	۳۵/۶	MPa
	نرخ جریان مذاب	۶	$\text{g/10 min}$
	مدول کششی	۳۴۲۰	MPa

### ۳- ملاحظات تجربی

#### ۳-۱- آماده‌سازی سطح الیاف

به منظور انتخاب مناسب‌ترین اسید برای آماده‌سازی سطح الیاف از اسید استیک، اسید سیتریک و اسید اگزالیک با غلظت PH۲/۴ استفاده شد. سه دسته از الیاف، به صورت مجزا، به مدت ۱ ساعت و در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد [۳۰] (برای اطمینان از فرآیند) در هرکدام از این سه اسید غوطه‌ور شدند. فرآیند غوطه‌وری در اسید مناسب، در دماهای بالا، بر این مشکل غلبه می‌کند. پس از آن، الیاف با آب مقطر شسته شده و در جریان هوای با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت قرار گرفتند تا اطمینان حاصل شود که بین الیاف مورد نظر چسبندگی به وجود نمی‌آید. کیفیت سطح الیاف پس از آماده‌سازی توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود سطح الیاف در ابتدا و قبل از شست‌وشو در اسید، از زبری بسیار کمی برخوردار است و این سطوح برای آغشتگی

**جدول ۲:** تعریف نمودن سه سطح برای دو پارامتر در روش تاگوچی نرم‌افزار Minitab.

تنوع آزمایش	دما (°C)	سرعت (rpm)
۱	۱۵۰	۱
۲	۱۵۰	۸
۳	۱۵۰	۱۵
۴	۱۷۰	۱
۵	۱۷۰	۸
۶	۱۷۰	۱۵
۷	۱۹۰	۱
۸	۱۹۰	۸
۹	۱۹۰	۱۵

سپس مساحت هر مقطع محاسبه گردید و بر اساس این مقادیر، میانگین سطح مقطع نمونه ( $A_v$ ) محاسبه شد. کسر حجمی الیاف با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید [۲۵] و چگالی فیلامنت را می‌توان با استفاده از رابطه (۳) تعیین نمود [۳۰]:

$$V_f = A_f / A_v \quad (2)$$

$$\rho_c = \frac{W}{A_v \times L} \quad (3)$$

به‌طوری‌که  $V_f$  کسر حجمی الیاف،  $A_f$  سطح مقطع الیاف نمونه،  $W$  وزن نمونه،  $A_v$  میانگین سطح مقطع نمونه،  $\rho_c$  چگالی نمونه و  $L$  طول نمونه است.

به‌منظور آماده‌سازی نمونه تست کشش، لازم است که رزین از ۴۰ میلی‌متر طول نمونه جدا شود. با حذف رزین از روی الیاف، یک نمونه آزمایش، آماده انجام تست می‌شود که ۱۰ میلی‌متر از قسمت کامپوزیتی آن باقی می‌ماند (شکل ۴).



**شکل (۴):** آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام تست کشش.

این ۱۰ میلی‌متر کامپوزیت باقی‌مانده به‌عنوان یک انتهای آزاد عمل می‌کند تا در مقابل کشش الیاف در فیکسچر تست،

که قرار است در آنجا با الیاف کربن ترکیب شوند. الیاف کربن با طی مراحل طراحی‌شده و عبور از این استخر، به‌صورت حداکثری با مواد مذاب آغشته می‌گردند. فیلامنت حاصل از ترکیب الیاف و رزین توسط یک جمع‌کننده به سمت بیرون از دستگاه کشیده می‌شود و پس از عبور از غلتک فرمینگ و فرآیند خنک‌سازی، به دور قرقره‌ای جمع‌آوری می‌گردد. برای این منظور رشته‌های الیاف باید در زمان عبور از استخر به‌خوبی از هم پخش شوند و تا حد امکان روی هم قرار نگیرند تا آغستگی حداکثری الیاف حاصل شود. باز شدن الیاف از یکدیگر، با عبور نخ از روی پین‌های منحنی شکل خاصی که در طول استخر مذاب طراحی‌شده‌اند، انجام می‌گردد. این دستگاه در گروه مهندسی مکانیک دانشگاه جامع امام حسین (ع) برای اولین بار در سطح کشور طراحی و ساخته شد. شکل ۳ شماتیکی از این دستگاه را نشان می‌دهد.



**شکل (۳):** مدل کامل دستگاه آغشته‌سازی الیاف کربن.

### ۳-۳- اندازه‌گیری و آزمایش نمونه

مطابق با پارامترهای در نظر گرفته‌شده، تعداد ۴۵ نمونه ساخته شد. نمونه‌ها برای انجام تست در دستگاه تست کشش، در ابعاد حدود ۵۰ میلی‌متر ( $L$ ) برش داده شدند و سپس برای هرکدام از آن‌ها، اندازه‌گیری کسر حجمی الیاف انجام شد. نتایج اندازه‌گیری ابعاد و محاسبه کسر حجمی الیاف در جدول ۲ آمده است. قطر مقطع نمونه‌ها با استفاده از ابزار اندازه‌گیری در سه نقطه  $A_1$ ،  $A_2$  و  $A_3$  اندازه‌گیری شد.



و خطا، درجه آزادی هر عامل و خطا، میانگین مربعات هر عامل و خطا و سهم هر عامل در پاسخ (P-Value) ارائه می‌شود. در این تحقیق از نرم‌افزار MiniTab به منظور پردازش و تحلیل نتایج به دست آمده استفاده گردیده است. در جدول (۳) مقادیر پارامترهای مورد بررسی و همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان مقاومت برشی بین سطحی الیاف و PLA در شرایط مختلف ارائه شده است. بر این اساس، نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌ها در ۹ تنوع و برای هر تنوع در ۵ تعداد آماده شدند.

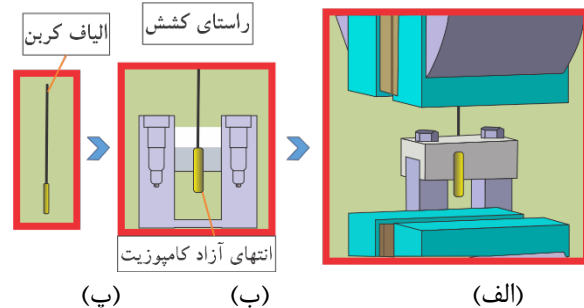
به این ترتیب آزمایش‌های مربوطه در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و در سه سرعت برای واحد جمع‌آوری به صورت ۱، ۸ و ۱۵ دور در دقیقه طراحی شد. همچنین به دلیل اینکه مقدار بالاتر مقاومت برشی بین سطحی، مطلوب‌تر است، تابع زیان روش تاگوچی، از نوع «بزرگ‌تر-بهرتر» انتخاب شده است.

### ۳-۶- تست کشش

کیفیت عملکرد دستگاه پس از تولید فیلامنت، باید توسط تست کشش نمونه‌ها و تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع فیلامنت مورد ارزیابی قرار بگیرد. کیفیت محصول با هندسه سطح مقطع، کسر حجمی الیاف، کیفیت آغستگی و مقاومت برشی سطحی بین ماتریس و الیاف نشان داده می‌شود. انجام تست کشش نمونه‌ها تحت استاندارد ASTM D7913 انجام شد. در این روش، نمونه را به صورت عمودی در یک قاب فلزی با طراحی خاص قرار می‌دهند و روکش ماتریسی در قسمت بالایی نمونه را جدا می‌کنند تا فقط الیاف باقی بماند، در حالی که در قسمت پایین نمونه، الیاف با روکش ماتریس باقی مانده است. قسمت بالایی به عنوان انتهای بارگذاری شده در نظر گرفته می‌شود و قسمت پایین به عنوان انتهای آزاد محکم نگه داشته شده است (شکل ۶).

برای انجام این آزمایش از دستگاه تست کشش دو تن ساخت شرکت سنتم استفاده شده است. اجرای تست کشش برای همه نمونه‌ها، به روش کنترل جابه‌جایی و با نرخ جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و بر روی نمونه‌های یکسان با طول ۵۰ میلی‌متر انجام شد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، لایه PLA در اثر تست کشش، همانند یک غلاف از روی الیاف

مقاومت کند. به منظور کشش نمونه آماده شده، فیکسچر مخصوصی طراحی گردید که یک سوراخ مرکزی به قطر ۰/۷ میلی‌متر برای بیرون کشیدن الیاف از قسمت کامپوزیتی درون آن تعبیه شد (شکل ۵).



شکل (۵): الف) نمونه تست کشش؛ ب) فیکسچر انجام تست؛ پ) اجرای تست کشش.

### ۳-۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

برای ارزیابی ساختار مورفولوژیکی و شرایط آغستگی بین الیاف و ماتریس، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع نمونه تصویربرداری صورت گرفته است. برای دستیابی به یک بررسی عمیق‌تر در سطح میکروسکوپی، تصویربرداری الکترونی با بزرگنمایی 500x تا 25kx از سطح مقطع فیلامنت انجام شد.

### ۳-۵- طراحی آزمایش (کنترل کیفیت آماری)

در این تحقیق یک کنترل کیفیت آماری دومتغیره به منظور ارتباط بین مقاومت برشی بین سطحی الیاف و پوشش PLA و پارامترهای دمای ذوب اکسترودر و سرعت جمع‌آوری فیلامنت خروجی از دستگاه فیلامنت‌ساز بر اساس روش تاگوچی و با استفاده از نرم‌افزار Minitab در نظر گرفته شد و در خروجی آن، تعداد ۹ آزمایش مورد مطالعه قرار گرفت. برای تحلیل نتایج آزمایش‌ها، از بررسی نمودار نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده شده است. مقدار سیگنال به نویز میزان پراکندگی را حول یک مقدار مشخص بیان می‌کند یا به بیان دیگر به ما نشان می‌دهد جواب‌های ما در بین چند آزمایش انجام شده چگونه تغییر کرده‌اند. از تحلیل رگرسیون به منظور تجزیه و تحلیل نتایج استفاده شده است. نتایج تحلیل به‌طور معمول به صورت جدولی شامل مجموع مربعات هر عامل

**جدول (۳):** نتایج تجربی به‌دست‌آمده حاصل از خروجی‌های طراحی آزمایش.

F (N)	$\rho_c$ ( $\frac{gr}{cm^3}$ )	$A_v$ ( $mm^2$ )	W (g)	V (rpm*)	T (°C)
۱۳/۶۷	۳/۲۴۹	۰/۹۵	۰/۱۳	۱	۱۵۰
۱۱/۴۹	۳/۰۹۵	۱	۰/۱۳	۸	۱۵۰
۹/۸۳	۳/۷۰۱	۰/۹	۰/۱۴	۱۵	۱۵۰
۱۹/۴۲	۳/۳۹۴	۰/۹۲	۰/۱۳	۱	۱۷۰
۱۶/۵۷	۲/۹۸۸	۱	۰/۱۲	۸	۱۷۰
۱۴/۵۷	۳/۶۲۴	۰/۹۵	۰/۱۴	۱۵	۱۷۰
۲۳/۱۱	۳/۴۳۶	۰/۹	۰/۱۴	۱	۱۹۰
۱۹/۴۶	۳/۱۷۱	۰/۹۳	۰/۱۳	۸	۱۹۰
۱۷/۶۱	۳/۱۷۱	۰/۹۴	۰/۱۲	۱۵	۱۹۰

بر اساس این نتایج مقدار متوسط کسر حجمی الیاف بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی، ۱۸/۳ درصد بود که با استفاده از تغذیه الیاف چندلایه قابل‌افزایش است. حداکثر مقاومت برشی بین سطحی الیاف و PLA به ۲۳/۱۱ نیوتن رسیده است. نتایج آزمایش بیانگر این است که کیفیت پیوند بین الیاف-ماتریس در حد مطلوب می‌باشد. این مقدار برای کامپوزیت‌های معمولی بین الیاف کربن و ترموپلاستیک PP (بدون آماده‌سازی اولیه و بدون فرآیندهای بهبود آغستگی الیاف)، تنها در حدود ۷ نیوتن می‌باشد [۳۲]. همان‌طور که در اشکال ۸ و ۹ نشان داده شده است، نتایج با تجزیه و تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز تأیید شد که کیفیت بالای آغستگی الیاف، منجر به مقاومت برشی بین سطحی بالای کامپوزیت گردیده است. بیشترین مقدار مقاومت برشی بین سطحی به‌دست‌آمده مربوط به نمونه‌ای است که در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱ دور در دقیقه تولید شده است. این نتیجه نشان می‌دهد اثر مستقیم افزایش دما روی کاهش ویسکوزیته PLA مذاب در میزان کیفیت آغستگی تأثیر مستقیم دارد و سبب بهبود آن می‌شود. همچنین از آنجایی که سرعت ۱ دور در دقیقه برای جمع‌آوری فیلامنت تولیدی، سرعت پایینی به حساب می‌آید، می‌توان نتیجه گرفت هرچه سرعت پایین‌تر باشد، الیاف فرصت بیشتری دارند تا در معرض آغستگی بهتری قرار گیرند. البته که سرعت پایین در نرخ تولید

جدا شده است. باین حال مقداری PLA همچنان در بین الیاف موجود است.

#### ۴- بررسی نتایج

در ادامه و در جدول ۳ نتایج تجربی حاصل از خروجی‌های طراحی آزمایش نشان داده شده و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در جدول ۳، T دمای استخر مذاب ترموپلاستیک، V سرعت واحد جمع‌آوری فیلامنت، W میانگین وزن نمونه‌ها،  $A_v$  میانگین سطح مقطع نمونه‌ها،  $\rho_c$  میانگین چگالی نمونه‌ها و F میانگین نیروی جدایش نمونه‌ها است.



شکل (۶): انجام تست کشش نمونه توسط دستگاه کشش سنتام ۲ تن و فیکسچر طراحی شده.



شکل (۷): وضعیت نمونه فیلامنت، پس از انجام تست کشش.



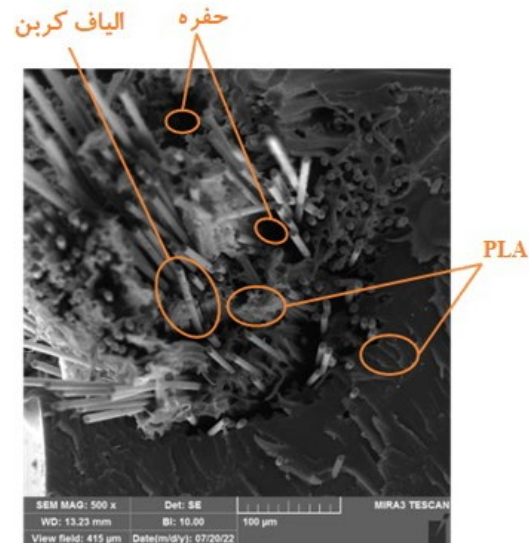
به نمایش گذاشتند. باین حال، در تصاویر میکروسکوپ الکترونی مقداری فضای خالی هنوز قابل مشاهده است. این شرایط را می توان با این واقعیت توضیح داد که ماتریس در طول فرآیند، ویسکوزیته بالایی را تجربه می کند. مذاب پلاستیک چسبنک نمی تواند به خوبی در تمام حفره های الیاف نفوذ کند. ویسکوزیته مذاب را می توان با افزایش دما کاهش داد [۲۹]. این عمل، به طور هم زمان به وجود آمدن حفره ها را در داخل کامپوزیت به حداقل می رساند.

با توجه به شکل ۹ و بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابری سطح مقطع فیلامنت تولید شده، نواحی آغشته نشده اغلب در مرکز الیاف قرار گرفته اند که این امر بیانگر پوشش دهی کامل سطح خارجی الیاف کربن با پلیمر و همچنین آغشته سازی بخش زیادی از مرکز الیاف به وسیله ماتریس است که دلیل این امر همان طور که ذکر شد ناشی از ویسکوزیته بالای ماتریس است. با توجه به اینکه در این پژوهش از الیاف کربن 3k استفاده شده است، درصد بالای آغستگی سطوح الیاف کربن به ماتریس PLA که در شکل ۹ به خوبی قابل مشاهده است، در نهایت مقاومت بین سطحی الیاف کربن و ماتریس PLA را رقم خواهد زد که از اهداف اصلی این پژوهش است.

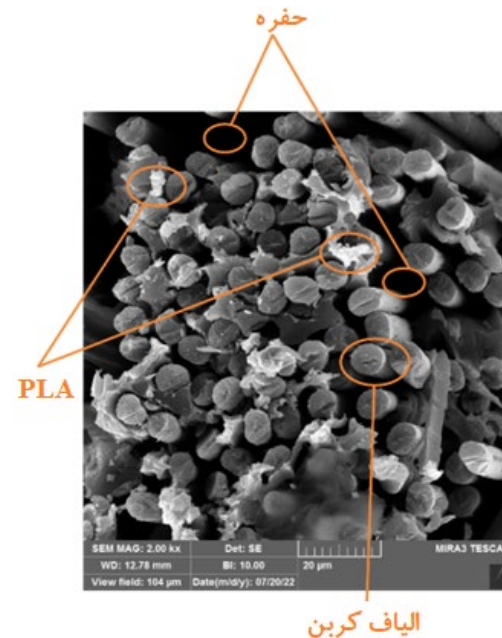
#### ۴-۱- بررسی رگرسیون نتایج طراحی آزمایش

رگرسیون، معادله خطی را تعیین می کند که دارای کمترین مجموع مربعات فواصل افقی بین نقاط داده و خط مورد نظر باشد. از محاسبه رگرسیون، بیشتر برای پیش بینی ارتباط بین متغیرها چه وابسته و چه مستقل استفاده می شود. در این تحقیق به منظور بررسی معنی دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شد. بر این اساس چنانچه p-value برای یک مدل کمتر از ۰/۰۵ باشد، مدل در نظر گرفته شده معنی دار می باشد و می توان نتیجه گرفت که کدام یک از پارامترها روی نتیجه، اثر مثبت دارد. به این ترتیب که اگر این مقادیر از مقدار ۰/۰۵ بیشتر باشند، یعنی اینکه گواه کافی برای اینکه این پارامتر در پاسخ اثر مطلوب دارد، وجود ندارد. پس از بررسی مدل های مختلف بررسی شده و استفاده از روش رگرسیون، تحلیل پارامترهای مستقل و کمیت های  $R^2$  و  $R_{adj}^2$  مشخص شد که از بین مدل های پیشنهادی، مدل درجه یک، تطابق بهتری با نتایج به دست آمده از آزمایش ها دارد. بر این اساس

و صرفه اقتصادی اثر مستقیم دارد. لذا در عمل و با لحاظ صرفه اقتصادی، نیاز به یک بهینه سازی چند متغیره می باشد.



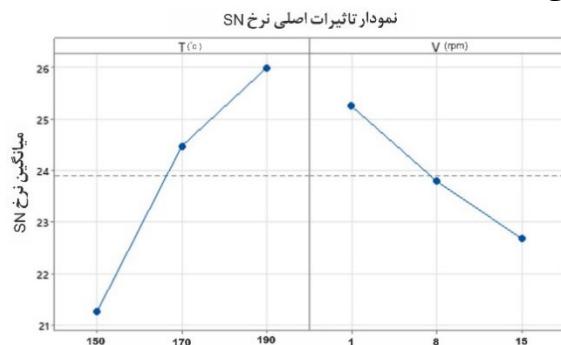
شکل (۸): تصویر میکروسکوپ الکترونی از آغستگی مناسب میان الیاف و ماتریس با بزرگنمایی 500x.



شکل (۹): تصویر میکروسکوپ الکترونی از آغستگی مناسب میان الیاف و ماتریس با بزرگنمایی 2.0kx.

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، با توجه به سطح مقطع بسیار کوچک الیاف کربن (با قطر ۷ میکرومتر) و شرایط ویسکوزیته ترموپلاستیک ها، الیاف به طور کامل توسط ماتریس آغشته شد و روش هایی که به منظور بهبود آغستگی الیاف به ماتریس PLA استفاده شدند به خوبی نتیجه خود را

را با نتیجه حاصل از آزمایش تطبیق داد و از این طریق میزان دقت انجام آزمایش‌ها را سنجید. این عمل برای هر ۹ آزمایش انجام‌شده و نتایج در جدول ۵ با نتایج حاصل از آزمایش‌ها مقایسه شده است. از جدول ۵ می‌توان نتایج پیش‌بینی روش تاگوچی را با نتایج حاصل از آزمایش‌ها مقایسه نمود. ملاحظه می‌شود که بیشترین اختلاف در نتایج، کمتر از ۴٪ است که مقدار قابل قبولی بوده و بر اجرای درست آزمایش‌ها صحه می‌گذارد.



سیگنال به نویز (بزرگتر بهتر است)

شکل (۱۰): نتیجه تحلیل نرخ SN روش تاگوچی.

جدول (۵): مقایسه نتایج پیش‌بینی روش تاگوچی و نتایج تجربی.

T (°C)	V (rpm)	F (Test) (N)	F (Taguchi) (N)	خطا (%)
۱۵۰	۱	۱۳/۶۷	۱۴/۲۰۴۸	۳/۷۶۴۹۲۵
۱۵۰	۸	۱۱/۴۹	۱۱/۳۱۲۷	-۱/۵۵۸۲۹
۱۵۰	۱۵	۹/۸۳	۹/۴۷۴۹	-۳/۷۴۸۸۹
۱۷۰	۱	۱۹/۴۲	۱۹/۳۹۳۷	-۰/۱۳۵۶۱
۱۷۰	۸	۱۶/۵۷	۱۶/۵۰۲۶	-۰/۴۰۸۴۲
۱۷۰	۱۵	۱۴/۵۷	۱۴/۶۶۳۷	۰/۶۳۸۹۹۳
۱۹۰	۱	۲۳/۱۱	۲۲/۶۰۱۵	-۲/۲۴۹۸۵
۱۹۰	۸	۱۹/۴۶	۱۹/۷۱۰۴	۱/۲۷۰۳۹۵
۱۹۰	۱۵	۱۷/۶۱	۱۷/۸۷۱۵	۱/۴۶۲۲۴

## ۵- نتیجه‌گیری

ساخت دستگاه فیلامنت‌ساز و بررسی عملکرد نمونه‌ها با موفقیت انجام‌شده است. این دستگاه توانست رشته‌هایی با هندسه و ابعاد یکنواخت تولید کند. کسر حجمی رشته‌های

مقادیر عددی ضرایب متغیرها، p-value و همچنین  $R^2$  و  $R_{adj}^2$  به‌دست‌آمده که در جدول ۴ نشان داده‌شده است. مدل به‌دست‌آمده برای محاسبه مقاومت برشی بین سطحی الیاف PLA نیز به‌صورت نشان داده‌شده در رابطه (۴) است.

$$F = 12.526 + 4.1198 T - 2.365 V \quad (4)$$

مقدار  $R^2$  و  $R_{adj}^2$  به ترتیب برابر ۹۷/۶۴٪ و ۹۶/۸۶٪ می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده برای این آزمایش‌ها مناسب بوده و مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها با مقادیر پیش‌بینی‌شده بر اساس مدل مطابقت دارد. پس از بررسی داده‌ها و استخراج مدل رگرسیونی برای میزان مقاومت برشی بین سطحی، میزان عملکرد و صحت آن مورد بررسی قرار گرفت.

جدول (۴): نتیجه تحلیل رگرسیون نتایج.

منبع	مجموع مربعات	P-value	متوسط مربعات	F-value
مدل	۱۳۹/۳۱۵	۰	۶۹/۶۵۸	۱۲۴/۳۰
دمای ذوب	۱۰۵/۷۵۶	۰	۱۰۵/۷۵۶	۱۸۸/۷۱
سرعت (جمع‌آوری فیلامنت)	۳۳/۵۵۹	۰	۳۳/۵۵۹	۵۹/۸۸
خطای خالص	۳/۳۶۲	۰	۰/۵۶۰	

## ۴-۲- بررسی نتایج آزمایش با استفاده از روش تاگوچی

پس از به دست آوردن نتایج آزمایش، مقادیر حاصل در قسمت طراحی آزمایش نرم‌افزار Minitab وارد شده و سپس تحلیل داده‌ها با استفاده از روش تاگوچی انجام گردید. با استفاده از شکل ۹ و تحلیل نرخ SN (شکل ۱۰) به‌خوبی می‌توان بر نتایج حاصل از آزمایش‌ها صحه گذاشت که کاهش سرعت جمع‌آوری فیلامنت و افزایش دمای ذوب پلاستیک، اثر مثبت و مستقیم در کیفیت آغستگی دارند. در تحلیل این نمودار باید اضافه کنیم که برای هر کدام از پارامترها، بیشترین مقدار نرخ SN، مطلوب‌ترین خروجی را نتیجه خواهد داد.

یکی دیگر از قابلیت‌های روش تاگوچی، پیش‌گویی نتایج آزمایش بر اساس داده‌های آماری است؛ به‌این‌ترتیب که می‌توان برای هر کدام از آزمایش‌ها نتیجه پیشنهادی نرم‌افزار

Fiber-Reinforced Polyphenylene Sulfide Laminates Made by Thermocompression to Simulate the Consolidation Process in FDM. *Polymers*. 2022;14(2):301.

[2] Bellehumeur C, Li L, Sun Q, Gu P. Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process. *Journal of manufacturing processes*. 2004;6(2):170-8.

[3] Hietala M, Oksman K. Pelletized cellulose fibres used in twin-screw extrusion for biocomposite manufacturing: Fibre breakage and dispersion. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018;109:538-45.

[4] Ismail KI, Yap TC, Ahmed R. 3D-Printed Fiber-Reinforced Polymer Composites by Fused Deposition Modelling (FDM): Fiber Length and Fiber Implementation Techniques. *Polymers*. 2022;14(21):4659.

[5] Kutz M, editor. *Applied plastics engineering handbook: processing and materials*. William Andrew; 2011.

[6] Zhuo P, Li S, Ashcroft IA, Jones AI. Material extrusion additive manufacturing of continuous fibre reinforced polymer matrix composites: A review and outlook. *Composites Part B: Engineering*. 2021;224:109143.

[7] Henninger FH. Beitrag zur Entwicklung neuartiger Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen aus kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten (Doctoral dissertation, Technische Universität Kaiserslautern).

[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.

[9] Hu J, Mubarak S, Li K, Huang X, Huang W, Zhuo D, Li Y, Wu L, Wang J. The Micro-Macro Interlaminar Properties of Continuous Carbon Fiber-Reinforced Polyphenylene Sulfide Laminates Made by Thermocompression to Simulate the Consolidation Process in FDM. *Polymers*. 2022;14(2):301.

[10] He Q, Wang H, Fu K, Ye L. 3D printed continuous CF/PA6 composites: Effect of microscopic voids on mechanical performance. *Composites Science and Technology*. 2020;191:108077.

کامپوزیت می‌تواند باکیفیت اشباع خوب به ۱۸/۳۳٪ برسد. مقایسه نتایج زبری نسبی میانگین حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه خام و سه نمونه غوطه‌ور در اسید نشان داد بیشترین تأثیر روی زبری الیاف کربن 3K در غوطه‌وری اسید استیک است. افزایش زبری سطح الیاف و استفاده از طراحی نوآورانه قالب‌های آغشتگی که مجهز به پین‌های پخش‌کننده بودند، منجر به اثر آغشتگی یکنواخت روی الیاف شد. تقریباً همه الیاف توسط ماتریس پوشانده شده‌اند. فیلامنت‌هایی باکیفیت آغشتگی کافی و کسر حجمی مناسب می‌توانند به‌عنوان فیلامنت‌هایی برای تولید محصولات کامپوزیتی ساختاری استفاده شوند.

آزمایش‌ها مجموعاً در ۹ حالت مختلف (سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و سه سرعت جمع‌آوری ۱، ۸ و ۱۵ دور در دقیقه) انجام شد. افزایش مقدار مقاومت برشی بین سطحی برای فیلامنت خروجی در مقایسه باحالتی که الیاف بدون آماده‌سازی و بدون استفاده از دستگاه به ماتریس آغشته شده بودند، کاملاً مشهود بود. نتایج آزمایش به‌منظور انجام تحلیل کنترل کیفیت آماری به روش تاگوچی به نرم‌افزار Minitab منتقل شد. تأثیر پارامترهای سرعت جمع‌آوری فیلامنت و دمای ذوب پلاستیک بر میزان مقاومت برش بین سطحی الیاف و PLA بررسی گردید. نتایج حاضر نشان داد افزایش دما به دلیل اثر کاهش غلظت مواد مذاب می‌تواند سبب آغشتگی بهتر الیاف به رزین ترموپلاستیک شود و اگر از سرعت جمع‌آوری فیلامنت خروجی کاسته شود، الیاف با فرصت بیشتری در معرض آغشتگی قرار خواهند گرفت که این امر می‌تواند به بهبود کیفیت فیلامنت کامپوزیتی منجر شود. همچنین با کمک امکان پیش‌بینی نتایج با روش تاگوچی، نتایج آزمایش‌ها برای حالات مختلف محاسبه شد که درصد اختلاف نتایج تاگوچی با نتایج تجربی، کمتر از ۴ درصد بود. با توجه به مقدار بالای ضریب تعیین ( $R^2$ ) به‌دست‌آمده از روش رگرسیون، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل رگرسیونی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارند.

## ۷- مراجع

[1] Hu J, Mubarak S, Li K, Huang X, Huang W, Zhuo D, Li Y, Wu L, Wang J. The Micro-Macro Interlaminar Properties of Continuous Carbon

- conventional and additive manufacturing methods. *Journal of Composite Materials*. 2018;52(23):3173-81.
- [21] Ho KK, Shamsuddin SR, Riaz S, Lamorinere S, Tran MQ, Javaid A, Bismarck A. Wet impregnation as route to unidirectional carbon fibre reinforced thermoplastic composites manufacturing. *Plastics, rubber and composites*. 2011;40(2):100-7.
- [22] Zhang B, Kim BC. Experimental characterisation of large in-plane shear behaviour of unidirectional carbon fibre/epoxy prepreg tapes for continuous tow shearing (CTS) process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022;162:107168.
- [23] Awaja F, Gilbert M, Kelly G, Fox B, Pigram PJ. Adhesion of polymers. *Progress in polymer science*. 2009;34(9):948-68.
- [24] Wenzhong N. The effect of coupling agents on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced polyimide composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2015 Nov;28(11):1572-82.
- [25] Barbero EJ. Introduction to composite materials design. CRC press; 2017.
- [۲۶] علیزاده، ت. نظام آبادی، ع. یوسفی، پ. تحلیل تجربی و عددی تأثیر کسر حجمی الیاف روی استحکام نهایی مواد کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف، سومین کنگره سراسری فناوریهای نوین ایران باهدف دستیابی به توسعه پایدار، ۱۳۹۴.
- [27] Toray Carbon Fibers America, Inc.. TORAYCA® T700S Data Sheet.
- [28] Amino Propyl Triethoxy Silane (APTS). Available online: <http://www.jessicachem.com> (accessed on 31 May 2020).
- [29] Rosen M, Kiani A. The Role of Plastics Compounding for Injection Molding: Some of the complexities of compounding are demystified in this overview. *Plastics Engineering*. 2016;72(1):24-8.
- [30] Marissen R, van der Drift LT, Sterk J. Technology for rapid impregnation of fibre bundles with a molten thermoplastic polymer. *Composites science and technology*. 2000;60(10):2029-34.
- [31] Wang J, Song F, Yu M. Unidirectional continuous fiber-reinforced polypropylene single-polymer composites prepared by
- [11] Peng Y, Wu Y, Wang K, Gao G, Ahzi S. Synergistic reinforcement of polyamide-based composites by combination of short and continuous carbon fibers via fused filament fabrication. *Composite Structures*. 2019;207:232-9.
- [12] Kvalsvig A, Yuan X, Potgieter J, Cao P. Analysing the tensile properties of 3D printed fibre reinforced thermoplastic composite specimens. In 2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP) 2017 (pp. 1-6). IEEE.
- [13] Van Der Klift F, Koga Y, Todoroki A, Ueda M, Hirano Y, Matsuzaki R. 3D printing of continuous carbon fibre reinforced thermo-plastic (CFRTP) tensile test specimens. *Open Journal of Composite Materials*. 2016;6(01):18.
- [14] Dikshit V, Yap YL, Goh GD, Yang H, Lim JC, Qi X, Yeong WY, Wei J. Investigation of out of plane compressive strength of 3D printed sandwich composites. In IOP conference series: materials science and engineering 2016 (Vol. 139, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.
- [15] Justo J, Távara L, García-Guzmán L, París F. Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites. *Composite Structures*. 2018 Feb 1;185:537-48.
- [16] Caminero MA, Chacón JM, García-Moreno I, Reverte JM. Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Polymer Testing*. 2018;68:415-23.
- [17] Goh GD, Yap YL, Agarwala S, Yeong WY. Recent progress in additive manufacturing of fiber reinforced polymer composite. *Advanced Materials Technologies*. 2019;4(1):1800271.
- [18] Blok LG, Longana ML, Yu H, Woods BK. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing*. 2018;22:176-86.
- [19] Caminero MA, Chacón JM, García-Moreno I, Rodríguez GP. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*. 2018;148:93-103.
- [20] Agarwal K, Kuchipudi SK, Girard B, Houser M. Mechanical properties of fiber reinforced polymer composites: A comparative study of

extrusion-calendering process. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2022;35(3):303-19.

[32] 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.