

## مروری بر فناوری نوظهور چاپ سه بعدی گرانولی

عاطفه نژادابراهیم

قم، دانشگاه صنعتی قم، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی پلیمر

### چکیده ...

چاپ سه بعدی گرانولی به عنوان یکی از فناوری‌های نوظهور در ساخت افزایشی اکستروژنی، به دلیل استفاده مستقیم از مواد اولیه گرانولی، به عنوان جایگزینی امیدبخش برای سامانه‌های متداول رشته‌محور مطرح شده است. حذف مرحله میانی تولید رشته، علاوه بر کاهش هزینه‌های فرایندی و مواد، موجب افزایش انعطاف پذیری در انتخاب مواد و توسعه ترکیبات پلیمری و کامپوزیتی متنوع می‌شود. این مزیت، چاپ گرانولی را به گزینه‌ای مناسب برای تولید قطعات مهندسی، ساختارهای زیست‌سازگار و کاربردهای بزرگ مقیاس تبدیل کرده است.

در این میان، عملکرد سامانه‌های گرانولی به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های ماده اولیه و عوامل فرایندی قرار دارد. در کامپوزیت‌های پلیمری، نوع پرکننده، اندازه ذرات، مورفولوژی، نسبت ابعادی و کیفیت توزیع و پراکنش آن در ماتریس، از جمله عوامل کلیدی در تعیین رفتار رئولوژیکی، پایداری اکستروژن، چسبندگی بین‌لایه‌ای، دقت ابعادی و خواص نهایی قطعه چاپ شده به شمار می‌روند. بنابراین، طراحی موفق فرمول‌بندی‌های قابل چاپ، نیازمند درک ارتباط متقابل میان ساختار ماده، ویژگی‌های پرکننده و شرایط فرایند است.

این مقاله مروری به بررسی مبانی، مزایا، چالش‌ها و کاربردهای چاپ سه بعدی گرانولی پرداخته و آن را از منظر اقتصادی و فنی با چاپ سه بعدی رشته‌ای مقایسه می‌کند. همچنین، نقش پلیمرها و کامپوزیت‌های زیست‌سازگار، اثر مشخصات پرکننده بر چاپ پذیری و عملکرد قطعه و مهم‌ترین چالش‌های موجود در توسعه این فناوری مرور شده است. در پایان، مسیرهای آینده برای بهبود کیفیت چاپ، توسعه مواد پیشرفته و گسترش کاربردهای صنعتی و زیست‌پزشکی این فناوری ارائه می‌شود.

### واژه‌های کلیدی:

چاپ سه بعدی اکستروژنی،  
چاپ سه بعدی گرانولی  
(FGF)،  
پلیمرهای زیست‌سازگار.

\*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

Nezhadebrahim@qut.ac.ir\*

## ۱ مقدمه

فناوری چاپ سه بعدی (3D Printing) نخستین بار در دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی و با معرفی روش استریولیتوگرافی (Stereolithography) توسط چاک هال (Chuck Hull) وارد عرصه‌ی تولید شد و به سرعت به عنوان یکی از نوآوری‌های مهم در ساخت افزایشی (Additive Manufacturing) شناخته شد. ساخت افزایشی یا چاپ سه بعدی به عنوان یکی از فناوری‌های نوین، تحولی چشمگیر در حوزه تولید ایجاد کرده است [۱]. روش‌های مرسوم ساخت شامل فرآیندهایی مانند ساخت کاهشی (Subtractive Manufacturing) از جمله ماشین‌کاری CNC و همچنین روش‌های شکل‌دهی نظیر قالب‌گیری تزریقی (Injection Molding) و ریخته‌گری (Casting) هستند. این روش‌ها معمولاً زمان‌بر بوده، منجر به ایجاد ضایعات قابل توجهی از مواد می‌شوند؛ مسئله‌ای که هنگام کار با پلیمرهای با کارایی بالا به عنوان محدودیتی مهم مطرح می‌شود. افزون بر این، استفاده از این فرآیندها در بسیاری از موارد از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه نیست [۲]. در مقابل، ساخت افزایشی به عنوان رویکردی نوین در تولید، مزایای قابل توجهی نسبت به روش‌های سنتی ساخت ارائه می‌دهد. در این فناوری، قطعات به صورت لایه‌به‌لایه ساخته می‌شوند که این امر ضمن کاهش مصرف و ضایعات مواد، امکان تولید ساختارهای پیچیده با دقت بالا را فراهم می‌کند. همچنین، کاهش مراحل فرآیند تولید در بسیاری از موارد موجب کوتاه‌تر شدن زمان ساخت شده، انعطاف‌پذیری بیشتری در طراحی و تولید قطعات ایجاد می‌کند. از دیگر مزایای مهم این فناوری می‌توان به قابلیت سفارشی‌سازی آسان و تولید قطعات متناسب با نیازهای اختصاصی اشاره کرد؛ ویژگی‌ای که در حوزه پزشکی، به‌ویژه در ساخت کاشتنی‌ها و تجهیزات اختصاصی بیمار، اهمیت ویژه‌ای دارد. به دلیل این مزایا، فناوری ساخت افزایشی در حوزه‌های مختلفی از جمله صنایع خودروسازی، نظامی، زیست‌پزشکی و کاربردهای بالینی مورد توجه گسترده قرار گرفته است. این فناوری در ابتدا عمدتاً برای نمونه‌سازی سریع در صنایع به کار می‌رفت، اما با توسعه روش‌های نوین چاپ و گسترش دامنه مواد قابل استفاده، کاربردهای آن به حوزه‌هایی نظیر مهندسی بافت، داروسازی، پزشکی بازساختی و حتی صنایع غذایی نیز گسترش یافت. امروزه، ساخت افزایشی به عنوان یکی از فناوری‌های پیشرو، امکان تولید قطعات و سازه‌هایی با هندسه‌های بسیار پیچیده، از جمله ساختارهای مبتنی بر آناتومی اختصاصی بیمار، را فراهم کرده، نقش مهمی در توسعه پزشکی شخصی‌سازی شده ایفا می‌کند [۳، ۴].

## ۲ چاپ سه بعدی

بر اساس استاندارد سازمان بین‌المللی استانداردسازی (ISO 52900:2021)، فرآیندهای ساخت افزایشی یا چاپ سه بعدی به هفت دسته اصلی تقسیم می‌شوند؛ این دسته‌بندی‌ها که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، چارچوبی استاندارد برای شناخت و مقایسه فناوری‌های مختلف ساخت افزایشی فراهم می‌کنند. این دسته‌بندی، نمایی کلی از اصول عملیاتی فناوری‌های مختلف چاپ سه بعدی ارائه می‌دهد و هر یک از این دسته‌ها شامل چندین فناوری و روش چاپ متفاوت است. از میان این فناوری‌ها، برخی روش‌ها کاربرد گسترده‌تری در پژوهش‌ها و صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. برای مثال، فناوری ساخت رشته‌ای ذوبی (Fused Filament Fabrication) یا مدل‌سازی رسوب ذوبی (Fused Filament Modelling) در دسته اکستروژن مواد ذوبی (Material Extrusion) قرار می‌گیرد. همچنین فناوری‌های تف‌جوشی لیزری انتخابی (Selective Laser Sintering) و هم‌جوشی چندجکتی (Multi Jet Fusion) از جمله روش‌های رایج در دسته هم‌جوشی بستر پودر (Powder Bed Fusion) محسوب می‌شوند. در کنار این موارد، روش‌های مبتنی بر نور یعنی استریولیتوگرافی و پردازش نور دیجیتال (Digital Light Processing) در گروه پلیمری‌شدن نوری در مخزن یا حمامی (Vat Photopolymerization) از طریق پلیمری‌شدن نوری رزین‌های مایع شناخته می‌شوند (شکل ۱) و دقت سطحی بسیار بالایی دارند، در حالی که فناوری جت‌کردن مواد (Material Jetting) نیز به عنوان یکی دیگر از روش‌های شناخته‌شده در حوزه چاپ سه بعدی مطرح است [۵، ۶].

به طور کلی، روش‌های چاپ سه بعدی متنوع‌اند و هر کدام بر اساس نوع ماده و مکانیسم، ساز و کار ساخت و ویژگی‌های خاص

ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES	Vat Photopolymerization
	Material Extrusion
	Material Jetting
	Binder Jetting
	Powder Bed Fusion
	Direct Energy Deposition
	Sheet Lamination

شکل ۱. تقسیم‌بندی فناوری‌های ساخت افزایشی (AM) طبق ۲۰۱۵: ISO/ASTM 52900 ساخت افزایشی - اصول کلی - اصطلاحات [۱].

رشته ذوبی (FFF)، ساخت افزایشی مبتنی بر پلت (Pellet Additive Manufacturing) و ساخت گرانول ذوبی (Fused Granular Fabrication). در میان این روش‌ها، فناوری FFF رایج‌ترین فناوری تجاری در حوزه چاپ سه بعدی پلیمرها محسوب می‌شود و از زمان معرفی آن در دهه ۱۹۹۰، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف یافته است. در این روش، رشته یا تار پلیمر گرم‌انرم از طریق سامانه تغذیه وارد محفظه ذوب شده، سپس ماده مذاب از افشانک خارج و به صورت لایه به لایه بر روی بستر ساخت رسوب داده می‌شود.

فناوری FDM به دلیل هزینه پایین، سهولت استفاده و دسترس پذیری بالا، در حوزه‌های متنوعی از جمله خودروسازی، هوافضا، طراحی صنعتی، آموزش و پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش امکان استفاده از پلیمرهای گرم‌انرم مختلفی مانند Nylon، PETG، ABS، PLA و TPU را فراهم می‌کند و برای تولید نمونه‌های اولیه، قطعات سبک‌وزن، مدل‌های آناتومیکی، داربست‌های مهندسی بافت و تجهیزات پزشکی سفارشی کاربرد دارد. همچنین، قابلیت تولید ساختارهای پیچیده و شخصی‌سازی آسان، این فناوری را به یکی از مهم‌ترین روش‌های ساخت افزایشی در پزشکی تبدیل کرده است. [۸]

با وجود مزایای متعدد فناوری‌های مبتنی بر رشته، به‌ویژه FDM، با محدودیت‌هایی نیز همراه هستند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، نیاز به رشته‌هایی با قطر یکنواخت و خواص پایدار است؛ زیرا تغییرات جزئی در قطر یا کیفیت رشته می‌تواند منجر به اختلال در جریان ماده و کاهش کیفیت چاپ شود. علاوه بر این، تولید رشته‌هایی کامپوزیتی حاوی نانوذرات، مواد زیست‌فعال یا پلیمرهای مهندسی‌شده، فرآیندی پیچیده، زمان‌بر و پرهزینه است و به تجهیزات اختصاصی نیاز دارد. بسیاری از پلیمرهای زیست‌سازگار و مواد مورد استفاده در کاربردهای پزشکی نیز به سختی به شکل رشته پایدار تبدیل می‌شوند که این موضوع دامنه استفاده از آنها را محدود می‌کند. از سوی دیگر، هزینه بالاتر رشته نسبت به مواد اولیه گرانولی، سرعت تغذیه محدود و بهره‌وری پایین‌تر فرآیند، از دیگر محدودیت‌های این فناوری به شمار می‌روند. [۹]

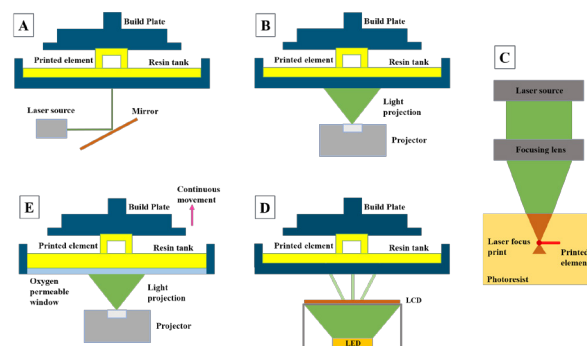
در همین راستا، فناوری‌های مبتنی بر گرانول یا نظیر PAM و FGF، به‌عنوان نسل جدیدی از روش‌های اکستروژنی مورد توجه قرار گرفته‌اند (شکل ۳). در این فناوری‌ها، به جای استفاده از رشته، مواد اولیه به صورت مستقیم و در قالب گرانول‌های پلیمری وارد سامانه اکستروژن می‌شوند. استفاده مستقیم از گرانول‌ها موجب کاهش هزینه مواد اولیه، افزایش سرعت چاپ، تسهیل استفاده از مواد کامپوزیتی و بازیافتی و همچنین

خود را دارند. روش‌های مبتنی بر پودر مانند SLS، SLM و EBM با استفاده از لیزر یا پرتو الکترونی پودرهای پلیمری و فلزی را ذوب یا تف‌جوشی می‌کنند و برای ساخت قطعات مقاوم و پیچیده مناسب‌اند. در کنار این‌ها، روش‌های جت‌کردن مواد مانند PolyJet با پاشش قطرات رزین یا هیدروژل امکان چاپ چند ماده به‌طور همزمان را فراهم می‌کنند و روش‌های ورقه‌ای مانند Sheet Laminating با برش و چسباندن لایه‌های ورقه‌ای سرعت بالایی دارند اما دقت کمتری ارائه می‌دهند. در میان همه‌ی این فناوری‌ها، روش‌های اکستروژنی جایگاه ویژه‌ای دارند، که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

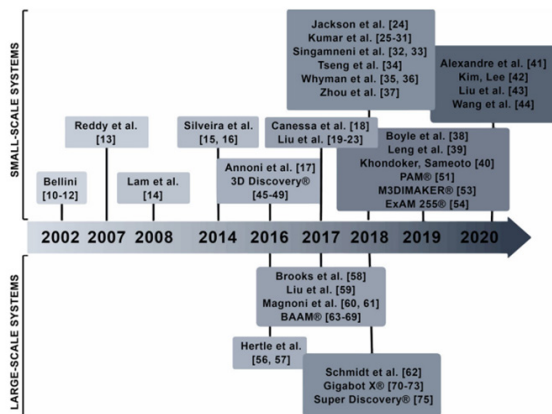
### ۳ فناوری‌های مبتنی بر اکستروژن

فناوری‌های مبتنی بر اکستروژن مواد (Material Extrusion)، یکی از پرکاربردترین و شناخته‌شده‌ترین دسته‌های ساخت افزایشی به شمار می‌روند و سهم قابل‌توجهی از بازار چاپ سه بعدی را به خود اختصاص داده‌اند. بر اساس یک نظرسنجی انجام‌شده در سال ۲۰۲۳، حدود ۵۶٪ از شرکت‌های فعال در حوزه چاپ سه بعدی از فناوری FDM/FFF استفاده می‌کنند، در حالی‌که سایر فناوری‌های پلیمری مانند SLS، SLA و MJF به ترتیب تنها ۲۰٪، ۱۰٪ و ۸٫۸٪ از بازار را در اختیار دارند. در روش‌های اکستروژنی، ماده اولیه پس از ذوب یا نرم شدن، از طریق افشانک اکستروود شده، به صورت لایه به لایه بر روی بستر ساخت رسوب داده می‌شود تا قطعه نهایی شکل گیرد. سادگی عملکرد، هزینه نسبتاً پایین تجهیزات، تنوع مواد قابل استفاده و امکان تولید قطعات پیچیده و سفارشی، از مهم‌ترین دلایل گسترش این فناوری در صنایع مختلف محسوب می‌شوند. [۷]

فناوری اکستروژنی شامل روش‌های متعددی هستند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از مدل‌سازی رسوب ذوبی (FDM) یا ساخت



شکل ۲. روش‌های مختلف پلیمریزاسیون نوری حمامی: Two Photon Polymerization (C)، DLP (B)، SLA (A) و CLIP (E) و LCD (D). [۵]

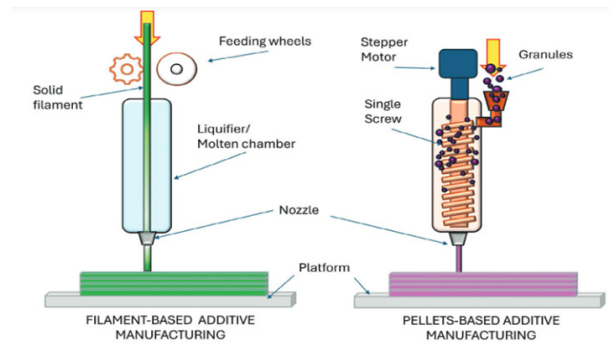


شکل ۴. نمودار زمانی توسعه پریترهای سه بعدی screw-assisted [۱۰].

سامان مند، نتو (Netto) و همکارانش در سال ۲۰۲۱، پژوهش‌های مختلف انجام شده در زمینه انواع چاپگرهای سه بعدی با استفاده از مواد خام پلیمری را تا سال ۲۰۲۰ از جهات مختلف بررسی و گزارش کرده اند [۱۰]. در میان نتایج سامان مند مختلفی که ایشان گزارش کرده اند، نمودار زمانی توسعه چاپگرهای سه بعدی پیچ‌ران (Screw Assisted) به صورت تجاری و تحقیقاتی را نمایش داده است (شکل ۴).

در سطح بین‌المللی نتایج این تلاش‌ها منجر به تولید دستگاه‌های پریتر سه بعدی با نام‌هایی نظیر Direct Pellet Extruder 3D Printing، Screw-Assisted 3D printing، Fused Granular Fabrication شده است. طرحواره‌ای از انواع چاپگرهای گرانولی در شکل ۵ نشان داده شده است.

یکی از کاربردهای عمده و روبه‌رشد این فناوری در زمینه پزشکی است. چاپ سه‌بعدی امکان ساخت پروتزهای سفارشی را فراهم کرد که به‌طور مناسب با بدن هر فرد مطابقت داشتند. این فناوری‌ها به توسعه پروتزهای سه‌بعدی و سایر ایمپلنت‌های پزشکی کمک کردند و امکان برنامه‌ریزی جراحی، آموزش و یادگیری مؤثرتر را فراهم کردند. کاشتنی‌های پزشکی، از جمله



شکل ۳. طرحواره فناوری‌های ساخت افزایشی اکستروژنی مبتنی بر رشته و گرانول [۹].

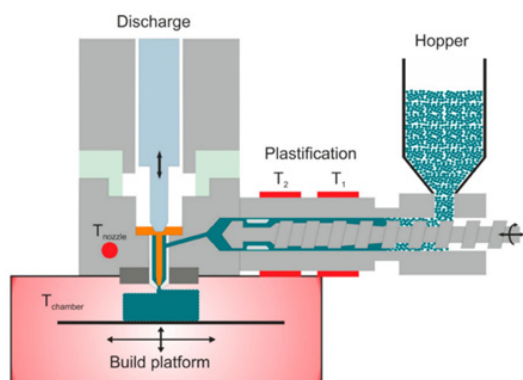
کاهش مراحل آماده‌سازی مواد می‌شود. به همین دلیل، چاپ سه‌بعدی گرانولی در سال‌های اخیر به‌عنوان رویکردی نوظهور و امیدوارکننده، به‌ویژه در کاربردهای صنعتی و پزشکی، مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است. در جدول ۱ مشاهده می‌شود که هزینه هر کیلوگرم ماده به‌صورت گرانول به‌طور میانگین ۵ تا ۱۰ برابر ارزان‌تر از رشته متناظر است. این اختلاف چشمگیر در هزینه مواد اولیه، یکی از اصلی‌ترین محرک‌های توسعه فناوری‌های اکستروژنی مبتنی بر گرانول نظیر PAM و FGF به‌ویژه در مقیاس صنعتی است [۹].

#### ۴ چاپ سه‌بعدی مبتنی بر گرانول (PAM/FGF)

برای غلبه بر محدودیت‌های ذکر شده درباره روش مبتنی بر رشته، روش نوظهور مبتنی بر گرانول معرفی شده است. در این فناوری به جای رشته، از گرانول‌های پلیمری یا کامپوزیتی به‌طور مستقیم در فرآیند چاپ استفاده می‌شود. این رویکرد نه تنها مشکلات مربوط به تهیه رشته را برطرف می‌کند، بلکه هزینه‌ها را کاهش داده و امکان استفاده از ترکیبات متنوع‌تری را فراهم می‌آورد. محققان و صنعتگران تلاش‌های زیادی در راستای توسعه چاپگرها سه بعدی با قابلیت استفاده از مواد خام پلیمری به صورت درجا، به جای استفاده از رشته‌های پلیمری کرده اند. در یک مقاله مروری

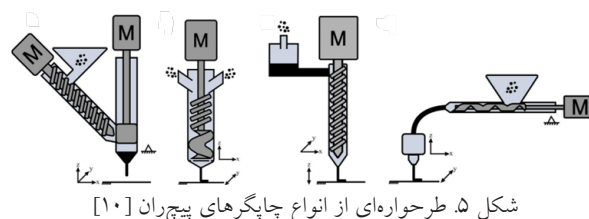
جدول ۱. مقایسه‌ای از قیمت مواد اولیه گرانول (Pellets) و رشته (Filaments) برای چند رزین متداول [۹].

Polymer	Pellets (per kg)	Filaments (per kg)
Polylactic acid (PLA)	15-30 \$	20-40 \$
Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Pellets	1-5 \$	15-35 \$
Polyamide (PA)	3 \$	100 \$
Polyetheretherketone (PEEK)	80E	500E
و ULTEM 1000 و (Polyetherimide, PEI)	32E	270E



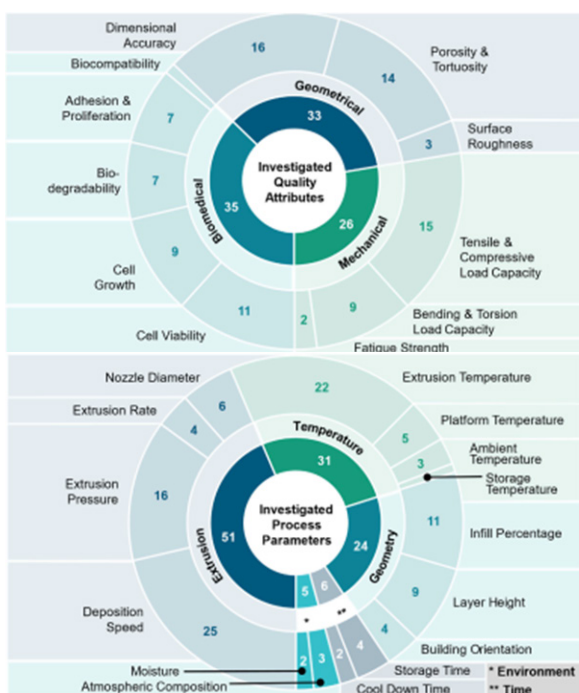
شکل ۶. طرحواره فرایند چاپ گرانولی در پژوهش کی و همکاران [۱۲].

نقطه مصرف (Point-of-Care) کمک کند. Janning و همکاران برای شناسایی الزامات فرایندی و کیفی در چاپ سه بعدی گرانولی داربست‌های پزشکی، مرور ساختاریافته‌ای ۳۰ مقاله انجام دادند و در آن، عوامل فرایندی و ویژگی‌های کیفی مرتبط با داربست‌های تولیدشده به این روش را استخراج کردند [۱۳]. همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، در میان ویژگی‌های کیفی داربست‌های پزشکی، شاخص‌هایی مانند استحکام کششی، استحکام فشاری و تخلخل بیشترین توجه را به خود اختصاص داده‌اند؛ در حالی که در کاربردهای مبتنی بر



کاشتنی‌های زانو و لگن و داربست‌هایی که برای کمک به کاربردهای اسکلتی-عضلانی طراحی شده‌اند، سفارشی‌سازی شدند. علاوه بر این، از آن برای ایجاد اندام‌های مصنوعی، تجهیزات جراحی و سامانه‌های تجویز دارو استفاده شد. بررسی چاپ‌پذیری پلیمرهای زیست‌سازگار در این روش می‌تواند به‌طور مستقیم در تولید داربست‌های مهندسی بافت، کاشتنی‌های زیستی و سامانه‌های دارورسانی نقش داشته باشد و محدودیت‌های موجود در روش‌های سنتی را کاهش دهد. به عنوان مثال، الیور (Oliver) و همکارانش در پژوهشی خواص فیزیکی-مکانیکی قطعه چاپ شده با استفاده از رشته آماده PLA و گرانول PLA را مقایسه کرده‌اند [۱۱]. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های ساخته‌شده با گرانول (Pellet-Based) خواص کششی و خمشی بالاتری نسبت به نمونه‌های رشته‌ای (Filament-Based) از خود نشان دادند. این تفاوت‌ها ناشی از ساختارهای متفاوتی بود که در طول فرآیند چاپ ایجاد شده‌اند. مشاهده شده است که نمونه‌های گرانولی نسبت به نمونه‌های رشته‌ای دارای درصد پرشدگی (Infill) بالاتری هستند. به طور غیرمنتظره، نمونه‌های گرانولی به پرشدگی ۱۰۰٪ دست یافتند. علاوه بر این، افزایش درصد پرشدگی منجر به بهبود پیوند میان لایه‌ها نیز شده است. دلیل اصلی بهبود خواص مکانیکی در نمونه‌های گرانولی، پیوند بهتر میان لایه‌ها عنوان شده است و با آزمون‌های تکمیلی، عواملی همچون میزان بلورینگی دو قطعه نیز به طور دقیق بررسی شده‌اند.

کی (Qi) و همکارانش در پژوهشی روش چاپ سه بعدی با تغذیه مستقیم گرانول (شکل ۶) در تولید اشکال دارویی جامد متخلخل با استفاده از فناوری رسوب‌گذاری قطرات حرارتی (Thermal Droplet Deposition) معرفی کرده‌اند [۱۲]. این پژوهش برای اولین بار نشان داد که پلیمر Eudragit® EPO که به‌طور معمول برای چاپ FDM مناسب نیست، می‌تواند بدون افزودنی‌های نرم‌کننده با استفاده از این روش چاپ شود. حذف مرحله رشته‌سازی باعث کاهش مخاطرات تخریب حرارتی دارو در طول فرآیند شده است. قرص‌های تولید شده دارای کیفیت چاپ بالا، توزیع یکنواخت دارو و رهش قابل کنترل بودند. این فناوری می‌تواند به شخصی‌سازی داروها و تولید قرص‌های سفارشی در



شکل ۷. عوامل فرایندی مورد بررسی در چاپ سه بعدی اکستروژنی (در بالا) و ویژگی‌های کیفی داربست‌های پزشکی تولیدشده (در پایین) [۱۳].

به اندازه متوسط ذرات کمتر از ۱۰۰ باشد، احتمال انسداد به شدت افزایش می‌یابد [۱۵].

در سامانه مبتنی بر گرانول و پیچران، این چالش‌ها اهمیت بیشتری دارند، زیرا تنوع در ترکیب مواد و رفتار رئولوژیکی می‌تواند منجر به جریان ناپیوسته، ایجاد حفره‌های داخلی، کاهش چسبندگی بین‌لایه‌ای و افت خواص مکانیکی شود. استفاده از عوامل سازگارکننده، اصلاح‌کننده‌های سطحی الیاف، پخش‌کننده‌ها و نرم‌کننده‌های زیست‌سازگار می‌تواند به بهبود توزیع پرکننده و کاهش تمایل به انسداد کمک کند. این نتایج نشان می‌دهد که در فناوری چاپ گرانولی، طراحی فرمولابندی مناسب، کنترل اندازه ذرات و انتخاب قطر افشانک متناسب از عوامل کلیدی برای پایداری فرآیند و کیفیت ساخت هستند.

### ۵ پلیمرهای زیست‌سازگار در چاپ سه بعدی گرانولی

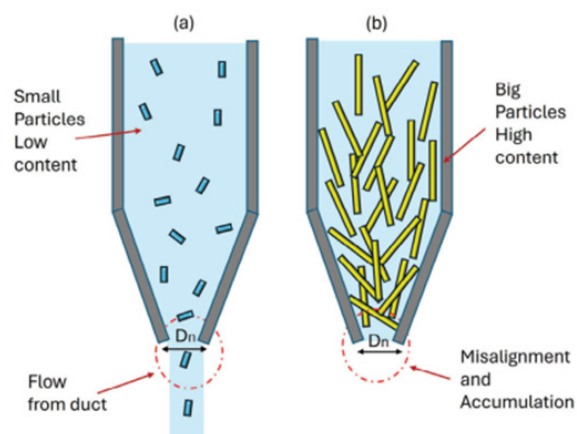
در سال‌های اخیر، استفاده از پلیمرهای گرمانرم زیست‌سازگار در چاپ سه‌بعدی زیستی توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. این مواد به دلیل قابلیت فرآیندپذیری، سازگاری زیستی و امکان تخریب کنترل‌شده، گزینه‌های مناسبی برای تولید داربست‌های مهندسی بافت، کاشتنی‌های پزشکی و سامانه‌های دارورسانی محسوب می‌شوند. از جمله پلیمرهای پرکاربرد در این حوزه می‌توان به پلی‌کاپرولاکتون (Polycaprolactone)، پلی‌لاکتیک اسید (Polylactic Acid)، پلی‌اتیلن گلیکول (Polyethylene Glycol)، پلی‌اتر اتراکتون (Polyether Ether Ketone) اشاره کرد [۱۶-۱۸]. در این بخش، پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه کاربرد برخی از این پلیمرها در فناوری چاپ سه‌بعدی گرانولی مرور خواهد شد.

#### ۵-۱ پلی‌لاکتیک اسید (PLA)

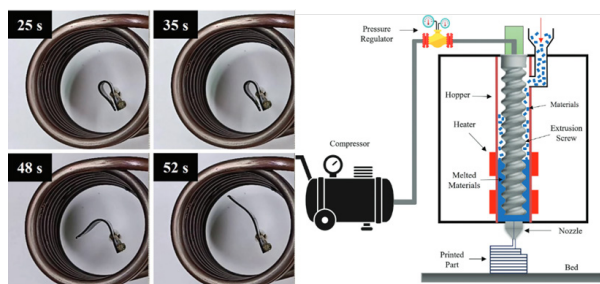
پلی‌لاکتیک اسید (PLA) یکی از پرکاربردترین پلیمرهای زیست‌سازگار در فناوری چاپ سه‌بعدی مبتنی بر اکستروژن مواد است و گزارش‌ها نشان می‌دهند که حدود ۸۶٪ از مواد مصرفی در این فناوری را تشکیل می‌دهد. این پلیمر از منابع تجدیدپذیر کشاورزی مانند نشاسته ذرت، چغندر قند و نیشکر تولید می‌شود و به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری، زیست‌سازگاری و سمیت پایین، در کاربردهای پزشکی، زیست‌فناوری و بسته‌بندی مورد توجه قرار گرفته است. در فرآیندهای اکستروژنی، از جمله چاپ سه‌بعدی گرانولی، PLA به دلیل دمای ذوب نسبتاً پایین، پایداری فرآیندی مناسب و قابلیت شکل‌دهی آسان، یکی از گزینه‌های رایج برای ساخت داربست‌های مهندسی بافت، سامانه‌های دارورسانی و ساختارهای متخلخل زیستی محسوب

سلول، زنده‌مانی سلولی نیز به‌عنوان معیاری کلیدی مطرح است. یکی از چالش‌های اساسی در چاپ سه‌بعدی اکستروژنی مبتنی بر گرانول و پیچران، نحوه‌ی رفتار مواد پُر شده (کامپوزیت‌ها) در مسیر جریان و افشانک است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که در این سامانه‌ها، اندازه ذرات، درصد وزنی پرکننده و نسبت قطر پرکننده به قطر افشانک نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری جریان و احتمال انسداد دارند. همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، در حالتی که از ذرات کوچک با محتوای کم استفاده می‌شود، جریان مذاب در مسیر افشانک پایدار بوده و ماده بدون ایجاد تجمع از دهانه خارج می‌شود؛ اما در صورت استفاده از ذرات بزرگ‌تر یا افزایش درصد پرکننده، پدیده‌هایی مانند ناهم‌راستایی الیاف، تجمع ذرات و انسداد مسیر رخ می‌دهد که عملکرد چاپگر و کیفیت قطعه نهایی را به شدت کاهش می‌دهد [۱۴].

مدل‌سازی‌های عددی (شامل CFD و روش اجزای مجزا DEM) نشان داده‌اند که ارتباط مستقیمی میان طول الیاف، درصد حجمی فیلر، و قطر افشانک وجود دارد. برای مثال، الیاف کوتاه با طول تقریبی ۰.۲۴ میلی‌متر در افشانک ۰.۴۵ میلی‌متری تا زمانی که درصد پرکننده کمتر از حدود ۲۶.۷٪ باشد، جریان پایدار ایجاد می‌کنند. در مقابل، افزایش طول الیاف به ۰.۳۵ میلی‌متر حتی در مقادیر کمتر از ۲۰٪ باعث اختلال در جریان و انسداد می‌شود. حتی در بارگذاری حجمی پایین مانند ۱۳٪ نیز طول الیاف حدود ۰.۴۵ میلی‌متر موجب گرفتگی افشانک خواهد شد. همچنین ثابت شده است که اگر نسبت قطر افشانک



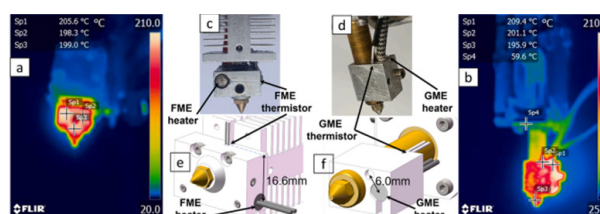
شکل ۸. نمایش طرحواره یک افشانک چاپ در دو حالت مختلف فرآیندی برای کامپوزیت‌های زیستی: (a) مقدار کم پرکننده و ذرات کوچک در ماتریس پلیمری همراه با جریان پیوسته در مجرا؛ (b) مقدار زیاد پرکننده و ذرات بزرگ در ماتریس پلیمری که منجر به ناهماهنگی و تجمع الیاف و گرفتگی مجرا می‌شود. (Dn: قطر افشانک) [۱۴].



شکل ۹. طرحواره چاپگر سه بعدی FGF، تصویری از آزمون حافظه شکلی در پژوهش یوسفی و همکاران [۲۲].

اختلاف معنی داری در خواص کششی، استحکام خمشی، مدول خمشی و استحکام ضربه بین دو روش وجود ندارد، اما در سختی Shore D و کرنش شکست خمشی تفاوت مشاهده شد. نویسندگان همچنین با ارجاع به شکل ۱۰ نشان دادند که دمای نزدیک ورودی خوراک به  $59.6^{\circ}\text{C}$  می‌رسد که می‌تواند باعث نرم شدن گرانول و افزایش خطر گرفتگی شود. نکته قابل توجه این پژوهش، استفاده هم‌زمان از تحلیل‌های حرارتی، رئولوژیکی و مولکولی در کنار آزمون‌های مکانیکی است؛ موضوعی که در بسیاری از مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته بود. علاوه بر این، مقاله بر قابلیت استفاده از ضایعات PLA و کاربرد فناوری چاپ گرانولی در اقتصاد چرخشی و کاهش هزینه‌های تولید رشته تأکید دارد.

بدایعی و همکاران در پژوهشی با تمرکز بر فناوری چاپ سه‌بعدی اکستروژن گرانولی، یک کامپوزیت زیست‌پایه‌ی تقویت‌شده با الیاف پیوسته شامل PLA، پودر زغال بامبو (BC) و الیاف ابریشم پیوسته (CSF) را توسعه دادند [۲۴]. برخلاف سامانه‌های رایج مبتنی بر رشته، در این روش از خوراک گرانولی استفاده شده که امکان نرخ تولید بالاتر، هزینه‌ی کمتر مواد اولیه و افزودن مستقیم تقویت‌کننده‌ها را فراهم می‌کند. پژوهشگران با اصلاح سامانه‌ی اکستروژن و یکپارچه‌سازی تزریق الیاف



شکل ۱۰. تصاویر توزیع دمایی دای‌های اکستروژن رشته‌ای (a) و گرانولی (b)، به همراه تصاویر ساختار دای (c) برای رشته‌ای و (d) برای گرانولی و مدل‌های سه‌بعدی آن‌ها. نقاط Sp1، Sp2، Sp3 و Sp4 به ترتیب نشان‌دهنده نقاط اندازه‌گیری دمای گرم‌کن، نشانگر دما، افشانک و ورودی اکستروژن هستند [۲۳].

می‌شود. با این حال، این پلیمر نسبت به بسیاری از پلیمرهای نفت‌پایه چقرمگی و انعطاف‌پذیری کمتری دارد و رفتار نسبتاً شکننده آن می‌تواند در برخی کاربردهای مهندسی محدودیت ایجاد کند. علاوه بر این، چالش‌هایی مانند کنترل نرخ تجزیه، مقاومت حرارتی پایین و آب‌گریزی سطحی که می‌تواند بر چسبندگی و رشد سلولی تأثیر بگذارد، از جمله محدودیت‌های استفاده از PLA در کاربردهای زیست‌پزشکی و چاپ سه‌بعدی محسوب می‌شوند. از این رو، پژوهش‌های اخیر عمدتاً بر بهبود خواص مکانیکی، اصلاح سطح، و توسعه کامپوزیت‌های مبتنی بر PLA برای افزایش فرآیندپذیری و عملکرد آن در فناوری‌های اکستروژنی و به‌ویژه چاپ سه‌بعدی گرانولی متمرکز شده‌اند. [۱۹-۲۱]

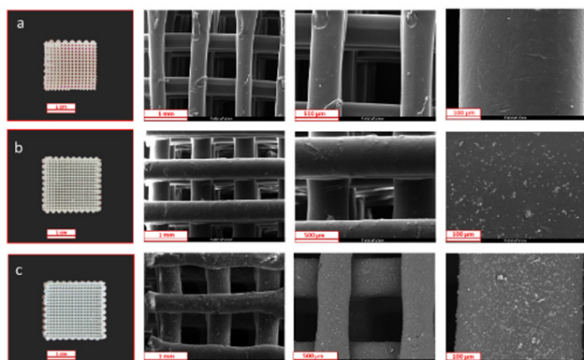
یوسفی و همکاران نانوکامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر PLA/PBAT/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> را برای کاربردهای چاپ چهاربعدی و حافظه شکلی مغناطیسی با استفاده از فناوری FGF توسعه دادند [۲۲]. در این پژوهش، مخلوط PLA/PBAT با نسبت وزنی ۳۰/۷۰ تهیه و با نانوذرات مگنتیت در مقادیر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ phr تقویت شد. فرایند اختلاط مذاب در دمای  $190^{\circ}\text{C}$  و سرعت ۱۹۰ rpm انجام شد و نمونه‌ها بدون مرحله رشته‌سازی تولید شدند. نتایج مورفولوژی و آزمون‌های حرارتی-مکانیکی دینامیکی نشان داد که نانوذرات Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> عمدتاً در فاز PBAT توزیع شده و موجب افزایش مدول ذخیره، پایداری حرارتی، استحکام، ازدیاد طول و چقرمگی نانوکامپوزیت‌ها شدند. بهترین عملکرد مربوط به نمونه حاوی ۱۰ phr اکسید آهن بود؛ در حالی که مقادیر بالاتر به دلیل تجمع نانوذرات باعث افت خواص شدند. همچنین نمونه‌های مستطیلی با ابعاد  $1.5 \times 1.0 \times 40$  mm حافظه شکلی سریع و مؤثری را تحت تحریک حرارتی و میدان مغناطیسی نشان دادند؛ به طوری که پس از گرم شدن تا  $80^{\circ}\text{C}$  و تثبیت شکل موقت، توانستند تحت القای مغناطیسی شکل اولیه خود را بازیابی کنند. نتایج نشان داده است که استفاده از سامانه تغذیه گرانولی امکان کنترل بهتر جریان رئولوژیکی و چاپ پایدار نانوکامپوزیت‌های حاوی ذرات اکسید آهن را فراهم کرد و مسیر مناسبی برای توسعه مواد هوشمند قابل تحریک از راه دور در چاپ چهاربعدی ارائه داد.

چن و همکاران به مقایسه‌ی چاپ سه‌بعدی مبتنی بر رشته و مبتنی بر گرانول برای قطعات PLA پرداختند و نشان دادند که روش گرانولی می‌تواند بدون نیاز به تولید رشته، عملکرد مکانیکی مشابهی با روش رشته‌ای ایجاد کند [۲۳]. در این مطالعه، یک چاپگر Creality Ender 3 Pro با استفاده از اکسترودر تک‌پیچ گرانولی اصلاح شد. نتایج نشان داد که

گیرد. همچنین پایداری ابعادی مناسب آن سبب می شود داربست پس از کاشت، ساختار خود را تا زمان تشکیل بافت جدید حفظ کند. با این حال، سرعت تخریب پایین، آب‌گریزی و محدودیت در تحمل بارهای مکانیکی بالا از مهم‌ترین نقاط ضعف PCL به شمار می‌روند. به همین دلیل، در بسیاری از پژوهش‌ها این پلیمر با مواد زیست‌فعال یا سایر پلیمرها ترکیب می‌شود تا خواص زیستی و مکانیکی آن بهبود یابد [۲۵، ۲۶].

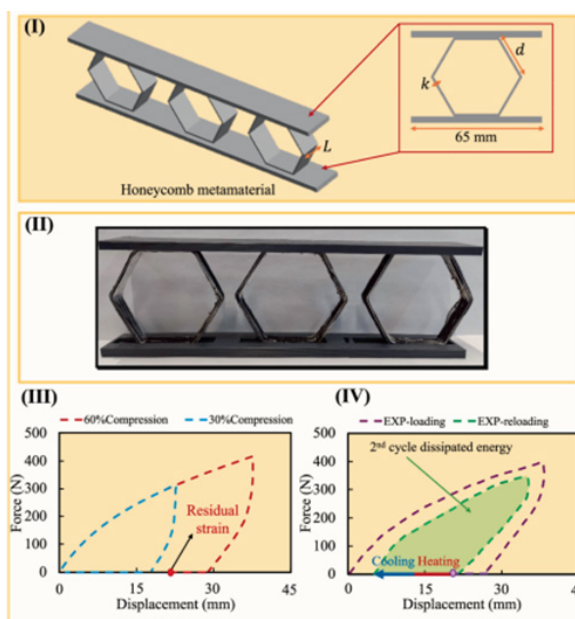
در مطالعه‌ای، لطفیان و همکاران داربست‌های زیست‌فعال مبتنی بر پلی‌کاپرولاکتون را با افزودن نانوذرات کلسیم زیرکونیوم سیلیکات (CZS) و با استفاده از چاپ سه‌بعدی مبتنی بر اکستروژن گرانولی توسعه دادند [۲۷]. هدف این پژوهش بهبود خواص مکانیکی و زیست‌فعالی داربست‌های مورد استفاده در مهندسی بافت استخوان بود. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، داربست‌های چاپ‌شده دارای ساختار متخلخل و لایه‌گذاری منظم بوده‌اند که برای کاربردهای مهندسی بافت اهمیت زیادی دارد. نتایج نشان داد که افزودن CZS تأثیر قابل توجهی بر دمای ذوب پلیمر نداشت، اما باعث افزایش دمای بلورینگی و بهبود استحکام فشاری داربست‌ها شد؛ به طوری که استحکام فشاری نمونه‌های کامپوزیتی تا حدود ۱۰.۹ مگاپاسکال افزایش یافت. همچنین داربست‌های حاوی این نانوذرات توانایی بیشتری در تشکیل لایه آپاتیت در محیط شبیه‌سازی شده مایعات بدن نشان دادند که بیانگر افزایش زیست‌فعالی آن‌ها است. نتایج آزمون‌های زیست‌سازگاری نیز افزایش تکثیر سلول‌های استخوانی در داربست‌های کامپوزیتی را نشان داد. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب پلی‌کاپرولاکتون با نانوذرات CZS می‌تواند رویکردی مؤثر برای توسعه داربست‌های زیست‌فعال برای تسریع بازسازی استخوان باشد.

در پژوهشی، رندن و همکاران کوپلیمرهای زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر PCEC را بر پایه‌ی پلی اتیلن گلاکول و



شکل ۱۲. تصاویر SEM از داربست‌های PCL و کامپوزیتی:

(a) PCL، (b) PC20، (c) PC40 [۲۷].



شکل ۱۱. خواص مکانیکی متاساختار لانه‌زنبوری ساخته‌شده از کامپوزیت زیستی PLA/BC/CSF. (I) طرحواره متاساختار طراحی شده، (II) ساختار لانه‌زنبوری چاپ سه‌بعدی شده، (III) پاسخ نیرو-جاب‌جایی تحت فشار چرخه‌ای در سطوح ۶۰٪ و ۳۰٪، (IV) ویژگی‌های نیرو-جاب‌جایی و اتلاف انرژی در چرخه‌های متعدد پس از فرایند بازیابی شکل [۲۴].

پیوسته در حین چاپ، موفق شدند خواص مکانیکی کامپوزیت را به طور چشمگیری بهبود دهند؛ به طوری که افزودن ۳ درصد وزنی پودر زغال بامبو استحکام کششی PLA را ۲۸٪ افزایش داد و حضور الیاف ابریشم پیوسته موجب رسیدن استحکام کششی به ۱۰۸ MPa معادل ۲۱۳٪ بیشتر از PLA خالص شد. همچنین استحکام خمشی سه‌نقطه‌ای ۲۴۷٪ افزایش و نرخ سوختن ۴۱٪ کاهش یافت. نتایج پایداری حرارتی نشان داد نمونه‌های PLA/BC/CSF در دمای ۷۰ °C تحت بار ثابت، پایداری ابعادی خود را حفظ کردند، در حالی که PLA خالص دچار تغییر شکل شد (شکل ۱۱). علاوه بر این، متاساختارهای لانه‌زنبوری و دوزنقه‌ای چاپ‌شده رفتار جذب انرژی و بازیابی شکلی مطلوبی از خود نشان دادند.

## ۵-۲ پلی‌کاپرولاکتون (PCL)

پلی‌کاپرولاکتون (PCL) یک پلی‌استر آلیفاتیک زیست‌تخریب‌پذیر است که به دلیل زیست‌سازگاری، سمیت پایین و قابلیت فرآیندپذیری مناسب، کاربرد گسترده‌ای در چاپ سه‌بعدی زیستی دارد. این پلیمر دارای دمای ذوب پایین و انعطاف‌پذیری مطلوب بوده، می‌تواند در ساخت داربست‌های مهندسی بافت، به‌ویژه در بازسازی استخوان و غضروف، مورد استفاده قرار

نیازمند سامانه‌های چاپ با دمای بالا و کنترل دقیق حرارت است. در چاپ سه بعدی گرانولی، PEEK امکان تولید قطعات مستحکم، سفارشی و مقاوم در برابر ضد عفونی کردن را فراهم می‌کند و به دلیل مدول نزدیک به استخوان طبیعی، در ساخت کاشتنی‌های ستون فقرات، مفاصل و پروتزهای پزشکی کاربرد گسترده‌ای دارد. با این حال، آب‌گریزی سطح، زیست‌فعالی پایین و دشواری چسبندگی سلولی از مهم‌ترین محدودیت‌های این پلیمر محسوب می‌شوند. از این رو، پژوهش‌های اخیر بر اصلاح سطح، ایجاد تخلخل، استفاده از پوشش‌های زیست‌فعال و توسعه کامپوزیت‌های مبتنی بر PEEK متمرکز شده‌اند تا عملکرد زیستی و فرآیندپذیری آن در فناوری‌های اکستروژنی و چاپ سه بعدی گرانولی بهبود یابد [۲۹].

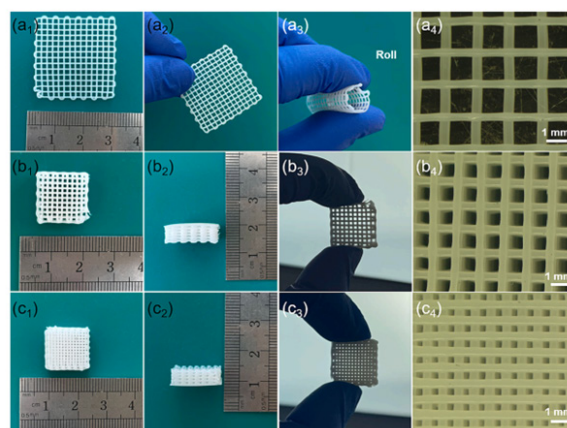
Pisaneschi و همکاران در مطالعه‌ای بر روی ساخت کاشتنی‌های جمجمه‌ای اختصاصی بیمار با استفاده از پلیمر PEEK و فناوری شکل‌گیری آزاد ابرگ)، عملکرد مکانیکی و ساختاری قطعات چاپ‌شده را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند [۳۰]. در این پژوهش، نمونه‌های خمشی با ابعاد  $4\text{mm} \times 10 \times 80$  در دو جهت XY و XZ چاپ شدند و آزمون سه نقطه‌ای مطابق استاندارد ISO ۱۷۸ با سرعت  $2\text{mm}/\text{min}$  انجام گرفت. نتایج نشان داد که قطعات چاپ‌شده در جهت XZ نسبت به XY دارای سختی و مقاومت خمشی بالاتری هستند. همچنین آزمون DSC نشان داد که PEEK پس از چاپ عمدتاً در حالت آمورف باقی مانده است که این موضوع به کاهش اعوجاج و بهبود چسبندگی بین‌لایه‌ای کمک می‌کند. کاشتنی جمجمه‌ای چاپ‌شده در آزمون فشاری تا بار  $N1800$  و جابه‌جایی  $6\text{mm}$  پیش از شکست مقاومت نشان داد و شکست عرضی نسبت به جهت ساخت، بیانگر اتصال مناسب لایه‌ها بود. علاوه بر این، تطابق خوبی میان نتایج تجربی و تحلیل المان محدود مشاهده شد که اعتبار مدل‌سازی عددی را تأیید می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، منحنی‌های بار-جابه‌جایی حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی همخوانی نزدیکی با یکدیگر دارند و قابلیت APF را برای تولید کاشتنی‌های PEEK با عملکرد مکانیکی قابل قبول نشان می‌دهند.

Curmi و همکاران در مطالعه‌ای اثر گرانی در درجات مختلف PEEK را بر استحکام برشی بین‌لایه‌ای در ساخت افزایشی مبتنی بر گرانول را بررسی کردند [۳۱]. نتایج نشان داد که هم گرانی ماده و هم دمای اکسترودر نقش تعیین‌کننده‌ای در چسبندگی بین‌لایه‌ای دارند؛ به طوری که درجه L4000G با گرانی بالاتر، در دمای  $220^\circ\text{C}$  بهترین عملکرد را نشان داد و بیشترین استحکام بین‌لایه‌ای برابر با  $17,70 \pm 0,58\text{MPa}$

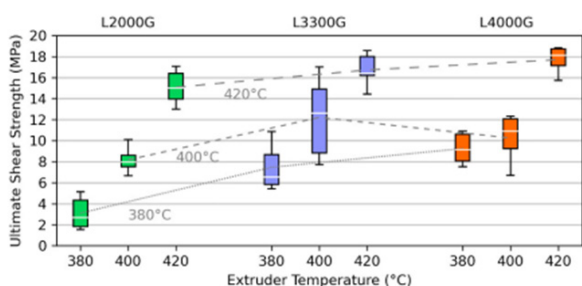
پلی (ε-کاپرولاکتون-کو-اتیلن کربنات) سنتز و اثر وزن مولکولی PEG را بر خواص فیزیکی، مکانیکی و رفتار تخریب این مواد بررسی کردند [۲۸]. نتایج نشان داد که تغییر وزن مولکولی PEG تأثیر قابل توجهی بر ساختار، درجه تبلور، رفتار رئولوژیکی و خواص حرارتی کوپلیمرها دارد؛ به طوری که با افزایش وزن مولکولی PEG، انعطاف‌پذیری و زیست‌تخریب‌پذیری نمونه‌ها افزایش یافت، در حالی که نمونه‌های دارای PEG کوتاه‌تر از استحکام مکانیکی و پایداری ساختاری بیشتری برخوردار بودند. این پژوهش همچنین نشان داد که کوپلیمرهای سنتز شده قابلیت فرآیندپذیری مناسبی در چاپ سه بعدی مبتنی بر اکستروژن گرانول و پیچ‌ران دارند و می‌توان از آن‌ها برای تولید داربست‌های متخلخل با معماری منظم و چسبندگی بین‌لایه‌ای مطلوب استفاده کرد. همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، داربست‌های چاپ‌شده دارای ساختار لایه‌ای منظم و تخلخل کنترل‌شده بوده‌اند که برای کاربردهای مهندسی بافت و بازسازی پزشکی اهمیت بالایی دارد.

### ۳-۵ پلی اتر اتر کتون (PEEK)

پلی اتر اتر کتون یکی از پلیمرهای گرمانرم مهندسی و نیمه‌بلورین است که به دلیل استحکام مکانیکی بالا، پایداری حرارتی و شیمیایی مناسب، و زیست‌سازگاری مطلوب، در فناوری‌های چاپ سه بعدی مبتنی بر اکستروژن و به‌ویژه ساخت کاشتنی‌های پزشکی مورد توجه قرار گرفته است. این پلیمر دارای دمای ذوب بالا (حدود  $343^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد) و مقاومت حرارتی مناسب بوده، به همین دلیل در فرآیندهای اکستروژنی



شکل ۱۳. تصاویر دیجیتال و تصاویر میکروسکوپ نوری از داربست‌های PCE20kC چاپ‌شده به روش سه بعدی: (a) ورق دولایه، (b) داربست ده‌لایه با تخلخل هزار میکرومتر، (c) داربست ده‌لایه با تخلخل پانصد میکرومتر [۲۸].



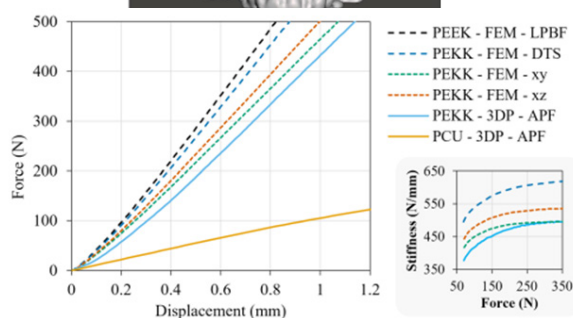
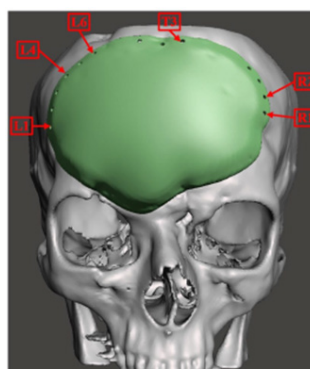
شکل ۱۵ نمودار جعبه‌ای استحکام برشی نهایی نمونه‌های آزمون فشار-برش. خطوط چین‌دار، روندهای هم‌دمای مربوط به هر دمای اکسترودر را نشان می‌دهند و بر اساس میانگین نتایج ترسیم شده‌اند [۳۱] (n=5).

افزایش قابل توجه استحکام کششی و خمشی شد؛ به طوری که نمونه 10HA40CF به استحکام کششی ۱۱۵.۷ MPa رسید، در حالی که افزایش HA بیشتر موجب افزایش مدول و کاهش چقرمگی شد. همچنین مشخص شد زمانی که نسبت حجمی فاز تقویت‌کننده از حدود ۲۰٪ فراتر می‌رود، فرایند تبلور PEEK مختل شده، تخلخل نمونه‌ها افزایش می‌یابد. تصاویر SEM نشان دادند در درصد‌های پایین تقویت‌کننده، اتصال بین HA و CF، زمینه PEEK مناسب است، اما در مقادیر بالاتر، جدایش بین لایه‌ای و حفرات افزایش پیدا می‌کند. در شکل ۱۶، طراحی سامانه اکستروژن پیچی شامل هندسه مارپیچ، نواحی تغذیه، تراکم و اندازه‌گیری مذاب، به همراه جهت چاپ نمونه‌های مکانیکی نمایش داده شده است که نقش کلیدی این ساختار را در بهبود اختلاط و فشار اکستروژن نشان می‌دهد.

## ۶ چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده در چاپ سه‌بعدی گرانولی

بررسی گسترده پژوهش‌های موجود نشان می‌دهد که چاپ سه‌بعدی مبتنی بر میکرواکسترودرهای پیچ‌ران یا گرانولی همچنان فناوری‌ای در حال توسعه است و با وجود پیشرفت‌های چشمگیر سال‌های اخیر، هنوز با چالش‌های فنی و تحقیقاتی متعددی روبه‌رو است. مهم‌ترین مسیرهای پژوهشی آینده در این حوزه را می‌توان در چند محور اصلی خلاصه کرد؛ کنترل دقیق و یکنواخت اکستروژن، بهبود قابلیت اختلاط و فرآیندپذیری مواد کامپوزیتی، و طراحی میکرواکسترودرهای سبک، کوچک و کارآمد.

پیشرفت در این حوزه‌ها می‌تواند امکان پردازش طیف گسترده‌ای از مواد مهندسی، زیست‌سازگار و تقویت‌شده را فراهم کند. یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از میکرواکسترودر، حذف



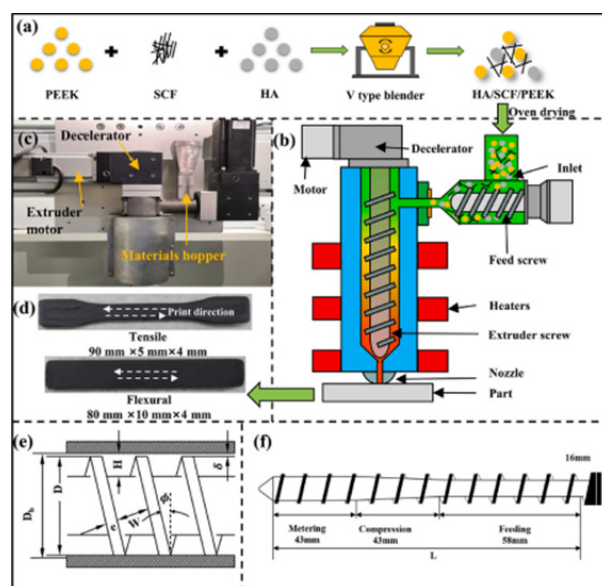
شکل ۱۴. طرحواره قطعه چاپ شده، منحنی‌های بار-جاب‌جایی نمونه‌ها [۳۰].

به دست آمد. در مقابل، برای نمونه با گرانروی کمتر (L2000G)، افزایش دمای چاپ از ۳۸۰ به ۴۲۰ درجه سانتیگراد باعث رشد استحکام برشی نهایی از  $1,58 \pm 3.10$  به  $15.08 \pm 1.68$  MPa شد که نشان‌دهنده اثر بسیار قوی شرایط فرایندی بر کیفیت اتصال لایه‌ها است. همچنین تغییرات بلورینگی با نتایج مکانیکی همسو بود؛ به گونه‌ای که درجات بلورینگی گزارش شده با رامن اسپکتروسکوپی در محدوده حدود  $29.7 \pm 1.3$ ٪ تا  $33$ ٪ قرار داشت و با افزایش دمای اکسترودر کاهش یافت. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، روند افزایش استحکام برشی نهایی با افزایش دمای چاپ به وضوح مشاهده می‌شود و این شکل به خوبی نقش کلیدی گرانروی و دمای فرایند را در تقویت قدرت بین لایه‌ای نشان می‌دهد.

ژانگ و همکاران، یک سامانه چاپ سه‌بعدی مبتنی بر اکستروژن گرانولی برای ساخت کامپوزیت‌های HA/CF/PEEK توسعه دادند و تأثیر میزان هیدروکسی‌آپاتیت (HA) و الیاف کربن (CF) را بر ریزساختار، تبلور و خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها بررسی کردند [۳۲]. برخلاف فرایندهای متداول FFF، استفاده از اکسترودر پیچی به دلیل ایجاد فشار و اختلاط مذاب بالاتر، امکان چاپ کامپوزیت‌های با گرانروی زیاد و درصد تقویت‌کننده تا ۶۰ wt٪ را فراهم کرد که برای کاربردهای کاشتینی، کاشتینه استخوانی اهمیت زیادی دارد. نتایج نشان داد افزودن CF موجب

نیاز به رشته‌های از پیش ساخته و تولید درجا ماده مصرفی در هنگام چاپ است. این ویژگی، علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید، می‌تواند در کاربردهای پزشکی بسیاری از چالش‌های مرتبط با نگهداری، آلودگی و الزامات ضدعفونی کردن را کاهش دهد. از این‌رو، این فناوری ظرفیت بالایی برای تولید پروتزهای سفارشی، قطعات با استحکام بالا، داربست‌های زیستی و مواد نوین مورد استفاده در مهندسی بافت دارد [۳۳، ۳۴].

در حال حاضر، بخش عمده‌ای از چاپگرهای سه بعدی صنعتی و رومیزی همچنان مبتنی بر استفاده از رشته‌های آماده هستند. با این حال، روند جهانی به سمت توسعه و استفاده از میکرواکسترودرهای گرانولی در مقیاس‌های پژوهشی، نیمه‌صنعتی و صنعتی در حال گسترش است. توسعه و بهینه‌سازی این فناوری می‌تواند زمینه‌ساز افزایش رقابت‌پذیری، کاهش وابستگی به واردات مواد مصرفی و شکل‌گیری نسل جدیدی از چاپگرهای چندماده‌ای باشد که قابلیت پردازش مستقیم مواد اولیه ارزان و متنوع را دارند.



شکل ۱۶. تجهیزات اکسترودر پیچی. (a) آماده‌سازی پودر، (b) طرحواره دستگاه، (c) تصاویر واقعی تجهیزات دستگاه، (d) اندازه نمونه مکانیکی و جهت چاپ، (e) پارامترهای پیچ، (f) طول بخش‌های پیچ [۳۲].

## مراجع

1. Pagac M., Hajnys J., Ma Q. P., Jancar L., Jansa J., Stefek P., Mesicek J., A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing, *Polymers* , 13, 598, **2021**
2. Prabhakar M., Manoj A. K., Saravanan A., Haiter Lenin A., Mayandi K., Sethu Ramalingam P., A Short Review on 3D Printing Methods, Process Parameters and Materials, *Materials Today: Proceedings* , 45, 6108-6114, **2021**
3. Vora H. D., Sanyal S., A Comprehensive Review: Metrology in Additive Manufacturing and 3D Printing Technology, *Progress in Additive Manufacturing*, 5, 319-353, **2020**
4. Kumar A., Singh A. P., Singh S. K., Singh R., Ahuja I. P. S., Application of 3D Printing for Engineering and Bio-Medicals: Recent Trends and Development, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* , 17, 2127-2136, **2023**
5. Aznarte Garcia E., Qureshi A. J., Ayranci C., A Study on Material-Process Interaction and Optimization for VAT Photopolymerization Processes, *Rapid Prototyping Journal* , 24, 1479-1485, **2018**
6. Nejadbrahim A., Ebrahimi M., Allonas X., Crouxé-Barghorn C., Ley C., Métral B., A New Safranin-Based Three-Component Photoinitiating System for High Resolution and Low Shrinkage Printed Parts via Digital Light Processing, *RSC Advances* , 9, 39709-39720, **2019**
7. Ahmadi Z., Najafi M., Nejadbrahim A., Ataefard M., Investigation of Printing Parameters on Dimensional Accuracy of Geometrically Complex Objects in FDM 3D Printing, *Progress in Color, Colorants and Coatings* , 18, 493-502, **2025**
8. Patti A., Challenges to Improve Extrusion-Based Additive Manufacturing Process of Thermoplastics Toward Sustainable Development, *Macromolecular Rapid Communications*, 45, 2400249, **2024**
9. Pignatelli F., Percoco G., An Application- and Market-Oriented Review on Large Format Additive Manufacturing Focusing on Polymer Pellet-Based 3D Printing, *Progress in Additive Manufacturing* , 7, 1363-1377, **2022**
10. Justino Netto J. M., Idogava H. T., Frezzatto Santos L. E., Silveira Z. D. C., Romio P., Alves J. L., Screw-Assisted 3D Printing with Granulated Materials: A Systematic Review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115, 2711-2727, **2021**
11. Pagés-Llobet A., Espinach F. X., Julián F., Oliver-Ortega H., Méndez J. A., Effect of Extruder Type in the Interface of PLA Layers in FDM Printers: Filament Extruder Versus Direct Pellet Extruder, *Polymers* , 15, 2019, **2023**
12. McDonagh T., Belton P., Qi S., Direct Granule Feeding of Thermal Droplet Deposition 3D Printing of Porous Pharmaceutical Solid Dosage Forms Free of Plasticisers, *Pharmaceutical Research* , 39, 599-610, **2022**
13. Janning K., König S., Herbst L., Nießing B., Schmitt R. H., Development of an End-to-End Automated Production Concept for Extrusion-Based Additive Manufacturing of Personalized Medical Scaffolds, *Frontiers in Manufacturing Technology* , 5, 1572842, **2025**
14. Patel A., Taufik M., Extrusion-Based Technology in Additive Manufacturing: A Comprehensive Review, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49, 1309-1342, **2024**
15. Gupta A. K., Krishnanand, Taufik M., Effect of Process Parameters on Performances Measured in Filament and Pellets-Based Additively Manufactured Parts, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E: *Journal of Process Mechanical Engineering* , 239, 489-512, **2025**
16. Azad M. A., Olawuni D., Kimbell G., Badruddoza A. Z. M., Hossain M. S., Sultana T., Polymers for Extrusion-Based 3D Printing of Pharmaceuticals: A Holistic Materials-Process Perspective, *Pharmaceutics* , 12, 124, **2020**
17. Aftab M., Ikram S., Ullah M., Khan N., Naeem M., Khan M. A., Qizi O. K. A., Recent Trends and Future Directions in 3D Printing of Biocompatible Polymers, *Journal of Manufacturing and Materials Processing* , 9, 129, **2025**
18. Kyle S., Jessop Z. M., Al-Sabah A., Whitaker I. S., Printability of Candidate Biomaterials for Extrusion-Based 3D Printing: State-of-the-Art, *Advanced Healthcare Materials*, 6, 1700264, **2017**
19. Tümer E. H., Erbil H. Y., Extrusion-Based 3D Printing Applications of PLA Composites: A Review, *Coatings* , 11, 390, **2021**
20. Arockiam A. J., Subramanian K., Padmanabhan R. G., Selvaraj R., Bagal D. K., Rajesh S., A Review on PLA with Different Fillers Used as a Filament in 3D Printing, *Materials Today: Proceedings* , 50, 2057-2064, **2022**
21. Wang X., Huang L., Li Y., Wang Y., Lu X., Wei Z., Liu Y., Research Progress in Polylactic Acid Processing for 3D Printing, *Journal of Manufacturing Processes* , 112, 161-178, **2024**
22. Yousefi M. A., Rahmatabadi D., Baniassadi M., Bodaghi M., Baghani M., 4D Printing of Multifunctional and Biodegradable PLA-PBAT-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposites with Supreme Mechanical and Shape Memory Properties, *Macromolecular Rapid Communications* , 46, 2400661, **2025**
23. Liu H., Gong K., Portela A., Cao Z., Dunbar R., Chen

- Y., Granule-Based Material Extrusion Is Comparable to Filament-Based Material Extrusion in Terms of Mechanical Performances of Printed PLA Parts: A Comprehensive Investigation, *Additive Manufacturing*, 75, 103744, **2023**
24. Rahmani K., Ravanbod S., Dezaki M. L., Branfoot C., Bodaghi M., Pellet-Fed Continuous-Silk-Fibre 3D/4D Printing of PLA/Bamboo-Charcoal Bio-Composites with Shape Recovery and Thermomechanical Stability, *Materials & Design*, 290, 115704, **2026**
25. Borkar T., Goenka V., Jaiswal A. K., Application of Poly-ε-Caprolactone in Extrusion-Based Bioprinting, *Bioprinting*, 21, e00111, **2021**
26. Shaik Y. P., Schuster J., Shaik A., A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used in 3D Printing FDM Processes, *Open Access Library Journal*, 8, 1-19, **2021**
27. Emadi H., Baghani M., Masoudi Rad M., Hoomehr B., Baniassadi M., Lotfian S., 3D-Printed Polycaprolactone-Based Containing Calcium Zirconium Silicate: Bioactive Scaffold for Accelerating Bone Regeneration, *Polymers*, 16, 1389, **2024**
28. Liu Y. Y., Blazquez J. P. F., Yin G. Z., Wang D. Y., Llorca J., Echeverry-Rendon M., A Strategy to Tailor the Mechanical and Degradation Properties of PCL-PEG-PCL Based Copolymers for Biomedical Application, *European Polymer Journal*, 198, 112388, **2023**
29. Oladapo B. I., Zahedi S. A., Ismail S. O., Omigbodun F. T., 3D Printing of PEEK and Its Composite to Increase Bio-interfaces as a Biomedical Material: A Review, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 203, 111726, **2021**
30. Pisaneschi G., Numerical and Experimental Exploration of Patient-Specific Cranial Implants with 3D-Printed PEKK via Arburg Plastic Freeforming, *Progress in Additive Manufacturing*, 10, 8099-8111, **2025**
31. Curmi A., Rochman A., Buhagiar J., Influence of Polyether Ether Ketone (PEEK) Viscosity on Interlayer Shear Strength in Screw Extrusion Additive Manufacturing, *Additive Manufacturing*, 84, 104086, **2024**
32. Zhang B., Lu S., Niu J., Yang C., Sun C., Li D., Influence of Reinforcement Phase Content on Mechanical Properties of Hydroxyapatite/Carbon Fiber/Polyether-Ether-Ketone Composites 3D Printed by Screw Extrusion, *Composites Science and Technology*, 258, 110843, **2024**
33. Whyman S., Arif K. M., Potgieter J., Design and Development of an Extrusion System for 3D Printing Biopolymer Pellets, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 3417-3428, **2018**
34. Altıparmak S. C., Yardley V. A., Shi Z., Lin J., Extrusion-Based Additive Manufacturing Technologies: State of the Art and Future Perspectives, *Journal of Manufacturing Processes*, 83, 607-636, **2022**

