



مروری بر چاپ چهاربعدی پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری

عارف انصاری پور¹، محمد حیدری رارانی^{2*}، رسول مهشید³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 16846-13114، m.heidarirarani@eng.ui.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1402/01/24

پذیرش: 1402/02/25

کلیدواژگان

چاپ چهاربعدی، پلیمرهای حافظه شکل، کامپوزیت، محرک، لاینشانی ذوبی

چکیده

با توسعه و گسترش چاپ سه‌بعدی و ارتقاء به چاپ چهاربعدی، این امکان برای سازه‌های چاپ سه‌بعدی معمول فراهم شده است که در طول زمان با اعمال یک یا چند محرک به‌طور هم‌زمان آن‌ها را به ساختاری پویا تبدیل کنند. چاپ چهاربعدی قادر است یک هندسه ساده را به یک هندسه پیچیده تبدیل کند بدون اینکه نیازی به چاپ هندسه پیچیده از ابتدا باشد. همچنین چاپ چهاربعدی هزینه‌های تولید را کاهش، مواد کمتری را هدر و سرعت تولید را افزایش می‌دهد و ویژگی‌هایی مانند خود مونتاژی، خودسازگاری و خود ترمیمی را به ویژگی‌های مرتبط با سازه‌های چاپ سه‌بعدی اضافه می‌کند. در این مطالعه، ابتدا انواع مواد هوشمند و سازوکارهای فعال‌سازی مورد استفاده در چاپ چهاربعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با تمرکز بر پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری، خواص و ویژگی‌های چاپ چهاربعدی تشریح می‌شود. در ادامه انواع روش‌های ساخت افزودنی مورد استفاده در چاپ چهاربعدی پلیمرها شرح داده می‌شود و در یک بخش جداگانه، تأثیر پارامترهای فرآیندی چاپ با استفاده از یک چاپگر FDM بر پاسخ مواد مورد استفاده به محرک اعمال شده مورد بحث قرار می‌گیرد. علاوه بر این، گسترش چاپ چهاربعدی در صنایع مختلف مانند پزشکی، هوافضا، حسگرها، رباتیک و سایر زمینه‌های کاربردی دیگر که چاپ چهاربعدی در آن‌ها وارد شده مورد بحث قرار گرفت و در پایان این پژوهش، چالش‌های موجود و فرصت‌های آتی توضیح داده شده است.

A review of 4D printing of polymers and polymer composites

Aref Ansaripour¹, Mohammad Heidari-Rarani^{1*}, Rasoul Mahshid¹

1-Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 16846-13114, Isfahan, Iran, m.heidarirarani@eng.ui.ac.ir

Keywords

4D printing, Shape memory polymers, Composites, Stimulus, Fused deposition modeling (FDM)

Abstract

With the development and expansion of 3D printing and upgrading to 4D printing, it became possible for static 3D printed structures to turn them into a dynamic structure over time by applying one or more stimuli simultaneously. 4D printing was able to transform a simple geometry into a complex geometry without the need for printing the entire geometry from the beginning. Also, 4D printing reduced production costs, wasted fewer materials, increased production speed, and added features such as self-assembly, self-compatibility, and self-healing to the features related to 3D printed structures. In this study, first, different types of smart materials (such as shape memory polymers, shape memory alloys, hydrogels, etc.) and activation mechanisms (such as water, heat, pH, etc.) used in 4D printing were evaluated. Then, focusing on polymers and polymer composites, the properties and characteristics of 4D printing were described. In the following, the types of 3D printing methods utilized in the 4D printing of polymers were explained, and in a separate section, the effect of the printing process parameters using an FDM printer on the response of the materials used to the applied stimulus is discussed. Furthermore, the expansion of 4D printing in various industries such as medicine, aerospace, sensors, robotics, and other fields of application in which 4D printing entered was discussed and at the end of this study, the existing challenges and future opportunities were profoundly discussed.

1- مقدمه

1-1- تعریف و تاریخچه چاپ سه‌بعدی

چاپ سه‌بعدی یک فناوری مهندسی است که اساس آن قرارگیری لایه‌های پی‌درپی بر روی یکدیگر است [1]. چاپ سه‌بعدی به دلیل سرعت بالا، دقت زیاد و هزینه پایین تولید توجه‌های زیادی را به خود معطوف کرده و به طور

فزاینده‌ای در سراسر دنیا در حال پیشرفت است و در زمینه‌های بسیاری مانند مهندسی پزشکی [2]، هوافضا [3]، خودروسازی [4]، قالب‌سازی [5] و غیره گسترش پیدا کرده است [6-10] نحوه ساخت قطعات با استفاده از چاپگرهای سه‌بعدی به این صورت است که فرایند ساخت با ترسیم یک مدل سه‌بعدی به کمک کامپیوتر (CAD) و با استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی شروع می‌شود.

- در یک تعریف ابتدایی، چاپ چهاربعدی به این صورت تعریف شد: چاپ چهاربعدی = چاپ سه‌بعدی + زمان که ویژگی یا عملکرد یک ساختار چاپ سه‌بعدی می‌تواند به عنوان تابعی از زمان تغییر یابد [26].
- چاپ چهاربعدی یک روش نمونه‌سازی سریع نسل جدید است که چاپ سه‌بعدی و مواد فعال (هوشمند) را ادغام می‌کند تا معماری‌های چاپی را قادر سازد در طول زمان تغییر شکل دهند [26]. در تعریف بیان شده نسبت به تعریف ابتدایی واژه‌های تحت عنوان مواد هوشمند یا فعال به تعریف ابتدایی اضافه شده است.
- چاپ چهاربعدی استفاده از مواد هوشمند را امکان‌پذیر می‌کند، این مواد توانایی دارند از روشی از پیش تعیین‌شده در پاسخ به یک محرک خارجی تبدیل شوند؛ که بعد چهارم چاپ چهاربعدی به زمان اشاره دارد [17].

با توجه به تعاریف فوق و تعاریف دیگر در تعریفی جامع می‌توان چاپ چهاربعدی را این‌گونه بیان کرد که چاپ چهاربعدی ترکیبی از چاپ سه‌بعدی با مواد هوشمند [8] یا ترکیبی از ساختارهای چند ماده‌ای است [26] که به روشی از پیش برنامه‌ریزی شده به محرک‌های مختلف و متعدد خارجی می‌توانند پاسخ دهند [17] که به عنوان تابعی از زمان تکامل می‌یابند و رفتار هوشمندانه‌ای را از خود نشان می‌دهند [26].

1-3- مقایسه بین چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی

در چاپ سه‌بعدی تمرکز اصلی بر روی ساخت سازه‌هایی با یک یا چند ماده که عمدتاً عملکرد استاتیکی دارند است، از این رو کاربردهایی که نیاز به عملکرد دینامیکی دارند چاپ سه‌بعدی نمی‌تواند آن‌ها را برآورده کند [8]. از این رو چاپ چهاربعدی برای برطرف کردن چنین نیازهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل 2 تفاوت بین چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی را نشان می‌دهد.

مواد پاسخگو به محرک جزء اصلی چاپ چهاربعدی‌اند که این مواد خود به چندین دسته تقسیم می‌شوند. قابلیت این گروه از مواد با ویژگی‌های همچون خود حسی⁷، تصمیم‌گیری⁸، پاسخگویی⁹، حافظه شکل¹⁰، خودسازگاری¹¹، چند کارکردی¹² و خود تعمیرری¹³ تعریف می‌شود [26].

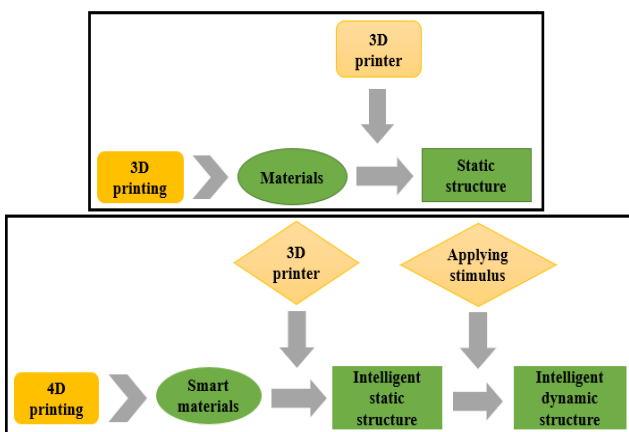


Fig. 2 The difference between 3D and 4D printing

شکل 2 تفاوت بین چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی

سیس مدل ایجاد شده با پسوند STL به نرم‌افزارهای رابط چاپگرهای سه‌بعدی به عنوان مثال Cura و Simplify3D و غیره داده می‌شود که در آن مدل سه‌بعدی برش داده شده و برخی از پارامترهای چاپ را به مجموعه‌ای از دستورالعمل‌های چاپ برای چاپگر تبدیل می‌کند که معمولاً G-code را به عنوان خروجی نرم‌افزار ارائه می‌دهند. در نهایت فایل برش داده شده به دستگاه چاپگر سه‌بعدی ارسال می‌شود و چاپگر هر یک از لایه‌ها را بر روی یکدیگر چاپ می‌کند که در نتیجه یک شکل سه‌بعدی در این فرایند ایجاد می‌شود [11-13]. شکل 1 نمای کلی از فرایند چاپ سه‌بعدی را نشان می‌دهد.

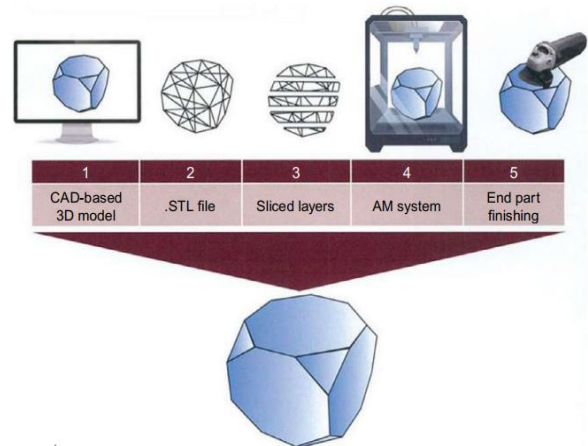


Fig. 1 Overview of the 3D printing process [14]

شکل 1 مروری بر فرایند چاپ سه‌بعدی [14]

پس از معرفی چاپ سه‌بعدی (ساخت افزایشی¹) توسط چالز هال² در سال 1986 به نام استریولیتوگرافی³ (SLA) و با انقضای حق امتیازهای قبلی انگیزه‌های عظیمی برای نوآوری در فناوری‌ها و مواد جدید برای ساخت افزایشی به وجود آمده است [15-18]. ساخت افزایشی دارای روش‌های مختلف چاپی بسیاری است که توانایی چاپ انواع مواد فراهم می‌کنند. به عنوان مثال می‌توان از روش‌های مختلف ساخت افزایشی در چاپ انواع پلیمرها استفاده کرد؛ از روش‌های رایج چاپ سه‌بعدی پلیمرها می‌توان به لایه‌نشانی ذوبی⁴ (FDM) [19]، SLA [20]، تفجوشی لیزری انتخابی⁵ (SLS) [21] نام برد [13]. در بخش 6 بیشتر در مورد روش‌های چاپ سه‌بعدی توضیح داده می‌شود.

1-2- تاریخچه و تعریف چهاربعدی

تاریخچه‌ی ابتدایی چاپ چهاربعدی با پیشرفت و توسعه‌ی فناوری چاپ سه‌بعدی همراه بوده است. تحقیقات در زمینه چاپ چهاربعدی برای اولین بار توسط تیپیتس⁶ در سال 2013 در موسسه فناوری ماساچوست معرفی و آغاز گردید و تاکنون توجهات بی‌سابقه‌ای را به خود جلب کرده که در بسیاری از صنایع همچون پزشکی [22]، هوافضا [23]، رباتیک نرم [24] و حسگرها [25] مورد استفاده قرار گرفته است [8,26].

تعاریف و برداشت‌های گوناگونی از مفهوم چاپ چهاربعدی از ابتدا تاکنون بیان شده است که تعدادی از آن‌ها در ذیل آورده شده است:

⁸ Decision making
⁹ Responsiveness
¹⁰ Shape memory
¹¹ Self-adaptability
¹² Multi-functionality
¹³ Self-repair

¹ Additive manufacturing
² Chuck Hull
³ Stereolithography
⁴ Fused deposition modeling
⁵ Selective laser sintering
⁶ Tibbits
⁷ Self-sensing

2- مواد هوشمند

تعریف مواد هوشمند نیز یک چالش است. در ادبیات تعاریف متعددی برای مواد هوشمند موجود است که گاهی باهم تناقض‌هایی دارند، با اینکه تعاریف موجود تفاوت‌هایی در جزئیات با یکدیگر دارند ولی یک توافق کلی برای تعریف آن در جامعه علمی وجود دارد. مواد هوشمند، مواد یا محصولات مشتق شده‌ای هستند که می‌توانند خواص فیزیکی یا شیمیایی خود را در واکنش به یک محرک خارجی مانند گرما [29]، رطوبت [30]، PH [31]، نور [32] و غیره به‌طور برگشت‌پذیر تغییر دهند [33,34]. به‌طور ساده‌تر مواد هوشمند از نظر ماهیت خاص هستند و هنگامی که تحت معرض محرک‌های خارجی مختلف قرار می‌گیرند، شکل و ویژگی ابعادی متفاوتی پیدا می‌کنند که ممکن است شکل و ویژگی ابعادی آن‌ها چندین بار به‌صورت کنترل شده تغییر یابد [35].

مواد هوشمند شامل دسته‌بندی‌های مختلفی بر اساس پاسخگویی به محرک‌ها، جنس ماده، عامل تحریک‌کننده و کاربردها می‌باشند. در زیر دسته‌بندی‌ای بر اساس انواع مواد هوشمند که توانایی تغییر شکل به انواع محرک‌های مختلف را دارند آورده شده است [34]:

- پلیمرهای حافظه شکل¹ (SMPs) [36]
- آلیاژهای حافظه شکل² (SMAs) [37]
- پیزوالکتریک‌ها³ [38]
- مگنتو استریکتیوها⁴ [39]
- هیبریدهای حافظه شکل⁵ (SMHs) [40]

و غیره.

1-2- پلیمرهای حافظه شکل (SMP)

پلیمرهای حافظه شکل دسته‌ای از مواد هوشمند هستند که می‌توانند از یک یا چند شکل تعریف شده به شکل دائمی تحت اعمال محرک‌های خارجی همچون حرارت (دما)، رطوبت، آب، PH، نور، میدان مغناطیسی و الکتریکی تبدیل شوند [8,17,41,42]. پلیمرهای حافظه شکل با توجه به ویژگی‌هایی مانند وزن کم، توانایی در تغییر شکل‌های بزرگ، ساخت و برنامه‌ریزی آسان، تخریب‌پذیری و زیست‌سازگاری بالا، آن‌ها را کاندید برای کاربردهای بسیاری کرده است [17,43,44].

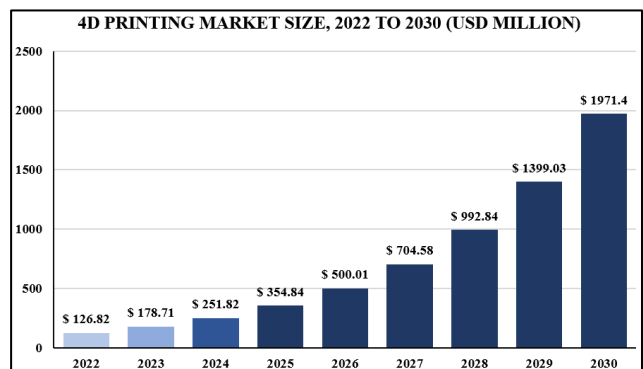
جهت فعال‌سازی پلیمرهای حافظه شکل با استفاده از گرما، شکل دائمی تحت تنش‌های بالای دمای انتقال شیشه‌ای⁶ به دست می‌آید. اگر این تنش اعمال شده هنگامی که پلیمر زیر دمای انتقال شیشه‌ای سرد می‌شود ثابت بماند، پلیمرهای حافظه شکل به‌صورت تغییر شکل یافته باقی می‌ماند تا زمانی که دوباره بالای دمای انتقال شیشه‌ای خود گرم شود [17]. پلیمرهای حافظه شکل چند مرحله‌ای نیز وجود دارند که می‌توانند بیش از دو شکل را به خاطر بسپارند که توانسته‌اند عملکرد سازه‌های چاپ شده چهاربعدی را تا حد زیادی بهبود ببخشند. تحریک برای تغییر شکل پلیمرهای حافظه شکل چند مرحله‌ای چاپ شده چهاربعدی معمولاً با گرما دادن مستقیم در دماهای مختلف انجام می‌شود [44].

از رایج‌ترین پلیمرهای حافظه شکل به عنوان مثال می‌توان از پلی‌لاکتیک اسید⁷ (PLA) [45]، (مت)اکریلات⁸ [46]، پلی‌پورتان⁹ [47] و کلرید پلی‌وینیل¹⁰ [48] نام برد. پلیمرهای حافظه شکل امروزه در کاربردهایی مانند

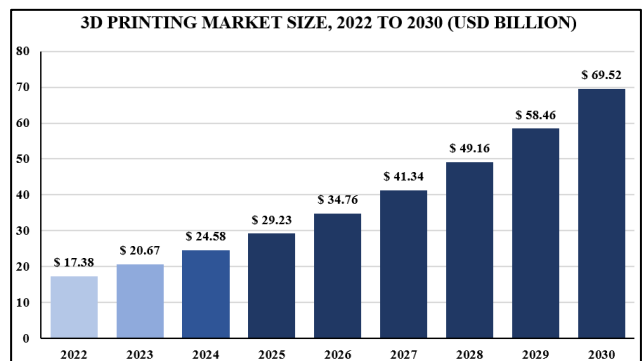
چاپ چهاربعدی توسعه هدفمند ساختار چاپ سه‌بعدی از نظر شکل، ویژگی و عملکرد است که توانایی دستیابی به خودمونتاژی، چند کارکردی و خود تعمیر را داراست و همچنین وابسته به زمان، مستقل از چاپگر، قابلیت پیش‌بینی دارد [26].

1-3-1- مقایسه بازار جهانی چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی

با گسترش چاپ چهاربعدی طی چند سال اخیر وب‌سایت "precedence research" در یک پیش‌بینی ارزش بازار جهانی این فناوری را از سال 2022 تا 2030 از 126.82 میلیون دلار آمریکا به 1971.4 میلیون دلار تخمین زده است. که در شکل 3-الف روند پیش‌بینی توسعه بازار این فناوری قابل مشاهده است. طی پیش‌بینی دیگر این وب‌سایت در مورد چاپ سه‌بعدی (شکل 3-ب) ارزش بازار این فناوری از 17.38 میلیارد دلار آمریکا در سال 2022 به 69.52 میلیارد دلار در سال 2030 خواهد رسید. از مقایسه این دو نمودار می‌توان دریافت که ارزش بازار چاپ چهاربعدی نسبت به چاپ سه‌بعدی در سال 2022 از 0.73 درصد به 2.84 درصد در سال 2030 افزایش خواهد یافت که رشد 289.04 درصدی را نشان می‌دهد. این افزایش نشان دهنده رشد و توجه به این فناوری طی سالیان آتی خواهد بود.



الف-ا



ب-ب

Fig. 3 Global market size forecast for a) 4D printing and b) 3D printing [27,28]

شکل 3 پیش‌بینی اندازه بازار جهانی برای الف) چاپ چهاربعدی و ب) چاپ سه‌بعدی [27,28]

⁶ Glass transition temperature

⁷ Polylactic acid

⁸ (Meth)acrylate

⁹ Polyurethane

¹⁰ Polyvinyl chloride

¹ Shape memory polymers

² Shape memory alloys

³ Piezoelectrics

⁴ Magnetostrictives

⁵ Shape memory hybrids

چگالی و هزینه پایین، ساخت و برنامه‌ریزی آسان، زیست‌سازگاری و زیست‌تخریب‌پذیری بالاتر می‌باشند. یکی از نقطه‌ضعف‌های آلیاژهای حافظه شکل این است که در طی هر چرخه تبدیل فاز نایجابی‌ها و نقص‌هایی ریزساختاری در آن‌ها ایجاد می‌شود [17,43].

3- سازوکارهای فعال‌سازی

موادی که در چاپ چهاربعدی استفاده می‌شوند به طور کلی مواد هوشمند هستند که می‌توانند در طی زمان در پاسخ به یک یا چند محرک خارجی ویژگی‌ها و عملکرد خود را تغییر دهند. سازوکارهای مختلفی برای فعال‌سازی مواد هوشمند وجود دارد که یک ساختار چاپ شده چهاربعدی می‌تواند عملکرد خود را بر اساس آن‌ها نشان دهد [8,26]. برخی از این سازوکارها در ادامه توضیح داده شده‌اند.

1-3- محرک آب یا رطوبت

ساختارهای خود تکاملی ابتدا با استفاده از مواد آب‌دوست شناخته شدند. زمانی که در آب غوطه‌ور می‌شوند انبساط می‌یابند و اشکال و تغییر شکل‌های از پیش برنامه‌ریزی شده‌ای را از خود نشان می‌دهند [62]. برخی از مواد هوشمند به محرک آب یا رطوبت واکنش نشان می‌دهند و اکنون بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. دسته‌ای از مواد پلیمری که توانایی پاسخگویی به محرک آب را دارند هیدروژل‌ها هستند که ساختارهای آب‌دوست آن‌ها را قادر می‌سازد که مقدار زیادی آب را در شبکه‌های سه‌بعدی خود نگه دارند [63]. ساختار هیدروژل‌ها متشکل از شبکه‌های سه‌بعدی از زنجیره‌های پلیمری است که از اتصالات عرضی تشکیل شده‌اند، زمانی که هیدروژل‌ها با رطوبت در تماس باشند تا 200 درصد هم می‌توانند حجم خورد را گسترش بدهند. هیدروژل‌ها قابلیت چاپ بالایی دارند و همچنین آن‌ها سازگاری بسیار خوبی با محیط‌زیست را از خود نشان می‌دهند؛ ولی یکی از مشکلات اصلی آن‌ها واکنش معکوس (برگشت) کند آن‌ها است که باید زمان زیادی را صبر کرد تا خشک شوند که برای رفع این مشکل محققین فعالیت‌هایی را انجام داده‌اند [8].

فان⁵ و همکاران [64] مفهوم حافظه شکل هیبریدی پاسخگو به آب را پیشنهاد دادند و مزایای آن‌ها را در قالب دو مثال بیان کردند. رابو⁶ و همکاران [62] یک ساختار خود تکاملی پویا را با دو ماده چاپ کردند، آن‌ها از یک پلیمر آب‌دوست برای افزایش اندازه و همچنین مواد منبسط کننده آب‌دوست برای فعال کردن سازوکار تاشوندگی استفاده کردند. مانو⁷ و همکاران [65] با چاپ سه‌بعدی پلیمر حافظه شکل و هیدروژل که هر دو ماده توانایی پاسخگویی به محرک را دارند، ساختاری سه‌بعدی را چاپ کردند. آن‌ها رویکرد تورم هیدروژل در پاسخگویی به آب را به عنوان نیروی محرک جهت تغییر شکل سازه و تغییرات مدول الاستیک با دما در پلیمر حافظه شکل برای تنظیم زمان تغییر شکل مورد استفاده قرار دادند.

2-3- محرک گرما یا دما

برخی از مواد هوشمند به حرارت یا دما پاسخ می‌دهند، تغییر شکل در این مواد عمدتاً به دو سازوکار اثر تغییر شکل⁸ [66] یا اثر حافظه شکل⁹ [67] مرتبط می‌شود [8].

در تحریک با استفاده از گرما در پلیمرها دو سطح دمایی و یک بار خارجی لازم است. یک دما (مانند دمای انتقال شیشه‌ای یا دمای انتقال ذوب کریستالی) بالاتر از دمای بحرانی و دمای دیگر باید پایین‌تر از دمای بحرانی ماده هوشمند

زیست پزشکی [49]، سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی [50]، صنعت نفت و گاز [51]، هوافضا [52]، الکترونیک [53] و ساختارهای خود گشودنی [17] به کار می‌روند.

2-2- آلیاژهای حافظه شکل (SMA)

آلیاژهای حافظه شکل دسته دیگری از مواد هوشمند حافظه شکل‌اند که هم می‌توانند حافظه مکانیکی و هم حرارتی داشته باشند [17]. زمانی که در معرض محرک‌های خاصی همچون گرمایی-مکانیکی قرار می‌گیرند تغییر شکل می‌دهند و پس از حذف محرک شکل ابتدایی قبل از تغییر شکل خود را بازیابی می‌کنند. آن‌ها توانایی به خاطر سپردن یک شکل خاص را حتی پس از تغییر شکل شدید در دماهای پایین دارند [54,55]. اثر حافظه شکل نتیجه تبدیل بین دو فاز کریستالی مختلف (آستنیت-مارتنزیت) در آلیاژهای حافظه شکل است. ساختار شبکه‌ای منحصربه‌فرد این مواد منجر به رفتار تغییر شکل می‌شود که بسیار متفاوت با آلیاژهای فلزی معمولی است. این مواد می‌توانند تغییر شکل‌های بزرگی را تحمل و بازیابی کنند و پسماند مکانیکی را در چرخه‌های بارگذاری-تخلیه از خود نشان دهند. علاوه بر این، خواص این آلیاژها نیز به دما بستگی دارد [17,55,56].

یکی از معروف‌ترین آلیاژهای حافظه شکل، آلیاژ نیکل-تیتانیوم است که به نایتینول¹ معروف است [57]. از مهم‌ترین کاربردهای آلیاژهای حافظه شکل می‌توان به استفاده در صنعت خودرو [54]، صنعت هوافضا [54]، زیست پزشکی [54]، عمران [58]، اتصالات لوله‌ها [58]، موتورهای حرارتی [58]، میکرو محرک‌ها [58] و غیره اشاره کرد.

3-2- پیزوالکتریک

برخی از مواد توانایی تولید بار الکتریکی بر روی سطوح خود در اثر اعمال تنش مکانیکی را دارند که به این دسته از مواد پیزوالکتریک گفته می‌شود و به اثری که تنش مکانیکی را به بار الکتریکی تبدیل می‌کند اثر مستقیم پیزوالکتریک گفته می‌شود. در این مواد یک اثر معکوس نیز وجود دارد بدین معنا که در اثر اعمال یک میدان الکتریکی این مواد می‌توانند کرنش مکانیکی از خود نشان دهند [59]. از این دو اثر مستقیم و معکوس در این مواد می‌توان در حسگرها و عملگرها بهره برد [60].

4-2- مگنتواستریکتیو

دسته دیگری از مواد هوشمند که توانایی پاسخگو به میدان مغناطیسی و کرنش مکانیکی را دارند مگنتواستریکتیوها هستند. این مواد می‌توانند در اثر اعمال یک میدان مغناطیسی دچار ازدیاد طول شوند که این اثر در این مواد به اثر ژول² معروف است. اثر دیگری که در این مواد وجود دارد اثر ویلاری³ است که در مقابل اثر ژول قرار می‌گیرد. این اثر زمانی ایجاد می‌شود که این مواد دچار کرنش مکانیکی شوند که در این صورت می‌تواند یک میدان مغناطیسی از خود ساطع کنند. یکی از رایج‌ترین مگنتواستریکتیوها ترفنول-دی⁴ است که می‌توان از آن در حسگرها و محرک‌های مغناطیسی از آن استفاده کرد [61].

5-2- مقایسه SMA و SMP

یک نقطه ضعف بالقوه برای پلیمرهای حافظه شکل استحکام کششی و سفتی کم آن‌ها در مقایسه با آلیاژهای حافظه شکل است. با این حال، بسیاری از نانوکامپوزیت‌های حافظه شکل در حال توسعه‌اند تا به بهبود رسانایی، پاسخ الکتریکی و خواص مکانیکی آن‌ها کمک کنند [17]. پلیمرهای حافظه شکل دارای مزایای زیادی نسبت به آلیاژهای حافظه شکل مانند بازیابی کرنش بالا،

⁶ Raviv

⁷ Mao

⁸ Shape change effect

⁹ Shape memory effect

¹ Nitinol

² Joule effect

³ Villari effect

⁴ Terfenol-D

⁵ Fan

3-3- محرک PH

برخی از مواد هوشمند توانایی پاسخ دادن به تغییرات مقدار PH را دارند و با توجه به مقدار PH دچار تغییر شکل و حجم می‌شوند [8,70]. این دسته از مواد معمولاً به دو دسته بر حسب گروه عاملی موجود در آن‌ها تقسیم می‌شوند: پلی‌اسیدها و پلی‌بازها. این مواد دارای گروه عاملی یونیزاسیون‌اند که می‌توانند پروتون‌ها را با تغییر مقدار PH به اشتراک (پذیرش یا اهدا) بگذارند. تغییر در حجم آب‌گریزی مسئله‌ای اساسی است که در این‌گونه از مواد با دافعه الکترواستاتیکی بین بارهای ایجاد شده روی آن‌ها رخ می‌دهد که دلیل آن‌هم فروپاشی یا انبساطی است که در آن‌ها ایجاد می‌شود. مواد پلی‌اسید در طی زمان با تغییر مقدار PH به دلیل آزاد شدن پروتون دچار انبساط می‌شوند ولی پلی‌بازها به دلیل پذیرش پروتون دچار انقباض می‌شوند [8,35].

نادگورنی⁶ و همکاران [71] با اکسترود کردن ماده پلی(2-ونیل پیریدین)⁷ (P2VP) و اضافه کردن 12 درصد وزنی آکریلونیتریل بوتادین استایرن⁸ (ABS) و رسیدن به فیلامنتی با قابلیت پاسخگویی به PH و چاپ که بتوان آن‌ها با یک چاپگر معمولی سه‌بعدی چاپ کرد را تولید کردند. همچنین قطعات چاپ شده توسط آن‌ها قابلیت برگشت‌پذیری به شکل اولیه بعد از اعمال محرک را از خود نشان داد. وو⁹ و همکاران [72] در مطالعه‌ای یک دستگاه اندازه‌گیری مقدار PH را با استفاده از چاپگر FDM و از جنس فیلامنت‌های ABS و کامپوزیت ABS و پلی(4-ونیل پیریدین)¹⁰ (P4VP) را چاپ کردند. دستگاه چاپ شده توسط آن‌ها پس از غوطه‌ور شدن در محلولی با PH در حدود 5 باعث به وجود آمدن یک دافعه الکترواستاتیکی بین واحدهای پروتونه شده می‌شد که حاصل آن تورم بخش چاپ شده دستگاه از جنس ABS/P4VP بود.

4-3- محرک الکتریکی

دسته‌ای از مواد هوشمند نیز وجود دارند که نسبت به اعمال الکتریسیته از خود واکنش نشان می‌دهند مثلاً با اعمال الکتریسیته دچار تغییر در ابعاد خود می‌شوند. یک نمونه از موادی که در اثر اعمال الکتریسیته دچار کرنش می‌شوند پیژوالکتریک‌ها هستند. همانطور که در بخش 2-3 گفته شد یک وابستگی الکترومکانیکی در پیژوالکتریک‌ها برقرار است؛ که می‌توان از این وابستگی الکترومکانیکی در حسگرها و عملگرها بهره برد. مواد پیژوالکتریک را می‌توان برای کاربردهای چاپ چهاربعدی نیز استفاده کرد، زیرا تحت تأثیر نیروی مکانیکی هم می‌توانند تغییر شکل دهند [8,73].

5-3- محرک مغناطیسی

میدان مغناطیسی یک محرک غیرمستقیم است که توانایی ایجاد تغییر شکل در مواد هوشمند را دارد که می‌توانند در چاپ چهاربعدی مورد استفاده قرار بگیرند، به این دسته مواد پاسخگوی مغناطیسی گفته می‌شود [8].

برگر¹¹ و همکاران [74] نانوذرات اکسید آهن Fe₃O₄ را در لایه‌های هیدروژل متخلخل جاسازی کردند که این ذرات به هیدروژل اجازه می‌دهد تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی از راه دور نسبت به اعمال میدان پاسخگو باشد. یو¹² و همکاران [75] یک نانوکامپوزیت زیست‌تخریب‌پذیر را ارائه کردند که می‌تواند به محرک حرارت و میدان مغناطیسی پاسخ بدهد. نانوکامپوزیت آن‌ها شامل پلی(ε-کاپرولاکتون)¹³ و نانوذرات اکسید آهن بود. ذرات نانو اکسید

باشد. خواص فیزیکی ماده مانند دمای بحرانی یا دمای انتقال شیشه‌ای یا دمای انتقال ذوب کریستالی نقش حیاتی در این تحریک ایفا می‌کنند. ساختار چاپ شده حساس به دما را می‌توان تا دمایی بالاتر از T_g تا T_1 گرم کرد که این گرم کردن می‌تواند باعث ایجاد تغییر شکل و کرنش در ساختار چاپ شده شود. سپس باید ساختار را تا تحت فشار خارجی تا زیر T_g تا T_2 خنک کرد که در این مرحله تنش حرارتی حذف شده و مواد به طور موقتی شکل خواهند گرفت و در نهایت برای رسیدن به شکل اولیه باید در شرایط تنش آزاد تا دمای T_1 گرم شوند. شکل 4 جریان سازوکار حرارتی را برای پلیمرهای حافظه شکل نشان می‌دهد [26,35].

لین¹ و همکاران [68] فیلامنت‌هایی از جنس PLA و PLA ترکیب شده با سوکسینات پلی بوتیلن² (PBS) را ساختند و هندسه‌هایی مانند ستاره دریایی و استنت اندولومینال³ را با آن‌ها چاپ کردند. آن‌ها قطعات چاپ شده را در حمام آب گرم در دمای $T_g + 20^\circ\text{C}$ حرارت دادند تا به تغییر شکل موقت از پیش برنامه‌ریزی شده‌ای دست یابند. یو⁴ و همکاران [69] تعدادی نمونه از جنس PLA و کامپوزیتی از جنس PLA تقویت شده با الیاف کربن (PLA/CFPLA) را با ضخامت‌های مختلف چاپ کردند، آن‌ها جهت فعال‌سازی قطعات با استفاده از محرک گرما نمونه‌های چاپ شده را در حمام آب 80°C قرار دادند تا دچار تغییر شکل شوند و همچنین نتایج آزمایش‌های تجربی خود را نیز با شبیه‌سازی المان محدود نیز مقایسه کردند. وان⁵ و همکاران [44] با استفاده از پلیمرهای حافظه شکل و ذرات اکسید آهن ساختار گلی را طراحی کردند که توانایی پاسخ‌گویی به دو محرک گرما و میدان مغناطیسی را داشت.

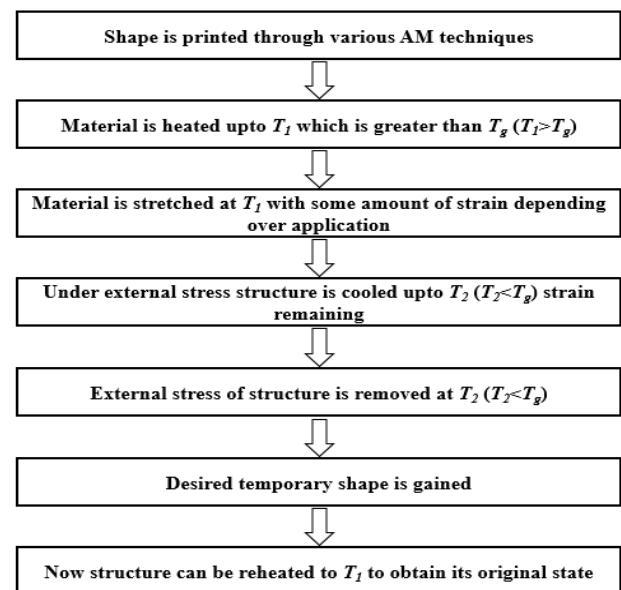


Fig. 4 Classified diagram for the activation of shape memory polymers [35]

شکل 4 نمودار طبقه‌بندی شده برای فعال‌سازی پلیمرهای حافظه شکل [35]

⁸ Acrylonitrile butadiene styrene

⁹ Wu

¹⁰ Poly(4-vinylpyridine)

¹¹ Breger

¹² Yu

¹³ Poly(ε-caprolactone)

¹ Lin

² Polybutylene succinate

³ Endoluminal stent

⁴ Yu

⁵ Wan

⁶ Nadgorny

⁷ Poly(2-vinylpyridine)

تا سه برابر تغییر طول بدهد. زنگ⁶ و همکاران [84] یک رویکرد طراحی و ساخت خود مونتاژ متوالی را ارائه کردند که با فعال‌سازی حرارتی محرک‌های دو لایه تحقق می‌یابد و شبکه‌های دوبعدی را به سه‌بعدی تبدیل می‌کند. آن‌ها یک ساختار جعبه تاشو را به عنوان مثال برای نشان دادن روش مورد استفاده در این تحقیق به کار بردند.

4-2- خودسازگاری

سازه‌های چاپ چهاربعدی توانایی سازگاری با محیط پیرامون خود را دارند. بدین مفهوم که ممکن است یک ساختار چاپ چهاربعدی بسته به شرایط محیطی در پاسخ به یک محرک به سرعت پاسخ بدهد درحالی‌که در محیطی دیگر برای پاسخ‌دهی نیاز به زمان بیشتری داشته باشد که این توانایی در جهت تطبیق‌پذیری را می‌توان خودسازگاری اسم‌گذاری کرد که در طراحی بافت یا دستگاه‌های پزشکی و دستگاه‌های الکترومکانیکی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد [8].

ژائو⁷ و همکاران [85] در مطالعه‌ای که بر روی پلیمرهای حافظه شکل در زمینه زیست پزشکی انجام دادند بیان کردند که این پلیمرها می‌توانند در دستگاه‌های تطبیقی زیست پزشکی بکار روند که باعث کاهش آسیب به بافت‌ها حین کاشتن این دستگاه‌ها می‌شود و بهتر می‌تواند با بافت‌های اطراف محل کاشت مطابقت داشته باشند و اینکه زیست‌سازگاری و زیست‌تخریب‌پذیری قابل تنظیمی را می‌توانند از خود نشان دهند.

4-3- خودترمیمی

توانایی خودترمیم شونده برای محرک‌های نرم یک توانایی مطلوب است که می‌تواند عمر ساختار را افزایش بدهد و همچون رفتاری مانند بافت‌های طبیعی را تقلید کند [86]. خودترمیم شونده‌ای از جمله پیشرفت‌های امیدوارکننده‌ای است که می‌تواند در مواد مورد استفاده در نمایشگرها، تلفن‌هایی همراه و ربات‌ها استفاده شود که قابلیت ترمیم شدن در دمای اتاق را داشته باشند [87]. اینورنیزی⁸ و همکاران [86] ماده هوشمند جدیدی را با قابلیت چاپ چهاربعدی که یک پلیمر حافظه شکل با سازوکار فعال‌سازی حرارتی با قابلیت خودترمیم شونده است را توسعه دادند. اشیاء چاپ شده با این پلیمر رفتار خود ترمیم شونده خوبی را پس از عمل ترمیم نشان دادند. شکل 5 یک لاستیک برگشت‌پذیر حرارتی را نشان می‌دهد که از موادی مانند اسیدهای چرب و اوره تشکیل شده است که توانایی خودترمیم شونده در دمای اتاق را دارد [87].

آهن علاوه بر ایجاد امکان پاسخ‌گویی به میدان مغناطیسی به بهبود پاسخگویی حرارتی به دلیل رسانایی گرمایی ذرات اکسید آهن کمک کردند. ژو¹ و همکاران [76] یک جوهر کامپوزیتی از جنس پلی(دی متیل سیلوکسان)² و نانوذرات آهن را برای چاپ چهاربعدی برگشت‌پذیر در واکنش به اعمال میدان مغناطیسی با زمان پاسخگویی سریع را توسعه دادند. پلی(دی متیل سیلوکسان) به عنوان یک زمینه نرم برای نانوذرات آهن این اجازه را به این ذرات می‌دهد که با خاموش و روشن شدن محرک سریعاً از خود واکنش نشان دهند. آن‌ها از این جوهر کامپوزیتی در یک ساختار پروانه‌ای شکل استفاده کردند که این ساختار می‌توانست با قرارگیری در یک میدان مغناطیسی بال‌های خود را تکان بدهد.

4-4- خواص مواد چاپ چهاربعدی

می‌توان ساختارهای پیچیده را با استفاده از چاپ سه‌بعدی چاپ کرد. ولی چاپ چهاربعدی می‌تواند یک ساختار ساده سه‌بعدی چاپ شده را به یک ساختار پیچیده تبدیل کند [77]. همچنین می‌توان با استفاده از چاپ چهاربعدی ویژگی‌هایی مانند خود مونتاژ³ [78]، خودسازگاری [79] و خود ترمیمی⁴ [80] را به سازه‌های چاپ سه‌بعدی اضافه کرد و پتانسیل استفاده از چاپ چهاربعدی را نسبت به چاپ سه‌بعدی بالا برد چون یک ساختار پویا را در مقابل یک ساختار استاتیکی قرار می‌دهد که می‌تواند در کاربردهای متنوعی قابلیت بهره‌برداری داشته باشد.

4-4-1- خودمونتاژی

خودمونتاژی یک ساختار را می‌توان جایگزینی برای ساخت یک ساختار پیچیده دانست که در شرایط دشوار محیطی می‌تواند بسیار مفید باشد [77]. چشم‌انداز محصولاتی با ساختارهای خودمونتاژی بسیاری گسترده شده و این‌گونه ساختارها می‌توانند با توجه به شرایط محیطی مونتاژ شوند و قابلیت تکرار داشته باشند؛ بنابراین چاپ چهاربعدی به کمک مواد هوشمند، آینده و فرصت‌های بسیاری را در بخش‌های مختلف به وجود آورده است [81].

یک از کاربردهای خودمونتاژ شونده استفاده از این ویژگی در چاپ استنت‌ها در کاربردهای پزشکی است. تحقیقات برای به دست آوردن استنت‌هایی با نسبت انقباض بالا که کمترین آسیب را به بدن وارد کند در حال انجام است. نسبت انقباض‌های مختلف را می‌توان بسته به پارامترهای هندسی و چیدمان لایه‌ها در این استنت‌ها به دست آورد [82]. به عنوان مثال مانن⁵ و همکاران [83] یک استنت با استفاده از پلی‌لاکتیک اسید نوع پزشکی طراحی و چاپ کردند که با توجه به شرایط محیطی و با قابلیت خودمونتاژی می‌توانست



Fig. 5 Self-healing rubber composite at room temperature. The sequence of images from left to right shows cutting, connecting, repairing and stretching the tire after healing [87]

شکل 5 کامپوزیت لاستیکی خودترمیم شونده در دمای اتاق. توالی تصاویر از چپ به راست، برش، اتصال، تعمیر و کشش لاستیک را پس از بهبود نشان می‌دهد [87]

⁵ Manen
⁶ Zeng
⁷ Zhao
⁸ Invernizzi

¹ Zhu
² Poly(dimethylsiloxane)
³ Self-assembly
⁴ Self-healing

درحالی‌که تغییرات شکل در مواد تغییر شکل ذاتاً برگشت پذیر هستند ولی در مواد حافظه شکل معمولاً یک تبدیل یک‌طرفه از حالت برنامه‌ریزی شده به حالت تعادل (اصلی) است [90].

مؤمنی و همکاران [26] در مروری که بر مقالات داشته‌اند بیان کردند که یک ماده تغییر شکل بلافاصله پس از اعمال محرک شکل خود را تغییر می‌دهد و بلافاصله پس از حذف محرک به شکل دائمی خود بازمی‌گردد. در حالی‌که اثر حافظه شکل شامل یک چرخه دو مرحله‌ای است که مرحله اول مرحله برنامه‌ریزی است که در آن یک ساختار از شکل اولیه خود تغییر شکل می‌دهد و در یک شکل موقت پایدار می‌ماند و در مرحله دوم که مرحله بازیابی نام دارد در آن شکل اصلی می‌تواند با یک محرک مناسب بازیابی شود. همچنین می‌توان با آزمایش‌ها تجربی امکان چاپ چهاربعدی یک‌طرفه و دوطرفه را با استفاده روش FDM تک ماده نشان داد [91].

6- روش‌های چاپی

چاپگرهای سه‌بعدی جدید و پیشرفته عمدتاً در فناوری‌های پیشرفته ساخت افزایشی استفاده می‌شوند [92]. از دهه‌های گذشته تاکنون روش‌های چاپی متنوعی برای چاپ مواد هوشمند یا فرامواد مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به FDM [93]، SLS [94]، فتوپلیمریزاسیون مخزنی⁴ (VP) [95]، نوشتن مستقیم با جوهر⁵ (DIW) [96] و اشاره کرد [97]. شکل 7 انواع روش‌های رایج ساخت افزایشی در چاپ چهاربعدی را به صورت یک طرح‌واره نشان می‌دهد.

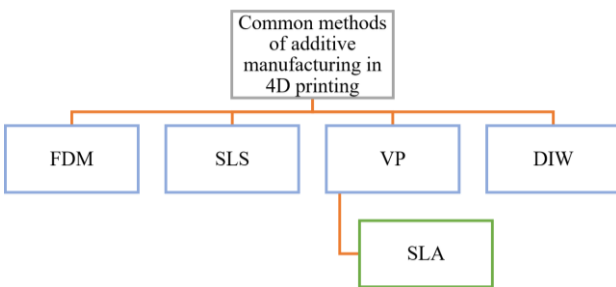


Fig. 7 Common methods of additive manufacturing in 4D printing
شکل 7 روش‌های رایج ساخت افزایشی در چاپ چهاربعدی

6-1- لایه‌نشانی مذاب (FDM)

روش لایه‌نشانی مذاب یا همان ساخت فیلامنت ذوب‌شده⁶ (FFF) محبوب‌ترین روش مورد استفاده در چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی پلیمرها است [8,98]؛ که به دلیل قابلیت اطمینان بالا، عملکرد ساده، هزینه کم، دسترسی آسان، تنوع زیاد رشته‌های مصرفی و توانایی ساخت قطعات با هندسه‌های پیچیده بسیار محبوب شده است و در صنعت چاپ سه‌بعدی چه در کاربردهایی با مقیاس خانگی، شرکت‌های کوچک و بزرگ و همچنین در صنایع مختلف مانند خودروسازی، هوانوردی، ساخت‌وساز، زیست پزشکی، آکوستیک و ساخت ساندویچ پانل‌ها⁷ برای نمونه‌سازی سریع مورد استفاده قرار گرفته است [99-103].

مبنای کاری چاپگر FDM به این صورت است که از رشته‌های ترموپلاستیک به عنوان مواد اولیه برای چاپ قطعات استفاده می‌کند. این

5- انواع مواد پلیمری مورد استفاده در چاپ چهاربعدی

دسته‌بندی‌های مختلفی برای طبقه‌بندی مواد پلیمری مورد استفاده در چاپ چهاربعدی وجود دارد که یکی از آن‌ها دسته‌بندی بر اساس نوع مواد مصرفی است. در ساختارهای چاپ شده، چاپ چهاربعدی ممکن است از یک ماده در ساختار طراحی شده یا از چند ماده بسته به طراحی سازه مورد نظر استفاده کرد. همچنین می‌توان از مواد کامپوزیتی و روش‌های مختلف چاپ برای ساخت اشیاء چند منظوره سفارشی‌سازی شده برای بسیاری از نیازها استفاده کرد [88]. طی دسته‌بندی دیگر می‌توان پلیمرهای حافظه شکل را به سه دسته یک‌طرفه، دوطرفه و چندگانه تقسیم‌بندی کرد. پلیمرهای حافظه شکل یک‌طرفه را برای یک مرحله تغییر شکل می‌توان برنامه‌ریزی کرد و چنانچه احتیاج به انقباض یا انبساط بیشتر باشد محرک دیگری اعمال می‌شود تا ماده در لحظه خواسته شده تغییر شکل مورد نیاز را به خود بگیرد. پلیمرهای حافظه‌شکلی که در یک مرحله برنامه‌ریزی شده‌اند اما تغییر شکل برگشت‌پذیر می‌دهند به آن‌ها پلیمرهای حافظه شکل دوطرفه می‌گویند و برای انقباض و انبساط بیشتر به هیچ محرک دیگری نیاز ندارند بلکه با خاموش شدن همان محرک به شکل اولیه خود بازمی‌گردند. پلیمرهای حافظه شکل چندگانه دارای دو یا چند شکل موقت هستند که این ویژگی در تغییر شکل بیشتر به T_g گسترده آن ماده بستگی دارد. برای درک بهتر از پلیمرهای حافظه شکل یک‌طرفه، دوطرفه و چندگانه می‌توان به شکل 6 مراجعه کرد [35,89].

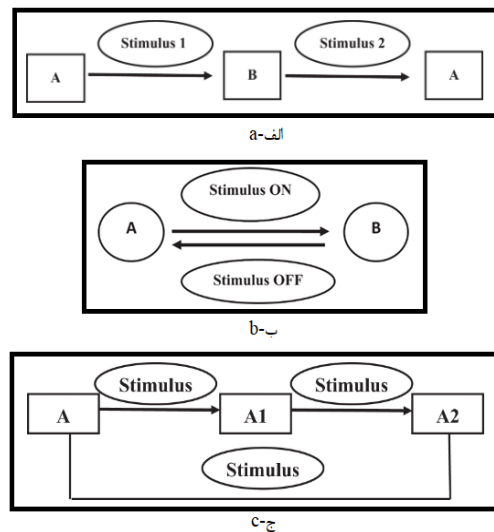


Fig. 6 Schematic of shape memory polymers (SMPs)- a) one-way, b) two-way, c) multiple [35]

شکل 6 طرح‌واره‌ای از پلیمرهای حافظه شکل (SMPs) - الف) یک‌طرفه، ب) دوطرفه، ج) چندگانه [35]

ژو¹ و همکاران بیان کردند که مواد پاسخگو به محرک‌ها را می‌توان به دو دسته طبقه‌بندی کرد:

- 1) مواد تغییر شکل² که در آن‌ها نوع خاصی از تغییر شکل در ساختار ماده اولیه کدگذاری شده است.
- 2) مواد حافظه شکل³ که هیچ‌گونه تغییر شکل از پیش تعیین‌شده‌ای را ندارند، اما امکان برنامه‌ریزی دگرگونی‌های شکل پیچیده در صورت نیاز را می‌دهند.

¹ Zhou
² Shape-changing materials
³ Shape-memory materials
⁴ Vat photopolymerization

⁵ Direct ink writing
⁶ Fused filament fabrication
⁷ Sandwich panels

مطالعه‌ای با استفاده از چاپگر FDM و به کمک اشعه UV سازه‌های محافظ آرنج را بر اساس شبکه‌های کوپلیستر^۲ حافظه شکل سنتز شده را ارائه دادند.

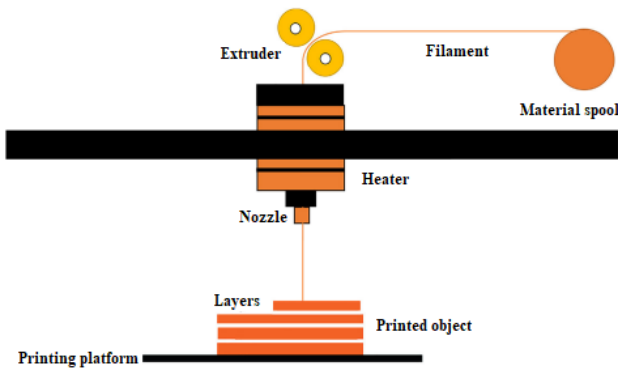


Fig. 8 FDM printer components [107]

شکل 8 اجزای چاپگر FDM [107]

رشته‌ها به وسیله یک نازل داغ ذوب می‌شوند. سپس رشته‌های ذوب شده به صورت لایه به لایه بر روی هم قرار می‌گیرند و ساختارهای سه‌بعدی مورد نظر را ایجاد می‌کنند. شکل 8 اجرای کلی چاپگر FDM را نشان می‌دهد [99,100].

اخیراً در مطالعه‌ای از رشته‌های PLA با استفاده از چاپگر FDM برای ساخت اجزای هندسی پیچیده در فرآیند چاپ چهاربعدی با پتانسیل جاذب‌های تنش استفاده شده است [104]. بدافی و همکاران [105] مطالعه‌ای را بر روی متا ساندویچ‌های جاذب انرژی برگشت پذیر تولید شده توسط فناوری چاپ چهاربعدی با چاپگر FDM بر روی یک پلیمر حافظه شکل انجام دادند. رفتار این سازه‌ی هوشمند حین بارگذاری در شکل 9 قابل مشاهده است، شکل 9-د-د پایان حرارت دادن ساختار چاپ شده را بالاتر از دمای T_g و خنک کاری تا دمای محیط را نشان می‌دهد. همچنین چنگ^۱ و همکاران [106] در

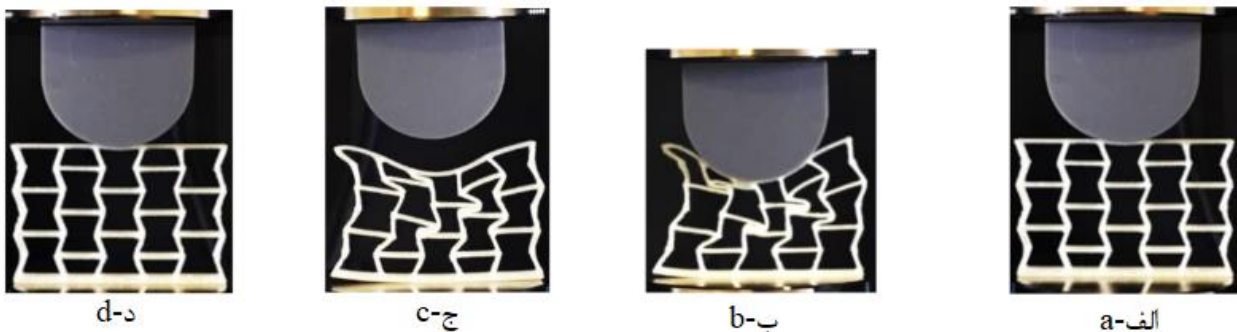


Fig. 9 Behavior of an SMP energy absorbing structure - a) Start of loading, b) End of loading, c) End of loading, d) End of heating-cooling [105]

شکل 9 رفتار یک سازه جذب‌کننده انرژی SMP - الف) شروع بارگذاری، ب) پایان بارگذاری، ج) پایان بارگذاری، د) پایان گرمایش-سرمایش [105]

می‌دهد. پلوسزایسکی^۵ و همکاران [115] با روش SLS پارچه‌های سبکی با عملکرد مغناطیسی را ایجاد کردند که می‌تواند در پاسخ به یک میدان مغناطیسی پاسخگو باشند. همچنین آن‌ها از این پارچه فعال را که می‌تواند جایگزینی به جای آتل‌های غیرفعال فلزی در یک مهاربند مفصلی ساده باشد را تعبیه کردند تا به سفتی قابل‌کنترلی دست پیدا کنند.

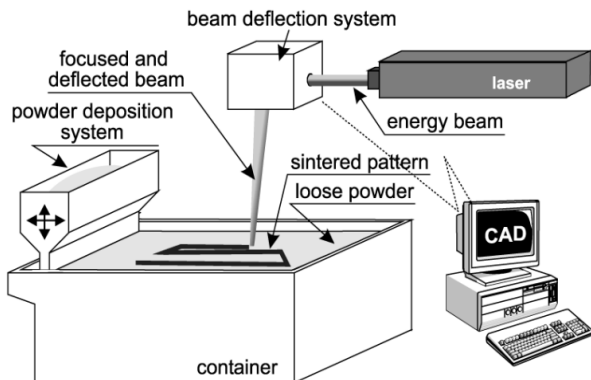


Fig. 10 An overview of a SLS printer [108]

شکل 10 یک نمای کلی از یک چاپگر SLS [108]

2-6- تف جوشی لیزر انتخابی (SLS) تف جوشی لیزر انتخابی (SLS) یکی از روش‌های در حال رشد نمونه‌سازی سریع است [108]. در این روش با تابش پرتوی لیزر به عنوان منبعی برای ذوب یا تف جوشی ذرات پودر در یک مسیر از پیش تعریف شده برای توسعه محصول از طریق رسوب لایه به لایه استفاده می‌شود. شکل 10 نمای کلی از اجزای تشکیل دهنده چاپگر SLS را نشان می‌دهد [8,109].

یکی از مزایای بسیار خوب SLS سهولت ترکیب مواد پودری مختلف است که طیف وسیعی از مواد را باهم ترکیب می‌کند و به‌طور گسترده توانایی پردازش هر ماده پودری مانند پلیمرها (پودرهای پلیمری مانند PU، PCL، PEEK و PA)، فلزات، سرامیک‌ها، ماسه‌ها و همچنین توانایی تولید انواع مواد کامپوزیتی را دارد [108,110,111,112]. برخلاف فناوری FDM، SLS امکان چاپ معماری‌های توخالی را بدون نیاز به پشتیبانی^۳ را می‌دهد که به کاهش زمان چاپ، کاهش اتلاف مواد کمک می‌کند و هزینه بازیافت مواد پودری پس از هر لایه را کاهش می‌دهد [113].

اویانگ^۴ و همکاران [114] یک نوع پلی‌اورتان حاوی پیوند برگشت پذیر با شبکه قابل‌تطبیق کووالانسی با عملکردهای خود ترمیمی و حافظه شکلی برای چاپ چهاربعدی با فناوری SLS ایجاد کردند. مطالعات آن‌ها نشان از عملکرد خود ترمیمی عالی باراندامان بالاتر از 98 درصد را داشت. این مطالعه الگویی برای طراحی پلیمرها/کامپوزیت‌های پویا برای چاپ چهاربعدی SLS ارائه

⁴ Ouyang
⁵ Ploszajski

¹ Cheng
² Copolyester
³ Support

توسعه دادند. شکل 12 پاسخگویی شبکه چاپ شده به شکل توپ را در گذر زمان در آب 65 درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. ژائو⁹ و همکاران [125] یک نوع پلی‌اورتان آکریلات⁸ را سنتز کردند. سپس آن را با اکریلت اپوکسی⁹، ایزوبورنیل آکریلات¹⁰ و با آغازگر رادیکال فوتوپلیمر¹¹ ترکیب کردند. آن‌ها فوتو پلیمر ساخته شده را از طریق چاپ سه‌بعدی به روش استریولیتوگرافی مورد استفاده قرار دادند. میانو¹² و همکاران [126] یک معماری با توانایی چند پاسخگویی از طریق چاپ چهاربعدی مبتنی بر روش استریولیتوگرافی را توسعه دادند که در آن از مفهوم تغییر شکل ناشی از تنش برای دستیابی به برنامه‌ریزی مجدد چاپ چهاربعدی استفاده می‌شود.

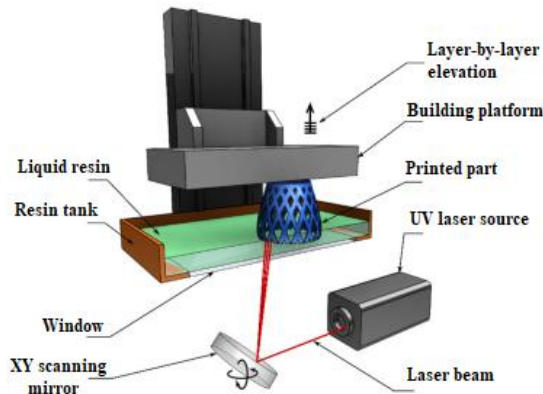


Fig. 11 Components of a typical SLA printer [123]

شکل 11 اجزای یک چاپگر SLA عمومی [123]

4-6- جوهر نویسی مستقیم (DIW)

جوهر نویسی مستقیم (DIW) که به نام چاپ مستقیم جوهر نیز شناخته می‌شود مشابه روش FDM است؛ روشی است که در دسته بندی اکستروژن مواد قرار می‌گیرد و ابتدا توسط سازانی¹³ و همکاران در آزمایشگاه ملی ساندا¹⁴ در سال 1997 معرفی شد [8,127]. این روش، یک روش آسان، سازگار و ارزان است که برای طیف وسیعی از مواد مانند سرامیک‌ها [128] (همچون آلومینا، زیرکونیا و کامپوزیت‌های آن‌ها [127])، پلیمرهای ترموست و کامپوزیت‌های آن‌ها [129,130]، فلزات [131] استفاده می‌شود [132]. ریولو¹⁵ و همکاران [133] از چاپگر DIW برای ساخت قطعاتی از جنس خاک رس کائولینیته استفاده کردند. اجزای چاپگر استفاده شده آن‌ها در شکل 13 قابل مشاهده است.

روش کار با DIW به این صورت است که از نازل‌هایی برای رسوب لایه به لایه جوهرهای ویسکوالاستیک تحت فشار برای چاپ ساختارهای طراحی شده استفاده می‌کند [134–136]. اندازه نازل در روش DIW می‌تواند بر کیفیت قطعات چاپی اثرگذار باشد. همچنین می‌توان برای بالا بردن وضوح چاپ از میکرو نازل‌ها استفاده کرد [137].

مو¹⁶ و همکاران [138] به بررسی تأثیرات اصلاح شرایط پخت در سیم‌های ساخته‌شده از جنس نانوذرات نقره به روش DIW پرداختند و نشان دادند که این سیم‌ها می‌توانند برای کاربردهای چاپ چهاربعدی و ماشین‌های نرم استفاده شوند.

3-6- فتوپلیمریزاسیون مخزنی (VP)

فتوپلیمریزاسیون مخزنی یکی از روش‌های ساخت افزایشی است که در آن از مواد حساس به نور استفاده می‌شود و مواد از طریق اشعه ماوراءبنفش یا پرتو لیزر پلیمریزه می‌شوند که باعث خشک شدن مواد به روشی کنترل شده خواهد شد [109]. این فرآیند فقط برای آن دسته از مواد هوشمند مانند پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری که به نور حساس هستند قابل استفاده است [116,117].

اخیراً نیز چاپ زیستی مبتنی بر VP که یک روش چاپ نوظهور زیستی برای کاربردهای مختلف مهندسی بافت است به دلیل دقت بالای ساخت مورد استفاده قرار گرفته است [118]. تانگ¹ و همکاران [119] به کمک روش VP ساختارهای متخلخل الهام گرفته شده زیستی را با قابلیت پاسخگویی به رطوبت را ایجاد کردند. فانگ² و همکاران [120] اثر حافظه چند شکل پلیمرهای شیشه‌ای سخت را با استفاده از روش VP و با معرفی پیوند هیدروژن غیرکووالانسی قربانی در شبکه پلیمر را نشان دادند.

3-6-1- استریولیتوگرافی (SLA)

استریولیتوگرافی SLA یک روش پلیمریزاسیون مخزنی است. از SLA به عنوان قدیمی‌ترین فناوری ساخت افزایشی یاد می‌شود [20,121]. قطعات ایجاد شده توسط SLA دارای وضوح سطح بسیار بالایی هستند اما هزینه ساخت بسیار زیادی دارند. تاکنون دسته‌بندی‌های مختلفی از فرآیندهای SLA ارائه شده است مانند SLA مبتنی بر لیزر و پردازش نور دیجیتال³ (DLP)، همچنین روش‌های تخصصی آن‌ها مانند پلیمریزاسیون دو فوتونی⁴ (TPP) یا تولید رابط مایع پیوسته⁵ (CLIP). از روش‌های SLA می‌توان برای ساخت قطعاتی با هندسه‌های بسیار پیچیده استفاده کرد [121].

در این روش چاپی که مواد به‌صورت لایه به لایه بر روی هم قرار می‌گیرند. به نحوی که یک ماده حساس به نور (فتوپلیمر)، رزین قابل پخت با قرارگیری در معرض پرتوی مرئی، نور UV، اشعه ایکس یا پرتو الکترونی جامد می‌شود [20,100,122]. در این فرایند رزین به نور تابیده شده پاسخ می‌دهد و پس از تابش، به‌صورت موضعی واکنش پلیمریزاسیون شیمیایی را فعال می‌کند که منجر به پخت مناطقی می‌شود که تحت تابش نور اعمالی بودند. پس از توسعه اولین لایه به این روش یک فیلم رزین تازه اعمال می‌شود و تحت تابش قرار می‌گیرد و پخت می‌شود؛ بنابراین، قطعه به‌صورت تدریجی لایه پس از لایه رشد می‌کند [121].

شکل 11 یک نمونه چاپگر SLA را نمایش می‌دهد که یک مخزن شفاف از رزین قابل پخت پر شده است در حالی که سکوی چاپ در مخزن غوطه‌ور است، پرتوی لیزر سکوی چاپ را شناسایی می‌کند و ساختار را مطابق با الگوی داده شده به آن لایه به لایه ایجاد می‌کند. بسته به نوع چاپگر ممکن است جهت حرکت سکوی چاپ از پایین به بالا یا بالعکس باشد [123]. از پارامترهای اصلی فرایند که بر کیفیت قطعات چاپ شده با استفاده از چاپگر SLA چاپ شده‌اند، می‌توان به عمق پر کردن، ضخامت لایه و پخت تکمیلی اشاره کرد [20].

چونگ⁶ و همکاران [124] یک فوتو پلیمر قابل چاپ با شبکه tBA-co-DEGDA و با ویژگی‌های حافظه شکل را با موفقیت توسط دستگاه SLA

⁹ Epoxy acrylate
¹⁰ Isobornyl acrylate
¹¹ Photopolymer
¹² Miao
¹³ Cesarani
¹⁴ Sandia
¹⁵ Revelo
¹⁶ Mu

¹ Tang
² Fang
³ Digital light processing
⁴ Two-photon polymerization
⁵ Continuous liquid interface production
⁶ Choong
⁷ Zhao
⁸ Polyurethane acrylate

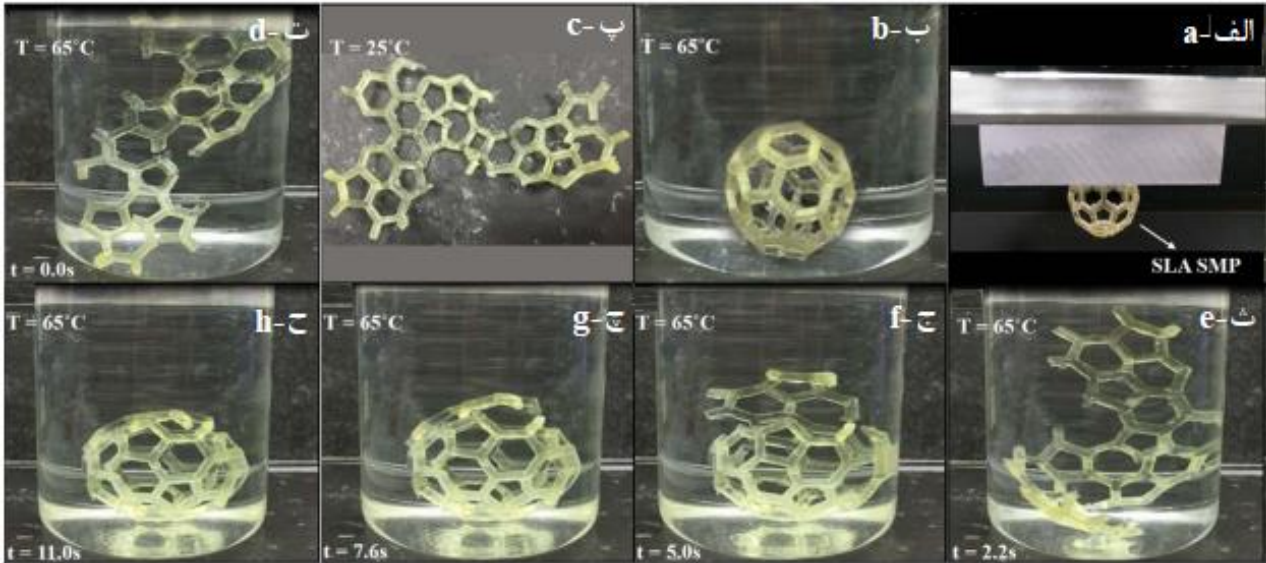


Fig. 12 a) Bucky ball printed by SLA printer, b) Final shape change in 65°C water, c) Initial shape before heating, d-h) Deformation stages over time in 65°C water [124]

شکل 12 الف) توپ باکی چاپ شده توسط چاپگر SLA، ب) تغییر شکل نهایی در آب با دمای 65°C (پ) شکل اولیه قبل از گرمایش، ت-ح) مراحل تغییر شکل در گذر زمان در آب 65°C [124]

7- پارامترهای مؤثر بر چاپ چهاربعدی

پاسخ‌گویی به محرک و تغییر شکل ناشی از پاسخ فقط تابعی از ماده نیست بلکه به فرایند ساخت نیز مرتبط می‌شود. در این قسمت به برخی از پارامترهای مؤثر در چاپ چهاربعدی با استفاده از چاپگر FDM پرداخته می‌شود. از پارامترهای مؤثر بر پاسخ در چاپ با استفاده از چاپگر FDM می‌توان به سرعت چاپ، دمای صفحه ساخت، دمای نازل، ضخامت لایه، درصد پر شوندگی و الگوی چاپی اشاره کرد؛ شکل 14 یک نمای کلی از پارامترهای مؤثر چاپ چهاربعدی بر پاسخ‌گویی به محرک در ساختارهای چاپ شده با استفاده از چاپگر FDM را نشان می‌دهد.

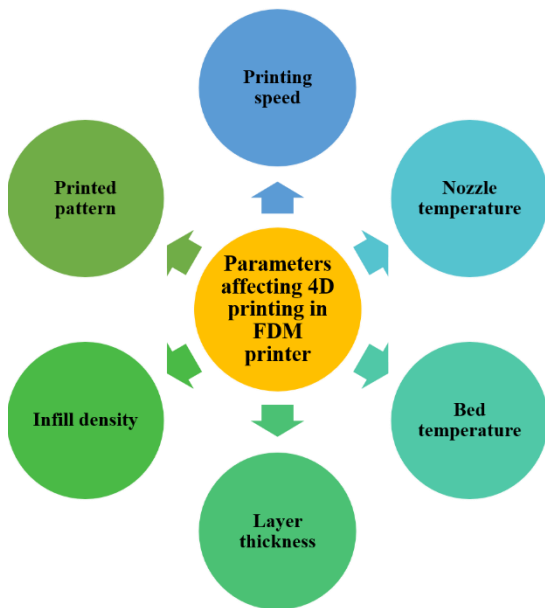


Fig. 14 Effective parameters of 4D printing using FDM printer
شکل 14 پارامترهای مؤثر چاپ چهاربعدی با استفاده از چاپگر FDM

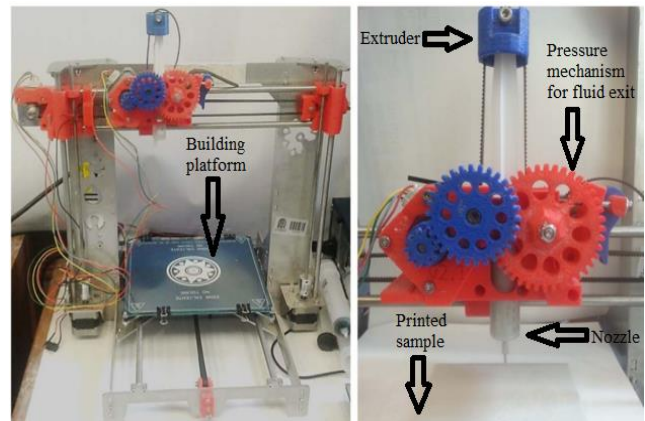


Fig. 13 A sample of DIW 3D printer [133]
شکل 13 یک نمونه چاپگر سه‌بعدی DIW [133]

الاستومرهای کریستال مایع به دلیل توانایی‌هایی همچون قابلیت برنامه‌ریزی، برگشت‌پذیری و تحریک سریع گزینه جذابی در میان مواد فعال برای چاپ چهاربعدی می‌باشند ولی از سوی دیگر محدودیت‌هایی برای چاپ این مواد وجود دارد از این رو پنگ¹ و همکاران [139] یک روش جدید با استفاده از روش DIW برای چاپ این مواد را ارائه کردند تا معماری‌های سه‌بعدی فعال ایجاد شده را در یک فرایند یک مرحله‌ای ساخت افزایشی ایجاد کنند. در مطالعه‌ای ونگ² و همکاران [140] رویکردی برای طراحی و ساخت سازه‌های خودمونتاز شونده با تغییر شکل‌های بزرگ را ارائه کردند. آن‌ها ساختارهای لولایی و نواری شکل از جنس رزین پلیمری قابل پخت، الیاف کوتاه شیشه و همچنین فوم سیلیکا را با استفاده از روش DIW چاپ کردند و تغییر شکل ناشی از ناهمسانگردی ایجاد شده به وسیله لایه گذاری را مورد مطالعه قرار دادند.

² Weng

¹ Peng

1-7- سرعت چاپ

سرعت چاپ یک پارامتر مؤثر بر مقدار پاسخ‌دهی در چاپ چهاربعدی با استفاده از چاپگر FDM است. سرعت چاپ ممکن است نقشی کلیدی در مقدار پیش‌کرنش ایجاد شده حین ساخت داشته باشد. به همین علت منطقی است که سرعت‌های بالاتر بار مکانیکی بیشتری را فراهم کنند که ممکن است باعث ایجاد پیش‌کرنش بیشتر شوند [141].

بدایقی و همکاران [142] در مطالعه‌ای مقطعی را با سه سرعت مختلف 20، 40 و 60 میلی‌متر بر ثانیه از جنس PLA را چاپ کردند و تغییر شکل خمشی آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که بیشترین تغییر شکل خمشی به ترتیب مربوط به سرعت 60، 40 و 20 میلی‌متر بر ثانیه بوده است. نتایج آن‌ها در شکل 15 قابل مشاهده است. جمشیدی و همکاران [143] با بررسی اثر سرعت چاپ دریافتند که با افزایش سرعت چاپ انحنای تغییر شکل در نمونه‌های مورد مطالعه توسط آن‌ها افزایش می‌یابد که علت آن را ناشی از سرد شدن با سرعت بیشتر و زمان کمتر برای خنک شدن در سرعت‌های بالا دانستند که باعث ذخیره تنش بیشتر در قطعات می‌شود. حسین‌زاده و همکاران [144] با روش طراحی آزمایش مکعب مرکزی یافتند که پیش‌کرنش اعمالی در چاپ چهاربعدی ماده PLA رابطه‌ای مستقیم با سرعت چاپ دارد. راجکومار¹ و همکاران [145] دریافتند که افزایش سرعت چاپ منجر به یک عمل خمشی بیشتر می‌شود که در امتداد جهت چاپ لایه‌های بالایی غالب است. آبرومند و همکاران [146] بر مطالعه‌ای که بر روی فیلامنت‌های تجاری PET-G در چاپ چهاربعدی به روش FDM داشتند بیان کردند که سرعت چاپ بالاتر ویژگی‌های خود خم‌شوندگی و بازیابی شکل را بالا می‌برد.

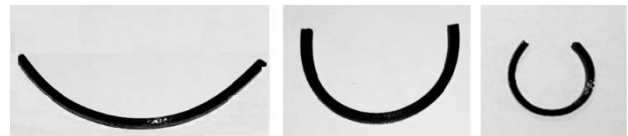


Fig. 15 Bending deformation of specimens printed by FDM method with different printing speeds. From right to left, the change of shape related to printing speeds of 60, 40 and 20 mm/s [142]

شکل 15 تغییر شکل خمشی نمونه‌های چاپ شده به روش FDM با سرعت‌های مختلف چاپی. از راست به چپ، تغییر شکل مربوط به سرعت چاپی 60، 40 و 20 میلی‌متر بر ثانیه است [142]

2-7- دمای نازل

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر ذخیره پیش‌کرنش در قطعات چاپ چهاربعدی دمای نازل است. تزرجانی و همکاران [147] با استفاده از روش سطح پاسخ تأثیر چهار پارامتر مؤثر در چاپگر FDM را بر پیش‌کرنش ذخیره‌شده در نمونه‌های چاپ شده را بررسی کردند که یکی از پارامترهای مورد بررسی توسط آن‌ها دمای نازل بود. آن‌ها دمای نازل را در سه سطح مختلف مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند تفاوت دمایی تأثیر زیادی بر پیش‌کرنش ندارد. بدایقی و همکاران [141] در مطالعات خود به بررسی اثر دمای مایع ساز به عنوان یک پارامتر مؤثر بر فرایند برنامه‌ریزی لایه به لایه در چاپ چهاربعدی پرداختند. آن‌ها با اشاره به این‌که دمای نازل یک پارامتر ناشناخته است ولی می‌توان دمای مایع ساز را توسط نرم‌افزار Craft-Ware کنترل و مشخص کرد اثر دمای نازل

را از طریق دمای مایع ساز بررسی کردند و دریافتند که هرگونه افزایش در دمای مایع ساز اثر منفی بر پیش‌کرنش دارد.

3-7- دمای صفحه ساخت

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در کنترل ایجاد و ذخیره پیش‌کرنش در قطعات چاپ شده دمای صفحه ساخت می‌باشد، پیش‌کرنش ذخیره شده در لایه‌های مختلف به دلیل گرادیان دما در جهت ضخامت است، که از دو عامل ایجاد می‌شود:

- فاصله لایه چاپ شده از صفحه ساخت
- تأثیر دمای لایه چاپی

در کل می‌توان اثر دمای صفحه ساخت و دمای نازل را به این صورت بیان کرد که لایه‌هایی که در پایین و نزدیک به صفحه ساخت قرار دارند تحت تأثیر دمای بالای صفحه ساخت قرار می‌گیرند و همچنین چاپ لایه‌های بالایی بر روی لایه‌های پایینی بر روی پیش‌کرنش لایه‌هایی پایینی اثر خواهد داشت و مقداری از پیش‌کرنش ذخیره‌شده در آن‌ها را آزاد می‌کند در نتیجه لایه‌هایی که در ابتدا چاپ شده‌اند و پایین نزدیک صفحه ساخت هستند کمترین مقدار پیش‌کرنش را دارند و برعکس لایه‌هایی بالایی که دورتر به صفحه ساخت هستند پیش‌کرنش بیشتری را دارند [141,142]. شکل 16 تصویری از این تفسیر را نشان می‌دهد.

تزرجانی و همکاران [147] اثر دمای صفحه ساخت را بر روی نمونه‌های چاپ شده از جنس PLA را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دمای صفحه ساخت را در سه سطح 25، 45 و 65 درجه سانتی‌گراد بررسی کردند که یک سطح بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای و در دو سطح دیگر کمتر از آن بود. آن‌ها مشاهده کردند، با کاهش دمای صفحه ساخت پیش‌کرنش بیشتری در نمونه‌های چاپ شده ذخیره می‌شود.

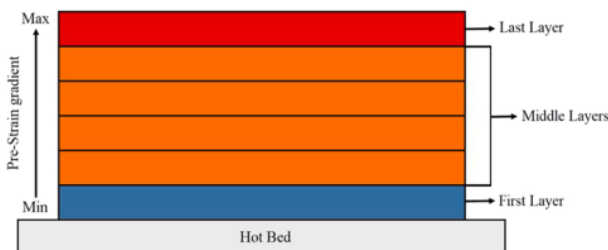


Fig. 16 Pre-strain stored between layers in a specimen printed by a FDM printer in 4D printing [147]

شکل 16 پیش‌کرنش ذخیره شده بین لایه‌ها در یک نمونه چاپ شده توسط یک چاپگر FDM در چاپ چهاربعدی [147]

4-7- ضخامت لایه

ضخامت لایه به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی فرایند چاپ نیز تأثیر قابل توجهی در میزان تغییر شکل و زمان فعال‌سازی در قطعات چهاربعدی دارد. هرچه ضخامت بیشتر باشد زمان بیشتری باید صرف شود که قطعات ضخیم‌تر به دمای انتقال شیشه‌ای و به حالت شیشه‌ای نرم برسند. قبل از رسیدن قطعات به حالت شیشه‌ای نرم فعال‌سازی انجام نمی‌شود، زیرا سفتی بالای قطعات در برابر پاسخگویی در دماهای پایین مقاومت می‌کند، از همین رو زمان فعال‌سازی نیز افزایش می‌یابد [83,148].

وانگ² و همکاران [148] به مطالعه اثر ضخامت لایه و ضخامت هندسه قطعات در تغییر شکل و زمان فعال‌سازی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد

² Wang

¹ Rajkumar

امتداد جهت چاپ، ناهمسانگردی و گرادیان حرارتی در طول ساخت لایه به لایه معرفی شده است که می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر خواص ماکروسکوپی، پایداری ابعادی و عملکرد ساختاری تأثیر بگذارد [145].

الشبلی^۲ و همکاران [152] با استفاده از چاپگر FFF با تغییر در الگوهای چاپ برای ساختارهای تک‌ماده‌ای و چند ماده‌ای به بررسی تغییر شکل خمشی در سازه‌های طراحی شده پرداختند و اثر پر شوندگی در این سازه‌ها را نیز بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد الگوهای مختلف چاپی تأثیری مستقیم بر میزان تغییر شکل دارد. شکل 18 تأثیر الگوهای چاپی مختلف مطالعه شده توسط آن‌ها را در یک جنس ماده نشان می‌دهد. نام^۳ و همکاران [153] مطالعه‌ای بر روی تأثیر الگوی چاپ و درصد پر شوندگی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در الگو خطی با کاهش تراکم پر شدن بازیابی شکل کاهش می‌یابد و در الگوی مکعبی با تراکم پایین‌تر کوتاه‌ترین زمان بازیابی شکل را نشان می‌دهد و قطعاتی که درصد پر شوندگی 100 درصد را دارا بودند طولانی‌ترین زمان بازیابی شکل را از خود نشان دادند و همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که چگالی پر شدن و دمای بالا بازیابی بهتری را فراهم می‌کند و دما و تراکم پر شدن پایین باعث تضعیف بازیابی می‌شود.

راجکومار و همکاران [145] اثرات سرعت چاپ، دمای صفحه ساخت و ضخامت را بر تغییر شکل دیسک‌های چاپی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش تراکم پر شدن دیسک‌ها می‌توانند با محدودیت کمتری منقبض شوند. نیازی و همکاران [91] با مطالعه بر روی قطعات نواری شکل PLA، PETG، TPU و PA 6 تغییر شکل ناشی از حرارت را در مواد مذکور را مورد مطالعه قرار دادند. همه مواد مورد مطالعه آن‌ها یک واکنش تغییر شکل ناشی از ناهمسانگردی را به شیوه‌ای از پیش برنامه‌ریزی شده نشان داد. نتایج آن‌ها نشان داد که هرچه درصد پر شوندگی کلی قسمت بالا به پایین در قطعات نواری شکل کمتر باشد، زاویه انحنای آن‌ها بیشتر خواهد شد. جمشیدی و همکاران [143] بر روی چیدمان لایه‌ها در قطعات نواری شکل مطالعه‌ای انجام دادند که نتایج آن‌ها نشان داد که برای ماده PLA چیدمان [0n/90n] بیشترین انحراف را نشان می‌دهد. گو^۴ و همکاران [154] اثرات ناشی از ایجاد ناهمسانگردی با استفاده از چیدمان‌های مختلف طولی و عرضی در نمونه‌های نواری شکل چاپ شده از جنس ABS را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد قطعاتی که به عنوان مثال فقط در جهت طولی چاپ شده‌اند کمترین تغییر شکل را از خود نشان می‌دهند اما نمونه‌هایی که لایه‌چینی در آن‌ها به‌صورت طولی و عرضی بوده است تغییر شکل به مراتب بیشتری را از خود نشان می‌دهند.

مؤثرترین پارامتر در به تأخیر انداختن زمان پاسخ ضخامت نمونه است که با افزایش ضخامت لایه و هندسه قطعات زمان بیشتری صرف فعال‌سازی خواهد شد. همچنین ضخامت لایه می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر نیروی بازیابی داشته باشد. نتایج مانن^۱ و همکاران [149] نشان داد که با افزایش ضخامت لایه مقدار تغییر شکل در نمونه‌های چاپ شده کاهش می‌یابد. شکل 17 بیانگر اثر ارتفاع لایه بر روی کرنش در نمونه‌های چاپ چهاربعدی به روش FDM را نشان می‌دهد.

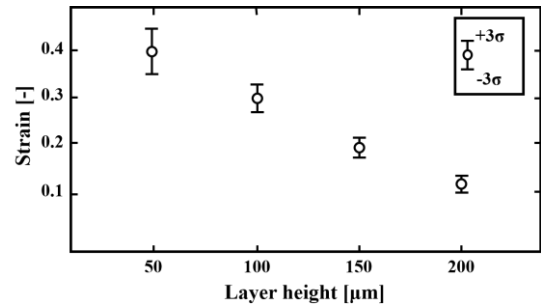


Fig. 17 Effect of layer height on strain in 4D printing in samples printed using FDM printer [149]

شکل 17 تأثیر ارتفاع لایه بر روی کرنش در چاپ چهاربعدی در نمونه‌های چاپ شده با استفاده از چاپگر FDM [149]

7-5- درصد پر شوندگی و الگوی چاپی

طراحی ریز معماری‌های الگوهای چاپی می‌تواند عملکردهای ساختاری مختلف و انعطاف‌پذیر را با ترکیب طرح‌های هندسی به ارمغان بیاورد. الگوهای چاپ اعم از خطوط مستقیم یا الگوهای چندضلعی با زاویه‌های مختلف طراحی شده است تا ویژگی‌های هدفمندی در چاپ چهاربعدی به دست آید که نیاز به درک بهتر تأثیر الگوهای پر کردن بر ناهمسانگردی و عملکرد سازه‌ها را برجسته می‌کند. سازه‌های چاپ چهاربعدی با الگوهای پرکننده مختلف تأثیر به‌سزایی در هدایت مسیر بار در کرنش ثابت بر رفتار پاسخگویی می‌تواند داشته باشد [150]. همچنین با تغییر درصد پر شدن به شیوه از پیش تعیین شده در چاپ سه‌بعدی به روش FDM می‌توان تغییر شکل جهت‌دار کنترل شده رفتار حرکتی یک ماده را مهندسی کرد [91]. همچنین الگوهای پرکننده چاپی مختلف می‌توانند ناهمسانگردی ساختاری را در جنبه‌های کشسانی، ویسکوالاستیسیته و اثر حافظه شکل به ارمغان بیاورند که تاکنون توجه بسیار کمی به آن‌ها شده است [151]. بسته به پارامترهای فرایند چاپ FDM کرنش‌های داخلی در

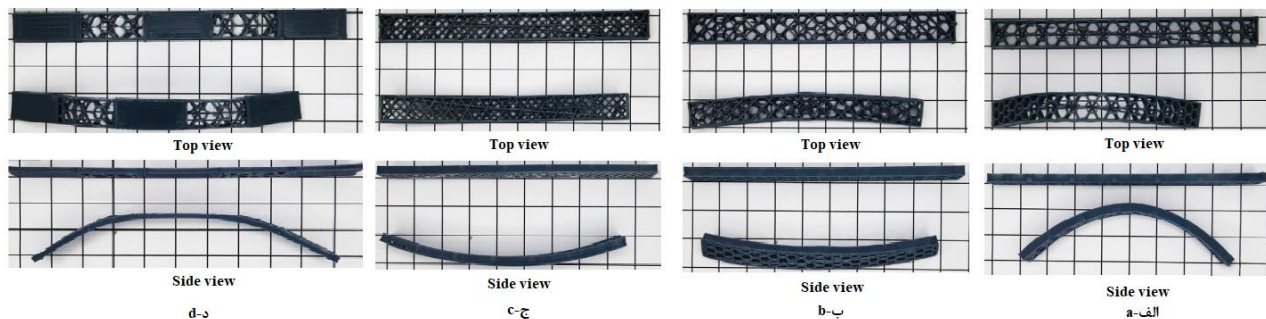


Fig. 18 Four different combined patterns printed with two viewing angles from top and from the side- a) Triangular and honeycomb pattern, b) Honeycomb and square pattern, c) Square and triangular pattern, d) Linear, honeycomb and triangular pattern [152]

شکل 18 چهار الگوی ترکیبی مختلف چاپ شده با دو زاویه دید از بالا و کنار- الف) الگوی مثلثی و لانه زنبوری، ب) الگوی لانه زنبوری و مربعی، ج) الگوی مربعی و مثلثی، د) الگوی خطی، لانه زنبوری و مثلثی [152]

³ Nam

⁴ Goo

¹ Manen

² Alshehly

8- کاربردها

در این بخش به تعدادی از زمینه‌های کاربردی مانند هوافضا [155]، پزشکی [156]، خودروسازی [157] و حسگرها [158] که امروزه چاپ چهاربعدی توانسته در آن‌ها ورود کند مورد بررسی قرار می‌گیرد. امید است که خواننده با آشنا شدن به یکی از این زمینه‌ها بتواند نتایج خارق‌العاده‌ای به دست آورد و آن‌ها را توسعه بدهد. چاپ چهاربعدی امروزه به فناوری بی‌حدوحصر در زمینه‌های مختلف تبدیل شده است که پیشرفت‌های بیشتر در فناوری آن نیازمند تحقیقات بین‌رشته‌ای خواهد بود [159].

8-1- پزشکی

پلیمرهای حافظه شکل و کامپوزیت‌های مبتنی بر این پلیمرها امروزه جایگزین پلیمرهای سنتی شده‌اند که عاملی برای به وجود آمدن علاقه زیاد به توسعه دستگاه‌های زیست پزشکی پویا و هوشمند شده است. با این حال باید معیارهای خاصی برای طراحی و انتخاب پلیمرهای حافظه شکل رعایت شود [160,161]. یکی از محصولات قابل تنظیم در زمینه پزشکی استنت‌ها هستند که چاپ چهاربعدی امکان ساخت آن فراهم می‌کند [162,163]. استنت‌های چاپی مبتنی بر پلیمرهای حافظه شکل با کاهش قطر موقت اولیه از طریق برنامه‌ریزی و به حداقل رساندن برش جراحی حین قرارگیری کمک می‌کنند و به عنوان روشی غیرتهاجمی برای مقابله با ناهنجاری‌های فیزیکی طراحی شده‌اند. اختلاف دمای قبل از کاشت و بدن می‌تواند به استنت‌های چاپی این اجازه را بدهد که قطر اصلی خود را بعد از کاشت به دست آورند [109,164,165].

جی¹ و همکاران [166] یک استنت از جنس پلیمر حافظه شکل با استفاده از روش میکرو استریولیتوگرافی با وضوح بالا چاپ کردند. ژانگ² و همکاران [167] مجموعه‌ای از استنت‌ها را با الگوها و درصد‌های مختلف وزنی اکسید آهن اضافه شده به PLA را چاپ کردند و فعال‌سازی آن‌ها را در میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه‌ای دیگر ژائو³ و همکاران [82] استنت‌هایی با عملکرد خودآرایی نشأت گرفته از اورینگامی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که بسته به زوایا و شکل سلول‌های واحد استنت‌هایی با میزان انقباض متفاوت را می‌توان با تنظیم چیدمان‌های دوره‌ای و تنظیم پارامترهای هندسی به دست آورد. شکل 19 سه نمونه از ساختارهای استنت‌های مورد مطالعه آن‌ها بر مبنای اورینگامی را قبل و بعد از شدن را نشان می‌دهد.



Fig. 19 4D printed stents before and after folding [82]

شکل 19 استنت‌های چاپ چهاربعدی شده قبل و بعد از تا شدن [82]

فناوری چاپ چهاربعدی پتانسیل بسیار زیادی برای استفاده در زمینه ترمیم اندام و بازسازی بافت [168] و کاربردهای دارورسانی [169] نیز دارد [170]. از همین رو میائو⁴ و همکاران [171] با استفاده از روش چاپ لیزری سه‌بعدی، داربست‌های متخلخل زیست‌سازگار مبتنی بر یک آکریلات اپوکسید شده⁵ روغن سویای تجدیدپذیر را که توانایی حمایت از رشد سلول‌های بنیادی

مزانشیمی⁶ مغز استخوان انسان را دارد چاپ کردند. آزمایش‌های حافظه شکلی آن‌ها نشان داد که داربست در دمای 18- سانتی‌گراد شکل موقت خود را دارد و در دمای بدن انسان (37 درجه سانتی‌گراد) شکل اصلی خود را بازیابی می‌کند.

8-2- هوافضا

ساخت و تولید در فضا برای مأموریت‌های فضایی آینده‌ای اساسی است که هزینه‌های پرتاب و سبکی در مأموریت‌های فضایی را به دنبال دارد. اخیراً چاپ سه‌بعدی با چاپگر FDM در ایستگاه فضایی بین‌المللی⁷ (ISS) بر روی ماده ABS انجام شده است. تولید در فضا بر کاهش وابستگی به زمین کمک بسیاری می‌کند و باعث طولانی‌تر شدن این مأموریت‌ها بدون پشتیبانی از زمین خواهد شد. هدف دیگر می‌تواند استفاده از خود ظرفیت سیاره‌ها یا سیارک‌های پیرامون زمین جهت ساخت افزایشی باشد [172]. تلاش‌های بسیاری برای ترکیب مواد هوشمند مانند پلیمرهای حافظه شکل و آلیاژهای حافظه شکل برای توسعه در صنعت هوافضا انجام شده است و توجهات بسیار زیادی را به استفاده از پلیمرهای حافظه شکل برای سیستم‌های فضایی مانند آنتن‌های مبتنی بر فوم پلیمرهای حافظه شکل را به خود جلب کرده است [173] و از مزایای استفاده از پلیمرهای حافظه شکل در مأموریت‌های فضایی می‌توان به حجم کمتری از فضا که در این مأموریت‌ها اشغال می‌شود اشاره کرد [96,174].

8-3- خودروسازی

ویژگی‌های چاپ چهاربعدی که قبلاً بیان شد مانند خودمونتاژی، چندکاره بودن و خود ترمیمی گستره فوق‌العاده‌ای در صنعت خودرو دارد. به عنوان مثال زمانی که بدنه خودرو دچار آسیب‌دیدگی‌هایی مانند فرورفتگی یا خراش می‌شود، می‌توان از خواص تغییر شکل و خودترمیمی چاپ چهاربعدی استفاده کرد [157]. علاوه بر این از خاصیت خودترمیمی موادی که با فناوری چاپ چهاربعدی چاپ شده‌اند می‌توان لاستیک‌های خودروها را توسعه داد که با ایجاد انعطاف‌پذیری در سفتی، استحکام و کشش برای شرایط مختلف جاده‌ای مناسب باشند [175]. در صنعت خودرو با توجه به نیازهای جهانی به سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها با ویژگی‌هایی مانند پایداری، مقرون‌به‌صرفه بودن و سبک وزنی نیاز است [176] و صنعت خودرو دارای طیفی وسیعی از این دسته قطعات است که می‌توان از چاپ چهاربعدی برای بهره‌برداری در آن‌ها استفاده کرد [157].

8-4- حسگرها و رباتیک

از آنجا که ساختارهای چاپ چهاربعدی می‌توانند نسبت به رطوبت، دما، تنش، کرنش، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی، PH و غیره پاسخگو باشند در حسگرها می‌توان از آن‌ها استفاده کرد [8]. رباتیک نرم رشته‌ای است که در آن ربات‌ها از مواد بسیار تغییر شکل‌پذیر ساخته می‌شوند که معمولاً از طراحی الهام گرفته زیستی پیروی می‌کنند [177]. امروزه ربات‌های نرم و محرک‌ها نیز به منطقه اصلی تمرکز برای کاربردهای چاپ چهاربعدی تبدیل شده‌اند [109]. چاپ چهاربعدی یک فناوری کلیدی در زمینه میکرو روباتیک است. برخلاف روش‌های سنتی میکرو ساخت، چاپ چهاربعدی تطبیق‌پذیری بالاتر، هندسه‌های پیچیده‌تر و طیف وسیعی از امکان‌های سنجش و تحریک را فراهم می‌کند و راه‌های جدیدتری را برای نسل بعدی میکرو ربات‌ها باز می‌کند [178]. در میان فناوری‌های چاپ سه‌بعدی TPP بالاترین وضوح (حد نانومتر) را دارد و امکان ساخت ساختارهای پیچیده سه‌بعدی را با انواع مختلف اعم از فعال یا غیرفعال، آلی یا معدنی را می‌دهد که این امر در زمینه میکرو رباتیک

⁵ Epoxidized acrylate
⁶ Mesenchymal
⁷ International space station

¹ Ge
² Zhang
³ Zhao
⁴ Miao

9- چالش‌ها و آینده

چاپ چهاربعدی به عنوان یک فناوری جدید و روبه رشد که در مرحله توسعه قرار دارد و با چالش‌هایی روبه‌رو است که باید بر آن‌ها غلبه کند. در این قسمت به برخی از چالش‌ها و آینده‌ی مربوط به این فناوری جدید با تمرکز بر پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری پرداخته می‌شود.

سه چالش مهمی که چاپ چهاربعدی با آن روبه‌رو است مربوط به حوزه‌های طراحی، مواد و فناوری می‌باشد. طراحی ساختارهای هوشمند در چاپ چهاربعدی یک چالش مهم است که سازه مورد نظر باید با توجه به محیط پیرامون تغییرات مدنظر را اعمال کند، بنابراین باید سازه به نحوی طراحی شود که پاسخ مطلوب را به شرایط اعمالی نشان دهد. طراحی سازه‌ای هوشمند که حین ساخت بتوانند در خود پیش‌گرفتگی لازم را ذخیره کند خود وابسته به ماده مصرفی، روش ساخت و پارامترهای مؤثر دیگر است که چالشی در طراحی یک ساختار هوشمند است. چالش بعدی مربوط به خواص مواد مصرفی در چاپ چهاربعدی پلیمرها می‌شود. برخی از مواد مورد استفاده در چاپ چهاربعدی به صورت یک‌طرفه تغییر شکل می‌دهند که برای برخی از ساختارها پاسخی قابل قبول است اما گاهی نیاز است یک ساختار به صورت رفت و برگشت تغییر شکل بدهد که ممکن است طی این رفت و برگشت دو طرفه خاصیت ماده تضعیف یا ماده مصرفی تخریب شود. به عنوان مثال برخی هیدروژل‌ها پس از خیس و خشک شدن مکرر تخریب می‌شوند. در برخی از موارد نیاز است یک ماده به طیف وسیعی از محرک‌ها پاسخ بدهد یا تغییر شکل‌های بزرگی را از خود نشان بدهد که مستلزم ماده‌هایی با چند کارکرد متفاوت است که به این اهداف می‌توان با کامپوزیتی کردن مواد مورد استفاده دست‌یافت؛ اما هنوز چاپ چهاربعدی ابتدای این مسیر است و تاکنون تعدادی کمی مطالعه بر روی کامپوزیت‌های پلیمری در چاپ چهاربعدی انجام گرفته است که بیشتر آن‌ها نیز مربوط به افزودن ذرات به پلیمرها می‌شود. تحقیقات در آینده می‌تواند متمرکز بر اضافه نمودن الیاف کوتاه یا بلند، مصنوعی یا طبیعی به ساختارهای چاپ چهاربعدی باشد. کامپوزیت‌ها می‌تواند در آینده باعث رشد و توسعه چاپ چهاربعدی شوند و عاملی باشند که چاپ چهاربعدی در زمینه‌های صنعتی رشد سریع‌تری پیدا کند.

چالش دیگری که چاپ چهاربعدی با آن روبه‌رو است فناوری چاپ سه‌بعدی است که به‌غیر از چاپگر FDM که امروزه بیشتر از چاپگرهای دیگر در دسترس است مابقی چاپگرهای سه‌بعدی محدود به مراکز تحقیقاتی هستند و هر کدام محدودیت خاصی برای چاپ مواد را دارند. نیاز بعدی که می‌تواند در حوزه فناوری به آن اشاره کرد توسعه نرم‌افزارهای چاپ چهاربعدی برای انواع روش‌های چاپی است توسعه این نرم‌افزارها باید سازوکار تغییر شکل، مواد هوشمند پایه، روش‌های چاپ و هندسه طراحی را در بر بگیرد که با توسعه و دسترسی آسان‌تر به این چاپگرها و نرم‌افزارها چاپ چهاربعدی می‌تواند رشد بسیار زیادی پیدا کند.

امروزه چاپ چهاربعدی نشان داده است که پتانسیل بسیار بالایی در بسیاری از زیرشاخه‌های مهندسی پزشکی دارد. بدین منظور توسعه سریع‌تر و مقرون‌به‌صرفه روش‌های چاپ زیستی ضروری است. همچنین نیاز به توسعه مواد هوشمند زیست‌سازگار وجود دارد که در سازگاری با محیط اطراف خود دارای محدودیتی نباشند و عملکردی را با چندین بافت و سیستم محرک ارائه کنند [180]. همچنین توسعه چاپگرهای زیستی کاربرپسند، خودکار، با وضوح بالا و بادوام در این زمینه ضروری است [181].

پزشکی بسیار جالب است که به این ساختارها اجازه می‌دهد در طی گذشت زمان یا اعمال یک محرک تغییر شکل بدهند یا تخریب شوند که همان مفهوم چاپ چهاربعدی را می‌رساند [177].

5-8- برنامه‌های کاربردی متفرقه

یو و همکاران [69] سه طرح خلاقانه را پیاده‌سازی کردند که هر سه طرح پیشنهادی در دمای 80 درجه سانتی‌گراد فعال می‌شوند. در طرح اول آن‌ها پوشش لامپ مدولار را اجرا کردند و در طرح دوم جابجایی را برای کمک به افراد دارای معلولیت را پیاده‌سازی کردند و در طرح آخر آن‌ها یک پشتیبان کفش را طراحی کردند که در پیاده‌روی و کوهنوردی از صدماتی مانند پیچ‌خوردگی مچ پا جلوگیری می‌کند. شکل 20 طرح پشتیبان کفش اجرا شده توسط آن‌ها را نشان می‌دهد.



Fig. 20 Shoe support design with the aid of 4D printing [69]

شکل 20 طراحی پشتیبان کفش به کمک چاپ چهاربعدی [69]

زارک¹ و همکاران [179] یک کلید الکترونیکی برای روشن کردن یک چراغ LED با استفاده از پلیمر حافظه شکل حساس به دما را چاپ کردند. آن‌ها برای اتصال رسانایی در کلید از جوهر نقره بر روی سطح کلید استفاده کردند. زمانی که کلید در دمای محیط قرار دارد کلید دارای شکل موقت است و زمانی که کلید تا بالای دمای ذوب خود گرم می‌شود کلید بسته می‌شود و چراغ LED روشن می‌شود. شکل 21 کلید هوشمند و سازوکار روشن شدن آن را نشان می‌دهد.

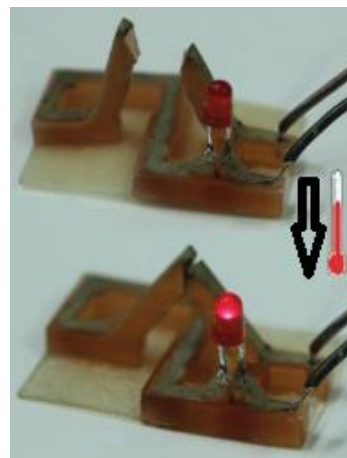


Fig. 21 Electric switch mechanism before and after heat activation [179]

شکل 21 سازوکار کلید الکتریکی قبل و بعد از فعال‌سازی با گرما [179]

¹ Zarek

- Angeles, pp. 1-269, 2017.
- [7] Ucraft, S. and Fletcher, R., "The rapid prototyping technologies," *Assem. Autom.*, Vol. 23, No. 4, pp. 318-330, 2003.
- [8] Ahmed, A., Arya, S., Gupta, V., Furukawa, H. and Khosla, A., "4D printing: Fundamentals, materials, applications and challenges," *Polymer (Guildf.)*, Vol. 228, pp. 1358-1381, 2021.
- [9] Meshkizadeh, P., Hajideh, M. R., Farahani, M. R. and Heidari-Rarani, M., "Thermal signal reconstruction and employment of K clustering method for inspection of additive manufactured polymer parts," In *Persian, Nondestruct. Test. Technol.*, Vol. 2, No. 7, pp. 60-69, 2021.
- [10] Vălean, C., Marşavina, L., Mărghitaş, M., Linul, E., Razavi, J. and Berto, F., "Effect of manufacturing parameters on tensile properties of FDM printed specimens," *Procedia Struct. Integr.*, Vol. 26, No. 2, pp. 313-320, 2020.
- [11] Aymar, A., Palermo, A. and Innocenti, B., "The Role of 3D Printing in Medical Applications: A State of the Art," *J. Healthc. Eng.*, Vol. 2019, p. 5340616, 2019.
- [12] Wong, K. V. and Hernandez, A., "A Review of Additive Manufacturing," *ISRN Mech. Eng.*, Vol. 2012, pp. 1-10, 2012.
- [13] Heidari-Rarani, M., "Residual stresses in additive manufacturing of polymers and polymer matrix composites," in *Residual Stresses in Composite Materials*, 2nd Edition, pp. 421-436, 2021.
- [14] Cotteleer, M., Holdowsky, J. and Mahto, M., "The 3D opportunity primer: The basics of additive manufacturing," *Deloitte University, Westlake*, pp. 1-17, 2014.
- [15] Chu H., et al., "4D printing: A review on recent progresses," *Micromachines*, Vol. 11, No. 9, p. 796, 2020.
- [16] Kianian, B., "Wohlers Report 2016: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report: Chapter title: The Middle East," 21st ed., *Wohlers Associates Inc., Lund*, pp. 1-335, 2016.
- [17] Mitchell, A., Lafont, U., Hołyńska, M. and Semprimoschnig, C., "Additive manufacturing — A review of 4D printing and future applications," *Addit. Manuf.*, Vol. 24, pp. 606-626, 2018.
- [18] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q. and Hui, D., "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos. Part B Eng.*, Vol. 143, pp. 172-196, 2018.
- [19] Wickramasinghe, S., Do, T. and Tran, P., "FDM-Based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments," *Polymers*, Vol. 12, No. 7, pp. 1-42, 2020.
- [20] Kafle, A., Luis, E., Silwal, R., Pan, H. M., Shrestha, P. L. and Bastola, A. K., "3d/4d printing of polymers: Fused deposition modelling (fdm), selective laser sintering (sls), and stereolithography (sla)," *Polymers*, Vol. 13, No. 18, p. 3101, 2021.
- [21] Salazar, A., Rico, A., Rodríguez, J., Segurado J., Escudero, Seltzer, R. and Martin De La Escalera Cutillas, F., "Fatigue crack growth of SLS polyamide 12: Effect of reinforcement and temperature," *Compos. Part B Eng.*, Vol. 59, pp. 285-292, 2014.
- [22] Javaid, M. and Haleem, A., "4D printing applications in medical field: A brief review," *Clin. Epidemiol. Glob. Heal.*, Vol. 7, No. 3, pp. 317-321, 2019.
- [23] Ntounoglou, K., Stavropoulos, P. and Mourtzis, D., "4D printing prospects for the aerospace industry: A critical review," *Procedia Manuf.*, Vol. 18, pp. 120-129, 2018.
- [24] Hann, S. Y., Cui, H., Nowicki, M. and Zhang, L. G., "4D printing soft robotics for biomedical applications," *Addit. Manuf.*, Vol. 36, p. 101567, 2020.
- [25] Tang, Y., Dai, B., Su, B. and Shi, Y., "Recent Advances of 4D Printing Technologies Toward Soft Tactile Sensors," *Front. Mater.*, Vol. 8, p. 658046, 2021.
- [26] Momeni, F., M. Mehdi Hassani, N. S., Liu, X. and Ni, J., "A review of 4D printing," *Mater. Des.*, Vol. 122, pp. 42-79, 2017.
- [27] Precedence research, "4D Printing Market", <https://www.precedenceresearch.com/4d-printing-market>, available in 1, June 2022.

با توجه به گسترش چاپ چهاربعدی در زمینه‌های مختلف لازم است مواد پلیمری چاپ چهاربعدی با عملکرد چندگانه توسعه یابند و به جهت توسعه بیشتر می‌توان آن‌ها را با مواد فلزی، سرامیکی و یا کامپوزیت‌های آن‌ها ترکیب کرد تا برخی از محدودیت‌های استفاده از پلیمرها در صنایع مختلف را کاهش دهند. همچنین ویژگی‌ها خودترمیمی و خودمونتاژی چاپ چهاربعدی می‌تواند در آینده به توسعه این فناوری کمک شایانی کنند. چرا که با استفاده از ویژگی خودترمیمی می‌توان از دورریز و بازیافت بیش از اندازه مواد مصرفی جلوگیری کرده و با استفاده از ویژگی خود مونتاژی می‌توان در کاهش زمان و هزینه جهت مونتاژ قطعات و فضای اشغال شده توسط آن‌ها کمک کرد.

10- جمع‌بندی

چاپ چهاربعدی از زمان آغاز به کار تا به امروز رشد قابل توجهی داشته است و نفوذ خود را در تعدادی از صنایع بالا برده است. چاپ چهاربعدی امروزه زمینه‌ای روبه‌پیشرفت برای ساخت قطعات خودمونتاژ، خودسازگار و خودترمیم را به وجود آورده است و به سرعت در حال پیشرفت می‌باشد. چاپ چهاربعدی امکان ساخت قطعاتی با ابعاد کوچک‌تر قبل از تغییر شکل به شکل اصلی را می‌دهد و همین امر باعث حمل و نقل آسان‌تر، جاگیر نبودن، کاهش وزن و طراحی آسان‌تر شده است. چاپ چهاربعدی که از فناوری چاپ سه‌بعدی با مواد هوشمند برای ایجاد سازوکارهای تغییر شکل در طول زمان استفاده می‌کند انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری بیشتری را نیز فراهم می‌کند.

با پیشرفت چاپ چهاربعدی در چاپ چند ماده‌ای مبتنی بر کامپوزیت‌های پلیمری حافظه شکل و تراز کردن مواد افزودنی از طریق میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به درک بهتر این فناوری جدید کمک می‌کند که نیازمند توسعه کامپوزیت‌های مبتنی بر پلیمرها می‌باشد. مواد کامپوزیتی و کامپوزیت‌های مبتنی بر پلیمرهای حافظه شکل که می‌توانند به چندین محرک برای دستیابی به چندین پاسخ متفاوت در محیط‌های چالش برانگیز ترکیب شوند مفید باشند و همچنین می‌توانند در موقعیت‌هایی که نیاز به تغییر شکل‌های بزرگ است از آن‌ها استفاده کرد. با توسعه روش‌های ساخت جدید و ترکیب روش‌های ساخت می‌توان هندسه‌های پیچیده‌ای با استفاده از مواد پلیمری و فلزی ایجاد کرد و بسیاری از محدودیت‌های را کنار گذاشت. در سال‌های اخیر چاپ چهاربعدی به سمت کاربردهای واقعی و عملی در حرکت بوده است و در زمینه‌های بسیاری مانند توسعه استنت‌های پزشکی، جاذب‌های انرژی، لوازم الکترونیکی، محرک‌ها، دستگاه‌های دارو رسان و گیره‌ها توسعه پیدا کرده است و در آینده‌ای نزدیک با رفع چالش‌های موجود جهان را متحول خواهد کرد.

11- منابع

- [1] Jiang, J., "A novel fabrication strategy for additive manufacturing processes," *J. Clean. Prod.*, Vol. 272, p. 122916, 2020.
- [2] Culmone, C., Smit, G. and Breedveld, P., "Additive manufacturing of medical instruments: A state-of-the-art review," *Addit. Manuf.*, Vol. 27, pp. 461-473, 2019.
- [3] Blakey-Milner B., et al., "Metal additive manufacturing in aerospace: A review," *Mater. Des.*, Vol. 209, p. 110008, 2021.
- [4] Charles, A., Hofer, A., Elkaseer, A. and Scholz, S. G., "Additive Manufacturing in the Automotive Industry and the Potential for Driving the Green and Electric Transition," in *Proceedings of the International Conference on Sustainable Design and Manufacturing*, pp. 339-346, Sep. 2022.
- [5] Shahbazi, A. and Zeinedini, A., "Impact response of E-glass/epoxy composite bi-directional corrugated core sandwich panels", *Polym. Compos.*, Vol. 29, No 9, pp. 1563-1574, 2020.
- [6] Noorani, R., "3D printing: technology, applications, and selection," 1st Editio. Boca Raton, CRC Press Taylor & Francis Group, Los

- [48] Aberoumand, M., et al., "4D Printing of Polyvinyl Chloride (PVC): A Detailed Analysis of Microstructure, Programming, and Shape Memory Performance", *Macromol. Mater. Eng.*, vol n/a, no n/a, pp. 2200677, 2023.
- [49] Liu, C., Qin, H. and Mather, P. T., "Review of progress in shape-memory polymers," *J. Mater. Chem.*, Vol. 17, No. 16, pp. 1543–1558, 2007.
- [50] Gall, K., Kreiner, P., Turner, D. and Hulse, M., "Shape-memory polymers for microelectromechanical systems," *J. Microelectromechanical Syst.*, Vol. 13, No. 3, pp. 472–483, 2004.
- [51] Patil, D. and Song, G., "A review of shape memory material's applications in the offshore oil and gas industry," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 26, No. 9, pp. 58–72, 2017.
- [52] Zhang, J., Wang, C. and Zhang, L., "Deployment of SMP Miura-ori sheet and its application: Aerodynamic drag and RCS reduction," *Chinese J. Aeronaut.*, Vol. 35, No. 8, pp. 121–131, 2022.
- [53] Zarek, M., Layani, M., Cooperstein, I., Sachyani, E., Cohn, D. and Magdassi, S., "3D Printing of Shape Memory Polymers for Flexible Electronic Devices," *Adv. Mater.*, Vol. 28, No. 22, pp. 4449–4454, 2016.
- [54] Mohd Jani, J., Leary, M., Subic, A. and Gibson, M. A., "A review of shape memory alloy research, applications and opportunities," *Mater. Des.*, Vol. 56, pp. 1078–1113, 2014.
- [55] Chopra, I. and Sirohi, J., "Shape Memory Alloys (SMAs)," in *Smart Structures Theory*, 1st ed., Cambridge University Press, Cambridge, pp. 194–304, 2013.
- [56] Janke, L., Czaderski, C., Motavalli, M. and Ruth, J., "Applications of shape memory alloys in civil engineering structures—Overview, limits and new ideas," *Mater. Struct.*, Vol. 38, No. 5, pp. 578–592, 2005.
- [57] Chaudhari, R., Vora, J. J. and Parikh, D. M., "A Review on Applications of Nitinol Shape Memory Alloy BT - Recent Advances in Mechanical Infrastructure," in *Proceedings of Recent Advances in Mechanical Infrastructure*, Springer, Singapore, pp. 123–132, 2021.
- [58] Schwartz, M., "Shape Memory Alloys, Applications," in *Smart materials—Encyclopedias*, 1st ed., John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 921–936, 2002.
- [59] Uchino, K., "Chapter 1 - The Development of Piezoelectric Materials and the New Perspective", in *Woodhead Publishing in Materials*, K. B. T.-A. P. M. (Second E. Uchino, Red, Woodhead Publishing, pp. 1–92, 2017.
- [60] Aksel, E. and Jones, J. L., "Advances in Lead-Free Piezoelectric Materials for Sensors and Actuators", *Sensors*, Vol 10, No 3. pp. 1935–1954, 2010.
- [61] Olabi, A. G., and Grunwald, A., "Design and application of magnetostrictive materials", *Mater. Des.*, Vol 29, No 2, pp. 469–483, 2008.
- [62] Raviv, D., et al., "Active printed materials for complex self-evolving deformations", *Sci. Rep.*, Vol 4, No 1, pp. 1–8, 2014.
- [63] Ahmed, E. M., "Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review," *J. Adv. Res.*, Vol. 6, No. 2, pp. 105–121, 2015.
- [64] Fan, K., et al., "Water-responsive shape memory hybrid: Design concept and demonstration," *Express Polym. Lett.*, Vol. 5, No. 5, pp. 409–416, 2011.
- [65] Mao, Y., et al., "3D Printed Reversible Shape Changing Components with Stimuli Responsive Materials," *Sci. Rep.*, Vol. 6, No. 1, p. 24761, 2016.
- [66] Grubbs, R. B. and Sun, Z., "Shape-changing polymer assemblies," *Chem. Soc. Rev.*, Vol. 42, No. 17, pp. 7436–7445, 2013.
- [67] Beloshenko, V. A., Varyukhin, V. N. and Voznyak, Y. V., "The shape memory effect in polymers," *Usp. Khim.*, Vol. 74, No. 3, pp. 285–306, 2005.
- [68] Lin, C., Liu, L., Liu, Y. and Leng, J., "4D printing of shape memory polybutylene succinate/polylactic acid (PBS/PLA) and its potential applications," *Compos. Struct.*, Vol. 279, p. 114729, 2022.
- [69] Yu, Y., et al., "Material characterization and precise finite element analysis of fiber reinforced thermoplastic composites for 4D
- [28] Precedence research, "3D Printing Market", 2023. <https://www.precedenceresearch.com/3d-printing-market>, available in 1, March 2023.
- [29] Xiao, X., Hu, J., Gui, X. and Qian, K., "Shape memory investigation of α -Keratin Fibers as Multi-Coupled stimuli of responsive Smart Materials," *Polymers*, Vol. 9, No. 3. p. 87, 2017.
- [30] Zheng, Q., Xu, C., Jiang, Z., Zhu, M., Chen, C. and Fu, F., "Smart Actuators Based on External Stimulus Response," *Front. Chem.*, Vol. 9, p. 650538, 2021.
- [31] Zeng, X., et al., "Novel pH-Responsive Smart Fabric: From Switchable Wettability to Controllable On-Demand Oil/Water Separation," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, Vol. 7, No. 1, pp. 368–376, 2019.
- [32] Raza, A., Hayat, U., Rasheed, T., Bilal, M. and Iqbal, H. M. N., "smart materials-based near-infrared light-responsive drug delivery systems for cancer treatment: A review," *J. Mater. Res. Technol.*, Vol. 8, No. 1, pp. 1497–1509, 2019.
- [33] Su, M. and Song, Y., "Printable Smart Materials and Devices: Strategies and Applications," *Chem. Rev.*, Vol. 122, No. 5, pp. 5144–5164, 2022.
- [34] Sobczyk, M., Wiesenhütter, S., Noennig, J. R. and Wallmersperger, T., "Smart materials in architecture for actuator and sensor applications: A review," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 33, No. 3, pp. 379–399, 2022.
- [35] Kumar, S., Singh, R., Batish, A. and Singh, T. P., "Additive manufacturing of smart materials exhibiting 4-D properties: A state of art review," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, Vol. 35, No. 9, pp. 1358–1381, 2022.
- [36] Leng, J., Lu, H., Liu, Y., Huang, W. M. and Du, S., "Shape-memory polymers - A class of novel smart materials," *MRS Bull.*, Vol. 34, No. 11, pp. 848–855, 2009.
- [37] Michaud, V., "Can shape memory alloy composites be smart?," *Scr. Mater.*, Vol. 50, No. 2, pp. 249–253, 2004.
- [38] Waghulde, K. B. and Kumar, B., "Vibration analysis of cantilever smart structure by using piezoelectric smart material", *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst.*, Vol 4, No 3, pp. 353–375, 2011.
- [39] Peuzin, J. C., "Magnetostrictive Materials," *Encycl. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 18, No. 4, pp. 5101–5107, 2001.
- [40] Liang, R., Wang, L., Yu, H., Khan, A., Ul Amin, B. and Khan, R. U., "Molecular design, synthesis and biomedical applications of stimuli-responsive shape memory hydrogels", *Eur. Polym. J.*, Vol 114, pp. 380–396, 2019.
- [41] Yarali, E., Baniassadi, M. and Baghani, M., "Numerical homogenization of coiled carbon nanotube reinforced shape memory polymer nanocomposites," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 28, No. 3, p. 035026, 2019.
- [42] Jebellat, E., Baniassadi, M., Moshki, A., Wang, K. and Baghani, M., "Numerical investigation of smart auxetic three-dimensional meta-structures based on shape memory polymers via topology optimization," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 31, No. 15, pp. 1838–1852, 2020.
- [43] Lendlein, A. and Kelch, S., "Shape-memory polymers," *Angew. Chemie - Int. Ed.*, Vol. 41, No. 12, pp. 2034–2057, 2002.
- [44] Wan, X., He, Y., Liu, Y. and Leng, J., "4D printing of multiple shape memory polymer and nanocomposites with biocompatible, programmable and selectively actuated properties," *Addit. Manuf.*, Vol. 53, p. 102689, 2022.
- [45] Liu, Y., et al., "Microstructural design for enhanced shape memory behavior of 4D printed composites based on carbon nanotube/polylactic acid filament", *Compos. Sci. Technol.*, Vol 181, pp. 107692, 2019.
- [46] Miao, J.-T., et al., "Dynamic Imine Bond-Based Shape Memory Polymers with Permanent Shape Reconfigurability for 4D Printing", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol 11, No 43, pp. 40642–40651, 2019.
- [47] Deng, Y., Zhang, F., Liu, Y., Zhang, S., Yuan, H. and Leng, J., "4D Printed Shape Memory Polyurethane-Based Composite for Bionic Cartilage Scaffolds", *ACS Appl. Polym. Mater.*, Vol 5, No 2, pp. 1283–1292, 2023.

- materials," *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, Vol. 54, No. 14, pp. 1365–1380, 2016.
- [91] Niazy, D., Elsabbagh, A. and Ismail, M. R., "Mono-material 4d printing of digital shape-memory components," *Polymers*, Vol. 13, No. 21, 2021.
- [92] Morgan, N. B., "Medical shape memory alloy applications - The market and its products," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 378, No. 1-2 SPEC. ISS., pp. 16–23, 2004.
- [93] Ly, S. T. and Kim, J. Y., "4D printing – fused deposition modeling printing with thermal-responsive shape memory polymers," *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, Vol. 4, No. 3, pp. 267–272, 2017.
- [94] Wu, H., et al., "Selective Laser Sintering-Based 4D Printing of Magnetism-Responsive Grippers," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 13, No. 11, pp. 12679–12688, 2021.
- [95] Andreu, A., et al., "4D printing materials for vat photopolymerization," *Addit. Manuf.*, Vol. 44, p. 102024, 2021.
- [96] Joshi, S., et al., "4D printing of materials for the future: Opportunities and challenges," *Appl. Mater. Today*, Vol. 18, p. 100490, 2020.
- [97] Akbari, S., Zhang, Y. F., Wang, D. and Ge, Q., "4D Printing and Its Biomedical Applications," in *3D and 4D Printing in Biomedical Applications*, 1st ed., Brighton, pp. 343–372, 2018.
- [98] Singh, S., Singh, G., Prakash, C. and Ramakrishna, S., "Current status and future directions of fused filament fabrication," *J. Manuf. Process.*, Vol. 55, pp. 288–306, 2020.
- [99] Yang, Y., Chen, Y., Wei, Y. and Li, Y., "3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 84, No. 9–12, pp. 2079–2095, 2016.
- [100] Cano-Vicent, A., et al., "Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects," *Addit. Manuf.*, Vol. 47, p. 102378, 2021.
- [101] Heidari-Rarani, M., Rafiee-Afarani, M. and Zahedi, A. M., "Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites," *Compos. Part B Eng.*, Vol. 175, p. 107147, 2019.
- [102] Heidari-Rarani, M., Ezati, N., Sadeghi, P. and Badrossamay, M. R., "Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, Vol. 35, No. 12, pp. 2435–2452, 2022.
- [103] Shahkarami, M. and Zeinedini, A., "Flexural Properties of 3D-printed hierarchical-sinusoidal corrugated core sandwich panels with natural fiber reinforced skins," *Polym. Polym. Compos.*, Vol. 30, p. 09673911221101299, 2022.
- [104] Barletta, M., Gisario, A. and Mehrpouya, M., "4D printing of shape memory polylactic acid (PLA) components: Investigating the role of the operational parameters in fused deposition modelling (FDM)," *J. Manuf. Process.*, Vol. 61, pp. 473–480, 2021.
- [105] Bodaghi, M., Serjoui, A., Zolfagharian, A., Fotouhi, M., Rahman, H. and Durand, D., "Reversible energy absorbing meta-sandwiches by FDM 4D printing," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 173, p. 105451, 2020.
- [106] Cheng, C. Y., et al., "4D printing of shape memory aliphatic copolyester via UV-assisted FDM strategy for medical protective devices," *Chem. Eng. J.*, Vol. 396, p. 125242, 2020.
- [107] Tahir, M., Rahimzadeh, A., Kalman, J., Fayazbakhsh, K. and Lessard, L., "Experimental and analytical investigation of 3D printed specimens reinforced by different forms of recyclates from wind turbine waste," *Polym. Compos.*, Vol. 42, No. 9, pp. 4533–4548, 2021.
- [108] Kruth, J. P., Wang, X., Laoui, T. and Froyen, L., "Lasers and materials in selective laser sintering," *Assem. Autom.*, Vol. 23, No. 4, pp. 357–371, 2003.
- [109] Khalid, M. Y., Arif, Z. U., Noroozi, R., Zolfagharian, A. and Bodaghi, M., "4D printing of shape memory polymer composites: A review on fabrication techniques, applications, and future perspectives," *J. Manuf. Process.*, Vol. 81, pp. 759–797, 2022.
- [110] Akbar, I., El Hadrouz, M., El Mansori, M. and Lagoudas, D., printing," *CAD Comput. Aided Des.*, Vol. 122, p. 102817, 2020.
- [70] Koetting, M. C., Peters, J. T., Steichen, S. D. and Peppas, N. A., "Stimulus-responsive hydrogels: Theory, modern advances, and applications," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, Vol. 93, pp. 1–49, 2015.
- [71] Nadgorny, M., Xiao, Z., Chen, C. and Connal, L. A., "Three-Dimensional Printing of pH-Responsive and Functional Polymers on an Affordable Desktop Printer," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 8, No. 42, pp. 28946–28954, 2016.
- [72] Wu, C. Y., Chen, J. R. and Su, C. K., "4D-printed pH sensing claw," *Anal. Chim. Acta*, Vol. 1204, p. 339733, 2022.
- [73] Liu, Q. S., Roux, B. and Velarde, M. G., "Thermocapillary convection in two-layer systems," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 41, No. 11, pp. 1499–1511, 1998.
- [74] Breger, J. C., et al., "Self-folding thermo-magnetically responsive soft microgrippers," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 7, No. 5, pp. 3398–3405, 2015.
- [75] Yu, X., Zhou, S., Zheng, X., Guo, T., Xiao, Y. and Song, B., "A biodegradable shape-memory nanocomposite with excellent magnetism sensitivity," *Nanotechnology*, Vol. 20, No. 23, p. 235702, 2009.
- [76] Zhu, P., Yang, W., Wang, R., Gao, S., Li, B. and Li, Q., "4D Printing of Complex Structures with a Fast Response Time to Magnetic Stimulus," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 10, No. 42, pp. 36435–36442, 2018.
- [77] Zhou, Y., et al., "From 3D to 4D printing: approaches and typical applications," *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 29, No. 10, pp. 4281–4288, 2015.
- [78] Liu, X., et al., "Capillary-Force-Driven Self-Assembly of 4D-Printed Microstructures," *Adv. Mater.*, Vol. 33, No. 22, p. 2100332, 2021.
- [79] Grassi, G., Sparman, B. E. and Tibbitts, S., "Material agency and 4d printing," in *Material Balance: A Design Equation*, 1st ed., Springer International Publishing, Milan, pp. 53–63, 2021.
- [80] Kuang, X., Chen, K., Dunn, C. K., Wu, J., Li, V. C. F. and J. Qi, H., "3D Printing of Highly Stretchable, Shape-Memory, and Self-Healing Elastomer toward Novel 4D Printing," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 10, No. 8, pp. 7381–7388, 2018.
- [81] Tibbitts, S., "4D Printing: Multi-Material Shape Change," *Archit. Des.*, Vol. 81, No. 1, pp. 116–121, 2014.
- [82] Zhao, W., Li, N., Liu, L., Leng, J. and Liu, Y., "Origami derived self-assembly stents fabricated via 4D printing," *Compos. Struct.*, Vol. 293, p. 115669, 2022.
- [83] Van Manen, T., Janbaz, S., Jansen, K. M. B. and Zadpoor, A. A., "4D printing of reconfigurable metamaterials and devices," *Commun. Mater.*, Vol. 2, No. 1, pp. 1–8, 2021.
- [84] Zeng, S., Gao, Y., Tan, J. and Wei, Z., "Self-Assembly by 4D Printing: Design and Fabrication of Sequential Self-Folding," in *Proceedings of ASME 2022 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, American Society of Mechanical Engineers, p. V001T03A005, 2022.
- [85] Zhao, W., Yue, C., Liu, L., Liu, Y. and Leng, J., "Research progress of shape memory polymer and 4D printing in biomedical application," *Adv. Healthc. Mater.*, Vol. n/a, No. n/a, p. 2201975, 2022.
- [86] Invernizzi, M., Turri, S., Levi, M. and Suriano, R., "4D printed thermally activated self-healing and shape memory polycaprolactone-based polymers," *Eur. Polym. J.*, Vol. 101, pp. 169–176, 2018.
- [87] Bauer, S., Bauer-Gogonea, S., Graz, I. Kaltenbrunner, M., Keplinger, C. and Schwödau, R., "25th anniversary article: A soft future: From robots and sensor skin to energy harvesters," *Adv. Mater.*, Vol. 26, No. 1, pp. 149–162, 2014.
- [88] Rafiee, M., Farahani, R. D. and Therriault, D., "Multi-Material 3D and 4D Printing: A Survey," *Adv. Sci.*, Vol. 7, No. 12, p. 1902307, 2020.
- [89] Hager, M. D., Bode, S., Weber, C. and Schubert, U. S., "Shape memory polymers: Past, present and future developments," *Prog. Polym. Sci.*, Vol. 49–50, pp. 3–33, 2015.
- [90] Zhou, J. and Sheiko, S. S., "Reversible shape-shifting in polymeric

- Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., Vol 171, p. 107584, 2023.
- [131] Skylar-Scott, M. A., Gunasekaran, S. and Lewis, J. A., "Laser-assisted direct ink writing of planar and 3D metal architectures," Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., Vol. 113, No. 22, pp. 6137–6142, 2016.
- [132] Fu, K., et al., "Graphene Oxide-Based Electrode Inks for 3D-Printed Lithium-Ion Batteries," Adv. Mater., Vol. 28, No. 13, pp. 2587–2594, 2016.
- [133] Revelo, C. F. and Colorado, H. A., "3D printing of kaolinite clay ceramics using the Direct Ink Writing (DIW) technique," Ceram. Int., Vol. 44, No. 5, pp. 5673–5682, 2018.
- [134] Xu, C., Quinn, B., Lebel, L. L., Therriault, D. and L'espérance, G., "Multi-Material Direct Ink Writing (DIW) for Complex 3D Metallic Structures with Removable Supports," ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 11, No. 8, pp. 8499–8506, 2019.
- [135] Lewis, J. A., "Direct ink writing of 3D functional materials," Adv. Funct. Mater., Vol. 16, No. 17, pp. 2193–2204, 2006.
- [136] Lewis, J. A. and Gratson, G. M., "Direct writing in three dimensions," Mater. Today, Vol. 7, No. 7, pp. 32–39, 2004.
- [137] Wan, X., Luo, L., Liu, Y. and Leng, J., "Direct Ink Writing Based 4D Printing of Materials and Their Applications," Adv. Sci., Vol. 7, No. 16, p. 2001000, 2020.
- [138] Mu, Q., Dunn, C. K., Wang, L., Dunn, M. L., Qi, H. J. and Wang, T., "Thermal cure effects on electromechanical properties of conductive wires by direct ink write for 4D printing and soft machines," Smart Mater. Struct., Vol. 26, No. 4, p. 45008, 2017.
- [139] Peng, X., et al., "4D Printing of Freestanding Liquid Crystal Elastomers via Hybrid Additive Manufacturing," Adv. Mater., Vol. 34, No. 39, p. 2204890, 2022.
- [140] Weng, S., et al., "4D Printing of Glass Fiber-Regulated Shape Shifting Structures with High Stiffness," ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 13, No. 11, pp. 12797–12804, 2021.
- [141] Bodaghi, M., Damanpack, A. R. and Liao, W. H., "Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing," Mater. Des., Vol. 135, pp. 26–36, 2017.
- [142] Bodaghi, M., Noroozi, R., Zolfagharian, A., Fotouhi, M. and Norouzi, S., "4D printing self-morphing structures," Materials (Basel), Vol. 12, No. 8, 2019.
- [143] Jamshidi, M., Salimi Nezhad, I., Golzar, M. and Behraves, A. H., "Investigation of the Effect of 3D printing parameters on shape-shifting of flat structures to Three-Dimensional Shapes," In Persian, J. Sci. Technol. Compos., Vol. 7, No. 4, pp. 1271–1278, 2021.
- [144] Hosseinzadeh, M., Ghoreishi, M. and Narooei, K., "Investigation of the Effect of 3D Printing Parameters on the Bending Shape Recovery in 4D Printing Process," In Persian, Modares Mech. Eng., Vol. 22, No. 9, pp. 567–577, 2022.
- [145] Rajkumar, A. R. and Shanmugam, K., "Additive manufacturing-enabled shape transformations via FFF 4D printing," J. Mater. Res., Vol. 33, No. 24, pp. 4362–4376, 2018.
- [146] Aberoumand, M., et al., "A comprehensive experimental investigation on 4D printing of PET-G under bending," J. Mater. Res. Technol., Vol. 18, pp. 2552–2569, 2022.
- [147] Tezerjani, S. M. D., Yazdi, M. S. and Hosseinzadeh, M. H., "The effect of 3D printing parameters on the shape memory properties of 4D printed polylactic acid circular disks: An experimental investigation and parameters optimization," Mater. Today Commun., Vol. 33, p. 104262, 2022.
- [148] Wang, J., Wang, Z., Song, Z., Ren, L., Liu, Q. and Ren, L., "Programming Multistage Shape Memory and Variable Recovery Force with 4D Printing Parameters," Adv. Mater. Technol., Vol. 4, No. 11, p. 1900535, 2019.
- [149] Van Manen, T., Janbaz, S. and Zadpoor, A. A., "Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers," Mater. Horizons, Vol. 4, No. 6, pp. 1064–1069, 2017.
- [150] Liu, T., Liu, L., Zeng, C., Liu, Y. and Leng, J., "4D printed anisotropic structures with tailored mechanical behaviors and shape memory effects," Compos. Sci. Technol., Vol. 186, p. 107935, 2020.
- [151] Garcia, C. R., et al., "3D printing of anisotropic metamaterials," Prog. Electromagn. Res. Lett., Vol. 34, No. PIERL12070311, pp. "Toward enabling manufacturing paradigm of 4D printing of shape memory materials: Open literature review," Eur. Polym. J., Vol. 168, p. 111106, 2022.
- [111] Makvandi, P., et al., "Bioinspired microneedle patches: Biomimetic designs, fabrication, and biomedical applications," Matter, Vol. 5, No. 2, pp. 390–429, 2022.
- [112] Fina, F., Goyanes, A., Gaisford, S. and Basit, A. W., "Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines," Int. J. Pharm., Vol. 529, No. 1–2, pp. 285–293, 2017.
- [113] Yang, D., et al., "3D/4D printed tunable electrical metamaterials with more sophisticated structures," J. Mater. Chem. C, Vol. 9, No. 36, pp. 12010–12036, 2021.
- [114] Ouyang, H., Li, X., Lu, X. and Xia, H., "Selective Laser Sintering 4D Printing of Dynamic Cross-linked Polyurethane Containing Diels-Alder Bonds," ACS Appl. Polym. Mater., Vol. 4, No. 5, pp. 4035–4046, 2022.
- [115] Ploszajski, A. R., Jackson, R., Ransley, M. and Miodownik, M., "4D Printing of Magnetically Functionalized Chainmail for Exoskeletal Biomedical Applications," MRS Adv., Vol. 4, No. 23, pp. 1361–1366, 2019.
- [116] Al Rashid, A., Ahmed, W., Khalid, M. Y. and Koç, M., "Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications," Addit. Manuf., Vol. 47, p. 102279, 2021.
- [117] Davoudinejad, A., et al., "Additive manufacturing with vat polymerization method for precision polymer micro components production," Procedia CIRP, Vol. 75, pp. 98–102, 2018.
- [118] Ng, W. L., et al., "Vat polymerization-based bioprinting - process, materials, applications and regulatory challenges," Biofabrication, Vol. 12, No. 2, p. 22001, 2020.
- [119] Tang, T., Alfharhan, S., Jin, K. and Li, X., "4D Printing of Seed Capsule-Inspired Hygro-Responsive Structures via Liquid Crystal Templating-Assisted Vat Photopolymerization," Adv. Funct. Mater., Vol. 33, No. 5, p. 2211602, 2023.
- [120] Fang, Z., Lu, R., Chen, J., Zhao, Q. and Wu, J., "Vat photopolymerization of tough glassy polymers with multiple shape memory performances," Addit. Manuf., Vol. 59, p. 103171, 2022.
- [121] Xu, X., Robles-Martinez, P., Madla, C. M., Joubert, F., Goyanes, A., Basit, A. W. and Gaisford, S., "Stereolithography (SLA) 3D printing of an antihypertensive polyprintlet: Case study of an unexpected photopolymer-drug reaction," Addit. Manuf., Vol. 33, p. 101071, 2020.
- [122] Sun, C., Fang, N., Wu, D. M. and Zhang, X., "Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask," Sensors Actuators, A Phys., Vol. 121, No. 1, pp. 113–120, 2005.
- [123] Pagac, M., et al., "A review of vat photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3d printing," Polymers, Vol. 13, No. 4, pp. 1–20, 2021.
- [124] Choong, Y. Y. C., Maleksaedi, S., Eng, H., Wei, J. and Su, P. C., "4D printing of high performance shape memory polymer using stereolithography," Mater. Des., Vol. 126, pp. 219–225, 2017.
- [125] Zhao, T., et al., "4D printing of shape memory polyurethane via stereolithography," Eur. Polym. J., Vol. 101, pp. 120–126, 2018.
- [126] Miao, S., et al., "Stereolithographic 4D Bioprinting of Multiresponsive Architectures for Neural Engineering," Adv. Biosyst., Vol. 2, No. 9, p. 1800101, 2018.
- [127] Shahzad, A. and Lazoglu, I., "Direct ink writing (DIW) of structural and functional ceramics: Recent achievements and future challenges," Compos. Part B Eng., Vol. 225, p. 109249, 2021.
- [128] Lewis, J. A., Smay, J. E., Stuecker, J. and Cesarano, J., "Direct ink writing of three-dimensional ceramic structures," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 89, No. 12, pp. 3599–3609, 2006.
- [129] Aw, J. E., et al., "Self-Regulative Direct Ink Writing of Frontally Polymerizing Thermoset Polymers," Adv. Mater. Technol., Vol. 7, No. 9, p. 2200230, 2022.
- [130] Mahshid, R., Isfahani, M. N., Heidari-Rarani, M. and Mirkhalaf, M., "Recent advances in development of additively manufactured thermosets and fiber reinforced thermosetting composites: Technologies, materials, and mechanical properties",

- https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Printing_bricks_from_moon_dust_using_the_Sun_s_heat, available in 5, March 2017.
- [173] Ishizawa, J., "Research on Application of Shape Memory Polymers to Space Inflatable Systems," Proceeding 7th Int. Symp. Artif. Intell. Robot. Autom. Sp., Vol. 400, pp. 1-4, 2003.
- [174] Hinkle, J., Lin, J. H. K. and Kling, D., "Design and materials study on secondary structures in deployable planetary and space habitats," in Proceedings of 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 19th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 13t, Denver, pp. 2011-2024, 2011.
- [175] Carlota, V., "How will 4D printing disrupt our current manufacturing techniques?," <https://www.3dnatives.com/en/4d-printing-disrupting-current-manufacturing-techniques-230920194/#!> (accessed Sep. 23, 2019), available in 23, September 2019.
- [176] Baba, Z. U., Shafi, W. K., Haq, M. I. U. and Raina, A., "Towards sustainable automobiles-advancements and challenges," Prog. Ind. Ecol., Vol. 13, No. 4, pp. 315-331, 2019.
- [177] Xavier, M. S., et al., "Soft Pneumatic Actuators: A Review of Design, Fabrication, Modeling, Sensing, Control and Applications," IEEE Access, Vol. 10, pp. 59442-59485, 2022.
- [178] Adam, G., Benouhiba, A., Rabenorosoa, K., Clévy, C. and J. Cappelleri, D., "4D Printing: Enabling Technology for Microrobotics Applications," Adv. Intell. Syst., Vol. 3, No. 5, p. 2000216, 2021.
- [179] Zarek, M., Layani, M., Cooperstein, I., Sachyani, E., Cohn, D. and Magdassi, S., "3D Printing of Shape Memory Polymers for Flexible Electronic Devices," Adv. Mater., Vol. 28, No. 22, pp. 4449-4454, 2016.
- [180] Phuhongsung, P., Zhang, M. and Bhandari, B., "4D printing of products based on soy protein isolate via microwave heating for flavor development," Food Res. Int., Vol. 137, p. 109605, 2020.
- [181] Oladapo, B. I., Adebisi, A. V. and Ifeoluwa Elemure, E., "Microstructural 4D printing investigation of ultra-sonication biocomposite polymer," J. King Saud Univ. - Eng. Sci., Vol. 33, No. 1, pp. 54-60, 2021.
- 75-82, 2012.
- [152] Alshehly, Y. S., et al., "Variable stiffness 4D printing," in Smart Materials in Additive Manufacturing, volume 2: 4D Printing Mechanics, Modeling, and Advanced Engineering Applications, Elsevier, pp. 407-433, 2022.
- [153] Nam, S. and Pei, E., "The influence of shape changing behaviors from 4D printing through material extrusion print patterns and infill densities," Materials, Vol. 13, No. 17, p. 3754, 2020.
- [154] Goo, B., Hong, C. H. and Park, K., "4D printing using anisotropic thermal deformation of 3D-printed thermoplastic parts," Mater. Des., Vol. 188, p. 108485, 2020.
- [155] Wu, W., et al., "Metallic 4D Printing of Laser Stimulation," Adv. Sci., Vol. n/a, No. n/a, p. 2206486, 2023.
- [156] He, W., et al., "A Biocompatible 4D Printing Shape Memory Polymer as Emerging Strategy for Fabrication of Deployable Medical Devices," Macromol. Rapid Commun., Vol. 44, No. 2, p. 2200553, 2023.
- [157] Raina, A., Haq, M. I. U., Javaid, M., Rab, S. and Haleem, A., "4D Printing for Automotive Industry Applications," J. Inst. Eng. Ser. D, Vol. 102, No. 2, pp. 521-529, 2021.
- [158] Jiang, Y., et al., "Recent Advances in 3D Printed Sensors: Materials, Design, and Manufacturing," Adv. Mater. Technol., Vol. 8, No. 2, p. 2200492, 2023.
- [159] Wang, W., Liu, Y. and Leng, J., "Recent developments in shape memory polymer nanocomposites: Actuation methods and mechanisms," Coord. Chem. Rev., Vol. 320-321, pp. 38-52, 2016.
- [160] Serrano, M. C. and Ameer, G. A., "Recent insights into the biomedical applications of shape-memory polymers," Macromol. Biosci., Vol. 12, No. 9, pp. 1156-1171, 2012.
- [161] Shakibania, S., Ghazanfari, L., Raeeszadeh-Sarmazdeh, M. and Khakbiz, M., "Medical application of biomimetic 4D printing," Drug Dev. Ind. Pharm., Vol. 47, No. 4, pp. 521-534, 2021.
- [162] Zhou, Y., et al., "4D Printing of Shape Memory Vascular Stent Based on β CD-g-Polycaprolactone," Macromol. Rapid Commun., Vol. 42, No. 14, p. 2100176, 2021.
- [163] Lin, C., Zhang, L. J., Liu, Y. J., Liu, L. W. and Leng, J. S., "4D printing of personalized shape memory polymer vascular stents with negative Poisson's ratio structure: A preliminary study," Sci. China Technol. Sci., Vol. 63, No. 4, pp. 578-588, 2020.
- [164] Small, W., et al., "Shape memory polymer stent with expandable foam: A new concept for endovascular embolization of fusiform aneurysms," IEEE Trans. Biomed. Eng., Vol. 54, No. 6, pp. 1157-1160, 2007.
- [165] Yakacki, C. M., Shandas, R., Lanning, C., Rech, B., Eckstein, A. and Gall, K., "Unconstrained recovery characterization of shape-memory polymer networks for cardiovascular applications," Biomaterials, Vol. 28, No. 14, pp. 2255-2263, 2007.
- [166] Ge, Q., Sakhaei, A. H., Lee, H., Dunn, C. K., Fang, N. X. and Dunn, M. L., "Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers," Sci. Rep., Vol. 6, No. 1, p. 31110, 2016.
- [167] Zhang, F., Wen, N., Wang, L., Bai, Y. and Leng, J., "Design of 4D printed shape-changing tracheal stent and remote controlling actuation," Int. J. Smart Nano Mater., Vol. 12, No. 4, pp. 375-389, 2021.
- [168] Kumari, G., et al., "A voyage from 3D to 4D printing in nanomedicine and healthcare: Part II," Nanomedicine, Vol. 17, No. 4, pp. 255-270, 2022.
- [169] Osouli-Bostanabad, K., et al., "Traction of 3D and 4D Printing in the Healthcare Industry: From Drug Delivery and Analysis to Regenerative Medicine," ACS Biomater. Sci. Eng., Vol. 8, No. 7, pp. 2764-2797, 2022.
- [170] Ding, H., Zhang, X., Liu, Y. and Ramakrishna, S., "Review of mechanisms and deformation behaviors in 4D printing," Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 105, No. 11, pp. 4633-4649, 2019.
- [171] Miao, S., et al., "4D printing smart biomedical scaffolds with novel soybean oil epoxidized acrylate," Sci. Rep., Vol. 6, No. 1, p. 27226, 2016.
- [172] Agency, E. S., "Printing bricks from moon dust using the Sun's heat,"