مقاله مروری

فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی
سال هفتم، شماره ۱، شماره پیاپی ۲۵، بهار ۱۴۰۱
Vol. 7, No. 1, Issue No. 25
Spring 2022, Quarterly
صفحه ۲۷-۱۵

Iran Polymer Technology: Research and Development

معرفی مواد هوشمند حافظه‌دار ساخته‌شده با نانوفناوری و چاپگرهای چهاربعدی

مهرناز فرخ پور، محمد آزادی *

سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی مکانیک

چکیده ...

در این مقاله مروری، به چاپگرهای چهاربعدی بر اساس فرایند تولید افزایشی با تأکید بر نانوفناوری پرداخته شده است. امروزه چاپ مواد برای ساختارهای پیچیده سه‌بعدی، مورد استفاده قرار می‌گیرد اما به‌عنوان فناوری جدیدتر و پیشرفته‌تر، از فناوری چاپ چهاربعدی در ایجاد مواد هوشمند استفاده می‌شود. بنابراین پس از معرفی انواع روش‌های چهاربعدی، چاپ در مقیاس نانو و چاپ نانوکامپوزیت‌ها نیز بررسی می‌شود. همچنین در این مطالعه، به کاربردهای چاپ چهاربعدی با تأکید بر نانوفناوری، به‌منظور تولید مواد هوشمند حافظه‌دار اشاره شده است.

واژه‌های کلیدی:

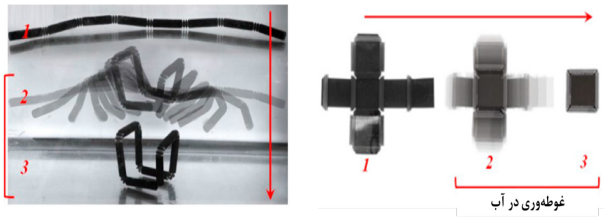
تولید افزایشی،
چاپگر چهاربعدی،
نانوفناوری،
مواد هوشمند،
مواد حافظه‌دار

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
m_azadi@semnan.ac.ir

۱ مقدمه

امروزه، فناوری‌های ساخت، نقش حیاتی در رشد اقتصادی، کاربردهای صنعتی و پیشرفت‌های علمی دارند [۱]. فناوری فرایند تولید افزایشی، ابتدا توسط چارلز هال (Charles Hall) در سال ۱۹۸۳ میلادی معرفی شد [۱،۲]. روش تولید افزایشی شامل افزوده شدن ماده به صورت لایه به لایه برای ایجاد شکل مورد نظر است [۳]. طی چند دهه اخیر، روش‌های تولید افزایشی به‌دلیل توانایی در ساخت سریع هندسه‌های پیچیده، تنوع مواد قابل‌استفاده و هدررفت کم نسبت به روش‌های قدیمی ساخت مورد توجه قرار گرفته است [۳،۴]. به‌طور کلی، تولید افزایشی با استفاده از تجهیزات ساده می‌تواند اشکال پیچیده را با دورریز کمتر تولید کند که این امر باعث صرفه‌جویی چشمگیر در مصرف ماده و افزایش انعطاف در طراحی می‌شود [۵]. از جمله روش‌های تولید افزایشی می‌توان به استریولیتوگرافی (SLA: Stereolithography) [۶]، مدل‌سازی رسوب ذوبی (FDM: Fused Deposition Modeling) [۷]، نمونه‌سازی سریع با ذوب لیزری انتخابی (SLS: Selective Laser Sintering) [۸]، نوشتن با جوهر مستقیم (DIW: Direct Ink Writing) [۹] و چاپ جوهرافشان (Ink-jet Printing) [۱۰] اشاره کرد. انواع سازوکار تغذیه در چاپ شامل اکستروژن ماده (Material Extrusion)، پلیمری‌شدن نوری (Vat Photopolymerization)، ورق‌چینی لایه‌ای (Sheet Lamination)، ماده‌پرانی (Material Jetting)، حامل پرانی (Binder Jetting)، جوش بستر پودری (PBF: Powder Bed Fusion) و نشست‌دهی با انرژی مستقیم (DED: Direct Energy Deposition) است [۱۱].

مفهوم چاپ چهاربعدی نخستین بار توسط اسکایلر تیبیتس (Skylar Tibbits) در سال ۲۰۱۳ مطرح شد. در حالی که در ۳۰ سال گذشته فناوری چاپ در فرایند تولید افزایشی محبوب بوده است، اخیراً پیشرفت جدیدی در تولید افزایشی که شامل ساخت اجسام با قابلیت تغییر شکل پس از چاپ است، مورد توجه قرار گرفته است. به نوعی، بعد چهارم در چاپ چهاربعدی زمان است؛ به نحوی که خواص، شکل و یا کاربرد جسم چاپ‌شده در طی زمان می‌تواند تغییر کند. این تغییرات می‌تواند در پاسخ به محرک‌های محیطی نظیر حرارت، نور، رطوبت، غلظت اسید (pH)، اشعه فرابنفش، میدان مغناطیسی، نیرو و غیره رخ دهد. در شکل ۱ دو نمونه چاپ چهاربعدی‌شده حساس به آب آورده شده است. تغییر شکل اجسام چهاربعدی، می‌تواند به شکل صورت پیچش (Twisting)، خمش (Bending)، جمع شدگی (Shrinking) و گسترده شدن (Spreading) باشد [۱۲،۱۷-۵].



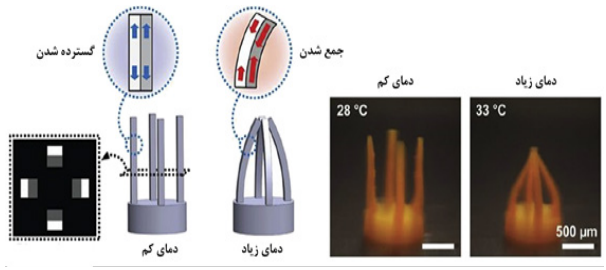
(الف) (ب)

شکل ۱ تغییر شکل در محیط آبی طی زمان: الف) از دوبعدی به سه‌بعدی، ب) از یک‌بعدی به سه‌بعدی [۱].

در شکل ۲ یک نمونه گیره حساس به دما با سازوکار جمع شدن و گسترده شدن نشان داده شده است.

عموماً از مواد هوشمند (Smart Materials) در چاپ چهاربعدی استفاده می‌شود. مواد هوشمند برای تغییر شکل نیازمند به تغییرات محیطی مانند گرما و رطوبت هستند. هرچند از مواد عمومی (General Materials) نیز می‌توان برای استفاده در فرایند چاپ چهاربعدی استفاده کرد. مواد عمومی تحت تنش‌های از پیش تعیین شده، تغییر شکل به‌خصوصی می‌دهند. این تغییر شکل در حین فرایند چاپ با توجه به واکنش‌های شیمیایی و نفوذ رزین (Resin Diffusion) در بین لایه‌ها برنامه‌ریزی می‌شود. بنابراین، مواد عمومی با کمک تغییر شکل کنترل شده در مکان‌های متفاوت تحت تنش‌های مهندسی شده می‌توانند جایگزین استفاده از مواد هوشمند در چاپ چهاربعدی شوند [۱۸].

فناوری‌های مورد استفاده در چاپ چهاربعدی همانند فناوری‌های چاپ سه‌بعدی است درحالی که بعد چهارم مربوط به طبیعت مواد مورد استفاده در چاپ است. برای مثال جوهرهای قابل استفاده در چاپ چهاربعدی معمولاً شامل مونومرها (Monomers)، مواد آغازگر (Initiators)، پرکننده‌ها (Fillers) و حامل‌ها (Binders) هستند. لازم است ترکیبات هر کدام از جوهرها خواص شیمیایی و مکانیکی مورد نیاز در چاپ افزایشی از قبیل حساسیت حرارتی، زاویه تماس و محدودیت های کشش سطحی را دارا باشد [۱۸]. در شکل ۳ کاربردهای



شکل ۲ تغییر شکل گیره در برابر دما.

شکل ۳ کاربردهای چاپ چهاربعدی در صنعت [۲۱-۱۹].

رایج چاپ چهاربعدی آورده شده است.

در صنعت تولید افزایشی، پلیمرها مواد اساسی هستند. افزودن نانوذرات تقویت‌کننده به ساختار پلیمر باعث بهبود خواص فیزیکی، افزایش سختی، استحکام، خواص کششی و خواص مقاومت به ضربه این مواد می‌شود [۲۲، ۲۳]. به‌طور کلی نانوکامپوزیت‌ها به‌عنوان مواد جامدی که از ترکیب دو یا چند فاز متفاوت تشکیل شده‌اند به طوری‌که حداقل یکی از این فازها در ابعاد زیر ۱۰۰ نانومتر باشند [۲۳]. وجود یک فاز با ابعاد نانو در ساختار نانوکامپوزیت‌ها باعث بهبود خواص مکانیکی [۲۴]، حرارتی [۲۵]، الکتریکی [۲۶] و شیمیایی [۲۷] می‌شود. امروزه پیشرفت‌های فناوری چاپ غالباً بر روی مواردی همچون بهبود سامانه‌های چاپ با توانایی چاپ مواد جدید، افزایش سرعت چاپ و بهبود ابزار چاپگر و دستیابی به ابعاد نانو و میکرو در چاپ متمرکز شده است [۵].

در یک مطالعه مروری کوانجین و همکاران مهم‌ترین پیشرفت‌های اخیر در حوزه چاپ چهاربعدی از جمله ویژگی‌ها و آخرین دستاوردها در این زمینه را بررسی کردند. در ادامه به کمک روش تجزیه و تحلیل نقاط قوت، نقاط ضعف، فرصت‌ها و محدودیت‌ها (Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats Analyze Method: SWOT) تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای و سطح‌بندی که شامل بررسی روش‌های پردازش، مواد، هزینه تجهیزات و نیازهای بازار می‌شود را انجام دادند. همچنین کاربردهای چاپ چهاربعدی و مسیر رشد در آینده را بررسی کردند که نشان داد فناوری چاپ چهاربعدی می‌تواند در کاربردهای متفاوتی نظیر پزشکی و درمان، رباتیک و مهندسی در آینده مورد استفاده قرار گیرد [۱].

رایاته و جین (Rayate and Jain) در مطالعه‌ای مروری، مواد پیشرفته کامپوزیتی مورد استفاده در چاپ چهاربعدی و کاربرد آن‌ها را بررسی و از لحاظ ترکیب ماده، نوع محرک، فرایند تولید افزایشی و کاربرد، دسته‌بندی کردند [۲۸].

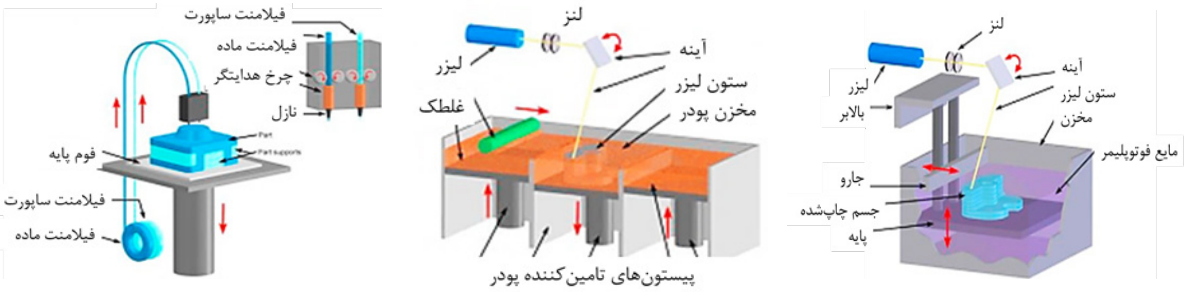
در مطالعه مروری دیگری، مومنی و همکاران بررسی جامعی از روند چاپ چهاربعدی ارائه می‌دهند و مفاهیم عملی و ابزارهای مرتبط را که در این زمینه نقش برجسته ای دارند خلاصه کردند. همچنین در این پژوهش جنبه‌های جدید و کمتر بررسی شده چاپ چهاربعدی نیز برای تحقیقات آینده مورد مطالعه و سازماندهی قرار گرفته است. همچنین بیان کردند چاپ چهاربعدی سه ویژگی خاص شامل خودآرایی (Self-assembly)، چندمنظوره بودن (Multi-functionality) و قابلیت تعمیر خود (Self-repair) را دارد که تحقیقات بیشتری در رابطه با قابلیت تعمیر خود نسبت به دو مورد دیگر نیاز است. علاوه بر این برای پیش‌بینی تغییر شکل در طول زمان، جلوگیری از برخورد اجزای سازه در طی مراحل خودآرایی و کاهش مراحل سعی و خطا از مدل‌سازی ریاضی استفاده می‌شود [۲۹].

۲ چاپ چهاربعدی

فناوری فرایند تولید افزایشی به‌دلیل ویژگی‌های خاص نظیر زمان کوتاه فرایند، هزینه پایین، ساخت سفارشی و کاهش مصرف مواد اولیه در صنایع متفاوت کاربرد دارد [۳۰،۳۱]. به‌علاوه، این فناوری همچنان در صف نوآوری صنعتی قرار دارد، می‌تواند به‌عنوان فناوری انقلابی باعث پیشرفت صنعت ساخت و تولید شود. از منظر طراحی ساختار، فرایند چاپ بستر بسیار کارآمدی را به‌منظور تولید سازه‌های پیچیده برای طراحان فراهم می‌کند و این فناوری عمدتاً در زمینه مهندسی به کار برده می‌شود [۱]. در سال‌های اخیر، چاپ چهاربعدی از جنبه‌های متفاوت مزایایی نسبت به چاپ سه‌بعدی پیدا کرده است که عمدتاً به‌دلیل رشد سریع در زمینه مواد هوشمند و ساختارهای چند ماده است [۳۲]. در مقایسه با چاپ سه‌بعدی، فرایند چاپ چهاربعدی مفهوم جدیدی را به‌عنوان تغییر در پیکربندی جسم چاپ‌شده با گذشت زمان و تحت تأثیر محرک خارجی در نظر می‌گیرد [۳۳]. عنصر اصلی چاپ چهاربعدی مواد هوشمند هستند که ویژگی‌هایی نظیر انعطاف‌پذیری، توانایی تغییر شکل و اندازه را به جسم چاپ‌شده در پاسخ به محرک خارجی می‌دهد [۱].

۲-۱ مبانی فناوری چاپ چهاربعدی

چاپگرها از لحاظ ماده ورودی به سه دسته پایه-جامد، پایه-مایع و پایه-پودر دسته‌بندی می‌شوند. روش‌های پایه-جامد شامل FDM روش‌های پایه-پودر شامل SLS و SLM می‌شود. همچنین انواع روش‌های پایه- مایع SLA، پردازش تور دیجیتال (DLP)، نوشتن با جوهر مستقیم (DIW) و جوهرافشان (Inkjet)

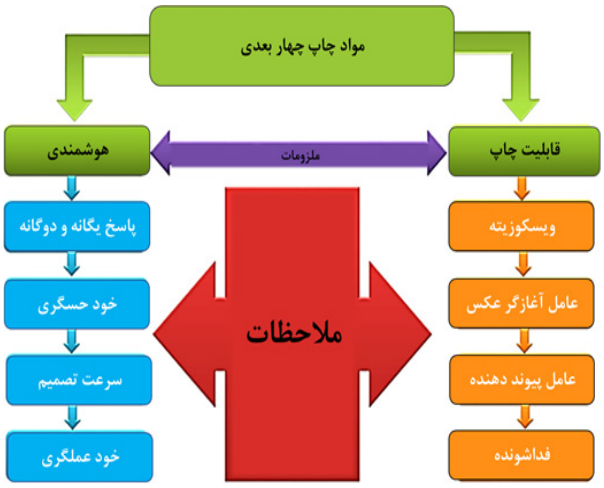


(الف) (ب) (پ)

شکل ۴ انواع فناوری رایج برای چاپ در فرایند تولید افزایشی: (الف) مدل‌سازی رسوب ذوبی، (ب) نمونه‌سازی سریع با ذوب لیزری انتخابی و (پ) استریولیتوگرافی [۱].

هستند [۳۴]. طرح‌واره کلی چند نمونه رایج چاپ سه‌بعدی در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱ جمع‌بندی مختصری از مطالعات انجام شده بر روش‌های تولید افزایشی آورده شده است.

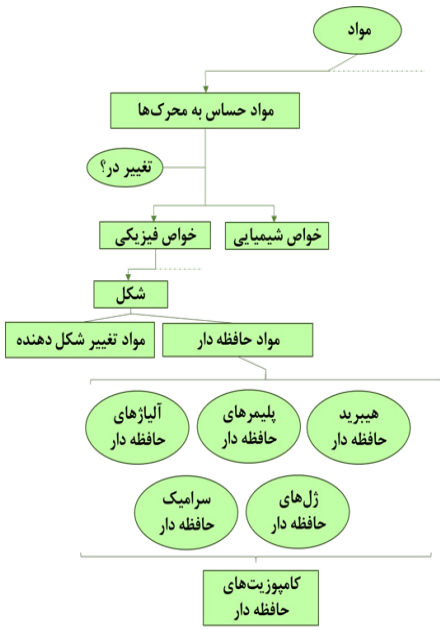
سازه چهاربعدی در حقیقت سازه سه‌بعدی چاپ‌شده‌ای است که در طول زمان قابلیت تغییر شکل، خواص و کارکرد دارد. مفهوم چاپ چهاربعدی به پنج عامل نوع چاپگر، ماده تحریک‌پذیر، محرک خارجی، سازوکار اثر و مدل‌سازی ریاضی وابسته است [۴۲، ۴۳]. اخیراً از فناوری‌های چاپ FDM، SLS، SLA، و Inkjet در صنعت چاپ چهاربعدی استفاده شده است [۴۴-۴۶]. کارایی و تغییر سازه چهاربعدی به ترکیبی مناسب از مواد هوشمند مانند نانوکامپوزیت‌های هوشمند، آلیاژهای حافظه‌دار و پلیمرها وابسته است [۴۷،۴۸]. در شکل ۵ مشخصات لازم مواد مورد استفاده در چاپ چهاربعدی آورده شده است. در



شکل۵ ویژگی‌های مواد مورد استفاده در چاپگرهای چهاربعدی [۵].

جدول ۱ مروری بر مطالعات انجام‌شده بر روش‌های تولید افزایشی.

روش	پایه مواد	روش لایه‌گذاری	مشخصه اصلی	مواد	مرجع
FDM	جامد	رسوب مواد جامد	کم هزینه، پسماند کم	کامپوزیت ترموپلاستیک (PLA, ABS, PU)	[۳۵]
SLS	پودر	لایه پودر	ذرات نرم کننده	فلز و آلیاژها و سرامیک	[۳۶]
SLM		لایه پودر فلزی	ذوب کامل	پلیمر و کامپوزیت	[۳۷]
SLA	مایع	پخت لایه مایع	پخت فرابنفش، دقت بالا	فلز و آلیاژها، سرامیک و کامپوزیت	[۳۸]
DLP		پخت لایه مایع	سرعت بالا، سازه بدون مواد کمکی	الاستومر و فرامادہ	[۳۹]
DIW		پخت لایه سیال	جوهر تیکسوتروپیک، خود پشتیبانی	پلیمر، سرامیک و موم، کامپوزیت و پلی‌الکترولیت	[۴۰]
Inkjet		انجماد لایه مایع	قابلیت چاپ چندگانه، دقت بالا، سازه پیچیده	Werowhite, Max, Visijet M3, Crystal, MED620, MED625FLX	[۴۱]



شکل ۶ دسته‌بندی مواد هوشمند مورد استفاده در چاپ چهاربعدی [۲۹].

شکل ۶ نیز دسته‌بندی مواد هوشمند نشان داده شده است. این مواد می‌توانند به شکل پودر، الیاف، موم‌های قابل چاپ یا مایع باشند [۵]. مروری بر چند ماده هوشمند استفاده شده در چاپ چهاربعدی در جدول ۲ آورده شده است. همچنین در جدول ۳ چاپ سه‌بعدی و چاپ چهاربعدی مقایسه شده‌اند. بررسی‌های انجام‌شده بر روی انواع مواد هوشمند و محرک‌های مربوط به آنان در مراجع [۲،۱۸] به‌صورت مروری مورد مطالعه قرار گرفته است. در چاپ چهاربعدی، علاوه بر مواد هوشمند و چاپ افزایشی، برای پیش‌بینی دقیق رفتارهای شکل‌گیری با گذشت زمان، مدل‌های ریاضی نیز مورد نیاز است [۴۹].

جدول ۲ مواد هوشمند به کار رفته در چاپ چهاربعدی [۱۷،۵۰].

ماده	محرک خارجی	نوع پاسخ	کاربرد
آلیاژ هوشمند فلزی	دما	شکل	محرک موتور
سرامیک	جریان	مقاومت	ترمیستور/جریان بیش از حد
مواد خود ترمیم کننده	نیرو	نیرو	علم طراحی و ساخت هوشمان
پلیمر	رطوبت	ظرفیت	حسگر رطوبت
مواد پیروالکتریک	دما	علائم الکتریکی	حسگر
گال پلیمری	غلظت اسید	انبساط و انقباض	عضله مصنوعی
مواد پیزوالکتریک	تغییر شکل، کرنش	علائم الکتریکی	حسگر ارتعاشات

جدول ۳ تجزیه و تحلیل مقایسه چاپ سه‌بعدی و چاپ چهاربعدی [۱].

دسته‌بندی	چاپ سه‌بعدی	چاپ چهاربعدی
روش چاپ	چاپ لایه‌به‌لایه یک سازه دو بعدی	گسترش یافته چاپ سه بعدی
نوع چاپگر	چاپگر سه بعدی	چاپگر چهار بعدی مواد هوشمند
ماده	گرمانرم، سرامیک، فلز، کاغذ، غذا، پلیمر، نانومواد و مواد زیستی	مواد هوشمند، مواد چندگانه، پلیمرهای حافظه دار و مواد پیشرفته
طراحی	جسم سه بعدی دیجیتال رسم شده یا اسکن شده	جسم سه بعدی دیجیتال با قابلیت تغییر شکل
تجهیزات جانبی	دستگاه‌ها، اکستروژن مواد و لیزر انتخابی پخت	افشانک، حامل و لیزر انتخابی اصلاح‌شده
انعطاف ساخت قطعات	ندارد	تغییر در شکل، رنگ و کارکرد
وضعیت محصولات	ثابت	هوشمند و متحرک
هزینه تجهیزات	کم	زیاد
نیاز بازار	متوسط	متوسط–زیاد
کاربرد	طراحی و مهندسی، صنایع هوایی، پزشکی، علم طراحی و ساخت هوشمان ، نظامی و دفاعی	ساخت و ساز، پزشکی، مبلمان، حمل و نقل، هواپیمایی، هوا فضا، دستگاه زیست پزشکی، رباتیک و سایر موارد

۲-۲ دستگاه‌های چاپگر چهاربعدی

در چاپگرهای رایج، موادی مانند پلیمر پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) و آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) مطابق با پارامترهای چاپ مانند شکل افشانک و دما که پیش از این در چاپگر تنظیم شده است، بهینه شده‌اند. چاپ مواد هوشمند یا چاپ چهاربعدی با چاپگرهای رایج به‌دلیل به هم چسبیدن مواد و متراکم شدن در طی چاپ، بسیار دشوار است. بنابراین لازم است تغییراتی در چاپگرها اعمال شود تا مشخصه‌های لازم برای چاپ چهاربعدی در آن ایجاد شود [۵]. در این رابطه استفاده از افشانک پوشش داده شده برای چاپگر چهاربعدی و به‌منظور چاپ پلی‌یورتان حرارتی (TPU) به روش اکستروژن مذاب در مرجع [۵۱] گزارش شده است. با توجه به ضریب انبساط حرارتی بالاتر پلی‌یورتان حرارتی (TPU) و به‌منظور جلوگیری از گرفتگی در افشانک در این چاپگر از بستر گرم‌کننده (Heating Bed) برای ایجاد جریان ثابت گرما استفاده شده است. این جریان ثابت گرما، همچنین از جاری شدن پلی‌یورتان حرارتی (TPU) مذاب روی سطح سردتر که باعث ایجاد حفره در جسم چاپ شده می‌شود، جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، به‌منظور جلوگیری از سرریز شدن جریان پلی‌یورتان حرارتی (TPU) مذاب و کاهش اصطکاک افشانک چاپگر با پلی‌تترافلورواتیلن (PTFE) پوشش داده شده است و نزدیک دستگاه گرمایشی که دارای حفاظ ۱/۲ تا ۱/۵ برابر طولانی‌تر از افشانک‌های مورد استفاده برای چاپ PLA و ABS است، قرار دارد [۵۱].

۲-۳ تجزیه و تحلیل SWOT چاپ چهاربعدی

برای مقایسه چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی ابتدا از روش تجزیه و تحلیل SWOT کمک گرفته شده است. از این نوع تحلیل برای بررسی عوامل داخلی و خارجی موثر و مخرب برای دستیابی اهداف یک پژوهش استفاده می‌شود. در ادامه به‌ترتیب مزایا، نقاط ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای صنعت چاپ آورده شده است. از عوامل داخلی مثبت و مزایای چاپ سه‌بعدی می‌توان به صرفه اقتصادی، دسترسی مناسب، بازار رو به رشد، کارایی فرایند تولید، ساخت آسان مدل سفارشی و کیفیت بالای تولید اشاره کرد. در برابر آن، گران بودن برخی تجهیزات، طولانی‌شدن زمان تولید، تفاوت کیفیت در چاپگرهای متفاوت، نیاز به یادگیری کار با نرم‌افزار و تجهیزات، محدودیت در ابعاد چاپ، محدود بودن مواد قابل استفاده و نیاز به محیط کنترل شده از نقاط ضعف این روش است. فرصت‌های چاپ سه‌بعدی شامل قابلیت سفارشی‌سازی طرح، زباله پلاستیکی بازیافتی، چاپ موادی غیر از پلاستیک مانند فلز، پلاستیک، چوب یا پارچه، مواد هوشمند، توسعه ماشین‌ها از لحاظ سرعت و ابعاد چاپ و فناوری چاپ چهاربعدی می‌شود. در حالی که مواردی مانند سازگاری و ارتقای ماشین، امنیت عمومی، تأثیر بر محیط زیست، حقوق مالکیت معنوی، مشکلات نرم‌افزاری، صنعت رقابتی و نیاز به بهبود دائم و تهدید برای نیروی کار سنتی از تهدیدهای این صنعت به شمار می‌رود [۵۲].

در رابطه با تحلیل SWOT چاپ چهاربعدی، از نقاط قوت چاپ چهاربعدی می‌توان کارایی مواد و فرایند ساخت، پیش‌بینی رشد مثبت بازار، چاپ چندرنگ، چاپ چندماده، زمان مناسب، بر پایه چاپ سه‌بعدی چندماده‌ای و استفاده از مواد هوشمند را نام برد. نقاط ضعف این صنعت شامل فناوری‌های جدید در چاپ سه‌بعدی، محدودیت و گرانی مواد هوشمند، گرانی سخت‌افزارهای چاپگر برای عموم، دقت در تغییر شکل و ضعف در هندسه‌های پیچیده می‌شود. فرصت‌های چاپ چهاربعدی مواردی مانند کاربرد در حمل‌ونقل، کاربرد در شرایط و مکان خاص مانند منطقه جنگی، قابل استفاده در کاشتنی‌ها (Implants) و صنایع دارویی، مفهوم ساختمان و شهر هوشمند و فناوری چاپ پنج‌بعدی است. و در نهایت، سازگاری ماشین آلات، مشکلات ایمنی و بهداشت عمومی، تأثیر بر محیط‌زیست، حقوق مالکیت معنوی، حق چاپ ، حق ثبت اختراع ، علامت تجاری، هک نرم‌افزار و مسائل اخلاقی از تهدیدات چاپ چهاربعدی است [۵۲]. مقایسه امتیاز چاپ سه‌بعدی و چاپ چهاربعدی در جدول ۴ آمده است.

۳ نانو فناوری در چاپ چهاربعدی

۳-۱ چاپ نانوکامپوزیت‌ها

در هر یک از روش‌های چاپ به‌صورت تولید افزایشی، مواد در ابعاد نانو برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرند. نانوکامپوزیت‌ها بر روی عوامل چاپ نظیر خواص

جدول ۴ امتیازدهی چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی بر اساس معیار SWOT [۱].

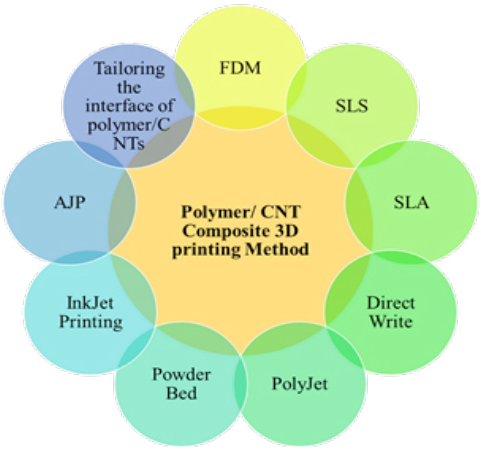
پارامتر SWOT	چاپ سه بعدی	چاپ چهار بعدی
نقاط قوت	۹	۷
نقاط ضعف	۷	۶
فرصت‌ها	۸	۹
تهدیدها	۷	۷
امتیاز کل	۳۱	۲۹

مواد، گرانروی پلیمر، خواص حرارتی پلیمر، چسبندگی بین لایه‌ها و برهم‌کنش مواد تأثیر می‌گذارد [۲۳].

مواد و سازه‌های فلزی به‌دلیل دارا بودن خواص حرارتی، خواص الکتریکی و خواص مغناطیسی ویژه همیشه در ساخت دستگاه‌های هوشمند مورد توجه بوده‌اند [۵۳]. اما روش تولید افزایشی مواد فلزی با آلیاژهای خاص سازگار است که به تجهیزات گران‌قیمت و پیچیده نیازمند است [۵۴]. به‌عنوان جایگزین، نانوکامپوزیت‌های پلیمری مغناطیسی به‌دلیل خواص برجسته از جمله پایداری، قابلیت ارتجاعی، وزن سبک، زیست‌سازگاری مناسب، سهولت سنتز، پردازش انعطاف‌پذیر و خواص مغناطیسی قابل‌کنترل در چند سال گذشته، گزینه مناسب جایگزین بوده است. هیدروژل‌های رسانا و نانوکامپوزیت‌ها از مواد پرکاربرد در رباتیک، مهندسی بافت و طراحی حسگرها هستند. نانوکامپوزیت‌های حساس به جریان الکتریکی را می‌توان با افزودن مواد رسانا از جمله نانوذرات فلزی و نانومواد کربن مثل نانولوله کربنی (CNT: Carbon Nano Tube)، گرافن و کربن سیاه) در ماتریس‌های پلیمری تولید کرد [۵۵].

یکی از نانومواد‌ی که به سرعت در حال پیشرفت است، نانولوله کربنی است. نانولوله‌های کربنی دارای خواص قابل‌توجهی هستند و به‌خاطر چگالی جرمی کم، خصوصیات الکتریکی متنوع، انعطاف‌پذیری زیاد، مدول‌های کششی زیاد و نسبت ابعاد بالا به شکل وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. انواع روش‌های چاپ نانولوله‌های کربنی در شکل ۷ آورده شده است [۵۶].

چشم‌انداز و نیازهای آینده برای تحقیقات روی نانوکامپوزیت شامل بهبود کیفیت چاپ افزایشی، یافت رویکردهای جدید برای غلبه بر محدودیت‌های چاپ افزایشی، کارایی، امنیت و پایداری تولید است. محدودیت‌ها و تحقیقات آینده برای



شکل ۷ روش‌های ساخت نانولوله‌های کربنی به کمک تولید افزایشی [۵۶].

نانولوله‌های کربنی شامل نوآوری در مواد، بهبود خواص سطحی پلیمر و نانولوله‌های کربنی، یکپارچگی مواد، تجهیزات و قابلیت چاپ است [۵۶].

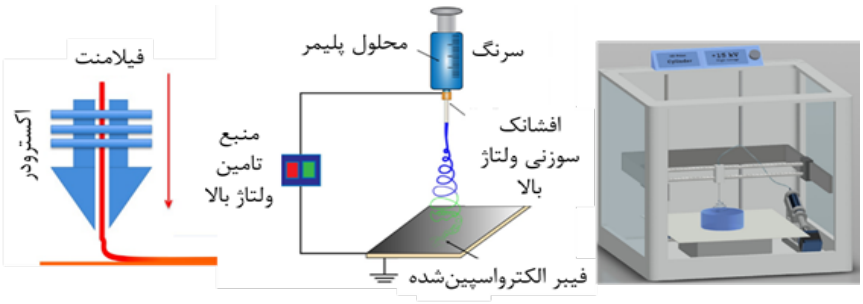
۳-۲ چاپ چهاربعدی در ابعاد نانو

در کنار مواردی مانند قابلیت چاپ مواد جدید یا افزایش سرعت چاپ، امروزه پیشرفت در فناوری‌های چاپ عمدتاً در جهت دستیابی به توانایی چاپ در ابعاد ماکرو و نانو متمرکز شده است. چاپ چهاربعدی در مقیاس نانو هنوز به شکل مناسبی بررسی نشده است. الکتروریسی (Electrospinning)، روش بسیار انعطاف‌پذیری است که می‌تواند با استفاده از ولتاژ بالا، محلول‌ها یا مذاب را به الیاف پیوسته در ابعاد نانو یا میکرو تبدیل کند و به ساخت سریع در صنعت چاپ در مقیاس نانو کمک کند. الکتروریسی که تنها روش موجود برای تولید انبوه الیاف طولانی پیوسته است، با استفاده از ولتاژ بالای مایع درون لوله باریک فلزی را که از چهار قسمت اصلی پمپ سرنگ (با سرنگ داخل آن)، افشانک فلزی، منبع تغذیه ولتاژ بالا و جمع‌کننده (که معمولاً رسانا است) ساخته شده، شارژ می‌کند [۵۷].

درحالی که در روش‌های رایج چاپ مانند رسوب ذوب‌شده، از دمای بالا برای ذوب الیاف گرمانرم استفاده می‌کنند، در روش چاپ الکتروریسی، افشانک متحرک متصل به ولتاژ بالا است و با سرنگی که محلول پلیمری را به افشانک منتقل می‌کند، تغذیه می‌شود. به‌دلیل تبخیر سریع و القای الکترواستاتیک، نانوالیاف می‌توانند به کمک فرایند مونتاژ هدایت شده، به اشکال و ساختارهای ماکروسکوپی سه‌بعدی تبدیل شوند. این روش قادر به ایجاد اشیای سه‌بعدی و با کیفیت بالا در مقیاس نانو است. همچنین در روش چاپ رسوب ذوب‌شده افشانک در نزدیکی بستر قرار دارد. روش الکتروریسی، روش چاپ بدون تماس است و برای سطوح پیچیده مناسب است. این امر می‌تواند باعث کاهش آسیب احتمالی افشانک در هنگام برخورد با بستر شود. سازه‌های تولیدشده به روش الکتروریسی باعث بهبود خواص نانوکامپوزیت‌ها و بهبود خواصی مانند سرعت بازسازی بافت و تکثیر سلولی، خواص مکانیکی مانند سفتی و استحکام و همچنین نفوذپذیری می‌شوند [۵۷]. طرحواره روش رسوب ذوب‌شده و الکتروریسی در شکل ۸ آمده است. در جدول ۵ مقایسه این روش‌ها آمده است.

۴ کاربردهای چاپ چهاربعدی

فناوری چاپ چهاربعدی این امکان را دارد که فضای فعلی تجارت را تغییر دهد. به‌عنوان مثال، فرایند فعلی به ساختار چاپ



شکل ۸ مقایسه طرح‌وار روش‌های چاپ رسوب ذوب‌شده و الکتروریسی.

جدول ۵ مقایسه روش‌های چاپ رسوب ذوب‌شده و الکتروریسی.

تجهیزات	چاپگر سه‌بعدی FDM	الکتروریسی	الکتروریسی سه‌بعدی
حرکت در جهت x-y-z	✓	–	✓
کنترل الیاف	✓	–	–
افشانک ولتاژ بالا	–	✓	✓
کنترل محلول	–	✓	✓
کنترل ولتاژ بالا	–	✓	✓
کنترل محیط	✓	✓	✓
مدل سه‌بعدی دیجیتال	✓	–	✓

چهاربعدی اجازه می‌دهد تا در صورت قرار گرفتن در معرض آب گسترش یابد و هنگامی که ساختار اجازه خشک‌شدن دارد، تمایل به باز شدن و بازیافت شکل اولیه خود دارد. با این حال، هنگامی که فرایند مشابه بارها و بارها تکرار می‌شود، مواد با گذشت زمان تخریب می‌شوند و فرایند بی‌نهایت قابل تکرار نیست برای کنترل روند جهت‌پذیری و برگشت‌پذیری، تحقیقات و توسعه بیشتری باید انجام شود [۵۲].

توانایی خودمتغیربودن مواد منجر به کاربردهای مختلفی در صنایع مختلف می‌شود. برای هر مشاغل کاهش هزینه تولید و افزایش سود برای ماندن در فضای رقابتی شدید ضروری است. مفهوم فناوری چاپ چهاربعدی همراه با چاپ سه‌بعدی بستری را برای اجرای ایده‌های جدید تجاری فراهم می‌کند که می‌تواند روند فعلی بازار را با کاهش سرمایه مورد نیاز، صرفه‌جویی در وقت، فضای کمتری برای نگه‌داری از شرکت و افزایش کارایی تجارت سازگار و رقابت، دچار تغییر کند. چاپ چهاربعدی باعث حفظ محیط زیست می‌شود زیرا قابلیت تغییرشکل جسم چاپ چهاربعدی‌شده اجازه می‌دهد بعد از استفاده از حالت اولیه، دوباره به شکل اصلی درآید [۵۲].

۴-۱ کاربردهای چاپ چهاربعدی در رشته پزشکی

دانشگاه میشیگان نسخه چاپی سه‌بعدی‌ای ایجاد کرد که با گذشت زمان جذب بدن می‌شود. این آتل زیست‌پزشکی که با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی چاپ شده است، با حرکت و رشد بدن، با گذشت زمان تغییر شکل داده و سازگار می‌شود. کاشت این ساختار چاپ چهاربعدی‌شده که باید با سامانه ایمنی بدن سازگار باشد و قادر به سازگاری بافت‌های خارجی اطراف بدن باشد، به‌صورت موفقیت‌آمیز انجام شده است [۵۲].

این فرایند با مدل مجازی نای از طریق سی‌تی‌اسکن بیمار و مدل طراحی مجرای استینت مجازی با نرم‌افزار تصویربرداری پزشکی به نام Mimics آغاز شد. از پلی‌کاپرولاکتون (PCL) به‌عنوان ماده‌ای زیستی برای چاپ با کمک چاپگر سه‌بعدی Formiga P100 استفاده شد [۵۲].

به احتمال زیاد، آینده فناوری چاپ چهاربعدی شامل انواع کاشت و جراحی ترمیمی است. فراتر از کمک به بیماران دارای مشکلات تنفسی، محققان در حال استفاده از آن‌ها برای اصلاح و تغییر شکل اسکلت انسان مانند بازسازی صورت یا بازسازی گوش‌ها هستند [۵۲].

۴-۲ کاربردهای چاپ چهاربعدی در صنعت هوانوردی و رباتیک

اسکایلر تیبیتس از گروه فناوری نوظهور و گروه طراحی شرکت ایرباس برای توسعه ورودی مخصوص هوا با یکدیگر همکاری کردند. این همکاری با ایرباس، ورودی هوای جدیدی ایجاد کرده است که به‌طور خودکار تنظیم می‌شود تا جریان هوایی را که برای خنک کردن موتور استفاده می‌شود، کنترل کند. درحالی که ورودی‌های تهویه هوا در حال حاضر ساکن هستند و جریان

هوا با سرعت هواپیما متفاوت است [۵۲].

ریشه طراحی مستلزم توانایی تولید قطعات واکنشی و بسیار حساس است. چاپ چهاربعدی به این ماشین‌آلات امکان سازگاری و پویایی پیشرفته‌تر برای انجام کار پیچیده را به طور موثر می‌دهد. گروهی از محققان دانشگاه‌های آمریکا ربات‌های اریگامی را تولید کردند که ربات‌هایی با قابلیت تنظیم مجدد هستند و می‌توانند خود را به شکل دلخواه درآورند و به دور خود بخزند. نمونه اولیه ربات کاملاً از قطعات قابل چاپ تشکیل شده بود [۵۲].

مواد هوشمند را می‌توان در برنامه‌های بی‌شماری از دستگاه‌های زیست‌پزشکی برای رهاسازی دارو تا تا علم طراحی و ساخت هوشمان (Robotic) قابل‌برنامه‌ریزی در محیط‌های خاص از جمله در ارتفاعات، فضا و شرایط آب‌وهوایی شدید مانند طغیان، برف و محیط‌های غیرقابل سکونت استفاده کرد. رباتیک نرم از چگونگی انطباق موجودات زنده با محیط خود بهره می‌برد. مواد بسیار سازگار هستند و به آن‌ها امکان می‌دهد رفتار موجودات زنده را تقلید کنند. رباتیک را می‌توان به‌عنوان محرک، حسگر و کنترل‌کننده طبقه‌بندی کرد [۵۸].

۴-۳ کاربرد نانوفناوری در چاپ چهاربعدی

کاربرد روش الکتروریسی و نانوفناوری در صنعت چاپ افزایشی به‌صورت زیر است [۵۷]:

* زیست‌پزشکی
- مهندسی بافت و توسعه دارویی
- نانومواد چهاربعدی
* کاربرد در انرژی
- باتری‌ها
- سلول‌های سوختی
- ابرخازن‌ها
* کاتالیزورها
* تصفیه‌کننده‌ها
* صنایع غذایی
* لوازم آرایشی
* عایق‌های صوتی

۵ محدودیت‌ها و دیدگاه آینده

اگرچه چاپ هوشمند، فناوری نوینی است، اما در بسیاری از صنایع، قابلیت به‌کارگرفته‌شدن دارد. برای فناوری چاپ، از نظر مواد مورد استفاده یا محیط کار برای کاربردهای خاص و تحت شرایط شدید خارجی محدوده‌هایی وجود دارد نظیر مواد زیستی در کاربردهای پزشکی که هنوز به توسعه بیشتر نیاز دارند. در حال حاضر، چاپگرهای موجود در زمینه مواد جدید یا کاربردهای صنعتی با چالش مواجه هستند. بنابراین، چالش‌های متعددی برای پیشرفت نسل بعدی فناوری تولید افزایشی وجود دارد که عمدتاً مورد توجه قرار می گیرند که به شرح زیر ذکر شده است [۱]:

- پیشبرد سرعت و وضوح چاپ و کاهش مصرف انرژی و هزینه‌ها.
- بهبود دقت ابعاد محصول چاپ‌شده و اندازه مقیاس (به‌عنوان مثال، در مقیاس نانو)
- تولید مواد چاپ به‌صورت جدید با ویژگی‌های برتر (همچون فراماده چندگانه)
- چاپ یکپارچه با سایر فرایندهای سنتی یا فناوری چندپردازشی (به‌عنوان مثال، فناوری افزایشی و فناوری کاهشی) به‌عنوان فناوری ترکیبی یا سه‌گانه

برای فناوری چاپ چهاربعدی از مواد هوشمند برای طراحی و کاربرد سازه قابل‌تغییر استفاده می شود. استفاده از چاپ چهاربعدی در حوزه پزشکی برای تحقق نیازهای بالقوه در حال افزایش است. مواد هوشمند به‌عنوان سنگ بنای چاپ چهاربعدی در نظر گرفته شده‌اند. با این حال، در ساختارهای چاپ چهاربعدی هنوز چالش‌های متنوعی وجود دارد که می‌توان در آینده بر آن غلبه کرد. این صنعت در سال‌های آینده می‌تواند کمک‌های شگرفی در پزشکی، مهندسی و سایر زمینه‌های بالقوه داشته باشد [۱]. برای ایجاد آینده موفق در رابطه با چاپ چهاربعدی نیاز به تهیه مواد جدید و کاملاً قابل‌تنظیم است که بتواند به طیف وسیعی از محرک‌های خارجی پاسخ دهد تا تغییر شکل مربوط را به‌دست آورد. همچنین به توسعه نرم‌افزار جدید در چاپ چهاربعدی برای انواع مختلف فنون چاپ چهاربعدی نیاز است. توسعه نرم‌افزار در این زمینه نیاز به در نظر گرفتن مبانی مواد هوشمند، روش چاپ، الزامات هندسی و ساختاری محصول و سازوکار تغییر شکل در روش چاپ چهاربعدی دارد. فنون چاپ چهاربعدی باید بسیار پیشرفت کنند که با مواد مختلف سازگار شوند و با یک ماده خنثی نشوند. چاپ چهاربعدی در بسیاری از زیرشاخه‌های مهندسی پزشکی ظرفیت زیادی دارد. با این حال، برای توسعه سریع‌تر فنون چاپ زیستی مقرون به صرفه‌تر، تلاش‌های فراوانی لازم است [۳]. چاپ چهاربعدی، فناوری برتر در مقایسه با فرایند ساخت سنتی از لحاظ کیفیت و عملکرد محصول است. چشم‌انداز آینده فناوری چاپ چهاربعدی به‌طور خلاصه به شرح زیر است [۱].

- تولید مواد هوشمند جدید با ویژگی‌های پیشرفته

- بهبود کارکرد در حوزه پزشکی و کاشتنی
- افزایش کارایی محرک‌های خارجی
- تحقیق در مورد عملکرد خودکنترل‌کننده‌ها مانند خودرشدکننده و خودواکنش‌دهنده
- بهبود طول عمر محصول چاپ‌شده، زمان چرخه بازیافت و ظرفیت چرخه از پیش برنامه‌ریزی شده
- بررسی چاپ سازه‌های پیچیده

۶ نتیجه‌گیری

تولید به روش چاپ هوشمند که به فناوری چاپ چهاربعدی معروف است، به‌عنوان فناوری پیشرفته در مقایسه با فناوری ساخت سنتی (یا کاهشی)، توسعه یافته است. از فناوری چاپ برای تولید ساختار ثابت در مختصات سه‌بعدی استفاده شده است و چاپ چهاربعدی به‌عنوان فناوری پیشرفته در ترکیب مواد هوشمند و فناوری تولید افزایشی در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه انواع روش چاپ چهاربعدی، معرفی شد. در ادامه چاپ در ابعاد نانو و چاپ نانوکامپوزیت‌ها بررسی شد. همچنین برخی از کاربردهای چاپ چهاربعدی در صنایع متفاوت بیان شد و در نهایت محدودیت‌ها، چالش‌ها و افق پیش‌روی صنعت چاپ افزایشی بررسی شد.

مراجع

1. Quanjina M., Rejaba M., Idrisa M.S., Kumar N.M., Abdullaha M.H., Reddy G.R., Recent 3D and 4D Intelligent Printing Technologies: A Comparative Review and Future Perspective, *Procedia Computer Science*, 167, 1210–1219, **2020**.
2. Mitchell A., Lafont U., Hołynska M., Semprimoschnig C., Additive Manufacturing - A Review of 4D Printing and Future Applications, *Additive Manufacturing*, 24, 606–626, **2018**.
3. Joshi S., Rawat K., Karunakaran C., Rajamohan V., Mathew T., Koziol K., Thakur T., Balan A.S.S, 4D Printing of Materials for the Future: Opportunities and Challenges, *Applied Materials Today*, 18, 100490, **2020**.
4. Pinho A.C., Buga C.S., Piedade A.P., The Chemistry Behind 4D Printing, *Applied Materials Today*, 19, 100611, **2020**.
5. Deshmukh K., Houkan M.T., Mariam AlMaadeed A., Sadasivuni K., 3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials - Chapter 1: Introduction to 3D and 4D Printing Technology: State of the Art and Recent Trends, *Elsevier Inc*., Qatar, **2020**.
6. Melchels F.P.W., Feijen J., Grijpma D.W., A Review on Stereolithography and Its Applications in Biomedical Engineering, *Biomaterials*, 31, 6121–6130, **2010**.
7. Chia H.N., Wu B.M., Recent Advances in 3D Printing of Biomaterials, *Journal of Biological Engineering*. 9, 4, **2015**.
8. Yuan S., Shen F., Chua C.K., Zhou K., Polymeric Composites for Powder-based Additive Manufacturing: Materials and Applications, *Progress in Polymer Science*, 91, 141–168, **2019**.
9. Tian X., Jin J., Yuan S., Chua C.K., Tor S.B., Zhou K., Emerging 3D-printed Electrochemical Energy Storage Devices: A Critical Review, *Advanced Energy Materials*, 7, 1700127, **2017**.
10. Cummins G., Desmulliez M.P.Y., Inkjet Printing of Conductive Materials: A Review, *Circuit World*, 38, 193–213, **2012**.
11. C L., Toit D., Choonara Y.E., Kumar P., Pillay V., 4D Printing and Beyond: Where to from here, *Advanced 3D-Printed Systems and Nanosystems for Drug Delivery and Tissue Engineering*, 139–157, **2020**.
12. Javaid M., Haleem A., Significant Advancements of 4D Printing in the Field of Orthopaedics, *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 11, 4, 485–490, **2020**.
13. Alshahrani H., Review of 4D Printing Materials and Reinforced Composites: Behaviors, Applications and Challenges, *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 6, 167–185, **2021**.
14. Yuan Siang L., Wan Ting S., Lay Poh T., Yunlong W., Yuekun L., Huaqiong L., 4D Printing and Stimuli-responsive Materials in Biomedical Applications, *Acta Biomaterialia*, 92, 19–36, **2019**.
15. Gladman A.S., Matsumoto E.A., Nuzzo R.G., Mahadevan L., Lewis J.A., Biomimetic 4D Printing, *Nature Material*, 15, 413–418, **2016**.
16. Tibbits S., Design to Self-assembly, *Architectural Design*, 82, 68–73, **2012**.
17. Tibbits S., 4D Printing: Multi-material Shape Change, *Architectural Design*, 84, 116–121, **2014**.
18. Ryan K., Down M., Banks C., Future of Additive Manufacturing: Overview of 4D and 3D Printed Smart and Advanced Materials and Their Applications, *Chemical Engineering Journa*l, 32290-7, 1385–8947, **2020**.
19. Falahati M., Ahmadvand P., Safaee S., Chang Y., Lyu Z., Chen R., Li L., Lin Y., Smart Polymers and Nanocomposites for 3D and 4D Printing, *Materials Today*, 40, 215–245, **2020**.
20. Somolinos C.S., 4D Printing: An Enabling Technology for Soft Robotics, Mechanically Responsive Materials for Soft Robotics, **2020**.
21. Pei, E., Loh, G.H., Technological Considerations for 4D Printing: An Overview, *Progress in Additive Manufacturing*, 3, 95–107, **2018**.
22. Kumar R., Singh R., Singh M., Kumar P., On ZnO nano Particle Reinforced PVDF Composite Materials for 3D Printing of Biomedical Sensors, *Journal of Manufacturing Processes*, 60, 268–282, **2020**.
23. Hansen C.J., 3D and 4D Printing of Nanomaterials - Chapter 2: Processing Considerations for Reliable Printed Nanocomposites, *Elsevier Inc.*, Netherlands, **2020**.
24. Compton B.G., Hmeidat N.S., Pack R.C., Heres M.F., Sangoro J.R., Electrical and Mechanical Properties of 3D-printed Graphene-reinforced Epoxy, *JOM*, 70, 292–297, **2018**.

25. De Leon A.C., Chen Q., Palaganas N.B., Palaganas J.O., Manapat J., Advincula R.C., High Performance Polymer Nanocomposites for Additive Manufacturing Applications, *Reactive and Functional Polymers*, 103, 141–155, **2016**.
26. Choi H.W., Zhou T., Singh M., Jabbour G.E., Recent Developments and Directions in Printed Nanomaterials, *Nanoscale*, 7, 3338–3355, **2015**.
27. Zhou X., Liu C.J., Three-dimensional Printing for Catalytic Applications: Current Status and Perspectives, *Advanced Functional Materials*, 27, 1701134, **2017**.
28. Rayatea A., Jain P.K., A Review on 4D Printing Material Composites and Their Applications, *Materials Today: Proceedings*, 5, 20474–20484, **2018**.
29. Momeni F., Hassani M.N, Liu X., Ni J., A Review of 4D Printing, *Materials and Design*, 122, 42–79, **2017**.
30. Bogers M., Hadar R., Bilberg A., Additive Manufacturing for Consumer-centric Business Models: Implications for Supply Chains in Consumer Goods Manufacturing, *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 225–239, **2016**.
31. Conner B.P., Manogharan, G.P., Martof A.N., Rodomsky L.M., Rodomsky C.M., Jordan, D.C., Limperos J.W., Making Sense of 3-D Printing: Creating a Map of Additive Manufacturing Products and Services, *Additive Manufacturing*, 1, 64–76, **2014**.
32. Jacobsen M., Clearing the Way for Pivotal 21st-Century Innovation, in Giftedness and Talent in the 21st Century: Springer, Switzerland, 163–179, **2016**.
33. Hawkes E., An B., Benbernou N.M., Tanaka H., Kim S., Demaine E.D., Rus D., Wood R.J., Programmable Matter by Folding, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 12441–12445, **2010**.
34. Rastogi P., Kandasubramanian B., Breakthrough in the Printing Tactics for Stimuli-Responsive Materials: 4D Printing, *Chemical Engineering Journal*, 366, 264–304, **2019**.
35. Khatri B., Lappe K., Habedank M., Mueller T., Megnin C., Hanemann T. Fused Deposition Modeling of Abs-barium Titanate Composites: A Simple Route Towards Tailored Dielectric Devices, *Polymers*, 10, 666, **2018**.
36. Olakanmi E.O., Cochrane R., Dalgarno K., A Review on Selective Laser Sintering/melting (SLS/SLM) of Aluminium Alloy Powders: Processing, Microstructure, and Properties, *Progress in Materials Science*, 74, 401–477, **2015**.
37. Liu, Y., Y. Yang, Wang D., A study on the Residual Stress During Selective Laser Melting (SLM) of Metallic Powder, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87, 647–656, **2016**.
38. Song X., Chen Y., Lee T. W., Wu S., Cheng L. Ceramic Fabrication Using Mask-Image Projection-based Stereolithography Integrated with Tape-casting, *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 456–464, **2015**.
39. Ge L., Dong L., Wang D., Ge Q., Gu, G., A Digital Light Processing 3D Printer for Fast and High-precision Fabrication of Soft Pneumatic Actuators, *Sensors and Actuators A: Physical*, 273, 285–292, **2018**.
40. Lewis J.A., Direct Ink Writing of 3D Functional Materials, *Advanced Functional Materials*, 16, 2193–2204, **2006**.
41. Sochol R.D., Sweet E., Glick C.C., Venkatesh S., Avetisyan A., Ekman K.F., Raulinaitis A., Tsai A., Wienkers A., Korner K., Hanson K., Long A., Hightower B.J., Slatton G., Burnett D.C., Massey T.L., Iwai K., Lee L.P., Pisterbi K.S.J., Lin L., 3D Printed Micro-fluid-circuitry via Multi-Jet-based Additive Manufacturing, *Lab on a Chi*p, 16, 668–678, **2016**.
42. Zhou Y., Huang W.M., Kang S.F., Wu X.L., Lu H.B., Fu J., Cui H., From 3D to 4D Printing: Approaches and Typical Applications, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29, 4281–4288, **2015**.
43. Zhang Z., Demir K.G., Gu G.X., Developments in 4D-Printing: A Review on Current Smart Materials, Technologies, and Applications, *International Journal of Smart and Nano Material*s, 1–20, **2019**.
44. Zhang Q., Yan D., Zhang K., Hu, G. Pattern Transformation of Heat-shrinkable Polymer by Three-dimensional (3D) Printing Technology, *Scientific Reports*, 5, 8936, **2015**.
45. Miao S., Cui H., Nowicki M., Xia L., Zhou X., Lee S. J., Zhu W., Sarkar K., Zhang Z., Zhang L. G., Stereolithographic 4D Bioprinting of Multi Responsive Architectures for Neural Engineering, *Advanced Biosystems*, 2, 1800101, **2018**.
46. Dadbakhsh S., Speirs M., Kruth J. P., Schrooten J., Luyten J., Van Humbeeck J., Effect of SLM Parameters on Transformation Temperatures of Shape Memory Nickel-Titanium Parts, *Advanced Engineering Materials*, 16, 1140–1146, **2014**.
47. Kim K., Zhu W., Qu X., Aaronson C., McCall W.R.,

Chen S., Sirbuly D.J., 3D Optical Printing of Piezoelectric Nanoparticle–Polymer Composite Materials, *ACS Nano*, 8, 9799–9806, **2014**.
48. Meier, H., Haberland, C., Frenzel, J., Zarnetta, R., Selective Laser Melting of NiTi Shape Memory Components, *Innovative Developments in Design and Manufacturing: CRC Press*, 251–256, **2009**.
49. Momeni F., Ni J., Laws of 4D Printing, *Engineering*, 6, 9, 1035–1055, **2020**.
50. Khoo Z. X., Teoh J.E.M., Liu Y., Chua C. K., Yang S., An J., Leon K., Yeong W.Y., 3D Printing of Smart Materials: A Review on Recent Progresses in 4D Printing, *Virtual and Physical Prototyping*, 10, 103–122, **2015**.
51. Choi J., Kwon O.C., Jo W., Lee H.J., Moon M.W., 4D Printing Technology: A Review, *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2, 159–167, **2015**.
52. Gurung D., Technological Comparison of 3D and 4D Printing, Arcada University, Finland, **2017**.
53. Sirringhaus H., Shimoda T., Inkjet Printing of Functional Materials, *MRS Bulletin*, 28, 802–806, **2003**.
54. Wang X., Guo Q., Cai X., Zhou S., Kobe B., Yang J, Initiator-integrated 3D Printing Enables the Formation of Complex Metallic Architectures, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 6, 2583–2587, **2013**.
55. Shin M., Hoon Song K., Burrell J., Cullen D. Burdick J., Injectable and Conductive Granular Hydrogels for 3D Printing and Electroactive Tissue Support, *Advanced Science*, 6, 1901229, **2019**.
56. Agarwala S., Goh G.L., Goh G.D., Dikshit V., Yeong W.Y., 3D and 4D Printing of Polymer/CNTs-based Conductive Composites - Chapter 10: Fabrication of 3D and 4D Polymer Micro- and Nano-structures Based on Electrospinning, Elsevier Inc., Netherlands, **2020**.
57. Radacsi N., Nuansing W., 3D and 4D Printing of Polymer/CNTs-based Conductive Composites-Chapter 7: 3D and 4D Printing of Polymer/CNTs-based Conductive Composites, Elsevier Inc., Netherlands, **2020**.
58. Chen A., Yin R., Cao L., Yuan C., Ding H.K., Zhang W.J., Soft Robotics: Definition and Research Issues, *in: 24th Int. Conf. Mechatronics Mach. Vis. Pract.*, 366–369, **2017**.