



ساخت افزودنی پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری به روش اکستروژن مواد

تألیف

دکتر محمد حیدری رارانی (عضو هیأت علمی دانشگاه اصفهان)

سولماز قرقانی‌پور

پریسا صادقی



سرشناسه	:	حیدری رارانی، محمد، ۱۳۶۱
عنوان و نام پدیدآور	:	ساخت افزودنی پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری: به روش اکستروژن مواد/ تألیف محمد حیدری رارانی، سولماز قرقانی‌پور، پریسا صادقی
مشخصات نشر	:	اصفهان: دانشگاه اصفهان، ۱۴۰۳
مشخصات ظاهری	:	ی، ۱۸۵ ص.
فروست	:	انتشارات دانشگاه اصفهان؛ ۷۶۴.
شابک	:	978-600-110-232-5
وضعیت فهرست‌نویسی	:	فیفا
یادداشت	:	کتابنامه
موضوع	:	مواد چندسازه پلیمری Polymeric composites چاپ سه‌بعدی Three-dimensional printing اکستروژن Extrusion process
شناسه افزوده	:	قرقانی پور، سولماز، ۱۳۷۵ -
شناسه افزوده	:	صادقی، پریسا، ۱۳۷۴ -
شناسه افزوده	:	دانشگاه اصفهان University of Isfahan TK ۷۸۸۷/۷
رده بندی کنگره	:	۶۸۱/۶۲۰۲۸۸
رده بندی دیوینی	:	۹۶۷۶۸۲۰
شماره کتابشناسی ملی	:	

عنوان کتاب:	ساخت افزودنی پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری: به روش اکستروژن مواد
تألیف:	محمد حیدری رارانی، سولماز قرقانی‌پور، پریسا صادقی
ویراستار ادبی:	کامران شهبازی
ناشر:	دانشگاه اصفهان
نوبت چاپ:	اول، پاییز ۱۴۰۳
شمارگان:	۱۰۰۰
قیمت:	۱/۵۰۰/۰۰۰ ریال



تمامی حقوق نشر برای ناشر محفوظ است

مراکز فروش کتاب

اصفهان: دانشگاه اصفهان، چاپخانه دانشگاه، تلفن: ۰۳۱-۳۷۹۳۲۱۸۵ و ۰۳۱-۳۷۹۳۲۰۹۲
 پُست الکترونیکی: press@res.ui.ac.ir فروش الکترونیکی کتاب: <https://press.ui.ac.ir>
 - میدان آزادی، خیابان دانشگاه، فروشگاه کتاب دانشگاه اصفهان تلفن: ۰۳۱-۳۷۹۳۲۰۶۸
 تهران: میدان انقلاب، خیابان شهید لبافی‌نژاد، بین ۱۲ فروردین و اردیبهشت، پلاک ۲۳۸
 مؤسسه کتابیران، مرکز پخش کتاب‌های دانشگاهی، تلفن: ۰۲۱-۶۶۴۹۴۴۰۹ و ۰۲۱-۶۶۴۱۱۱۷۳ - ۰۲۱

فهرست مطالب

فصل اول: معرفی ساخت افزودنی و چاپگرهای سه بعدی.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۱
۲-۱- اهمیت ساخت افزودنی.....	۲
۳-۱- انواع چاپگرهای سه بعدی.....	۴
۱-۳-۱- استریولیتوگرافی (SLA).....	۵
۲-۳-۱- تفجوشی لیزری انتخابی (SLS).....	۵
۳-۳-۱- پردازش نور دیجیتال (DLP).....	۷
۴-۳-۱- لایه نشانی ذوبی (FDM) یا تولید فیلامنت ذوبی (FFF).....	۸
۵-۳-۱- ساخت شیء لایه ای (LOM).....	۹
۶-۳-۱- هم‌پست پرفشار (BJ).....	۱۰
۴-۱- تاریخچه چاپ سه بعدی.....	۱۱
۵-۱- کاربرد چاپگرهای سه بعدی.....	۱۶
۱-۵-۱- صنعت هوافضا و خودروسازی.....	۱۶
۲-۵-۱- الکتریکی.....	۱۸
۳-۵-۱- پزشکی.....	۱۹
۴-۵-۱- دندان پزشکی.....	۲۰
۵-۵-۱- ساخت طلا و جواهر.....	۲۱
۶-۵-۱- ماکت سازی.....	۲۱
۶-۱- جمع بندی.....	۲۲
۷-۱- مراجع.....	۲۲
فصل دوم: چاپ سه بعدی پلیمرها با روش FDM.....	۲۷
۱-۲- مقدمه.....	۲۷
۲-۲- نحوه کار چاپگر.....	۲۸
۱-۲-۲- مرحله اول: طراحی مدل سه بعدی نرم افزاری (CAD).....	۲۹
۲-۲-۲- مرحله دوم: ترجمه مدل به زبان دستگاه.....	۳۲
۳-۲-۲- مرحله سوم: انتقال فایل به دستگاه چاپگر.....	۳۴
۴-۲-۲- مرحله چهارم: تنظیمات چاپگر FDM.....	۳۴
۵-۲-۲- مرحله پنجم: ساخت.....	۳۷
۶-۲-۲- مرحله ششم: عملیات پس پردازش.....	۳۹

۴۴	۳-۲- مواد اولیه چاپگر سه بعدی FDM (FFF).....
۴۶	۳-۲-۱- آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS).....
۴۷	۳-۲-۲- اسیدپلی لاکتیک (PLA).....
۴۹	۳-۲-۳- پلی اتیلن ترفتالات (PET).....
۴۹	۳-۲-۴- پلیمرهای با کارایی بالا (PEEK، PEKK و ULTEM).....
۵۰	۳-۲-۴- قابلیت ها و محدودیت های چاپگر FDM.....
۵۲	۳-۲-۵- جمع بندی.....
۵۲	۳-۲-۶- مراجع.....
۵۵	فصل سوم: مفاهیم و پارامترهای مهم ساخت به روش FDM.....
۵۵	۳-۱- مقدمه.....
۵۶	۳-۲- پارامترهای لایه بندی.....
۵۷	۳-۲-۱- ضخامت لایه.....
۶۰	۳-۲-۲- ضخامت دیواره.....
۶۲	۳-۲-۳- چگالی پرشدگی.....
۶۵	۳-۲-۴- الگوی پرشدن.....
۷۳	۳-۲-۵- سرعت چاپ.....
۷۵	۳-۲-۶- چسبندگی صفحه ساخت.....
۷۷	۳-۲-۶-۱- روش Raft.....
۷۹	۳-۲-۶-۲- روش Brim.....
۸۰	۳-۲-۶-۳- روش Skirt.....
۸۲	۳-۲-۷- سازه تکیه گاه.....
۸۸	۳-۳- جهت گیری ساخت.....
۹۰	۳-۴- شرایط دمایی.....
۹۱	۳-۴-۱- دمای نازل.....
۹۱	۳-۴-۲- دمای بستر چاپ.....
۹۲	۳-۴-۳- دمای محیط.....
۹۲	۳-۵- اصلاح تنظیمات پارامترها بر روی G-code و تبدیل آن به STL.....
۹۳	۳-۶- تأثیر پارامترهای چاپ بر خواص مکانیکی.....
۹۴	۳-۶-۱- ضخامت لایه.....
۹۵	۳-۶-۲- تأثیر چگالی پرشدگی.....
۹۶	۳-۶-۳- تأثیر الگوی پرشدن.....
۹۷	۳-۶-۴- تأثیر سرعت چاپ.....
۹۷	۳-۶-۵- تأثیر جهت گیری ساخت.....
۹۹	۳-۶-۶- تأثیر شرایط دمایی.....
۱۰۰	۳-۷- جمع بندی.....

۱۰۱.....	۳-۸- مراجع
۱۰۵.....	فصل چهارم: چاپ سه بعدی کامپوزیت های پلیمری
۱۰۵.....	۴-۱- مقدمه
۱۰۶.....	۴-۲- تعریف کامپوزیت و معرفی انواع مواد اولیه در کامپوزیت ها
۱۰۶.....	۴-۲-۱- دسته بندی کامپوزیت ها از نظر نوع زمینه
۱۰۸.....	۴-۲-۲- دسته بندی کامپوزیت ها از نظر نوع ماده تقویت کننده
۱۱۰.....	۴-۳- تولید فیلامنت
۱۱۳.....	۴-۴- چاپ سه بعدی کامپوزیت ها
۱۱۳.....	۴-۴-۱- چاپ سه بعدی کامپوزیت های تقویت شده با میکروذرات
۱۱۷.....	۴-۴-۲- چاپ سه بعدی کامپوزیت های تقویت شده با نانوذرات
۱۲۰.....	۴-۴-۲-۱- مشکلات چاپ سه بعدی کامپوزیت های تقویت شده با نانوذرات
۱۲۱.....	۴-۴-۳- چاپ سه بعدی کامپوزیت های تقویت شده با الیاف کوتاه
۱۲۳.....	۴-۴-۳-۱- مشکلات چاپ سه بعدی کامپوزیت های تقویت شده با الیاف کوتاه
۱۲۴.....	۴-۴-۴- چاپ سه بعدی کامپوزیت های تقویت شده با الیاف پیوسته
۱۲۵.....	۴-۴-۴-۱- چاپ سه بعدی کامپوزیت های گرمانرم تقویت شده با الیاف پیوسته
۱۳۶.....	۴-۴-۴-۲- چاپ سه بعدی کامپوزیت های گرماسخت تقویت شده با الیاف پیوسته
۱۴۲.....	۴-۴-۴-۳- مشکلات چاپ سه بعدی کامپوزیت های تقویت شده با الیاف پیوسته
۱۴۴.....	۴-۵- جمع بندی
۱۴۴.....	۴-۶- مراجع
۱۵۱.....	فصل پنجم: محدودیت ها و مشکلات ساخت به روش FDM
۱۵۱.....	۵-۱- مقدمه
۱۵۱.....	۵-۲- خرابی های چاپگر سه بعدی
۱۵۲.....	۵-۲-۱- خارج نشدن ماده از رشته ساز
۱۵۵.....	۵-۲-۲- حرکت نازل خارج از محدوده صفحه ساخت
۱۵۵.....	۵-۲-۳- تاب برداشتن
۱۵۸.....	۵-۲-۴- چسبیدن قطعه چاپ شده به صفحه چاپ
۱۶۰.....	۵-۲-۵- اکستروژن ناکافی و اکستروژن بیش از حد
۱۶۴.....	۵-۲-۶- وجود فضای خالی بین لایه ها
۱۶۹.....	۵-۲-۷- عدم چاپ برخی از لایه ها
۱۷۰.....	۵-۲-۸- پای فیل
۱۷۱.....	۵-۲-۹- رشته رشته شدن یا تار شدن فیلامنت
۱۷۶.....	۵-۲-۱۰- تغییر مکان لایه
۱۷۷.....	۵-۲-۱۱- متوقف شدن اکستروژن هنگام چاپ
۱۷۸.....	۵-۲-۱۲- نواربندی و لرزش در راستای Z
۱۷۹.....	۵-۱-۱۳- رگه شدن سطح چاپ

۱۸۰.....	۵-۲-۱۴- سایه انداختن سطح چاپ.....
۱۸۱.....	۵-۱-۱۵- عدم چاپ صحیح جزییات ریز.....
۱۸۱.....	۵-۲-۱۶- کاهش دقت ابعادی مدل چاپ شده.....
۱۸۲.....	۵-۱-۱۷- از بین رفتن سازه تکیه گاه.....
۱۸۲.....	۵-۲-۱۸- ناهموار بودن سطوح در ارتباط با سازه تکیه گاه.....
۱۸۳.....	۵-۳- آینده نگری ساخت افزودنی.....
۱۸۳.....	۵-۴- جمع بندی.....
۱۸۴.....	۵-۵- مراجع.....

فهرست جدول ها

۶۶.....	جدول ۳-۱: الگوهای پرشدگی.....
۷۷.....	جدول ۳-۲: مقادیر پیشنهادی برای دمای نازل و دمای صفحه ساخت و خنک کنندگی.....
۱۰۰.....	جدول ۳-۳: تأثیر برخی پارامترهای چاپ سه بعدی بر استحکام کششی.....
	جدول ۴-۱: پژوهش های صورت گرفته در زمینه چاپ سه بعدی کامپوزیت های تقویت شده با
۱۱۶.....	میکروذرات.....
۱۱۸.....	جدول ۴-۲: پژوهش های صورت گرفته در زمینه چاپ کامپوزیت های تقویت شده با نانوذرات.....
۱۲۲.....	جدول ۴-۳: پژوهش های صورت گرفته در زمینه چاپ کامپوزیت های تقویت شده با الیاف کوتاه...۱۲۲
	جدول ۴-۴: پژوهش های صورت گرفته در زمینه چاپ کامپوزیت های گرمانرم تقویت شده با الیاف
۱۳۱.....	پیوسته.....
۱۳۴.....	جدول ۴-۵: چاپگرهای کامپوزیتی با الیاف کربن.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: روند ساخت افزودنی..... ۲
- شکل ۲-۱: فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم..... ۴
- شکل ۳-۱: نحوه عملکرد چاپگر SLA..... ۶
- شکل ۴-۱: نحوه عملکرد چاپگر SLS..... ۷
- شکل ۵-۱: تفاوت نحوه عملکرد چاپگرهای SLS و DLP..... ۸
- شکل ۶-۱: نحوه کار چاپگر FDM..... ۹
- شکل ۷-۱: طرح‌واره‌ای از طرز کار چاپگر نوع LOM..... ۱۰
- شکل ۸-۱: نحوه کار چاپگر بایندرجت..... ۱۱
- شکل ۹-۱: نمونه‌ای از طرح‌های اولیه چاک هال برای تولید چاپگر سه‌بعدی..... ۱۳
- شکل ۱۰-۱: نخستین چاپگر اختراع شده توسط چاک هال..... ۱۳
- شکل ۱۱-۱: فنجان شست‌وشوی چشم..... ۱۴
- شکل ۱۲-۱: قسمتی از موتورجت که توسط چاپگر سه‌بعدی ساخته شده است..... ۱۸
- شکل ۱۳-۱: PCB انعطاف‌پذیر چاپ شده توسط چاپگر سه‌بعدی..... ۱۹
- شکل ۱۴-۱: نمونه‌ای از کاربرد چاپ سه‌بعدی در ساخت دست مصنوعی..... ۲۰
- شکل ۱۵-۱: نمونه‌ای از قالب دندان چاپ شده توسط چاپگر سه‌بعدی..... ۲۰
- شکل ۱۶-۱: نمونه‌ای از ساخت جواهر توسط چاپگر سه‌بعدی DLP..... ۲۱
- شکل ۱۷-۱: نمونه‌ای از ساخت ماکت پیچیده توسط چاپگر سه‌بعدی..... ۲۲
- شکل ۱-۲: خلاصه‌ای از مراحل ساخت محصول توسط چاپگر سه‌بعدی FDM..... ۲۸
- شکل ۲-۲: اسکنر سه‌بعدی..... ۲۹
- شکل ۳-۲: روند ایجاد یک مدل سه‌بعدی تشکیل شده از ابرنقاط توسط اسکنر سه‌بعدی..... ۳۰
- شکل ۴-۲: استخراج شکل جسم از ابرنقاط به دست آمده توسط اسکنر سه‌بعدی..... ۳۰
- شکل ۵-۲: طراحی مدل سه‌بعدی توسط نرم‌افزار..... ۳۱
- شکل ۶-۲: تقسیم مدل سه‌بعدی صورت انسان به مثلث‌های کوچک (وجه)..... ۳۲
- شکل ۷-۲: تغییر قالب یک فایل سه‌بعدی و آماده‌سازی برای چاپ..... ۳۳
- شکل ۸-۲: طریقه تراز کردن با کمک گرفتن از یک کاغذ..... ۳۵
- شکل ۹-۲: تأثیر فاصله مناسب و نامناسب سر نازل از صفحه ساخت..... ۳۶
- شکل ۱۰-۲: مسیر بارگذاری مواد اولیه..... ۳۶
- شکل ۱۱-۲: شمای کلی از طرز کار چاپگر FDM..... ۳۷
- شکل ۱۲-۲: چاپگر دارای ساختار الف (سه‌محوره و ب) دو محوره..... ۳۸

شکل ۲-۱۳:	قطعه چاپ شده توسط چاپگر FDM قبل و پس از عملیات سوهان کاری	۳۹
شکل ۲-۱۴:	جدا کردن سازه غیر قابل استفاده تکیه گاه	۴۰
شکل ۲-۱۵:	صیقلی کردن سطح روی قطعه چاپ شده با استفاده از بخار استون	۴۳
شکل ۲-۱۶:	گرد شدن گوشه ها و لبه های تیز قطعه چاپ شده توسط چاپگر FDM	۵۱
شکل ۳-۱:	دسته بندی انواع پارامترهای ساخت	۵۶
شکل ۳-۲:	برخی از پارامترهای لایه بندی	۵۷
شکل ۳-۳:	ضخامت لایه ها	۵۸
شکل ۳-۴:	تفاوت ضخامت لایه در قطعه چاپ شده	۵۸
شکل ۳-۵:	چاپ سه بعدی سطوح منحنی	۵۹
شکل ۳-۶:	تعداد دیوارها	۶۱
شکل ۳-۷:	نمونه های چاپ شده با چگالی پرشدگی مختلف	۶۳
شکل ۳-۸:	قطعه ای چاپ شده با چگالی پرشدگی متغیر	۶۴
شکل ۳-۹:	میزان تنش در نقطه اتصال گیره	۶۵
شکل ۳-۱۰:	الف) درصد چگالی پایین، ب) افزایش درصد چگالی پرشدن و ج) افزایش ضخامت دیواره	۶۶
شکل ۳-۱۱:	دسته بندی کلی الگوهای چاپ	۶۸
شکل ۳-۱۲:	الف) الگوی LINES و ب) الگوی ZIG-ZAG	۶۹
شکل ۳-۱۳:	الف) الگوهای GRID، ب) TRIANGLES و ج) TRI-HEXAGONS	۷۰
شکل ۳-۱۴:	الف) الگوهای CUBIC، ب) CUBIC SUBDIVISION، ج) OCTET و د)	
	QUARTER CUBIC	۷۱
شکل ۳-۱۵:	الف) الگوی GYROID در نرم افزار و ب) چاپ شده	۷۱
شکل ۳-۱۶:	الف) الگوهای CONCENTRIC، ب) CROSS و ج) CROSS 3D	۷۲
شکل ۳-۱۷:	تفاوت سرعت چاپ در کیفیت قطعه	۷۴
شکل ۳-۱۸:	سه روش شروع چاپ الف) RAFT، ب) BRIM و ج) SKIRT	۷۷
شکل ۳-۱۹:	نمایی از سه لایه تشکیل دهنده سازه RAFT	۷۸
شکل ۳-۲۰:	نمایی از BRIM	۷۹
شکل ۳-۲۱:	نمایی از SKIRT	۸۱
شکل ۳-۲۲:	نشان دادن بیرون آمدگی ها و پل ها با کمک حروف Y، H و T	۸۳
شکل ۳-۲۳:	نیاز به ساختار تکیه گاه برای بیرون آمدگی های بیش از ۴۵ درجه	۸۳
شکل ۳-۲۴:	استفاده نکردن از سازه تکیه گاه هنگام چاپ حرف T و خراب شدن چاپ	۸۴
شکل ۳-۲۵:	چاپ پل با طول های متفاوت	۸۴
شکل ۳-۲۶:	نمونه های چاپ شده در آزمون MASSIVE OVERHANG	۸۵
شکل ۳-۲۷:	روش ایجاد سازه تکیه گاه الف) خطی و ب) درختی	۸۶
شکل ۳-۲۸:	برای چاپ تصویر سمت راست، گزینه لمس صفحه ساخت و تصویر سمت چپ، گزینه	
	همه جا انتخاب شده است.	۸۷

- شکل ۳-۲۹: میزان نیاز سازه تکیه‌گاه در زاویه بیرون‌زدگی ۸۷
- شکل ۳-۳۰: جهت‌گیری ساخت ۸۹
- شکل ۳-۳۱: تأثیر جهت‌گیری‌های مختلف و نیاز قطعه به سازه تکیه‌گاه ۸۹
- شکل ۳-۳۲: شرایط دمایی چاپگر سه‌بعدی ۹۱
- شکل ۳-۳۳: الف) شکل طرح‌واره و ب) تصویر میکروسکوپی سطح مقطع برش‌خورده از نمونه چاپ‌شده توسط چاپگر FDM ۹۴
- شکل ۳-۳۴: نمونه واقعی و طرح‌واره لایه‌ها با درصد پرشدگی متفاوت: الف) ۲۰ درصد، ب) ۴۰ درصد، ج) ۶۰ درصد و د) ۸۰ درصد ۹۵
- شکل ۳-۳۵: طرح‌واره‌ای از جهت اعمال نیرو بر رشته‌های داخلی قطعه چاپ‌شده ۹۶
- شکل ۳-۳۶: درهم‌فرورفتگی بیشتر رشته‌ها هنگام چاپ با سرعت پایین‌تر ۹۷
- شکل ۳-۳۷: جهت‌گیری (زاویه) چاپ ۹۸
- شکل ۳-۳۸: نوع شکست در جهت‌گیری‌های متفاوت نمونه ۹۸
- شکل ۴-۱: کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الف) ذرات، ب) الیاف کوتاه، ج) الیاف بلند و د) الیاف پیوسته ۱۰۸
- شکل ۴-۲: طرح‌واره‌ای از دستگاه تولید فیلامنت ۱۱۱
- شکل ۴-۳: طرح‌واره‌ای از رشته‌ساز: الف) تک‌مارپیچ و ب) دومارپیچ ۱۱۲
- شکل ۴-۴: الف) اتمیزه‌کردن با گاز و ب) اتمیزه‌کردن با آب ۱۱۵
- شکل ۴-۵: روش الف) اکستروژن هم‌زمان و ب) اکستروژن دوگانه برای چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته ۱۲۶
- شکل ۴-۶: طرح‌واره‌ای از: الف) تولید فیلامنت تقویت‌شده با الیاف پیوسته و ب) رشته‌ساز چاپ الیاف کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف پیوسته ۱۲۷
- شکل ۴-۷: طرح‌واره‌ای از سر اکستروژن استفاده‌شده برای چاپ کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته ۱۲۸
- شکل ۴-۸: طرح‌واره‌ای از فرآیند آغشته‌سازی الیاف کربن با محلول پلیمر و دی‌کلرومتان و چاپ سه‌بعدی الیاف پیوسته ۱۳۰
- شکل ۴-۹: طرح‌واره‌ای از: الف) فرآیند چاپ به کمک گرمایش موضعی توسط لیزر در محل و ب) اتصال بین‌لایه‌ای در حضور لیزر ۱۳۱
- شکل ۴-۱۰: کاربرد کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته در قاب کوچک پهباد ۱۳۴
- شکل ۴-۱۱: نمونه‌های چاپ‌شده توسط چاپگر: الف) MARKFORGED و ب) ANISOPRINT ۱۳۶
- شکل ۴-۱۲: طرح‌واره‌ای از الف) فرآیند آغشته‌سازی، ب) چاپ فیلامنت و ج) فرآیند پخت در چاپ کامپوزیت گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته ۱۳۸
- شکل ۴-۱۳: نمای سطح مقطع برش‌خورده سرنگ DIW ۱۴۰
- شکل ۴-۱۴: طرح‌واره‌ای از چاپ سه‌بعدی LITA و اساس فرآیند ۱۴۱
- شکل ۵-۱: نمودار عیب‌یابی عملکرد رشته‌ساز در چاپگر سه‌بعدی ۱۵۳
- شکل ۵-۲: نمونه‌ای از مشکل تاب‌برداشتن گوشه نمونه ۱۵۶

- شکل ۳-۵: راه‌حلی برای رفع مشکل تاب برداشتن گوشه‌ها با استفاده از RAFT دایره‌ای..... ۱۵۷
- شکل ۴-۵: نمونه‌ای از صفحه ساخت انعطاف‌پذیر..... ۱۵۹
- شکل ۵-۵: مدل چاپ‌شده با مشکل اکستروژن ناکافی..... ۱۶۱
- شکل ۶-۵: مقایسه ضرایب اکستروژن..... ۱۶۲
- شکل ۷-۵: نمونه چاپ‌شده با مشکل اکستروژن بیش از حد..... ۱۶۳
- شکل ۸-۵: نمایش فضای خالی بین لایه اول و الگوی شبکه‌ای..... ۱۶۴
- شکل ۹-۵: شکاف‌های موجود در لایه اول قطعه چاپ‌شده..... ۱۶۶
- شکل ۱۰-۵: جدایش لایه‌های مختلف چاپ‌شده در اثر عدم چسبندگی مناسب..... ۱۶۷
- شکل ۱۱-۵: سوراخ‌های روی سطوح جانبی..... ۱۶۸
- شکل ۱۲-۵: الف) فاصله بین خطوط چاپ‌شده در لایه آخر و ب) فضای خالی در دیواره‌های لایه آخر..... ۱۶۹
- شکل ۱۳-۵: عدم چاپ تعدادی از لایه‌ها..... ۱۷۰
- شکل ۱۴-۵: قطعه‌ای با مشکل تاول زدن یا پای فیل..... ۱۷۰
- شکل ۱۵-۵: نمایش مشکل رشته‌رشته‌شدن فیلامنت بین نقاط مختلف چاپ در دو حالت زیاد و مناسب..... ۱۷۲
- شکل ۱۶-۵: عملیات RETRACTION..... ۱۷۳
- شکل ۱۷-۵: چاپگر با رشته‌ساز الف) غیرمستقیم و ب) مستقیم..... ۱۷۴
- شکل ۱۸-۵: آزمایش دماهای مختلف چاپ به کمک برج درجه حرارت..... ۱۷۵
- شکل ۱۹-۵: الف) تغییر مکان یک لایه مشخص و ب) تغییر مکان تدریجی چند لایه..... ۱۷۷
- شکل ۲۰-۵: نوارهای افقی در راستای Z در سطح خارجی قطعه..... ۱۷۸
- شکل ۲۱-۵: موج‌دار شدن سطح چاپ در اثر ارتعاشات چاپگر..... ۱۸۰

پیشگفتار

چاپ سه بعدی یا ساخت افزودنی فرآیندی است که طی آن، قطعات سه بعدی به کمک یک فایل دیجیتال به صورت لایه به لایه ایجاد می شوند. چاپگرهای سه بعدی طبق کد دریافتی از رایانه، مواد اولیه را لایه به لایه روی هم چیده و مدل نهایی را طی فرآیند افزودنی تشکیل می دهند. می توان گفت چاپگر سه بعدی همان چاپگر دوبعدی است که عملیات چاپ را به دفعات تکرار می کند. بیش از سی سال از ورود چاپگرهای سه بعدی به دنیای صنعت و فناوری می گذرد. در طی این سال ها، چاپگرهای سه بعدی نسبت به مدل اولیه خود پیشرفت چشم گیری داشته اند؛ به طوری که امروزه طبق استاندارد ASTM هفت روش مختلف برای ساخت افزودنی معرفی شده است. اکستروژن مواد¹ یکی از مهم ترین و پرکاربردترین این روش ها است. این فناوری با سادگی کارکرد، نیاز بشر به استفاده از دستگاه های پیچیده و گران قیمت را کمتر کرده است.

مزیت های چاپ سه بعدی و سادگی کار با چاپگرهای سه بعدی، فرصت های زیادی را برای کارآفرینانی که می خواهند یک کسب و کار جدید راه بیندازند، به وجود آورده است. در این راستا، کتاب حاضر می کوشد تا با معرفی فناوری های چاپ سه بعدی، خواننده را با انواع چاپگرهای مختلف و عملکرد آن ها آشنا کند. در ادامه، به دلیل مزیت ها و برتری فناوری چاپ سه بعدی به روش اکستروژن مواد، دو روش لایه نشانی ذوبی (FDM)² یا ساخت فیلامنت ذوبی (FFF)³ برای پلیمرهای گرمانرم⁴ و جوهرنویسی مستقیم (DIW)⁵ برای پلیمرهای گرماسخت⁶ شرح داده خواهند شد. همچنین، موارد زیر برای کار با چاپگر FDM، به صورت مفصل معرفی می شوند:

¹ Material extrusion

² Fused deposition modelling

³ Fused filament fabrication

⁴ Thermoplastic

⁵ Direct ink writing

⁶ Thermoset

- طرز کار و تنظیمات اولیه
 - معرفی نرم‌افزارها و سایت‌های مرتبط و کمک‌کننده
 - عملیات ساخت
 - عملیات پس‌پردازش برای بالا بردن کیفیت محصول نهایی
 - انواع مواد اولیه
 - قابلیت‌ها و محدودیت‌های این نوع چاپگر
- در ادامه، در فصلی دیگر، تمام پارامترهای ساخت، مشکلات و محدودیت‌های احتمالی و چگونگی رفع آن‌ها در ساخت با روش FDM به صورت کامل شرح داده شده است. اطلاعات موجود در این فصل، این کتاب را از کتاب‌های مشابه موجود در بازار متفاوت می‌کند. در پایان، به چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به عنوان موضوعی جدید در حوزه ساخت افزودنی بر اساس اکستروژن مواد پرداخته می‌شود. در این فصل، به طور کامل به نقاط ضعف و قوت ساخت افزودنی کامپوزیت‌ها با انواع تقویت‌کننده‌های ذره‌ای و الیافی (کوتاه و پیوسته)، انواع زمینه‌های پلیمری و نحوه تولید فیلامنت کامپوزیتی پرداخته می‌شود. امید است این مجموعه راهنمای خوبی در به عمل رساندن فعالیت و تحقیقات شما خواننده گرامی باشد. به طور کلی، این کتاب می‌تواند برای چند دسته از خوانندگان سودمند باشد:
- دانش‌آموزان و دانشجویانی که در این زمینه تصمیم به تحقیق و پژوهش دارند.
 - افرادی که می‌خواهند ماکت، قالب و غیره بسازند.
 - افرادی که می‌خواهند کسب‌وکار خانگی خود را ایجاد کنند.
 - تمامی افرادی که به دنبال تبدیل ایده‌های خود به جسم فیزیکی با کمترین هزینه هستند.
- این کتاب با توجه به تجربه عملی چندین ساله مؤلفین، گردآوری و تألیف شده و در تدوین آن کوشش فراوان به عمل آمده تا بدون اشکالات چاپی و مفهومی باشد. با وجود این، از خوانندگان محترم تقاضا می‌شود هرگونه ایراد و پیشنهاد خود را به آدرس الکترونیکی heidarirarani@yahoo.com ارسال نموده تا در ویرایش‌های بعدی اصلاح شوند.
- در پایان بر خود لازم می‌دانیم از جناب آقای دکتر فرهاد حاجی ابوطالبی، بابت ویرایش علمی متن و نیز مدیریت و کارکنان انتشارات دانشگاه اصفهان برای چاپ کتاب صمیمانه تشکر و قدردانی نماییم.

محمد حیدری رارانی

سولماز قرقانی‌پور

پریسا صادقی

فصل اول

معرفی ساخت افزودنی و چاپگرهای سه بعدی

۱-۱- مقدمه

ساخت افزودنی (AM)^۱ به مجموعه‌ای از فناوری‌ها و فرآیندهای توسعه‌یافته در طی بیش از سی سال اشاره دارد. انجمن مواد و آزمایش آمریکا (ASTM) به‌عنوان یک سازمان بین-المللی استاندارد در آمریکا، ساخت افزودنی را چنین تعریف می‌کند: «فرآیندی از اتصال مواد برای ساخت اشیاء، با کمک داده‌های سه‌بعدی که معمولاً به‌صورت لایه‌به‌لایه و برخلاف روش‌های تولید کاهشی انجام می‌گیرد» [۱]. به‌طور معمول، برای این فرآیند، از اصطلاحات AM یا «چاپ سه‌بعدی»^۲ استفاده می‌شود.

فرآیند AM با ایجاد یک مدل سه‌بعدی به کمک رایانه در نرم‌افزار طراحی (CAD)^۳ آغاز می‌شود. مدل سه‌بعدی مبتنی بر CAD معمولاً با قالب STL^۴ ذخیره می‌شود. طبق این قالب، نرم‌افزار فایل سه‌بعدی را به‌صورت لایه‌به‌لایه و به‌عنوان دستورکار به دستگاه AM ارسال می‌کند. سپس، دستگاه AM با اضافه‌کردن لایه‌هایی از مواد، یکی پس از دیگری، تا زمانی که جسم فیزیکی ایجاد شود، به کار خود ادامه می‌دهد. به‌جز قالب STL، به‌تازگی قالب‌های دیگری نیز برای رفع محدودیت‌های قالب STL ساخته شده‌اند و فایل‌هایی با ساختار انعطاف‌پذیرتر ارائه می‌دهند.

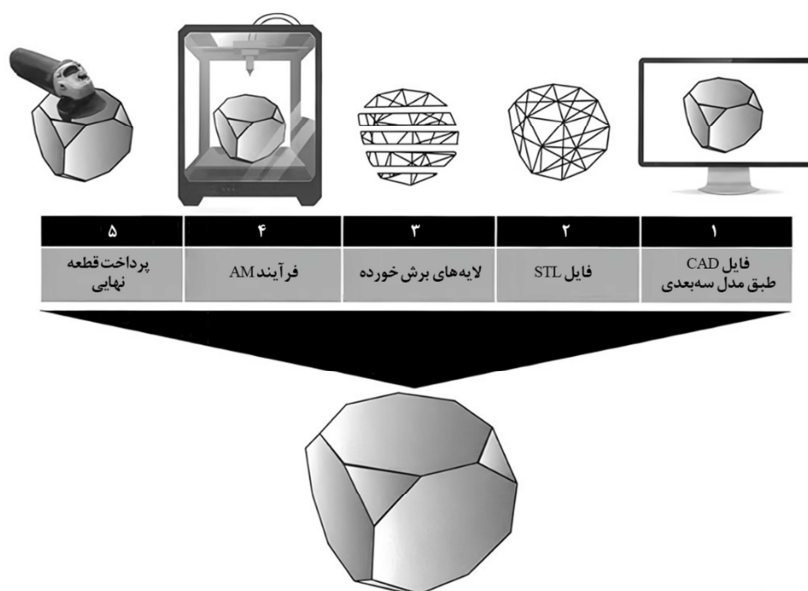
^۱ Additive manufacturing

^۲ 3D printing

^۳ Computer-aided design

^۴ Standard tessellation language

به بیان ساده‌تر، نحوه کار چاپگرهای سه‌بعدی را مثلاً می‌توان به درست کردن یک یک‌متری تشبیه کرد. در فرآیند درست کردن یک، ابتدا یک لایه یک روی میز کار قرار گرفته، روی آن لایه‌ای از خامه ریخته شده و دوباره یک لایه یک بر روی خامه‌ها چیده شده و این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که یک تا ارتفاع موردنظر ساخته شود. فناوری چاپ سه‌بعدی نیز به همین شکل کار می‌کند. مواد لایه به لایه بر روی هم چیده شده، با روش‌های مختلف سخت می‌شود تا استحکام مناسب را پیدا کنند. شکل ۱-۱، روند ساخت افزودنی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱: روند ساخت افزودنی [۲]

پس از تولید یک قطعه، ممکن است به یک سری فعالیت‌های جانبی نیاز باشد. بسته به ماده استفاده شده و پیچیدگی محصول، احتمال دارد برخی قسمت‌ها نیاز به پردازش ثانویه شامل ماسه‌زدن، پرکردن، جلادهی، پخت یا رنگ‌آمیزی داشته باشند که در فصل آینده به صورت کامل به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۱- اهمیت ساخت افزودنی

فناوری ساخت افزودنی در مقابل شیوه‌های تولید سنتی یا تولید کاهشی^۱ (مانند سوراخ‌کاری یا ماشین‌کاری) که اغلب به صورت کاهشی هستند (به این معنا که به طور

^۱ Subtractive manufacturing

کنترل شده‌ای از بلوک یک ماده خام لایه برداری کرده تا به شکل و اندازه موردنظر تبدیل شود) قرار دارد. تولید AM و تولید سنتی، هر یک مزایای مختص به خود را دارند. از مزایای روش AM، ایجاد طرح‌هایی پیچیده با وزن، زمان تولید و هزینه کمتر است که ساخت آن‌ها توسط قالب‌های سنتی، فرز و ماشین‌کاری، سخت یا پیچیده است. فرآیند تولید قطعه‌ای که با روش سنتی روزها یا هفته‌ها زمان می‌برد، ممکن است با چاپگر سه بعدی طی چند ساعت تولید شود. این فناوری در مقایسه با نمونه اولیه سنتی، فرآیندی پویاتر است و زمان تولید و وزن اجسام را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. برای مثال، در فرآیند تولید یک محصول جدید، باید نمونه‌های اولیه تهیه و قبل از مرحله تولید گسترده از تمام جوانب بررسی و عیب‌یابی شوند تا قبل از تولید، مشکلات احتمالی شناسایی شده و از مشکلاتی که ممکن است در فرآیند توسعه یک محصول جدید رخ دهد، جلوگیری شود. از آنجا که فرآیند نمونه‌سازی سنتی شامل فعالیت‌های پرهزینه و وقت‌گیر است، نمونه‌های اولیه موردنظر را می‌توان در دوره‌های کوتاه‌تر با استفاده از چاپگرهای سه بعدی تولید کرد. همچنین، با استفاده از این روش، می‌توان قطعاتی را که از چندین قطعه ساخته شده‌اند، اکنون به عنوان یک جسم تک و بدون سرهم‌بندی تولید نمود. از مزایای دیگر ساخت افزودنی و چاپگرهای سه بعدی می‌توان به موارد زیر نیز اشاره کرد [۳]:

- توانایی تولید طرح‌های پیچیده
- زمان تولید پایین‌تر
- تولید مواد اضافی کمتر
- راحتی اشتراک گذاشتن طرح محصول
- امکان تغییر و اصلاح سریع
- راحتی تولید محصولات شخصی‌سازی شده
- کارآمد از نظر سرمایه‌گذاری و تولید
- محاسبه قیمت محصول قبل از تولید
- استفاده از مواد قابل بازیافت
- حداقل دورریز از مواد

به طور کلی و با وجود این ویژگی‌ها، احتمالاً در آینده‌ای نه چندان دور، روش ساخت افزودنی نسبت به تولید سنتی باعث محبوبیت و مقبولیت بیشتر می‌شود، اهمیت چاپ و تأثیر اجتماعی فناوری چاپ سه بعدی به تدریج افزایش می‌یابد و بر زندگی، اقتصاد و جامعه

مدرن تأثیر فراوانی می‌گذارد. بدیهی است که روش ساخت افزودنی با پیشرفت فناوری چاپ سه‌بعدی می‌تواند جهان را متحول کرده و به‌طور درخور توجهی شیوه تولید محصولات و کالاها در سراسر جهان را تغییر داده و بهبود بخشد.

بیشتر فناوری‌های تکامل‌یافته مانند هواپیماهای بدون سرنشین، رباتیک، هوش مصنوعی و غیره به انقلاب صنعتی چهارم مربوط می‌شوند. چاپ سه‌بعدی نیز به دلیل داشتن قابلیت بالا به منظور ایجاد فرصت‌های بسیار بزرگ برای شرکت‌های تولیدی کوچک و متوسط، در فهرست فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم قرار گرفته است. شکل ۱-۲، فهرست جامعی از فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم [۴]

۳-۱- انواع چاپگرهای سه‌بعدی

چاپگرهای سه‌بعدی، مدل طراحی‌شده در رایانه را به صورت لایه‌به‌لایه می‌سازند. متناسب با نوع مواد، شیوه ساخت لایه‌های محصول نیز متفاوت خواهد بود. بنابراین، برای ساخت مدل با مواد مختلف به فناوری‌های چاپ مختلف یا چاپگرهای سه‌بعدی متفاوت نیاز است. انواع چاپگرهای سه‌بعدی تولیدکننده پلیمرها عبارتند از [۵]:

۱-۳-۱- استریولیتوگرافی^۱ (SLA)

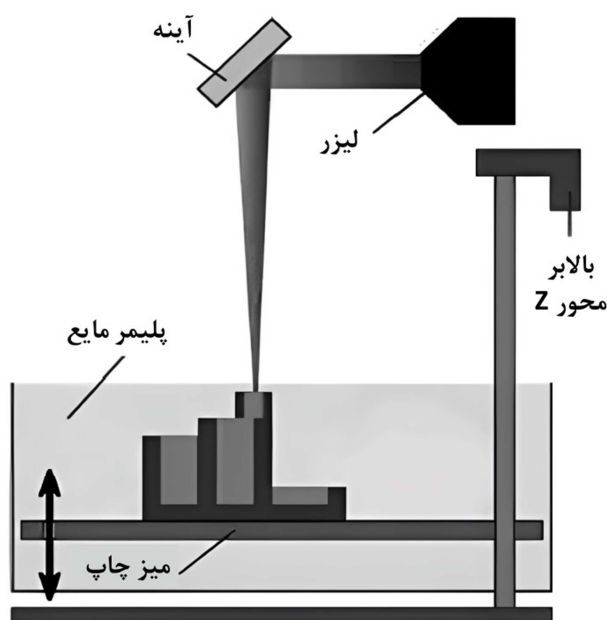
روش استریولیتوگرافی قدیمی‌ترین روش ساخت افزودنی و در واقع، نخستین چاپگر سه‌بعدی تجاری به حساب می‌آید. در این فناوری، محصول نهایی با استفاده از عملیات پلیمریزاسیون ساخته شده است؛ به‌صورتی که رزین مایع با اشعه فرابنفش پخته و منجمد می‌شود. در روش استریولیتوگرافی، قطعات با پلیمریزاسیون موضعی مواد پلیمری مایع تولید می‌شوند. رزین‌های اکریلیک و رزین‌های اپوکسی، مواد پلیمری معمول مورد استفاده در استریولیتوگرافی هستند [۶]. در این روش، ابتدا مدل ایجادشده در نرم‌افزار طراحی CAD به لایه‌های نازکی که روی یکدیگر قرار می‌گیرند، تقسیم شده و پرتو لیزر با تابیدن به یک لایه رزین فتوپلیمر طبق طرح برنامه‌ریزی‌شده، آن را در نقاط مشخص به حالت جامد درمی‌آورد [۷]. پس از سفت شدن و ساخته شدن هر لایه مطابق شکل CAD و ضخامت تنظیم‌شده با انرژی لیزر ماوراء بنفش، میز چاپ به اندازه ضخامت لایه بعدی به داخل رزین فرو رفته و فضای کافی برای ساخت لایه بعدی را به رزین فتوپلیمر می‌دهد [۸]. شدت توان لیزر، سرعت اسکن و مدت زمان قرارگرفتن در معرض اشعه لیزر، بر زمان پخت و وضوح چاپ تأثیر می‌گذارند. به دلیل پایین بودن استحکام رزین‌های پلیمری خالص و پایداری ضعیف آن‌ها در ساخت قطعات مقاوم، از رزین‌های دارای مواد افزودنی استفاده می‌کنند. این رزین‌ها اغلب دارای میکرو ذراتی مانند شیشه و کربن هستند که استحکام را به مراتب بالاتر می‌برند. امروزه از نانوذرات کربن یا سرامیک برای تقویت استحکام پلیمر نیز استفاده می‌شود [۹]. به دلیل دقت بالای این فناوری چاپ قطعات با وضوح بالا یکی از مهم‌ترین ویژگی‌هایش به‌شمار رفته و در همین راستا از آن برای ساخت قطعاتی که جزییات زیادی دارند مانند قطعات مهندسی دقیق، جواهرات و ماکت‌های پیچیده استفاده می‌شود. شکل ۱-۳، نحوه عملکرد چاپگر سه‌بعدی SLA را نشان می‌دهد.

۱-۳-۲- تف‌جوشی لیزری انتخابی^۲ (SLS)

تف‌جوشی لیزری انتخابی یا SLS یک فرآیند ساخت افزودنی است که بلافاصله پس از فرآیند استریولیتوگرافی معرفی شده است. این فناوری با تاباندن اشعه لیزر، ذوب و جامد کردن لایه‌به‌لایه ماده پودری، قطعه نهایی را می‌سازد. از آنجا که در هر دو روش SLA و SLS، از لیزر برای استحکام مواد استفاده می‌شود، می‌توان گفت این دو روش شبیه به یکدیگر هستند.

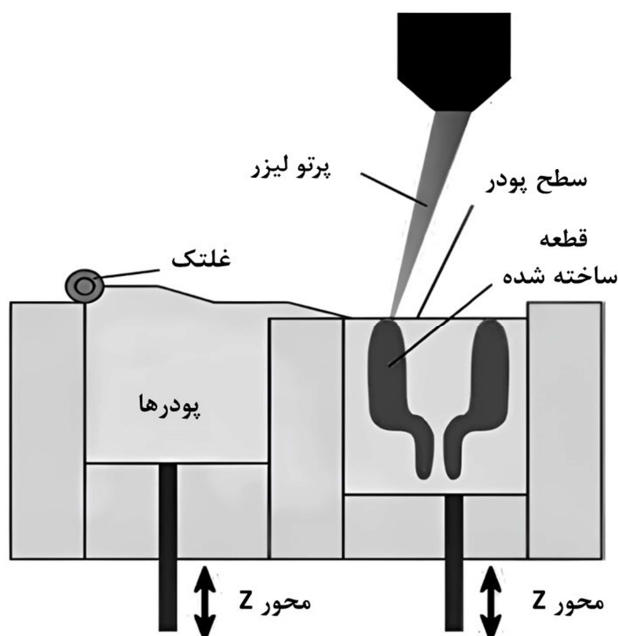
¹ Stereolithography

² Selective laser sintering



شکل ۳-۱: نحوه عملکرد چاپگر SLA [۱۰]

با این حال، در SLS، موادی که لیزر پراثری آن را ذوب می‌کند به شکل پودر است. پودرهای مورد استفاده در این فناوری که شامل ذرات ریز پلاستیک، سرامیک یا شیشه هستند، در اثر حرارت از لیزر پر قدرت با هم ذوب شده تا یک جسم جامد و سه بعدی تشکیل شود. این چاپگرها دو سینی ساخت دارند که در راستای Z حرکت می‌کنند. در ابتدای کار، پرتو لیزر تصویر اولین لایه قطعه را روی پودر می‌تاباند [۱۱]. به محض اینکه لیزر تغییر مکان می‌دهد، نقطه ذوب شده شروع به انجماد می‌کند. پس از جامد شدن لایه اول، همان‌طور که در شکل ۱-۴ ملاحظه می‌شود، سینی ساخت کمی به سمت پایین حرکت کرده و سینی دیگر که حامل پودر است کمی به بالا حرکت نموده و غلتک لایه نازک جدیدی از پودر را به صورت یکنواخت و همگن بر روی لایه قبلی قرار می‌دهد. با تکرار این فرآیند، ذوب و انجماد مکرر و قرار گرفتن لایه‌ها بر روی یکدیگر، حجم نهایی شکل می‌گیرد [۱۲]. پس از تولید، محصولات در داخل پودر باقی مانده تا خنک شده و به دمای اتاق برسند. برای آنکه فرآیند ذوب توسط لیزر تسریع شود، انرژی و توان کمتری مصرف شود، وضوح قطعه با اندازه ذرات پودر، قدرت لیزر، فاصله و سرعت اسکن تعیین می‌شود [۱۳].



شکل ۱-۴: نحوه عملکرد چاپگر SLS [۱۰]

از آنجا که تقریباً هر ماده‌ای به شکل پودر قابل پردازش است، این روش نسبت به سایر روش‌ها دارای مزیت بیشتری است. پلیمرها، فلزات و سرامیک‌ها موادی هستند که معمولاً در فرآیند SLS استفاده می‌شوند. همچنین از مواد کامپوزیتی مانند پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه، کامپوزیت‌های فلزی-پلیمری و کامپوزیت‌های فلزی-فلزی نیز می‌توان استفاده کرد [۱۴]. به علاوه، چگالی محصولاتی که با این روش تولید می‌شوند بسیار زیاد است که خود باعث افزایش استحکام می‌شود [۸ و ۱۵]. قطعات پلاستیکی که به این روش تولید می‌شوند، اغلب دارای ساختارهای متخلخل بوده و اگر نیاز باشد عملیات پرداخت سطح بر روی آن‌ها انجام می‌شود. فناوری SLS با توجه به توانایی بالایی که در ساخت حجم‌های با هندسه‌های پیچیده دارد، به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های ساخت نمونه اولیه در صنایع مختلف و همچنین به منظور تولید محصول نهایی استفاده می‌شود. امروزه، این فناوری در هنر و صنایع دستی با سرعت چشمگیری در حال رشد است [۹].

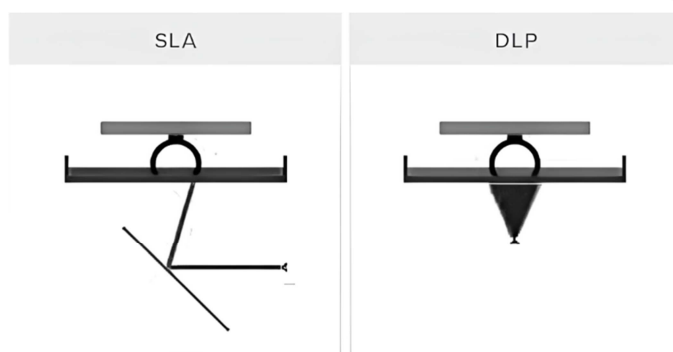
۱-۳-۳- پردازش نور دیجیتال^۱ (DLP)

پردازش نور دیجیتال یا DLP روشی جدید است که برای تولید ریزمحصولات با وضوح بالا

^۱ Digital light processing

از آن استفاده می‌شود. در این فرآیند با استفاده از نورافکن معمولی، میلیون‌ها الگوی نوری از نور ماوراء بنفش (UV) بر روی رزین شفاف فتوپلیمر قرار داده می‌شود. به این ترتیب کل لایه موردنظر محصول می‌تواند به صورت یک جا تشکیل شود [۳].

تفاوت چاپگر سه‌بعدی DLP با چاپگر سه‌بعدی SLA در شیوه تابش نور ماوراء بنفش برای تولید محصول است. در چاپگرهای سه‌بعدی DLP، نور ماوراء بنفش توسط نورافکن به رزین تابیده می‌شود. در چاپگرهای سه‌بعدی SLA، نور UV با لیزر به رزین تابیده و به‌طور قابل توجهی زمان تولید را کاهش می‌دهد [۱۶]. در شکل ۵-۱، تفاوت نحوه عملکرد دو چاپگر سه‌بعدی DLP و SLA نشان داده شده است.



شکل ۵-۱: تفاوت نحوه عملکرد چاپگرهای SLS و DLP [۱۶]

۱-۳-۴- لایه‌نشانی ذوبی (FDM) یا تولید فیلامنت ذوبی (FFF)

لایه‌نشانی ذوبی (FDM) یا تولید فیلامنت ذوبی (FFF) متداول‌ترین روش نمونه‌سازی سریع و چاپ سه‌بعدی است که در آن، برای تولید قطعه از تزریق کردن رشته‌های پلاستیکی به نام فیلامنت^۱ از جنس پلیمر گرمانرم مانند PLA^۲، ABS^۳ و PC^۴ به دلیل دمای ذوب پایین آن‌ها استفاده می‌شود. این فیلامنت‌ها در انواع رشته‌های رنگی در بازار وجود دارند که می‌توان از آن‌ها در ساخت قطعات رنگی نیز استفاده کرد. در روش FDM، رشته‌های گرمانرم که تا دمای بالاتر از دمای ذوب‌شان توسط دستگاه گرم‌کن گرم شده و به حالت نیمه‌مایع درآمده‌اند، از یک نازل خارج می‌شوند. در هنگام خارج شدن مواد، سرچاپگر سه‌بعدی (نازل اکستروژن) در امتداد صفحه xy حرکت کرده و مواد پلاستیکی که از طریق نازل خارج

^۱ Filament

^۲ Polylactic acid

^۳ Acrylonitrile butadiene styrene

^۴ Polycarbonates