Review Article

Polymerization
Quarterly, 2021
Volume 11, Number 3
Pages 44-60
ISSN: 2252-0449

A Brief Review on Three-Dimensional Printed Continuous Fiber-Reinforced Polymer Composites

Javad Rafiei and Ahmad Reza Ghasemi*

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan,

P.O. Box 87317-51167, Kashan, Iran

Received: 31 December 2020, Accepted: 7 April 2021

Abstract

Fiber reinforced composites offer exceptional directional mechanical properties, and the combination of their advantages with the capability of 3D printing has been resulted in many innovative research fronts. Three-dimensional printing technology is most widely used in automotive, aerospace, building, metal and alloy, electronics and biomedical industries. The most notable reason for the widespread acceptance of this technology is the ability to create intricate design at minimized process steps with the freedom to fabricate reinforcement as required. This review aims to summarize the methods and findings of research conducted on 3D-printed continous fiber reinforced composites by fused deposition modeling (FDM). It is shown that factors affecting the fabrication of these composites such as fiber orientation, fiber volume fraction, and stacking sequence as well as, printing parameters such as infill density, infill pattern, nozzle speed, layer thickness, built orientation, nozzle and bed temperatures have a great effect on mechanical properties. In the present paper, a brief history of the three-dimensional printing of continous fiber reinforced composites, mechanism of embedding different continuous fibers into different plastics and their microstructural and mechanical properties including predicting models have been reviewed. In addition, future research is defined based on current constraints and challenges.

Key Words

**composite,
three-dimensional printing,
continuous fiber,
mechanical properties,
fused deposition modeling**

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ghasemi@kashanu.ac.ir

مقاله مروری

بسپارش
فصلنامه علمی
سال یازدهم، شماره ۳
صفحه ۶۰-۴۴، ۱۴۰۰
ISSN: 2252-0449

مروری کوتاه بر کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف پیوسته چاپ‌شده سه‌بعدی

جواد رفیعی، احمدرضا قاسمی*
کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۸۷۳۱۷-۵۱۱۶۷

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۱۸

چکیده

کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته، خواص مکانیکی درخور توجهی را ایجاد می‌کنند و ترکیب مزایای آن‌ها با قابلیت‌های فناوری چاپ سه‌بعدی در بسیاری از پژوهش‌های جدید مورد توجه واقع شده است. فناوری چاپ سه‌بعدی در زمینه‌های صنایع خودرو، هوافضا، ساختمان، فلز و آلیاژ، الکترونیک و زیست‌پزشکی بیشترین کاربرد را دارد. شایان توجه‌ترین دلیل پذیرش گسترده این فناوری، قابلیت ایجاد طرح پیچیده در حداقل مراحل فرایند با آزادی عمل در استفاده از تقویت‌کننده‌های لازم است. هدف از این بررسی، ارائه روش‌ها و پژوهش‌های متمرکز بر کامپوزیت‌های چاپ‌شده سه‌بعدی تقویت‌شده با الیاف پیوسته با استفاده از روش چاپ مدل‌سازی مذاب‌نشانی به‌طور خلاصه است. افزون بر این نشان داده شده است، عوامل مؤثر بر ساخت این کامپوزیت‌ها از قبیل جهت‌گیری الیاف، کسر حجمی الیاف و رزین و همچنین پارامترهای چاپ از قبیل چگالی تراکم داخلی، الگوی چاپ، سرعت شیپوره، ضخامت لایه، جهت ساخت و دمای شیپوره و نوارها بر خواص مکانیکی اثر فراوان دارند. در کار حاضر، تاریخچه مختصری از چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف پیوسته، روش جادهی الیاف پیوسته مختلف در پلیمرهای متفاوت، خواص ریزساختار مکانیکی و نیز مدل‌های استفاده‌شده برای پیش‌بینی رفتار آن‌ها، بررسی شده است. افزون بر این، براساس محدودیت‌ها و چالش‌های فعلی، پژوهش‌های آینده تعریف شده است.



جواد رفیعی



احمدرضا قاسمی

واژگان کلیدی

کامپوزیت،
چاپ سه‌بعدی،
الیاف پیوسته،
خواص مکانیکی،
مدل‌سازی مذاب‌نشانی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
ghasemi@kashanu.ac.ir

مقدمه

چاپ سه‌بعدی (3DP) واژه‌ای کلیدی در ساخت افزایشی (additive manufacturing) مواد است که در سال‌های اخیر، دانشمندان به آن توجه بیشتری داشته‌اند. این فناوری در چند سال گذشته رشد شایان توجهی داشته است و پیش‌بینی می‌شود، به‌کمک این فناوری با ایجاد مواد کارا برای صنایع تولیدی، انقلاب جدیدی ایجاد شود. ساخت و کارایی قطعات با ساخت افزایشی می‌تواند براساس روش و مراحل مختلف مونتاژ مانند کشش مواد، پلیمرشدن، ذوب بستر پودر (powder bed fusion)، جت مواد و جت چسب متفاوت باشد [۱]. در حال حاضر، اصل کشش مواد، به‌عنوان مدل‌سازی مذاب‌نشانی (fused deposition modeling, FDM) به‌دلیل راحتی و کمی هزینه‌بری، به‌عنوان پرکاربردترین فناوری در میان انواع فناوری چاپ سه‌بعدی در سراسر جهان در نظرگرفته شده است [۲]. ارزیابی FDM با چاپ رزین گرمانرم آغاز می‌شود که به‌عنوان ساخت رشته مذاب (fused filament fabrication, FFF) شناخته می‌شود. مواد چاپ‌شده با FFF خواص مکانیکی ضعیفی نشان می‌دهند، از این رو معمولاً به‌عنوان محصولات اولیه استفاده می‌شوند [۳]. به‌منظور تقویت عملکرد کامپوزیت‌های پلاستیک، تقویت‌کننده‌های مختلف به‌عنوان مثال، کربن سیاه، الیاف خردشده و رشته‌های کوچک پلیمری با ماتریس گرمانرم مخلوط شده و در طول چاپ با هم کشیده می‌شوند. عملکرد این کامپوزیت‌ها به‌مقدار درخور توجهی به جهت‌گیری الیاف در بخش پلاستیک و کسر حجمی الیاف (FVF) بستگی دارد. با این حال، هنوز هم عملکرد مکانیکی ضعیف‌تری را در مقایسه با کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف به روش سنتی نشان می‌دهند. بنابراین، برای گسترش کاربرد فناوری چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های کارا، نیاز به کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف بیش از پیش احساس می‌شود. فناوری موجود با این ویژگی به‌عنوان ساخت الیاف پیوسته (continuous fiber fabrication, CFF) شناخته می‌شود [٤]. در این مقاله، ابتدا به تاریخچه چاپ سه‌بعدی و روش تولید کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف و در ادامه به مواد مصرفی، خواص، چشم‌انداز آینده و همچنین پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده پرداخته شده است.

تاریخچه و روند تکامل

هر چند تنها چهار دهه از ظهور رسمی فناوری چاپ سه‌بعدی می‌گذرد، ولی رشد انقلابی پژوهش در مهندسی و فناوری، این نوآوری را به سطح بلوغ خود رسانده است. دهه اول بین سال‌های ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۰ است که ارائه رسمی دو چاپگر سه‌بعدی محبوب و پرکاربرد تف‌جوشی لیزری گزینشی (selective laser sintering, SLS) و مدل‌سازی مذاب‌نشانی (FDM) را در برداشت. Chuck Hull اولین اختراع ثبت‌شده با عنوان دستگاه تولید اشیای سه‌بعدی از لیتوگرافی سه‌بعدی (SLA) را در سال ۱۹۸٦ ارائه کرد. در همان سال، Carl Deckard نخستین دستگاه SLS را به ثبت رساند که قابلیت ذوب ذرات پلاستیکی، فلزی، سرامیکی یا شیشه را با استفاده از لیزر پرانرژی و ساخت جسم جامد سه‌بعدی دارا بود. Scott Crump در سال ۱۹۸۹ رایج‌ترین چاپگر رومیزی سه‌بعدی، FDM، را اختراع کرد.

دهه دوم توسعه از سال ۱۹۹۱ تا۲۰۰۰، شامل تحولات زیادی در چاپگرهای سه‌بعدی موجود، ارائه چاپگرهای جدید و همچنین ظهور مواد جدید برای آن‌ها بود. پژوهش‌هایی به‌منظور بهبود عملکرد فنی چاپگرها شامل ساخت لایه‌ای اجسام، پخت جامد، ریخته‌گری مستقیم و چاپ در مقیاس بزرگ در این دهه انجام گرفت. این تلاش‌ها به چند پیشرفت برجسته مانند توسعه اندام چاپ‌شده، مثانه ایجادشده از سلول‌های خود بیمار و انعطاف‌پذیری در طراحی با امکان چاپ مواد سخت و نرم با عملکردهای مختلف منجر شد. انعطاف‌پذیری عملکردی، دقت، وضوح زیاد، چاپگرهای شخصی، کاربرپسندی، دسترسی آسان به‌همراه رونق پژوهش‌ها برای تهیه مواد جدید با خواص بهبودیافته محصول از پیشرفت‌های درخور ملاحظه‌ای بوده که در طول دهه سوم از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ رخ داده است. تولید قطعات بزرگ با سرعت زیاد و دقت کافی، سامانه ذوب با باریکه الکترون (electron beam melting, EBM)، ذوب انتخابی لیزری (selective laser melting, SLM) و چاپگر سه‌بعدی رنگی از اتفاقات این دهه است. همچنین، تحولات در حوزه ماده این دهه شامل ساخت اولین کلیه چاپ‌شده توسط پژوهشگران چینی، رگ خونی انسان، پروتزهای چاپ سه‌بعدی بدون مونتاژ قطعات، ایجاد محصولات مصرفی، اولین پوشاک آماده پوشیدن، عروسک برای پویانمایی فیلم سه‌بعدی و مبلمان چاپ‌شده سه‌بعدی می‌شود. رویداد مهم دیگر این دهه، انقضای حق ثبت اختراع روش FDM بود که دسترسی به آن را گسترده‌تر کرد. پس از آن، هزاران ذی‌نفع در سراسر جهان استفاده از این فناوری را آغاز و آن را تجربه کردند. از سال ۲۰۱۱ تا به امروز، بیشتر تلاش‌ها به استفاده از این فناوری برای مواد حساس با اهداف چندبعدی از محصولات شخصی تا صنعتی مانند غذا، اسباب‌بازی، جواهرات، خودرو، ساختمان، پوشاک و لوازم جانبی مد، زیست‌پزشکی، رباتیک و هواپیما مربوط بوده است. در سال ۲۰۱٦، Matsuzaki و همکاران کامپوزیت‌های سه‌بعدی با الیاف پیوسته را ارائه کردند که روش ساخت شایان توجهی برای تنظیم ویژگی‌های مکانیکی قطعات چاپی با هندسه

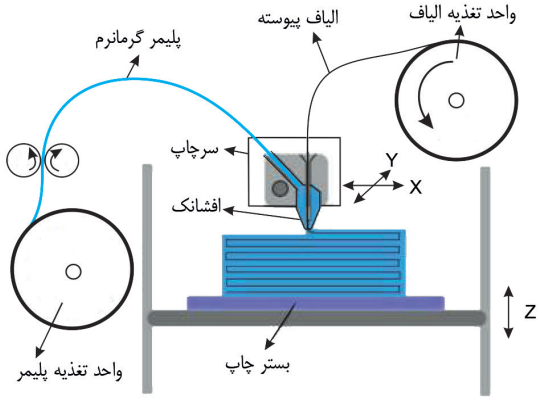
پیچیده بوده و به تولید مواد مختلف منجر می‌شود [۳].

مواد و روش ساخت الیاف پیوسته

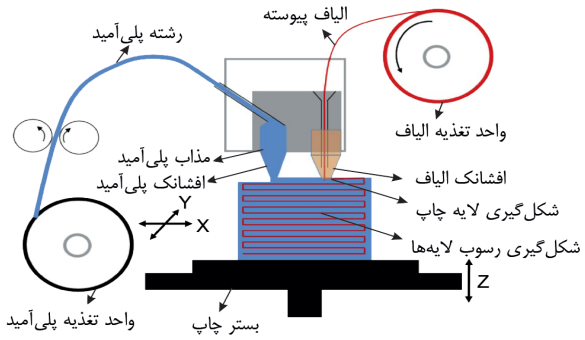
توصیف عملکرد

مراحل اساسی ایجاد یک شیء با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی در تمام فناوری‌های موجود یکسان است و از سه مرحله اساسی ایجاد یک مدل سه‌بعدی، برش و چاپ آن تشکیل شده است. ابتدا لازم است تا یک شیء سه‌بعدی مجازی (پوشه قطعه) با استفاده از نرم‌افزار ایجاد شود که به‌راحتی برای نرم‌افزارهای برش قابل خواندن است. نرم‌افزار برش به‌گونه‌ای طراحی شده است که روی هر لایه دوبعدی از مدل سه‌بعدی آن شیء کار کند و اطلاعات آن را برای چاپ به چاپگر منتقل کند. فناوری چاپ براساس روش چاپ و شکل فیزیکی مواد اولیه با یکدیگر متفاوت است [۱].

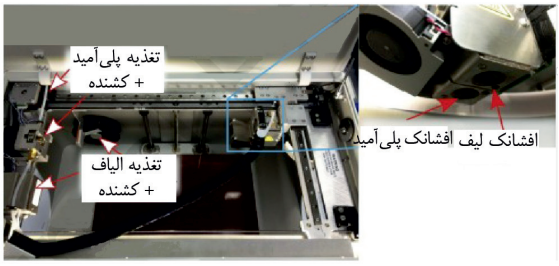
شکل ۱ نمایی از روش ساخت پیوسته الیاف با استفاده از چاپگرهای سه‌بعدی سنتی با سر چاپ اصلاح‌شده را نشان می‌دهد که برخلاف کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف تکه‌تکه، دارای دو ماده جداگانه برای ماتریس (رزین) و الیاف تقویت‌کننده است. شیپوره خروجی، هر دو پلیمر گرمانرم و الیاف پیوسته را دریافت می‌کند و الیاف پیوسته برای عبور از هسته شیپوره آماده می‌شوند. هنگامی که شیپوره گرم می‌شود، تزریق ماتریس اتفاق می‌افتد و ماده گرمانرم مذاب به‌همراه الیاف تقویت‌کننده نشانده می‌شوند. دمای شیپوره براساس خواص گرمایی پلیمر گرمانرم انتخاب می‌شود. به محض اینکه مواد به بستر چاپ می‌رسند، به‌سرعت جامد می‌شوند و به لایه قبلی می‌چسبند. سر چاپ برای حرکت در دو بعد (جهت‌های X-Y) طراحی شده است. هر لایه مطابق مسیر مدل سه‌بعدی طراحی به‌کمک رایانه (computer-aided design, CAD)



شکل ۱- نمایی از روش ساخت الیاف پیوسته با تک شیپوره [۵].



(الف)



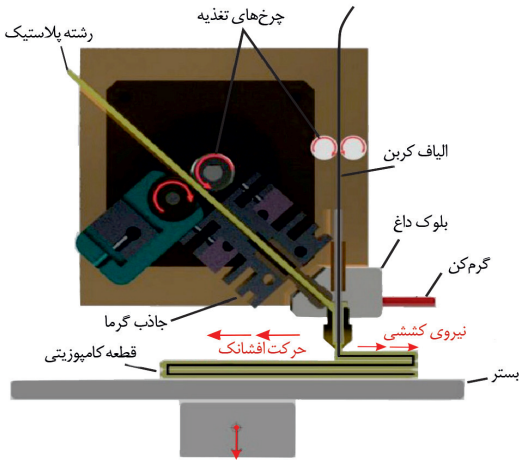
(ب)

شکل ۲- (الف) نمایی از روش ساخت پیوسته الیاف با شیپوره دوتایی و (ب) سامانه شیپوره دوتایی [۶].

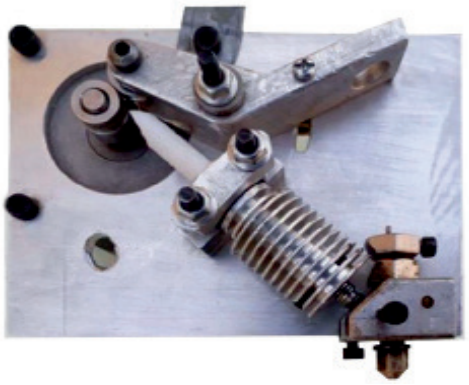
با نرم‌افزار برش منتقل می‌شود. حرکت سوم در امتداد جهت Z به فاصله برابر با ضخامت لایه، به‌وسیله الگوی ساخت پس از ساخت هر لایه انجام می‌شود که تا زمان تکمیل سازه ادامه می‌یابد [۵].

با ادامه پیشرفت‌ها، سر چاپ با دو شیپوره خروجی جداگانه برای پلاستیک و الیاف تقویت‌کننده ارائه شد که امکان ساخت مواد را با روش مناسب فراهم می‌کند. در اینجا، برخلاف سامانه تک شیپوره، لایه‌های منحصر به فردی را می‌توان برای تقویت انتخاب کرد. دو شیپوره به‌طور هم‌زمان کار نمی‌کنند، بلکه یکی متوقف می‌شود و دیگری کار می‌کند. الیاف پیوسته در طول بیرون‌آمدن به لایه قبلی می‌چسبند و با پلاستیک یک‌پارچه می‌شود. شکل‌های ۲-الف و ۲-ب به‌ترتیب نمایی از روش چاپ چاپگر و سر چاپ با دو شیپوره را نشان می‌دهد. سایر نمونه‌های دستگاه که از لحاظ سرعت، لایه‌لایه‌شدگی، به‌حداقل‌رساندن فضاهای خالی، بهره‌وری و چاپ‌پذیری بر محدودیت‌های سایر دستگاه‌ها غلبه کرده‌اند، نیز ارائه شده است [۶].

حیدری و همکاران طرح جدیدی از کشنده قابل نصب روی سر چاپ دستگاه‌های FDM را ارائه کرده‌اند که عملکرد آن باعث بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها شده است. این طرح در شکل ۳ نشان داده شده است [۷].



(الف)



(ب)

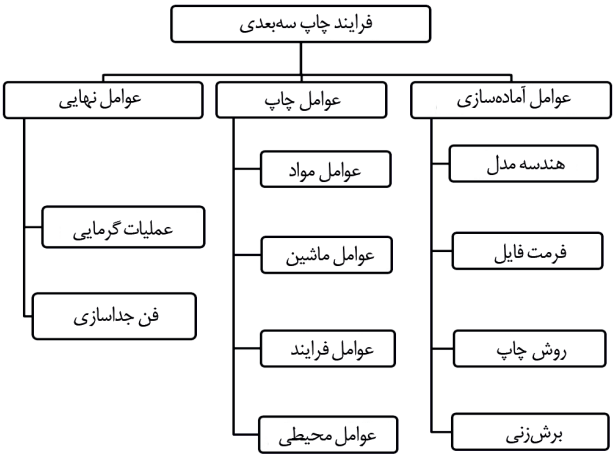
شکل ۳- (الف) نمایی از طرح جدید کشنده و (ب) کشنده ساخته شده [۷].

عوامل مؤثر بر کیفیت ساختارهای چاپ سه‌بعدی

کیفیت و ویژگی‌های قطعات چاپی به عوامل زیادی بستگی دارد که می‌توان آن‌ها را به سه مرحله اصلی آماده‌سازی، چاپ و تکمیل تقسیم کرد. در شکل ٤ تمام عوامل مرتبط با کیفیت و کارآیی کامپوزیت‌های چاپ سه‌بعدی موجود در پژوهش‌ها به‌طور تقریبی طبقه‌بندی شده‌اند.

عوامل آماده‌سازی

وضوح و کارایی مدل مدنظر به‌طور شایان توجهی به فناوری استفاده‌شده در چاپ بستگی دارد و تهیه مواد و چاپ نیز بر همین اساس متفاوت است. تعدادی از برنامه‌های کاربردی مختلف مانند OBJ، AFM، FBX، COLLADA، 3DS، IGES، STEP و X3D دردسترس هستند، تا افزون بر ایجاد قالب مورد پذیرش، پوشه مدل سه‌بعدی را نیز به چاپگر ترجمه کنند. نرم‌افزار برش کل ساختار را به واحد مؤلفه چاپ، هاشور-دانه (raster/bead) تقسیم و طراحی



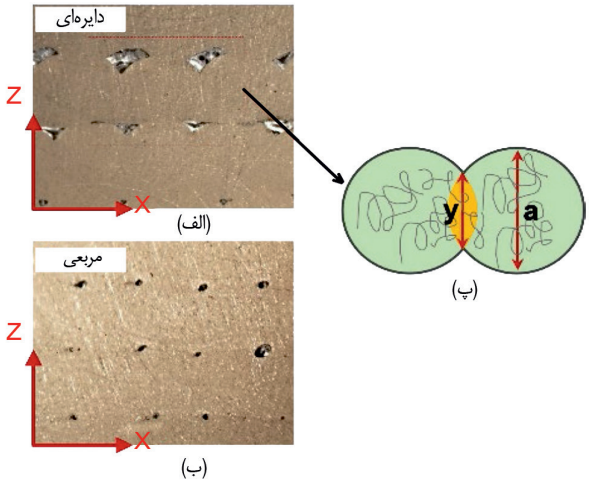
شکل ٤- عوامل مؤثر بر کیفیت کامپوزیت‌های چاپ سه‌بعدی.

می‌کند. بسته به ظرفیت دستگاه، می‌توان طراحی را در همه ابعاد درگیر کرد که درنهایت به آزادی طراحی، انتخاب مواد و آزادی حرکت کمک می‌کند [٦].

عوامل چاپ

مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد و معماری کامپوزیت‌های چاپ سه‌بعدی، مواد، ماشین، فرایند و عوامل محیطی است. بدیهی است، ماتریس و مواد تقویت‌کننده، تعیین‌کننده اصلی خواص قسمت چاپ هستند. عوامل دستگاه مربوط به بهره‌وری چاپگرهاست. دمای شیپوره، روش گرمایش و قطر و هندسه شیپوره بر کیفیت چاپگر اثر می‌گذارد. دما و کالیبره‌کردن با توجه به مواد در حال فراوری تنظیم می‌شوند. قطر شیپوره بر وضوح چاپ [٦] و انتخاب دمای مناسب به‌طور درخور توجهی بر بهره‌وری و کیفیت چاپ اثرگذارند. دمای زیاد، به‌دلیل چسبندگی کم و خاصیت رئولوژیکی بهتر باعث پیوند بین‌لایه‌ای بهتر و ایجاد حفره کمتر می‌شود و خواص مکانیکی بهتری را نشان می‌دهد [٨]. تغییر هندسه شیپوره از دایره‌ای به مستطیل، با کاهش فضای خالی، ویژگی‌های مکانیکی را تا حد درخور توجهی بهبود می‌بخشد (شکل ٥) [٩].

بیشترین عوامل مطالعه‌شده در فناوری FDM، پارامترهای فرایند است. سرعت چاپ اثر کمی بر استحکام کششی دارد، اما اثر آن بر هزینه تولید درخور توجه است. سرعت کم تغذیه به افزایش پیوند بین‌لایه‌ای کمک می‌کند، اما بر بهره‌وری تأثیر منفی دارد و هزینه محصول را افزایش می‌دهد. زاویه‌های تصویر و ماده نشانده‌شده یا هاشور نسبت به جهت افقی، اثر بیشتری بر استحکام کششی، چقرمگی و شکل‌پذیری دارد. Ning و همکاران جهت‌گیری الیاف‌های ۰، ۹۰ و ٤٥° را مطالعه کردند. یافته‌های این

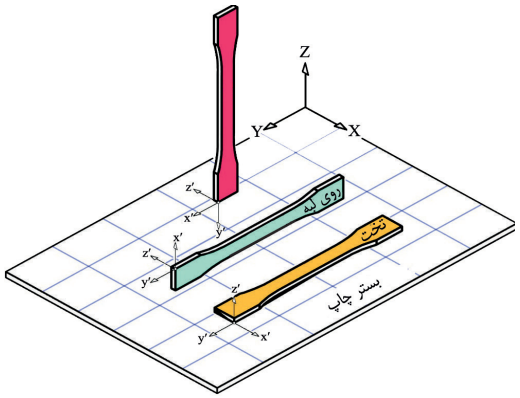


شکل ۵- اثر هندسه شیپوره بر کاهش تشکیل حفره: (الف) دایره‌ای، (ب) مربعی، (پ) ایجاد اتصال هم‌پوشانی میان دو نوار مجاور [۹].

پژوهشگران نشانگر استحکام کششی به‌دلیل چسبندگی بین سطحی ضعیف ماتریس و الیاف تقویت‌کننده و انعطاف‌پذیری بهتر آن‌ها بود [۱۰،۱۱]. جهت‌گیری الیاف، الگوی‌های تزریق مختلف مانند لانه‌زنبوری، شش‌ضلعی، مثلثی و جامد تغییر چشمگیری در چسبندگی سطحی، اتصال بین‌لایه‌ای، کشش، فشار، خمش و خاصیت ضربه را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، الگوی پر شدن جامد ممکن است، مقاومت کمتری در برابر ضربه نسبت به سایر الگوها داشته باشد. زیرا، شکاف‌های هوای آزاد موجود در سازه‌های ساخته‌شده با سایر الگوها به جذب شوک ضربه‌های بزرگ کمک می‌کند. Mei و همکاران به بررسی اثر روش‌های مختلف لایه‌گذاری بر استحکام کششی و مدول کشسانی کامپوزیت‌های تقویت‌شده پلی‌آمید یا نایلون (PA) با الیاف کربن (CF)، الیاف شیشه (FG) و کولار (K) پرداختند. آن‌ها نشان دادند، پرکردن مستطیلی و پس از آن شش‌ضلعی و مثلثی‌شکل بیشترین استحکام کششی را به‌دنبال دارد [۱۲]. شکل ٦، سه جهت‌گیری اصلی ساخت را نشان می‌دهد. خواص مکانیکی بهتر، برای پایدارترین جهت‌گیری به‌دست آمده که در آن سطح تماس بین سکوی چاپ و سازه بیشتر است [۱۱]. این نمونه با ضخامت کمتر لایه، چگالی ساخت خوب و استحکام بیشتر بین لایه‌ها را نشان می‌دهد که به خاصیت سطحی افزون‌تر منجر می‌شود [۱۰].

عوامل نهایی

پس از چاپ با روش FDM، لازم است قطعات چاپ‌شده از سکوی چاپ جدا شوند که نیازمند دقت زیادی است. به‌عنوان



شکل ٦- جهت‌گیری ساخت [۱۱].

مثال در برخی موارد، پیش از چاپ استفاده از چسب مخصوص توصیه می‌شود که باعث چسبندگی بهتر قسمت چاپ‌شده به بستر چاپ می‌شود. درنتیجه، فرایند جداسازی مطمئن مهم است. Papon و همکاران بهبود مقاومت کششی، مدول و استحکام را به‌ترتیب ۱۱/۲، ۷۰ و ٦/٦٪ گزارش کردند. آن‌ها دلیل این اتفاق را فرایند پس از پخت نمونه و پیامد آن کمک به بهبود بلورینگی پلیمر، پیوند بهتر بین سطحی با الیاف تقویت‌کننده و کاهش فضای خالی عنوان کردند [۹].

مواد به‌کاررفته

در کامپوزیت‌های پایه پلیمری از الیاف پیوسته به‌عنوان تقویت‌کننده و رزین‌های پلیمری به‌عنوان ماتریس استفاده می‌شود. در بررسی Wang و همکاران ذکر شده است، هنگام ساختن کامپوزیت، انتخاب ماتریس و تقویت‌کننده باید از نظر فیزیکی (چسبندگی خوب)، شیمیایی (ماتریس و الیاف نباید به‌طور شیمیایی واکنش دهند) و گرمایی (رفتار گرمایی مشابه، ضریب انبساط گرمایی) سازگار باشند [۱]. برخی از مواد به‌کارفته در ساخت سه‌بعدی قطعات پیوسته در جدول ۱ درج شده‌اند.

افزون بر این، آماده‌سازی الیاف پلیمر و همچنین عوامل فراوری آن مانند دمای ذوب، گرانروی، رئولوژی و جامدشدن از نظر مکانیک پلیمرها مهم بوده و نقش مهمی در عملکرد (خواص مکانیکی، وضوح و دقت) قطعات چاپ دارند. تعدادی از پژوهشگران، جزئیات لازم برای تهیه پلیمر و ملاحظات فرایند در سامانه ساخت سه‌بعدی FDM را به تفصیل شرح داده‌اند [۱۵،۱٦]. آماده‌سازی الیاف پلیمری شامل شکل‌شناسی پلیمر، سختی لیف، شکنندگی، نرمی، پایداری ابعادی و پیچیدن مناسب روی قرقره است. شکل‌شناسی بی‌شکل برای پلیمر در روش FDM/FFF

جدول ۱- مواد به‌کاررفته در ساخت الیاف پیوسته.

نوع کاربری	مواد	چگالی (g/cm^3)	قطر (µm)	مدول کششی (GPa)	مدول خمشی (GPa)	مرجع
ماتریس	Onyx	۱/۲	۱۷۵۰	۱/۴	۲/۹	۱۳
	پلی‌آمید	۱/۱	۱۷۵۰	۰/۹۴	۰/۸۴	۱۳
	پلی‌لاکتیک اسید (PLA)	۱/۲۵	۱۷۵۰	۲/۰۲	۲/۳۹۲	۷ و ۱۴
	آکریلونیتریل بوتادی‌ان استیرن (ABS)	۱/۰۴	۱۷۵۰	۰/۹۹۸	۱/۹	۱۴
الیاف پیوسته	کربن	۱/۱-۳/۴	۴۰۰	۵۴	۵۱	۷
	کولار	۱/۲	۳۰۰	۲۷	۲۶	۱۲
	الیاف شیشه	۱/۵	۳۰۰	۲۱	۲۲	۱۲
	چتایی	۱/۱-۳/۴۵	۲۰	۳۹/۴	-	۳

مدنظر است، به‌طوری که می‌تواند تحت سرمایش سریع قرار گیرد که درنهایت به دقت ابعادی بهتر قطعات چاپ کمک می‌کند. از این نظر، پلی‌آمیدها نسبت به سایر پلیمرهای نیمه‌بلوری و بلوری ترجیح داده می‌شوند، زیرا دارای ساختار بی‌شکل هستند. پلیمرهای نیمه بلوری با درجه تبلور کم (٪۳۲-۲۰) مانند پلی‌اتر اتر کتون (PEEK) نیز می‌توانند بسته به ساختارهای مولکولی و ماهیت خنک‌کننده استفاده شوند. زیرا، پلیمرهای دارای درجه بلورینگی زیاد، تمایل به انقباض زیاد و کوچک‌شدن دارند که به پیچش قطعه پس از چاپ منجر می‌شود [۱۶].

الیاف پلیمری باید (به قطر mm ۱/۷۵) به‌طور موازی، نه خیلی شکننده و نه خیلی نرم برای جلوگیری از لغزش و اطمینان از گرفته‌شدن مناسب به‌وسیله چرخ دنده‌ها روی قرقره قرار گیرند تا فشار روی لیف به‌حداقل برسد [۱۵،۱۶]. از آنجا که لیف پلیمر، فشار پلیمر مذاب را در شیپوره چاپ برای نشاندن تامین می‌کند، باید آن را به اندازه کافی سفت و محکم نگه دارد تا مقدار مذاب‌نشانی حفظ شود [۱۵]. خواص گرانروی‌کشسانی مذاب پلیمر، دقت ابعادی لازم برای قطعه چاپ‌شده و چسبندگی لایه‌به‌لایه با انتخاب مناسب شیپوره و دمای بستر کنترل می‌شود. گرانروی مذاب پلیمر باید با کنترل سرعت برش و دمای شیپوره تنظیم شود تا مذاب پلیمر به راحتی از شیپوره عبور کند [۱۷]. سرعت برش کم در فرایند مذاب‌نشانی مطلوب است، زیرا سرعت برش زیاد می‌تواند باعث کشش و جداشدگی شده و به تخریب پلیمر منجر شود [۱۵]. مقدار جریان مذاب بسته به دما و درصد تراکم داخلی با استفاده از شاخص جریان مذاب تعیین می‌شود. با این حال، تعیین گرانروی مناسب مذاب به‌عنوان تابعی از دما و فشار، بسیار پیچیده است [۱۵،۱۶]. در سینتیک جامدسازی، باید دو نیاز هم‌زمان یعنی سرمایش سریع و چسبیدن لایه‌های مجاور تضمین شوند. سرمایش سریع با قوام و دقت ابعادی مرتبط است. از سوی دیگر، حالت شیشه‌ای کمی برای اطمینان از چسبندگی بین‌لایه‌ای با چسباندن لایه‌های مجاور به هم لازم است [۱۷]. در هنگام سفت‌شدن، تنش داخلی باید حداقل باشد تا از پیچ‌خوردگی و لایه‌لایه‌شدن قطعه در بستر چاپ جلوگیری شود [۱۶]. مطالعات آینده برای تخمین و بهینه‌سازی گرانروی مذاب در سامانه CFF با شیپوره هم‌محور و همچنین مونتاژ شیپوره الیاف برای سامانه‌های تک‌شیپوره پیشنهاد شده است.

نتایج و تحلیل

به‌منظور بررسی عملکرد کامپوزیت‌های CFF، رفتارهای مکانیکی به‌طور گسترده بررسی شده‌اند. افزون بر این، درباره ساختارهای کامپوزیتی چاپ سه‌بعدی، به‌دست‌آوردن توپولوژی سطح، سطح مقطع و ماهیت شکستگی بسیار مهم است تا بتوان نقص‌های ساختاری مانند فضاهای خالی و چسبندگی بین لایه‌ها را مشاهده کرد. همچنین، برخی پژوهشگران مدل‌های ریاضی و نظریه‌های کامپوزیتی مختلفی را برای ارزیابی همخوانی مقادیر پیش‌بینی‌شده به‌وسیله مدل و مقادیر تجربی خواص مختلف به‌کار برده‌اند.

خواص ریزساختاری

ریزساختارها در مقیاس‌های مختلف مانند نانو، میکرو و مزو

مربوط به دقت یک قطعه چاپ‌شده است. چاپ با دقت در مقادیر نانو و میکرو، به‌ویژه برای دستگاه‌های زیست‌پزشکی، بسیار مهم است. ماهیت تولید سامانه چاپ FDM (چاپ یک نوار در یک زمان و پیوستن به یکدیگر برای تشکیل لایه‌ای به‌عنوان کل ساختار)، دست‌یابی به دقت ابعادی زیاد را نسبت به سایر روش‌های ساخت سه‌بعدی، محدود می‌کند. عدم دقت در یک نوار (با توجه به سرعت‌های مختلف سرمایش و تنش‌های داخلی) می‌تواند به‌طور درخور توجهی بر صحت و دقت قطعه نهایی اثر بگذارد. متوسط دقت ابعادی مورد انتظار قطعه چاپ‌شده FDM کمتر از ۰/۵ mm است، در حالی که برای روش‌های SLA، SLS و جت مواد به‌ترتیب ۰/۳، ۰/۱ و ۰/۰۵ mm است [۱۸].

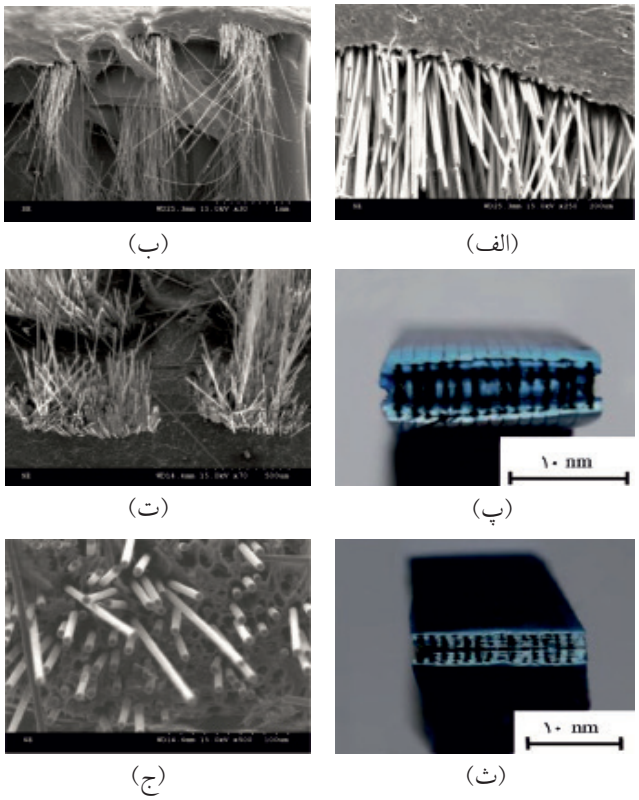
ساختار تقویت‌شده

تجزیه و تحلیل مزو و ریزساختاری سازه‌های چاپ سه‌بعدی شامل سطح، سطح مقطع و همچنین گرافیک شیوه‌های شکست به‌دلیل بارهای کششی، خمشی، فشاری، برشی و ضربه‌ای است. میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ پویشی لیزری و میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) معمولاً برای تهیه تصاویر استفاده می‌شوند. افزون بر این، از نرم‌افزار تجزیه و تحلیل تصویر و نیز تصاویر پویش‌شده برای تعیین تخلخل و FVF استفاده می‌شوند [۱۹،۲۰]. در فن چاپ با شیپوره دوتایی، توزیع ناهموار الیاف در ماتریس باعث ایجاد نواحی غنی از پلیمر و الیاف می‌شود که همگنی را محدود می‌کند. در نتیجه، منطقه غنی از الیاف به دلیل آغشتگی ضعیف با پلیمر ماتریس، تخلخل داخلی را حدود ٪۲ و احتمال شروع و انتشار ترک را افزایش می‌دهد [۱۹]. در صورت انجام فرایند کشش هم‌محور، که در آن دو شاخه رشته به‌طور مستقیم با ماتریس پلیمر به‌کمک سامانه تک‌شیپوره تغذیه می‌شوند، اوضاع ممکن است، به‌دلیل عدم اشباع کافی وخیم‌تر شود [۲۱]. این مسئله در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

همچنین، کنترل توزیع همگن پلیمر بسیار سخت است و تحت تأثیر دمای شیپوره و گرانروی پلیمر ماتریس مذاب قرار دارد. Meng و همکاران روش فرایند آغشته‌سازی الیاف پیوسته و اثر دمای پیش‌گرمایش و گرانروی مناسب بر دست‌یابی به لایه بهینه در کامپوزیت CF/PEEK را ارائه کردند که در شکل ۸ نشان داده شده است [۲۲].

ساختار کامپوزیت‌ها

قطعات چاپ‌شده شامل چند ساختار از جمله پوسته، مقدار جامد،

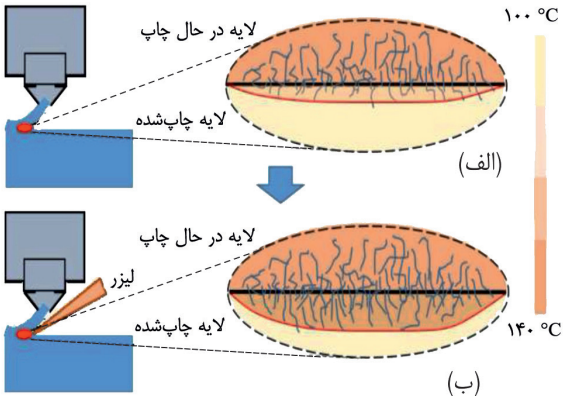


(الف) (ب) (پ) (ت) (ث) (ج)

شکل ۷- (الف)، (ب) و (پ) میکروساختار سطح مقطع شکست کامپوزیت CF/PLA با گرمای سرچاپ °C ۱۸۰، (ت)، (ث) و (ج) °C ۲۴۰؛ (ب) و (ت) سطح مقطع سرتاسری، (الف) و (ج) سطح مشترک و (پ) و (ث) الگوی شکست [۲۱].

تزریق و الیاف (شکل ۹) است. پوسته بخشی از کامپوزیت نیست، بلکه یک ساختار بیرونی از نمونه چاپ‌شده است. مقدار جامد فقط از ماتریس تشکیل شده و معمولاً پیش‌فرض لایه اولیه و آخری است. لایه تزریق میان لایه‌های جامد بالا و پایین قرار دارد و ممکن است، شکل‌های مختلف سلولی براساس اهداف چاپگر مانند شش‌ضلعی، مثلثی، لانه‌زنبوری داشته باشد. لایه‌های الیاف کولار، تقویت‌کننده هستند که براساس عملکرد مدنظر ساخته می‌شوند [۲۳].

شکل‌های ۱۰-الف و ب نمای برش‌خورده و از بالای کامپوزیت‌های CF/Nylon را نشان می‌دهد. در تصویر سطح مقطع، لایه‌های تقویت‌کننده سازه و ماتریس مشخص است. نمای درون‌صفحه‌ای از کامپوزیت الیاف تک‌لایه در شکل ۱۰-پ، ایجاد حلقه در لبه به‌دلیل حرکت شیپوره چاپ را نشان می‌دهد. Chabaud و همکاران شعاع حلقه نیم‌دایره‌ای را حدود ۰/۶ mm اندازه‌گیری کردند که البته ممکن است، بسته به اندازه لیف متفاوت باشد. شکل‌های ۱۰-ت تا ج تصاویر با بزرگ‌نمایی بیشتر هستند

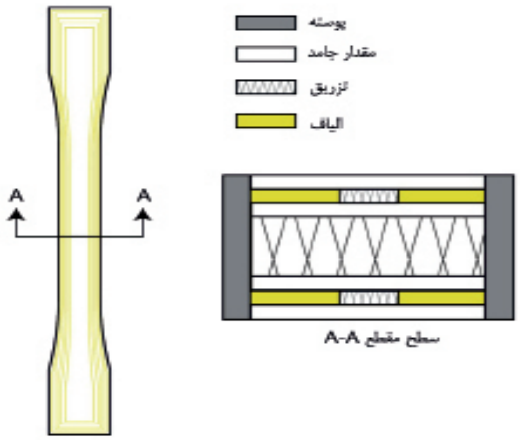


شکل ۸- نمودار توزیع اتصال بین‌لایه‌ای پلیمر: (الف) بدون کمک لیزر و (ب) با کمک آن [۲۲].

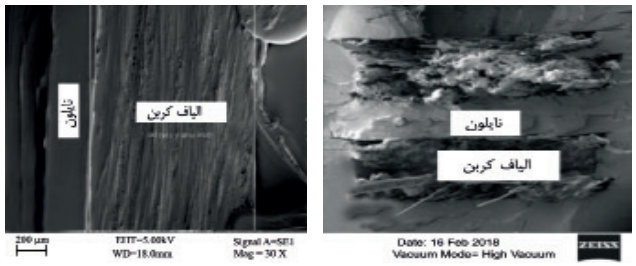
که ساختار متخلخل مواد چاپ را نشان می‌دهند. تخلخل زیاد در سازه چاپ سه‌بعدی به دلایل مختلف، از جمله قطر ناهمگن رشته، توزیع ناهموار ماتریس، اشباع ضعیف رشته و مناطق غنی از الیاف است. افزون بر این، ماهیت فرایند چاپ FDM یکی از دلایل ایجاد حفره است [٤]. شکل لایه نشانده‌شده به هندسه شبیوره بستگی دارد و هم‌پوشانی ضعیف میان نوارهای چاپ مجاور و لایه‌ها از دلایل عمده وجود حفره هستند.

ریزساختار شکست تحت بار کششی، خمشی و برشی

پژوهشگران ریزساختار کامپوزیت‌های شکسته‌شده، از جمله شکست کششی، خمشی، فشاری و برشی را در زیر بارهای مکانیکی مختلف بررسی کرده‌اند [۲۰،۲۵]. Goh و همکاران، رفتار کششی و خمشی کامپوزیت‌های پلی‌آمید تقویت‌شده با CF و FG را بررسی کردند. شکل ۱۱-الف روش شکست تحت بار کششی



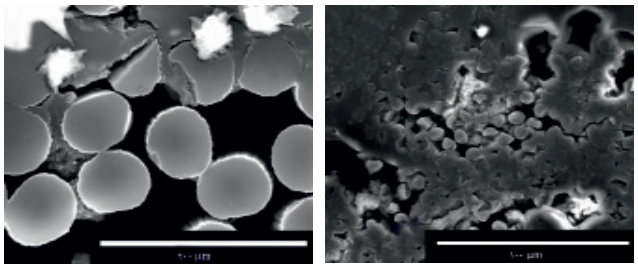
شکل ۹- نمایی از ساختار کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف چاپ‌شده سه‌بعدی [۲۳].



(ب) (الف)



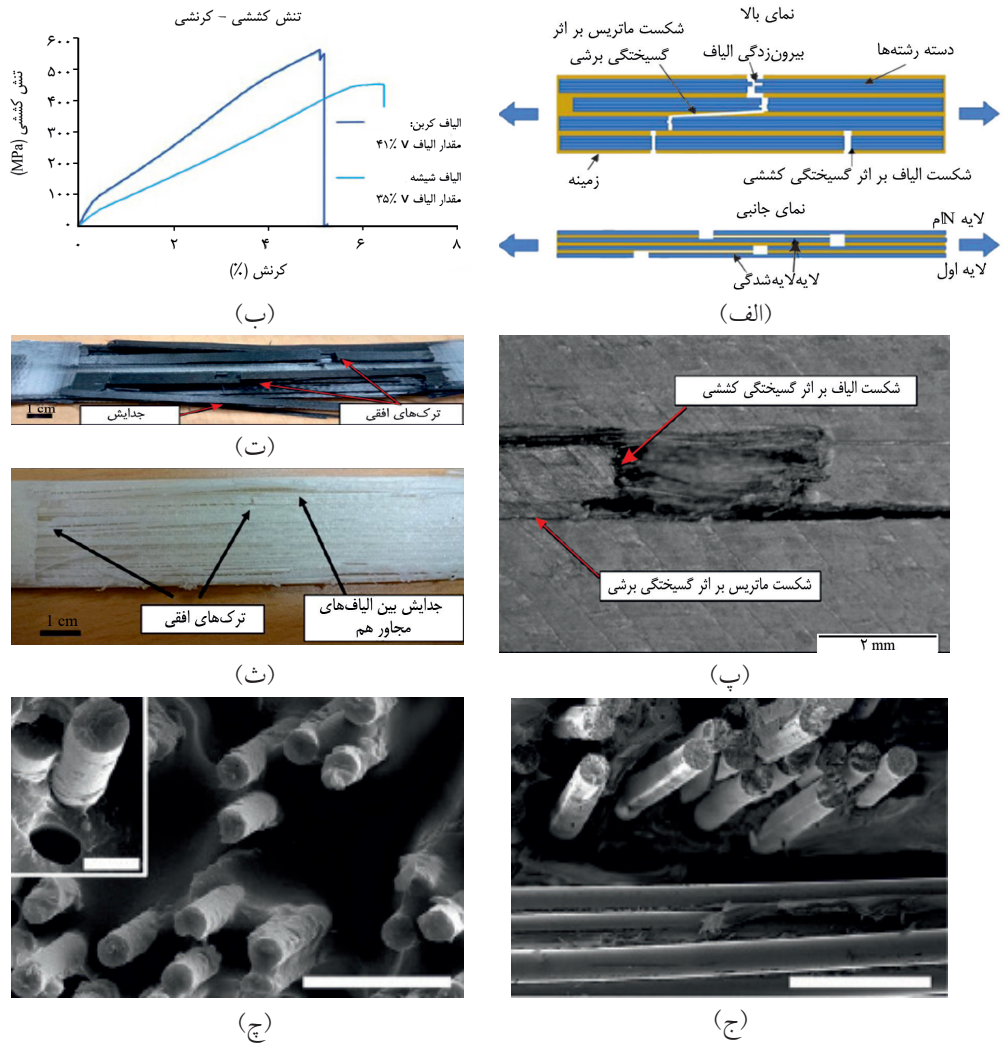
(ت) (پ)



(ج) (ث)

شکل ۱۰- نماهای مختلف از کامپوزیت CF/N: (الف) نمای برش‌خورده، (ب) نما از بالا [۱۳]، (پ) لایه تکی CF چاپ‌شده با شکست الیاف در اثر خمیدگی [۱۹]، (ت)، (ث) و (ج) بزرگ‌نمایی سطح مقطع نشان‌دهنده تخلخل [٢٤].

را نشان می‌دهد. شکل ۱۱-ب روابط تنش-کرنش خطی هر دو کامپوزیت CF و FG و کرنش ۵/۲ و ٦/۲٪ در استحکام کششی ٦۰۰ و ۱۲/۹۹ MPa را برای آن‌ها نشان می‌دهد. شکاف افقی در وادادگی کششی و لایه‌لایه‌شدگی و جدایش میان نوارهای مجاور و لایه‌ها در وادادگی برشی نشانگر پیوند متقابل ضعیفی است که در فرایند سفت‌شدگی ناکافی نشان‌داده‌شده در شکل‌های ۱۱-پ تا ث به‌وجود می‌آید [۲۰]. مطالعات ریزساختاری سطح مقطع شکست به درک ماهیت پیوند ماتریس و الیاف کمک می‌کند. شکل ۱۱-ج سطح مقطع شکستگی کشش کامپوزیت PA/CF تک‌جهتی و متقاطع را نشان می‌دهد. تعداد زیادی شکستگی الیاف حاکی از انتقال بار از ماتریس به الیاف است. همچنین، چسبندگی سطحی خوبی به‌همراه تعداد کمی سوراخ و خروج الیاف نشانگر آغشته‌سازی نامناسب یا منطقه پر از الیاف است [۲۵].

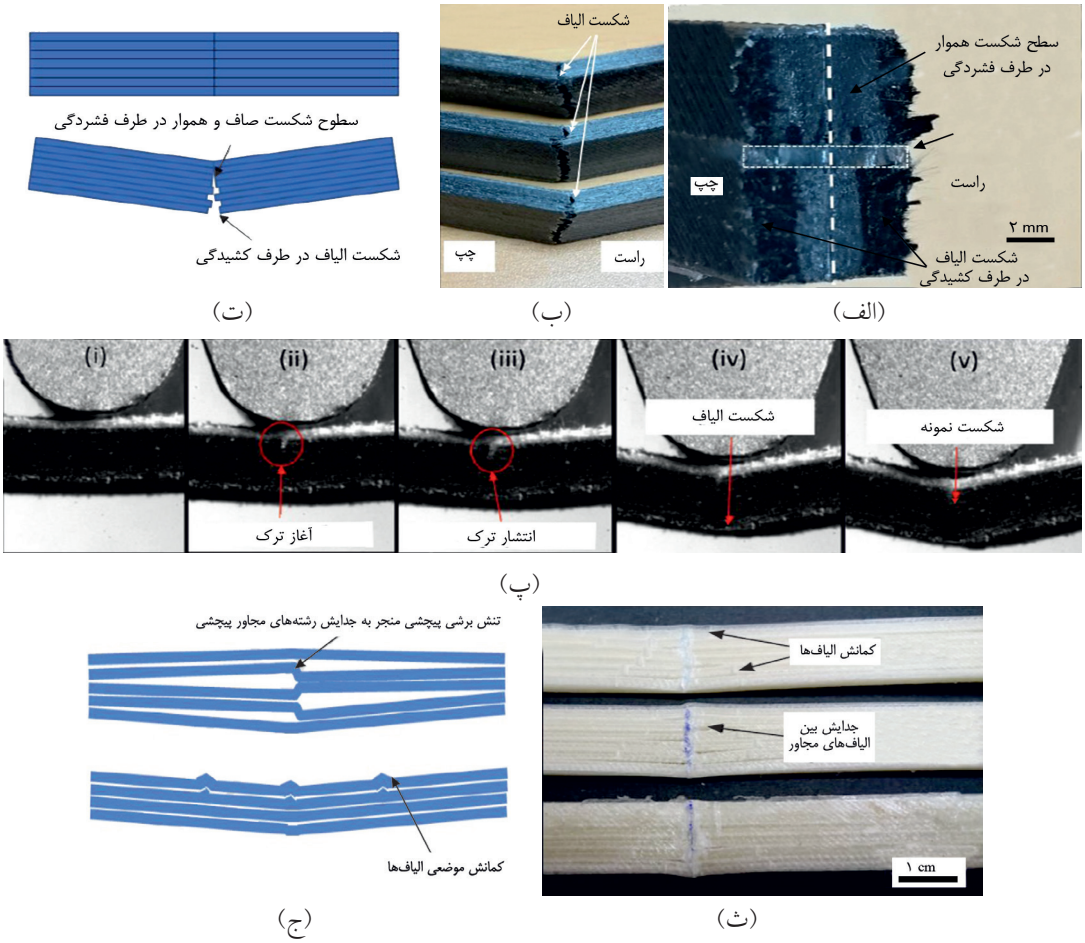


شکل ۱۱- (الف) روش شکست کششی کامپوزیت CFF، (ب) نمودار تنش-کرنش کامپوزیت‌های PA تقویت‌شده با CF و FG، (پ) ترک‌برداری ماتریس در اثر وادادگی برشی و شکست الیاف در اثر وادادگی کششی، (ت) و (ث) شیوه شکست شامل ترک و جداشدگی در کامپوزیت‌های CF و FG [۲۰] و تصاویر SEM از بیرون‌زدگی الیاف در سطح شکست کامپوزیت PA/CF با جهت‌گیری (ج) متقاطع و (چ) تک‌جهتی [۲۵].

شکست سازه به‌وسیله بار خمشی کامپوزیت‌های پلی‌آمید تقویت‌شده با الیاف CF و FG در شکل ۱۲ نشان داده شده است که با استفاده از دوربین پرسرعت ضبط شده‌اند. برای کامپوزیت CF/PA مشاهده می‌شود که ترک از لایه بالا شروع می‌شود. زیرا، ابتدا این لایه بار فشاری مستقیم موضعی را تجربه می‌کند و به سمت محور خنثی انتشار می‌یابد. این کار به شکست الیاف منجر می‌شود و به‌دنبال آن، با افزایش پیوسته بار خمشی شکست نهایی اتفاق می‌افتد (شکل‌های ۱۲-الف تا پ). افزایش بار خمشی به سایر لایه‌ها گسترش می‌یابد و درنهایت شکستگی اتفاق می‌افتد، همان‌طور که در شکل ۱۲-ت نشان داده شده است. ماهیت شکست کامپوزیت FG/PA با کامپوزیت CF/PA متفاوت است. این امر نه به‌دلیل تنش، بلکه به‌سبب کمانش موضعی انجام می‌شود که باعث پیچش برشی و شکست ماتریس می‌شود، که توسط Goh و همکاران توضیح داده شده است (شکل‌های ۱۲-ث و ج) [۲۰].

خواص مکانیکی

مطالعه خواص مکانیکی شامل ویژگی‌های شبه‌ایستا و پویاست. کشش، خمش، برش و ضربه به‌عنوان ویژگی‌های شبه‌ایستا و خزش، خستگی و رشد ترک از ویژگی‌های پویاست. برای کامپوزیت‌های CFF، تجزیه و تحلیل خواص دینامیکی کمتر یافت می‌شود. از سوی دیگر، در میان خواص شبه‌ایستا، کشش و خمش بیشتر بررسی شده‌اند. پژوهش‌ها شامل استفاده از الیاف پیوسته و



شکل ۱۲- شیوه شکست خمشی کامپوزیت CFF: (الف)، (ب) و (ت) پدیده شکست با افزایش تدریجی بار خمشی در کامپوزیت CF، (پ) چگونگی شکست، (ث) نمای کمانش FG از بالا، (ج) چگونگی شکست کامپوزیت‌های FG تحت بار خمشی [۲۰].

ماتریس‌های پلیمری مختلف، هندسه سازه‌ها، شرایط فرایند و پارامترهای چاپ می‌شود.

خواص کششی و خمشی

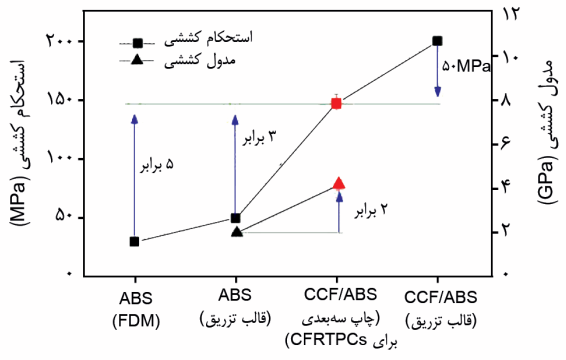
خواص کششی و به‌دنبال آن خواص خمشی عمده‌ترین معیارها برای ارزیابی عملکرد قطعات چاپ سه‌بعدی هستند. البته بررسی پژوهش‌های مختلف و طراحی آزمون‌ها در مقاله‌های منتشرشده، نتایج بسیار واگرایی را به‌دنبال دارد که مقایسه و نتیجه‌گیری معنی‌دار و ساختاریافته از آن‌ها را دشوار و امکان‌ناپذیر می‌سازد.

بدیهی است، هنگامی که کامپوزیت پلاستیک با الیاف پیوسته تقویت شود، استحکام کششی افزایش می‌یابد. این موضوع را می‌توان در شکل‌های ۱۳-الف و ب مشاهده کرد که استحکام کششی و خمشی به‌کمک الیاف تقویت‌کننده چند برابر افزایش یافته است [۵].

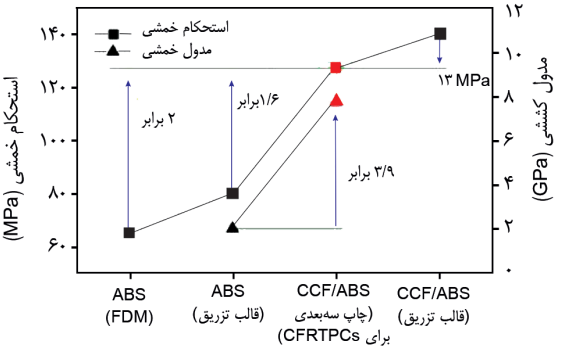
کامپوزیت‌های ساخته‌شده با روش‌های سنتی دارای خواص کششی و خمشی بسیار زیادی در مقایسه با کامپوزیت‌های تولیدی با روش FDM هستند [۵]. تخلخل زیاد، پیوند بین‌سطحی ضعیف به‌دلیل افت خواص و کمیت پلیمر و نواحی غنی از الیاف، پیوند بین‌لایه‌ای ضعیف میان نوارها و لایه‌های چاپ مجاور به‌دلیل هم‌پوشانی ضعیف، تزریق ضعیف ماتریس، هندسه شیپوره، جامدسازی و رئولوژی پلاستیک از عوامل اصلی این موضوع هستند.

همان‌طور که اشاره شد، بیرون‌زدگی الیاف نشانه بارز تزریق ضعیف است (شکل‌های ۱۱-ج و چ). Yang و همکاران استحکام برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت CF/ABS با ۱۰٪ کسر حجمی تقویت‌کننده تولیدشده به دو روش قالب‌گیری تزریقی و چاپگر سه‌بعدی هم‌محور را مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند، مقاومت کامپوزیت ساخته‌شده با روش چاپ ۸/۵ برابر کمتر است و این اختلاف را ناشی از تزریق ضعیف دانستند [۵].

عملکرد نهایی مکانیکی کامپوزیت‌های چاپ‌شده در اصل تحت تأثیر خواص مکانیکی ماتریس و مواد تقویت‌کننده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۳- (الف) استحکام کششی و مدول کششی و (ب) استحکام خمشی و مدول خمشی ABS تهیه‌شده با روش‌های FDM و قالب‌گیری تزریقی و کامپوزیت‌های CCF/ABS با ۱۰٪ wt تقویت‌کننده چاپ سه‌بعدی و ۱۰٪ wt تقویت‌کننده قالب‌گیری تزریقی [۵].

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در میان الیاف پیوسته، CF یا الیاف کربن بیشترین مدول کششی و خمشی را در مقایسه با الیاف کولار و شیشه دارد، در حالی که پلیمر اپوکسی و پلی‌اتر اتر کتون بیشترین و پلی‌آمید کمترین مدول را به‌عنوان ماتریس دارند. روند مشابهی در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با CF، به‌دلیل خاصیت ذاتی این الیاف مشاهده می‌شود که مدول کششی و خمشی بیشتری نسبت به کامپوزیت‌های دارای سایر تقویت‌کننده‌ها را نشان می‌دهند [۲۶]. اگرچه کامپوزیت‌های ساخته‌شده از CF و ABS یا PLA باید بیشترین مقدار را نشان دهند، این مسئله می‌تواند به فرایند چاپ هم‌محور مربوط شود، زیرا دست‌یابی به توزیع ماتریس در آن چالش برانگیزتر است [۲۲]. اگرچه کولار از خواص مکانیکی بهتری نسبت به الیاف شیشه برخوردار است، تعداد کمی از کامپوزیت‌های آن به‌دلیل دارابودن مقدار الیاف بسیار زیاد، مقادیر بیشتری را نشان می‌دهند [۱۹،۲۰]. جهت‌گیری لایه تقویت‌کننده و زاویه شیب نیز تعیین‌کننده عملکرد کششی و خمشی است. جهت‌گیری همسان‌گرد در برابر بارهای کششی و خمشی نسبت به جهت‌گیری هم‌مرکز تا حدودی پایدارتر است. Dickson و همکاران موضوع را بررسی کردند، اما این نتایج را تصدیق نکردند [۲۲]. می‌توان ادعا کرد که لایه همسان‌گرد اثر خود را در جهت نمونه نشان می‌دهد، درنتیجه سهم بیشتری برای تحمل بار اعمال‌شده دارد. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده برای استحکام مکانیکی کامپوزیت‌ها، واقعیت رابطه خطی بین FVF و استحکام مکانیکی کامپوزیت‌ها نیز تقویت می‌شود [۱۴]. بررسی چند لایه تقویت‌کننده و چگونگی نشاندن آن‌ها نشان می‌دهد، صرف‌نظر از نحوه نشاندن، تعداد لایه‌های نشانده‌شده بسیار مهم بوده، زیرا تعداد لایه‌ها بر FVF حاکم است [۲۲].

عرض و زاویه هاشور نقش مهمی در تحمل و انتقال بار دارد، زیرا بر اتصال بین نوارهای مجاور و لایه‌های روی هم اثر می‌گذارد. بیشترین استحکام کششی و خمشی برای لایه‌های همسان‌گرد در زاویه شیب (هاشور) صفر تجربه شده و به‌تدریج با افزایش زاویه هاشور تا ۱۸۰° کاهش می‌یابد [۴،۶]. با افزایش زاویه هاشور، الیاف تقویت‌شده از امتداد محور کششی منحرف می‌شوند. این انحراف باعث هم‌پوشانی ضعیف میان هاشورها شده که به تزریق ناکافی در مرز منجر می‌شود. Mei و همکاران مواد جامد ۱۰۰٪ متراکم را با الگوهای مختلف تزریقی مانند مستطیلی، مثلثی و شش‌ضلعی بررسی کرده‌اند [۱۲]. در این پژوهش، از تأثیر این الگوهای تزریق، نتیجه نهایی حاصل نشده است. از این رو، پژوهش‌های بیشتری برای درک بیشتر اثر چگالی پرشدن به‌همراه هندسه‌های مختلف تزریق نیاز است.

Meng و همکاران به پیوند بین‌لایه‌ای ضعیف کامپوزیت CFF پرداختند و ترکیب سامانه پیش‌گرمایش لیزری را برای ایجاد مقاومت برشی بین‌لایه‌ای و استحکام خمشی پیشنهاد کردند [۲۲]. هر دو خاصیت کششی و خمشی برای کامپوزیت گرماسخت CF/EP با استفاده از چاپگر FDM بررسی شده و بیشترین مقادیر ۷۲۹/۹ و ۲۰۲/۲ MPa برای مقاومت‌های کششی و خمشی حاصل شده است. همچنین، مطالعه یادشده بر ضعف استحکام و تشکیل اسفنج، به‌دلیل دمای زیاد کامپوزیت CF/PA متمرکز شده است. پس از مطالعه زمان خشک‌کردن مشخص شد، افزایش آن باعث کاهش میزان تشکیل حباب می‌شود که درنتیجه کاهش تخلخل و افزایش خواص مکانیکی مانند کشش و خمش را به‌دنبال دارد [۲۷].

خواص فشاری

فشرده‌سازی کامپوزیت‌های پلی‌آمید-CF و پلی‌آمید-FG در امتداد و عمود بر جهت الیاف با تغییر پیکربندی سامانه تقویت مانند الگو و توزیع تقویت، جهت چاپ و FVF در پژوهش‌های پیشین بررسی شده‌اند [۲۶]. در میان این تنظیمات، اثر توزیع تقویت‌کننده در شکست فشاری درخور توجه بود. ترکیب هم‌مرکز (در یک لایه) و هم‌فاصله‌بودن (لایه‌های مختلف در ضخامت) تقویت‌کننده، به حداکثر مدول فشاری ۲/۱۰۲ GPa در ٪۲۴/۴۴ FVF منجر شده است. با این حال، این نتیجه درباره ماتریس پلی‌آمید چندان صادق نیست.

خاصیت برشی و ضربه

پیوند بین‌لایه‌ای ضعیف یکی از عمده‌ترین محدودیت‌های فرایند ساخت سه‌بعدی مبتنی بر کشش مواد است و شکست برشی سازه را موجب می‌شود. مطالعات متعددی برای بررسی و تقویت رفتار برشی سازه چاپ‌شده گزارش شده است. مقاومت برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های پلی‌آمید همسان‌گرد تقویت‌شده با CF، FG، و K با تغییر FVF و ضخامت لایه، مطالعه شده است. اثر بسیار کم ضخامت لایه، اما اثرهای درخور توجه FVF بر مقاومت برشی بین‌لایه‌ای (interlaminar shear strength, ILSS) گزارش شده است. در میان این کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌های PA/CF بهترین مقاومت و پس از آن PA/FG و PA/K به‌دلیل اشباع ضعیف در پلاستیک پلی‌آمید قرار دارند. یافته مشابه توسط Justo و همکاران برای جهت‌گیری الیاف متقاطع (°±۴۵) در بهبود ILSS گزارش شده است [۲۶]. برای توضیح دلایل ضعف استحکام برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت CF/ABS با ٪۱۰ FVF (MPa81/2)، Yang و همکاران گزارش دادند، استحکام برشی تحت تأثیر زبری الیاف و ساختار فصل مشترک است. همچنین، آن‌ها چگونگی تقویت در برابر این آسیب را شامل بهینه‌سازی پارامترهای فرایند، اصلاح سطح، اصلاح شیپوره چاپ و پخت پیش و پس از آماده‌سازی کامپوزیت‌ها پیشنهاد کردند [۵]. به‌دنبال این مفهوم، ٪۴۲/۲ بهبود استحکام برشی برای کامپوزیت CF/N با استفاده از اصلاح اندازه CF و تحت فشار قراردادن آن برای چسبندگی مناسب گزارش شده است [۲۸]. Meng و همکاران پیش‌گرمایش کامپوزیت CF/PEEK با لیزر را برای افزایش اشباع و توزیع خوب ماتریس استفاده کردند (شکل ۸) [۲۲]. اثر بار ضربه‌ای در کامپوزیت‌های چاپ سه‌بعدی کمتر مطالعه شده است، بنابراین نیاز به پژوهش‌های آینده دارد. افزایش ضخامت لایه و استحکام ضربه‌ای و شکست انعطاف‌پذیر برای نمونه‌های مسطح و برای نمونه‌های لبه‌ای کاهش استحکام ضربه‌ای و شکست ترد را نشان داد. FVF اثر مثبتی بر استحکام ضربه‌ای در انواع نمونه‌ها داشت. با توجه به ماهیت ترد CF، کامپوزیت CF/PA کمترین میزان مقاومت را نسبت به K/PA و FG/PA نشان داد [۱۴].

مدل‌های پیش‌بینی

استفاده از مدل‌های مختلف به‌منظور شبیه‌سازی به‌عنوان بخشی از تجزیه و تحلیل ساختاری کامپوزیت‌ها تبدیل شده است. این فرایندهای شبیه‌سازی براساس الگوریتم‌های مختلف و فن‌های عددی توسعه یافته‌اند. مدل‌سازی روشی مناسب برای مقایسه بین خواص نمونه و حجم ماده، پیش‌بینی خواص جسم براساس داده‌های تجربی به‌منظور حذف آزمایش‌های غیرممکن است. برای کامپوزیت‌های چاپ سه‌بعدی با فرایند CFF، از تجزیه و تحلیل اجزای محدود (FEA)، میزان سختی متوسط (VAS)، مدل‌های Park و Rodríguez برای خواص مکانیکی و ساختاری متنوع استفاده شده است. افزون بر این، کاربردهای نظر کامپوزیت، ROM، نظریه آغاز آسیب‌های Hashin و تجزیه و تحلیل آماری (مانند ANOVA و مدل‌سازی سطح واکنش (RMS) برای تجزیه و تحلیل عملکرد کامپوزیت‌ها مؤثر هستند. شبیه‌سازی FEA برای درک رفتار ساختاری، پیش‌بینی و بهینه‌سازی خواص مکانیکی به‌کار می‌رود. بعضی از پژوهشگران خواص کشسانی را از منظر پاسخ تنش-کرنش با تغییر دو پارامتر، مدل دوبعدی (FVF و جهت‌گیری الیاف) کامپوزیت‌های تقویت‌شده FG، CF و K بررسی کردند. همچنین، آن‌ها مدل VAS را برای برآورد مدول الاستیک و نسبت پواسون ارزیابی کردند که نتایج آن‌ها با مقادیر تجربی مطابقت خوبی داشتند [۲۹]. روش VAS شامل مدل‌های میکرومکانیکی برای برآورد ویژگی‌های مؤثر، سامانه هماهنگ برای تجزیه و تحلیل الگوهای پرکردن و تعیین میانگین شدت سفتی ماتریس می‌شود. سرانجام، آن‌ها با استفاده از مدول کشسانی محوری و جانبی و FVF به‌عنوان تعدیل‌کننده‌های مبتنی بر مدل VAS، مدل‌های پارامتری ساده‌ای را برای خاصیت الاستیک ایجاد کردند. پژوهش مشابهی با استفاده از مدل VAS در انواع کامپوزیت برای پیش‌بینی خواص کشسانی توسط Melenka و همکاران انجام شده است [۲۳]. برای برقراری ارتباط میان رشد ترک و چقرمگی شکست کامپوزیت ترکیبی CF/FG از طریق بهینه‌سازی ریزساختار، ارزیابی مدل FEA کارآمد بود. مودهای شکست کامپوزیت CF/N با استفاده از FEA به‌عنوان تابعی از هندسه، الگوی پرکردن و FVF به‌دلیل

اثرگذاری بر استحکام و شیوه‌های شکست با توزیع تنش‌ها بررسی شد. نمونه‌هایی با قطعات بخشی تقویت‌شده و کاملاً تقویت‌شده دنبال‌کننده یک مسیر منحنی، برای توصیف مدل‌های شکست ایجاد شده و خواص مکانیکی مدل‌های ساخته‌شده توسط شبیه‌سازی FEA نزدیک به داده‌های تجربی پیش‌بینی‌شده است. آن‌ها همچنین پیشنهاد کردند که به‌عنوان یک پروتکل طراحی ابتدایی، الگوی تزریق را می‌توان برای نواحی ریزبین ماتریس و تقویت‌کننده نادیده گرفت، با افزایش تمرکز تنش FVF به‌عنوان تراکم داخلی برای الگوهای منحنی اهمیت بیشتری می‌یابد. شبیه‌سازی FEA اطلاعات بیشتری را به‌ویژه برای کامپوزیت‌های چاپ سه‌بعدی نسبت به کامپوزیت‌های معمولی برای شناسایی موقعیت‌های شکست و انتشار با استفاده از سفتی متغیر فراهم می‌کند. پیاده‌سازی شبیه‌سازی FEA برای غلبه بر محدودیت‌های کامپوزیت‌های چاپ سه‌بعدی از قبیل شکستن الیاف و شل‌شدن آن‌ها و گرفتگی شیپوره با توجه به میدان‌های جریان و دمای کامپوزیت‌های CF انجام می‌شود. ROM روش مناسبی برای تخمین عملکرد خواص مکانیکی مدنظر از کامپوزیت‌های چاپ سه‌بعدی براساس خواص ماتریس و تقویت‌کننده و سطح تقویت‌کننده، FVF است. ROM برای پیش‌بینی رفتارهای کششی استفاده شده است [۱۳،۱٤،۱۹]. نشان داده شده است که ROM به‌طور معمول یک ابزار مناسب برای پیش‌بینی خاصیت کششی برای کامپوزیت کم‌الیاف (٪۱۱) است، درحالی‌که VAS برای مقدار الیاف بیشتر ترجیح داده می‌شود. فرض بر این است که ماهیت ناهمسان‌گرد ساختارهای چاپ سه‌بعدی و خاصیت پایین عرضی ممکن است دلیل یافته‌های متناقض باشد [۱۳]. از سوی دیگر، آخوندی و همکاران عملکرد بهینه در ٪۵۰ FVF با توافق خوب بین نتایج تجربی و پیش‌بینی‌شده، تنها ٪۲/۲ برای کامپوزیت E-glass/PLA، را یافتند [۳۰]. به غیر از مدل‌های پیش‌بینی‌شده فوق، برخی از نظریه‌های دیگر برای بررسی سایر خواص بررسی شده‌اند. به‌عنوان مثال، Chabaud و همکاران درباره رفتار میکروساختار کامپوزیت‌های تقویت‌شده CF و FG با استفاده از مدل Park در مورد تغییر میزان رطوبت به‌عنوان تابعی از رطوبت نسبی کامپوزیت‌ها پژوهش کرده‌اند [۱۹]. Rodríguez با درنظرگرفتن ساختار چاپ به‌عنوان یک کامپوزیت پلاستیک–حفره، مدلی را برای خواص میکرومکانیکی ارائه کرد. Hashin و Rotem نظریه‌ای را برای مدل‌سازی شروع آسیب ایجاد کردند، تا شکست را به‌دلیل بارهای کششی، فشار و برش با توجه به الیاف و ماتریس در معیارهای کشش و فشار پیش‌بینی کنند. نظریه صفحات لایه‌ای کلاسیک (classical laminate plate theory, CLPT) می‌تواند در مطالعات آینده به بررسی رفتار متعامد ساختارهای CFF چاپ سه‌بعدی برای شناسایی ناهمگن‌بودن آن در ضخامت بپردازد.

محدودیت و چشم‌انداز آینده

تولید کامپوزیت به روش CFF نوعی فناوری نوظهور بوده که ماتریس آن در حال رشد است. هم‌اکنون این فناوری با چالش‌هایی روبه‌روست که مانع از جایگزینی آن با فرایند تولید کامپوزیت سنتی می‌شود. با اطمینان می‌توان گفت که با پیشرفت علم و برطرف‌شدن چالش‌های مزبور، CFF فناوری بسیار جذابی برای ساخت مواد کامپوزیتی و کاربرد صنعتی آن‌ها خواهد بود.

مواد

چاپگر سه‌بعدی با انتخاب الیاف یا رزین‌های مختلف، فراتر از آنچه برای ماشین چاپ توصیه شده است، چندان سازگاری ندارد. اگرچه فرایند همگرا، ذی‌نفعان را قادر به انتخاب مواد می‌کند، اما کنترل فرایند بسیار خسته‌کننده است که موجب بروز رفتار متناقض در کامپوزیت می‌شود.

لایه‌لایه‌شدگی

از بزرگ‌ترین محدودیت‌های CFF فعلی، ناتوانی در اتصال‌دهی مناسب لایه‌های دوبعدی در جهت سه‌بعدی است. بدین معنی که کامپوزیت چاپ سه‌بعدی در فرایند FDM، خودبه‌خود به‌طور سه‌بعدی متصل نمی‌شود. برخی از پیشرفت‌ها با استفاده از سامانه تزریق مویرگی یا بازوی روباتیک در دست بررسی هستند. بنابراین، به‌دلیل عدم اتصال در جهت Z و چسبندگی بین‌لایه‌ای ضعیف، تمایل به لایه‌لایه‌شدگی در قطعات چاپ زیاد است.

ناهمسان‌گردی

با توجه به روش لایه‌به‌لایه، به‌ویژه در یک لایه واحد، رفتار کامپوزیت بسیار ناهمسان‌گرد است. امکان چاپ به شیوه لایه عرضی یا متقابل ممکن است، ولی تخلخل ساختاری را افزایش می‌دهد.

کسر حجمی الیاف FVF

عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌ها به‌طرز درخورتوجهی به FVF بستگی دارد. در سامانه چاپ سه‌بعدی، کنترل FVF و دست‌یابی به FVF زیاد (بیش از ٪۵۰)، به‌ویژه برای کامپوزیت‌های نازک‌تر، دشوار است. از آنجا که الیاف از پیش بسته‌بندی و اندازه شده‌اند، حاوی مقدار درخورتوجهی رزین هستند و چاپگرهای موجود

اجازه چاپ با الیاف تقویت‌کننده در چند لایه اول و آخر را نمی‌دهند.

کامپوزیت ترکیبی

در صورت نیاز به استفاده از چند نوع الیاف به‌عنوان تقویت‌کننده برای ایجاد کامپوزیت ترکیبی، لازم است تا چاپگر برای تغییر سامانه تغذیه متوقف شود. این کار، نه تنها چالشی و وقت‌گیر است، بلکه به‌شدت بر بازدهی نیز اثرگذار است. استفاده از الیاف ترکیبی و هیبرید نیاز به بررسی بیشتر دارد.

تشکیل حفره

تشکیل حفره در سامانه چاپ سه‌بعدی محدودیت ذاتی در اصل چاپ است. استحکام با افزودن مواد تقویت‌کننده بهبود می‌یابد، اما دوباره با تشکیل حفره کاهش می‌یابد. تشکیل لایه‌به‌لایه و شکل نوار چاپ باعث هم‌پوشانی ضعیف نوارها و تشکیل حفره بین نوارها و لایه‌های مجاور می‌شوند. افزون بر این، توزیع ناهموار ماتریس و اشباع ضعیف به ایجاد مناطق غنی از الیاف و پلیمر و افزایش تخلخل منجر می‌شود. این حفره‌ها به عنوان نقص ساختاری عمل می‌کنند و دلیل ایجاد شکست در قطعه هستند. فرسایش الیاف به‌شدت تحت تأثیر هندسه شیپوره و طراحی آن قرار دارد که باید برای کمینه‌کردن شکل‌گیری حفره بهبود یابد.

انعطاف‌پذیری محدود

بعضی از چاپگرهای سه‌بعدی CFF، به کاربران اجازه تنظیم عملیاتی تغییر عوامل مانند انتخاب مواد و دما، سرعت چاپ و قطر شیپوره را نمی‌دهد. با وجود انعطاف‌پذیری‌های زیاد از نظر نشاندن و قرارگیری الیاف، این سامانه اجازه دستکاری چگالی نوارها به واحد طول یا عرض در همان لایه و ترکیب مطلوب الیاف و پلاستیک را برای بهینه‌سازی مقدار الیاف مدنظر نمی‌دهد. در فرایند کشش، یکی‌نبودن اندازه الیاف بر گرادیان سرعت جریان ماتریس و رزین مذاب اثر می‌گذارند. در حین حرکت سرچاپگر در زاویه‌های مختلف هاشور، دست‌یابی به توزیع یکنواخت رزین بسیار چالش برانگیز است.

افزون بر این، پژوهش‌های آینده می‌تواند دربرگیرنده اثر الگوی تزریق بر خواص مکانیکی، پایش لحظه‌ای فرایند چاپ برای ارزیابی کیفیت بهتر و جلوگیری از ایجاد نقص، عدم تناقض میان مدل پیش‌بینی‌شده با مدل‌های مختلف، توسعه مدل چاپ چهاربعدی با توجه به محرک‌ها به‌عنوان بعد چهارم، باشند. همچنین، در این پژوهش‌ها باید به تجزیه و تحلیل ضربه و خواص دینامیکی (خزش، خستگی و رشد ترک) بیشتر توجه شود.

نتیجه‌گیری

قراردادن الیاف پیوسته در رزین پلیمری با استفاده از چاپگرهای سه‌بعدی نوآوری بسیار امیدبخش در تولید کامپوزیت‌های نسل بعدی بوده که به‌دلیل تأثیر معنی‌دار آن در افزایش خواص مکانیکی مانند خواص کششی، خمشی، فشاری و ضربه است. شگفت‌انگیزترین دلیل پذیرش گسترده این فناوری، قابلیت ایجاد طرح پیچیده در حداقل مراحل فرایند با آزادی عمل در استفاده از تقویت‌کننده‌های لازم است. بهبود چندبرابری خواص مکانیکی در مقایسه با کامپوزیت‌های تقویت‌نشده، امکان استفاده از کامپوزیت‌های CFF را برای اهداف تحمل بار زیاد مهیا می‌کند. با این حال رفتار ناهمسان‌گردی، پیوند بین‌سطحی ضعیف، تخلخل زیاد و مواد محدود ماتریس و تقویت‌کننده، از محدودیت‌های پیش روی این فناوری است. افزون بر این، مطالعات ریزساختار کامپوزیت‌های ساخته‌شده با این روش، شواهد عملکرد مکانیکی ضعیفی را در مقایسه با کامپوزیت‌های تهیه‌شده به‌طور سنتی نشان می‌دهد. همچنین، زمان، هزینه و مقیاس‌پذیری از چالش‌های بزرگ آن است. درحقیقت، پژوهش درباره کامپوزیت CFF، به‌ویژه در ماتریس پارامترهای مختلف چاپ و فرایند و همچنین پیکربندی تقویت‌کننده‌ها برای کاربردهای جدید و جایگزینی آن‌ها با مواد استفاده‌شده کنونی است.

مراجع

1. Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J., and Hui D., 3D Printing of Polymer Matrix Composites: A Review and Prospective, *Compos. Part B: Eng.*, **110**, 442-458, 2017.
2. Liu Z., Wang Y., Wu B., Cui C., Guo Y., and Yan C., A Critical Review of Fused Deposition Modeling 3D Printing Technology in Manufacturing Polylactic Acid Parts, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*., **102**, 2877–2889, 2019.
3. Matsuzaki R., Ueda M., Namiki M., Jeong T., Asahara H., Horiguchi K., Nakamura T. et al., Three-Dimensional Printing of Continuous-Fiber Composites by In-Nozzle Impregnation, *Sci. Rep.*, **6**, 23058, 2016.
4. Oztan C., Karkkainen R., Fittipaldi M., Nygren G., Roberson L., Lane M., and Celik E., Microstructure and Mechanical Properties of Three Dimensional-Printed Continuous Fiber Composites, *J. Compos. Mater*, **53**, 271-280, 2019.
5. Yang C., Tian X., Liu T., Cao Y., and Li D., 3D Printing for Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites: Mechanism and Performance, *Rapid Prototyp. J.*, **23**, 209-215, 2017.
6. Kabir S.M.F., Mathur K., and Seyam A.M., A Critical Review on 3D Printed Continuous Fiber-Reinforced Composites: History, Mechanism, Materials and Properties, *Compos. Struct.*, **19**, 32270-6, 2019.
7. Heidari-Rarani M., Rafiee-Afarani M., and Zahedi A.M., Mechanical Characterization of FDM3 D Printing of Continuous Carbon Fiber Reinforced PLA Composites, *Compos. Part. B: Eng.*, **175**, 442-458, 2019.
8. Behzadnasab M. and Yousefi A.A., Effects of 3D Printer Nozzle Head Temperature on the Physical and Mechanical Properties of PLA Based Product, *12th International Seminar on Polymer Science and Technology*, Tehran, 2-5 November, 2016.
9. Papon E.A., Haque A., and Spear S.K., Effects of Fiber Surface Treatment and Nozzle Geometry in Structural Properties of Additively Manufactured Two-Phase Composites, *AIAA Scitech 2019 Forum*, San Diego, California, 7-11 January, 2019.
10. Ning F., Cong W., Hu Y., and Wang H., Additive Manufacturing of Carbon Fiber-Reinforced Plastic Composites Using Fused Deposition Modeling: Effects of Process Parameters on Tensile Properties, *J. Compos. Mat*., **51**, 451-462, 2017.
11. Chacón J.M., Caminero M.A., García-Plaza E., and Núñez P.J., Additive Manufacturing of PLA Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties and Their Optimal Selection, *Mater. Des*., **124**, 143-157, 2017.
12. Mei H., Ali Z., Ali I., and Cheng L., Tailoring Strength and Modulus by3 D Printing Different Continuous Fibers and Filled Structures into Composites, *Adv. Compos. Hyb. Mater.*, **2**, 312–319, 2019.
13. Lozada J.N., Ahuett-Garza H., Orta-Castañón P., Verbeeten W., and Sáiz-González D., Tensile Properties and Failure Behavior of Chopped and Continuous Carbon Fiber Composites Produced by Additive Manufacturing, *Addit. Manuf*., **26**, 227-241, 2019.
14. Caminero M.A., Chacón J.M., García-Moreno I., and Rodríguez G.P., Impact Damage Resistance of 3D Printed Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Deposition Modelling, *Compos. Part B: Eng*., **148**, 93-103, 2018.
15. Fuenmayor E., Forde M., Healy A.V., Devine D.M., Lyons J.G., McConville C., and Major I., Material Considerations for Fused-Filament Fabrication of Solid Dosage Forms, *Pharmaceutics*, **10**, 44, 2018.
16. Rahim T.N.A.T., Abdullah A.M., and Akil H. Md., Recent Developments in Fused Deposition Modeling-Based 3D Printing of Polymers and their Composites, *Polym. Rev*., **59**, 589-624, 2019.
17. Vanzanella V., Scatto M., Zant E., Sisani M., Bastianini M., and Grizzuti N., The Rheology of PEOT/PBT Block Copolymers in the Melt State and in the Thermally-Induced Sol/Gel Transition Implications on the 3D-Printing Bio-scaffold Process, *Materials*, **12**, 226, 2019.
18. Tiwari K. and Kumar S., Analysis of the Factors Affecting the Dimensional Accuracy of 3D Printed Products, *Mater. Today. Proc.*, **5**, 18674-18680, 2018.
19. Chabaud G., Castro M., Denoual A.C., and Duigou L., Hygromechanical Properties of 3D Printed Continuous Carbon and Glass Fibre-Reinforced Polyamide Composite for Outdoor Structural Applications, *Addit. Manuf.*, **26**, 12, 2019.
20. Goh G., Dikshit V., Nagalingam A.P., Goh G.L., Agarwala

S., Sing S.L., Wei J., and Yeong W.Y., Characterization of Mechanical Properties and Fracture Mode of Additively Manufactured Carbon Fiber and Glass Fiber-Reinforced Thermoplastics, *Mater. Des*., **137**, 79-89, 2018.

21. Tian X., Liu T., Yang C., Wang Q., and Li D., Interface and Performance of 3D Printed Continuous Carbon Fiber-Reinforced PLA Composites, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf*., **88**, 198-205, 2016.
22. Meng L., Xiaoyong T., Junfan S., Weijun Z., Dichen L., and Yingjie Q., Impregnation and Interlayer Bonding Behaviours of 3D-Printed Continuous Carbon-Fiber-Reinforced Poly-ether-ether-ketone Composites, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf*., **121**, 130-138, 2019.
23. Melenka G.W., Cheung B.K.O., Schofield J.S., Dawson M.R., and Carey J.P., Evaluation and Prediction of the Tensile Properties of Continuous Fiber-Reinforced 3D Printed Structures, *Compos. Struct*., **153**, 866-875, 2016.
24. Van De Werken N., Hurley J., Khanbolouki P., Sarvestani A.N., Tamijani A.Y., and Tehrani M., Design Considerations and Modeling of Fiber-Reinforced 3D Printed Parts, *Compos. Part B: Eng*., **160**, 684-692, 2019.
25. Parandoush P., Zhou C., and Lin D., 3D Printing of Ultrahigh Strength Continuous Carbon Fiber Composites, *Adv. Eng. Mater*., **21**, 1800622, 2019.
26. Justo J., Távara L., García-Guzmán L., and París F., Characterization of 3D Printed Long Fibre Reinforced Composites, *Compos. Struct*., **185**, 537-548, 2018.
27. Ye W., Lin G., Wu W., Geng P., Hu X., Gao Z., and Zhao J., Separated 3D Printing of Continuous Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Polyimide, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf*., **121**, 457-464, 2019.
28. Liu T., Tian X., Zhang M., Abliz D., Li D., and Ziegmann G., Interfacial Performance and Fracture Patterns of 3D Printed Continuous Carbon Fiber with Sizing Reinforced PA6 Composites, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf*., **114**, 368-376, 2018.
29. Al Abadi H., Thai H.T., Paton-Cole V., and Patel V.I., Elastic Properties of 3D Printed Fibre-Reinforced Structures, *Compos. Struct*., **193**, 8-18, 2018.
30. Akhoundi B., Behravesh A.H., and Bagheri-Saed A., Improving Mechanical Properties of Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites Produced by FDM 3D Printer, *J. Reinf. Plast. Compos*., **38**, 99-116, 2019.