



4D Printing Additive Manufacturing Review; Mechanism, Challenges, Applications and Future

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Moradi M.¹ PhD,
Karami Moghadam M.^{*1} MSc,
Asgari F.¹ BSc

How to cite this article

Moradi M, Karami Moghadam M, Asgari F. 4D Printing Additive Manufacturing Review; Mechanism, Challenges, Applications and Future. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(4):1063-1077.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty and "Laser Material Processing Research Center", Malayer University, Malayer, Iran

*Correspondence

Address: Malayer University, Arak-Malayer Highway, Malayer, Hamadan Province, Iran. Postal Code: 6571995863
Phone: +98 (81) 32225312
Fax: +98 (81) 32225312
moradi@malayeru.ac.ir

Article History

Received: December 30, 2018
Accepted: August 24, 2019
ePublished: April 17, 2020

ABSTRACT

Additive manufacturing in the modern world is progressing significantly, resulting in special applications in engineering sciences, medicine, and art. When the MIT university mixed the concept of time in the 3D printing process, time was considered as the fourth dimension. By combining the fourth dimension, the time, the smart materials made of additive manufacturing are able to a reaction to the external motivations (heat, voice, impact, etc) within a specified time. In the 4D printing process, the material configuration will be converted to a converter that will be exposed to external motivation such as heat, water, chemicals, electrical current and magnetic energy. It is expected that in the future, this technology will be widely used, requiring the application of various engineering disciplines, including mechanical engineering, in the fabrication and production of objects, because the overall perspective of the 4-D printing process is to make intelligent materials that are optimized using computational challenges and empirical knowledge. In this article, after reviewing the 3D printing and introducing smart materials, the issue of 4D printing has been investigated using this material. The mechanism, challenges, applications, and future of 4D printing has been discussed.

Keywords Additive Manufacturing; 3D Printing; 4D Printing; Smart Materials; Manufacturing Engineering

CITATION LINKS

[1] Self-expanding/shrinking ... [2] How the Venus ... [3] Real-time imaging of ... [4] 4D Printing: Dawn ... [5] Four-dimensional printing ... [6] F2792-12a, Standard Terminology ... [7] 3D printed scaffolds as a new ... [8] 3D Printed parts with ... [9] Additive manufacturing methods ... [10] Standards, quality control, and ... [11] The synergic effects of FDM 3D ... [12] Microstructure modelling for metallic ... [13] Experimental and numerical study ... [14] Engineering analysis smart ... [15] Advanced Piezoelectric ... [16] Stimulus-responsive ... [17] Review of some ... [18] Self-healing materials [19] Elucidating the effect ... [20] Shape memory ... [21] Fabrication and characterization ... [22] Recent developments in ... [23] Ferromagnetic shape ... [24] Ferromagnetic shape ... [25] Characterization of ... [26] Shape and temperature ... [27] Review of progress in ... [28] Designing materials ... [29] Recent advances... [30] Ionic electro-active ... [31] Impact of viscoelastic ... [32] Shape memory ... [33] Thermomechanical properties ... [34] Shape memory bulk... [35] Multi-shape active... [36] Active materials by ... [37] Multifunctional ... [38] New design of shape... [39] Hydrogel composites ... [40] Smart hydrogels ... [41] Smart materials: A review... [42] Antiferroelectric shape ... [43] Polyurethane shape ... [44] Effects of moisture on... [45] Shape-memory polymers ... [46] 3D printed reversible ... [47] Active printed materials ... [48] Biomimetic 4D ... [49] 4D printing ... [50] Twisted composite structures made by ... [51] 4D printing of high performance ... [52] Digital manufacture ... [53] Smart three-dimensional ... [54] Stimuli-responsive behavior... [55] 4D printing with mechanically ... [56] 3D printed hygroscopic ... [57] Multi-stage responsive... [58] From 3D to 4D printing... [59] A review of 4D [60] Shape-memory polymer [61] Programmable materials [62] 3D printing of smart ... [63] Two-Way 4D Printing ... [64] 4D printing of ... [65] 4D printing smart biomedical ... [66] 4D printing of shape ... [67] Overview on the applications ... [68] Pattern transformation ... [69] MultiFab : A machine ... [70] Development of rapid ... [71] Mechanics of bioinspired ... [72] Design for 4D printing: ... [73] Multimaterial ... [74] 4D printing shape ... [75] Direct digital manufacturing ... [76] Additive manufacturing ... [77] Reversible energy ... [78] 3D printing on-water ... [79] Effective software ... [80] Self-folding with shape ... [81] Unclonable security features ... [82] Evolution of 3D printed ... [83] Nature-inspired smart ... [84] Plant leaf-mimetic smart ... [85] A perspective on ... [86] Multimaterial 4D ... [87] Self-deployable origami ... [88] 4D Bioprinting ... [89] Mitigation of ... [90] Advances and future

مروری بر چاپ ۴ بعدی به کمک ساخت افزایشی؛ مکانیزم، چالش‌ها، کاربردها و آینده پیش رو

محمود مرادی* PhD

"گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی" و "مرکز تحقیقات فرآوری لیزری مواد"، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

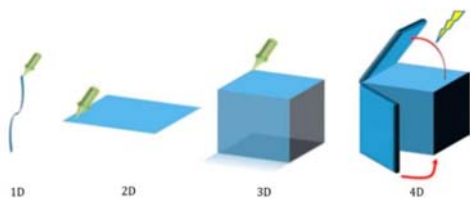
مجتبی کرمی مقدم MSC

"گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی" و "مرکز تحقیقات فرآوری لیزری مواد"، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

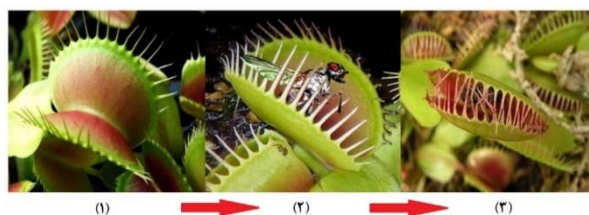
فاطمه عسگری BSc

"گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی" و "مرکز تحقیقات فرآوری لیزری مواد"، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

رفتار گیاه ونوس مگس‌خوار (Venus flytrap) نشان‌دهنده بسیار خوبی از مفهوم چاپ ۴ بعدی است [2]. برگ‌های گیاه ونوس مگس‌خوار در زمانی حدود ۱۰۰ میلی ثانیه برای اسیرکردن حشرات بسته می‌شوند. در این گیاه یک واکنش سریع ایجاد می‌شود [3]. این واکنش هنگامی رخ خواهد داد که قسمتی از بدن حشرات با برگ این گیاه برخورد می‌کنند (شکل ۲).



شکل (۱) شماتیک فرآیندهای ۱ بعدی، ۲ بعدی، ۳ بعدی و ۴ بعدی [1]



شکل (۲) نمایش مفهوم فرآیند ۴ بعدی در طبیعت، ترتیب بسته شدن برگ‌های گیاه ونوس [3]

در سال‌های اخیر، تولید مواد افزایشی در مواد هوشمند در کانون توجه قرار گرفته است و پژوهش‌های گسترده‌ای برای غلبه بر چالش‌های مختلف انجام شده است. رفتار وابسته به زمان مواد چندگانه هنگامی که در معرض محرک‌های خارجی مانند تنش، دما، رطوبت و غیره قرار می‌گیرند، قابل مشاهده است.

قابلیت چاپ ۴ بعدی به‌طور قطعی تایید شده است و توسط دانشمندان به‌عنوان یک ساختار فیزیکی ساخت لایه‌به‌لایه با مواد هوشمند از طریق تکنیک تولید افزایشی مناسب، مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. ساختاری که از این تکنولوژی بهره می‌برد، باید رفتار واکنشی از خود نشان دهد و به‌محض اینکه در معرض محرک قرار گرفت، در یک بازه زمانی از خود واکنش نشان دهد [4]. سه اصل اساسی برای تحقق فرآیند چاپ ۴ بعدی وجود دارد: یکی از مهم‌ترین آنها آماده‌سازی مواد کامپوزیتی واکنش‌دهنده به محرک است. دومین موضوع این است که یک محرک خاص باعث ایجاد یک پاسخ منحصر به فرد در مواد چندگانه ایجاد کند و نهایتاً سومین موضوع، مدت زمان برای پاسخ و تغییر شکل است. پدیده‌های تغییر شکل و تغییر مکان در ساختارها می‌تواند شامل تابش، خمش، پیچیده شدن، انقباض و انقباض خطی یا غیرخطی، پیچش سطحی و همچنین تولید ویژگی‌های توپوگرافی سطح باشد [5] (شکل ۳).

تغییر شکل مواد می‌تواند از هر بعد در طول زمان به‌عنوان یک تصویر باشد که ساختار چاپی ۴ بعدی را تحت تاثیر خود قرار خواهد داد. هنگامی که موادی به‌خودی خود قابلیت تبدیل شدن و تغییر

چکیده

ساخت افزایشی در جهان امروزی با رشد قابل توجهی روبه پیشرفت است که موجب شده کاربردهای ویژه‌ای در علوم مهندسی، پزشکی و هنر داشته باشد. هنگامی که در دانشگاه MIT مفهوم زمان را به فرآیند چاپ ۳ بعدی ادغام نمودند، زمان به‌عنوان بُعد چهارم در نظر گرفته شد. با ترکیب بُعد چهارم، یعنی زمان، مواد هوشمندی که از ساخت افزایشی ساخته می‌شوند، توانایی واکنش به محرک‌های خارجی (گرما، صدا، ضربه و غیره) در مدت زمان معین را دارند. در فرآیند چاپ ۴ بعدی، پیکربندی ماده در ساخت افزایشی به‌مبدلی تبدیل خواهد شد که در معرض محرک‌های خارجی همچون حرارت، آب، مواد شیمیایی، جریان الکتریکی و مغناطیسی قرار داده می‌شود. انتظار می‌رود در سال‌های آتی استفاده از این تکنولوژی به‌صورت وسیعی مورد استفاده قرار گیرد و این امر مستلزم به‌کارگیری رشته‌های مختلف ساخت از جمله مهندسی مکانیک در ساخت و تولید اشیاء است، زیرا چشم‌انداز کلی در فرآیند چاپ ۴ بعدی این است که مواد هوشمندی ساخته شوند که با استفاده از چالش‌های محاسباتی و دانش تجربی به‌حد مطلوب میل نمایند. در این مقاله پس از بررسی چاپ ۳ بعدی و نیز معرفی مواد هوشمند به‌موضوع چاپ ۴ بعدی با استفاده از این مواد پرداخته شده است. مکانیزم، چالش‌ها، کاربردها و آینده پیش رو چاپ ۴ بعدی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: ساخت افزایشی، چاپ ۳ بعدی، چاپ ۴ بعدی، مواد هوشمند، مهندسی ساخت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۲

*نویسنده مسئول: moradi@malayeru.ac.ir

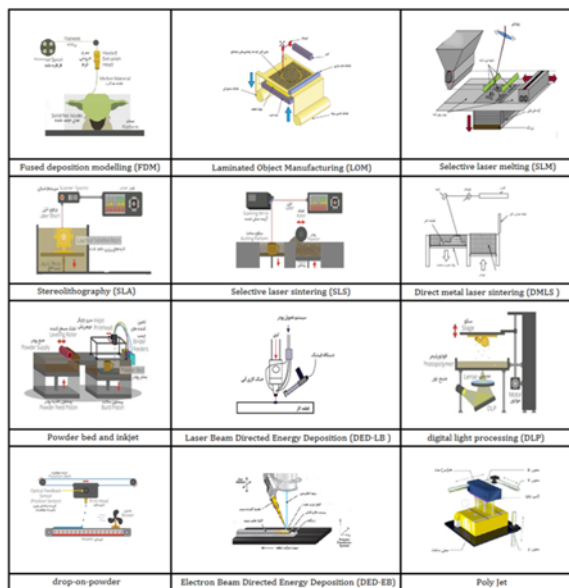
۱- مقدمه

در سال‌های اخیر توجه به ساخت مواد با دقت و سرعت بالا و همچنین توجه به کاهش هزینه‌های ناشی از دورریز مواد ساخته شده، دانشمندان مختلفی را به این حیطه برای بهبود عملکرد ساخت و طراحی دعوت نموده است. چاپ ۴ بعدی یک فناوری جدید است که در دسته فناوری ساخت افزایشی به‌عنوان فناوری به‌روزرسانی شده از فناوری چاپ ۳ بعدی عرضه شده است. فرآیند چاپ ۴ بعدی، ساختی افزایشی است که با در نظر گرفتن بعد زمان به چاپ ۳ بعدی مورد استفاده قرار گرفته می‌شود (شکل ۱).

این فناوری در سال ۲۰۱۳ در دانشگاه MIT توسط تربیت اسکایر که مدیر آزمایشگاه ساخت افزایشی این دانشگاه نیز است مورد استفاده قرار گرفته شد [1].

۲- روش‌های ساخت افزایشی در چاپ ۳بعدی

ساخت افزایشی یا چاپ ۳بعدی که به عنوان تولید لایه‌ای نیز نامیده می‌شود، روش ساختی است که در آن قطعات به صورت لایه‌ای از مواد روی یک بستر، چاپ خواهند شد. این روش یک روش تولید نمونه سریع با دقت بالا است [6]. تولید افزایشی در سال ۱۹۸۴ توسط هال [7] به جهان معرفی شد و در دو دهه گذشته به طور جدی مورد بررسی قرار گرفته است [8]. طیف گسترده‌ای از مواد پلاستیکی، فلزات، سرامیک و کامپوزیت‌ها برای تولید مواد افزایشی استفاده می‌شود که این فناوری به دسته‌بندی‌هایی تقسیم شده است [9] (شکل ۷).



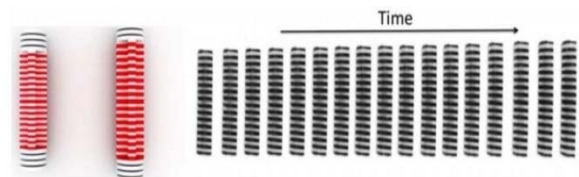
شکل ۷) طبقه‌بندی فرآیندهای ساخت افزایشی [8]

ساخت افزایشی دارای ظرفیت تولید برای پردازش مواد هوشمند است. چاپ ۳بعدی مزایای متعددی نسبت به تولید سنتی دارد. تنوع تولید قطعات بر اساس تقاضا با دنظرگرفتن ابزار خاص مانند ماشین‌های معمولی، صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ها و ویژگی‌های هندسی پیچیده با استفاده از امکانات تولید سنتی امکان‌پذیر نیست [10].

بر اساس گزارش هولر در سال ۲۰۱۳، مراقبت‌های بهداشتی، هوافضا، داروسازی، خودرو، ابزارآلات، مد و صنایع کاشت پزشکی (ایمپلنت‌ها) به سمت مدرن‌شدن پیش خواهند رفت و مستلزم ایجاد روابط عمیقی با تولید دقیق و بهینه دارند [11]. گزارش هولر در سال ۲۰۱۷، نشان داد که ۹۷ شرکت در تولید و فروش قطعات افزایشی شرکت داشته‌اند. در طول چند سال گذشته تاثیر رشد توسعه و همچنین تجاری‌سازی در بین روش‌های چاپ ۳بعدی مشاهده می‌شود. در شکل ۸، روش فناوری‌های ساخت افزایشی در صنایع مختلف به تصویر کشیده شده است [12].

چاپ ۳بعدی پایه و اساس فناوری چاپ ۴بعدی است. تا آنجا که به وضعیت فعلی تکنولوژی مربوط می‌شود، محققان طی ۵ سال

شکل را دارند و در معرض محرک‌های خارجی خاص قرار می‌گیرند، ویژگی تغییر شکل در طول زمان را نشان می‌دهند. تنوع تغییر شکل را می‌توان با محرک‌های فیزیکی مختلف برای چین‌خوردن، جمع‌شدن، انبساط و پیچیدن تحریک کرد (شکل ۴ تا ۶) [5].



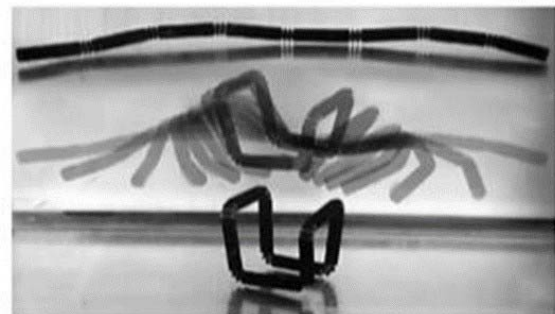
شکل ۳) تصویری از تغییر شکل به وسیله انبساط/انقباض خطی مطابقت داده شده [5]



شکل ۴) تصویری از تغییر شکل توسط خودجمع‌شوندگی [5]



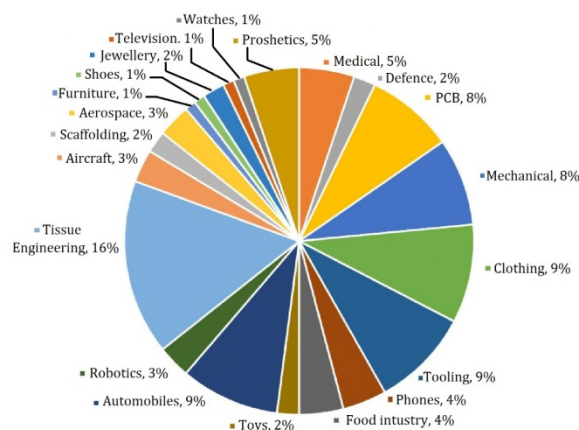
شکل ۵) تصویری از تغییر شکل سینوسی توسط خودخم‌شوندگی [5]



شکل ۶) تغییر شکل رشته قاب سیمی مکعبی توسط مکانیزم خودجمع‌شوندگی [5]

در این مقاله به بررسی مروری تحقیقات انجام‌شده در حیطه ساخت افزایشی در چاپ ۴بعدی پرداخته شده است که این فناوری نوعی از ساخت افزایشی در چاپ ۳بعدی با دنظرگرفتن فاکتور زمان است. این مقاله در بخش‌های متنوعی به ساخت افزودنی، مواد هوشمند، سازوکار این روش، کاربردها، مزیت‌ها و معایب آن پرداخته شده است. مفهوم بنیادین فناوری ساخت افزایشی، به طور مختصر برای تهیه چاپ ۴بعدی توصیف شده است.

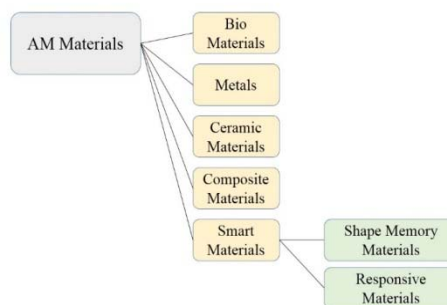
گذشته پیشرفت قابل توجهی در این صنعت داشته‌اند. پیشرفت فرآیند چاپ ۴بعدی وابسته به پیشرفت فناوری ساخت افزایشی در طیف وسیع‌تری است که در کنار آن به هوشمندی مواد نگاه جالبی داشته است.



شکل ۸) پرورش تکنولوژی تولید افزایشی در کاربرد صنعتی [11]

۳- مواد هوشمند در چاپ ۴بعدی

مواد هوشمند عملکرد موثر خود را بارها نشان داده‌اند که توانایی سازگاری و کاربرد چندمنظوره را دارا هستند. ماده هوشمند، ماده‌ای است که به محیط در یک محدوده زمانی خاص، واکنش نشان می‌دهد اما پس از مدتی یک اثر برگشت‌پذیر مفید ایجاد می‌کند. این واکنش ممکن است که در اثر محرک‌های خارجی همانند تنش، فشار، دما، pH، میدان الکتریکی یا مغناطیسی ایجاد شود. نتیجه تحریک می‌تواند یک رنگ، شکست، تنش، کشیدگی، یک تغییر شکل یا تغییر در حجم باشد [13]. محققان بر این نظر هستند که مواد هوشمند، تبدیل انرژی به حوزه‌های مختلف فیزیکی را نشان می‌دهند. تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی، از طریق مواد هوشمند یک نمونه از این دسته از مواد است [14]. مواد یکپارچه هوشمند، موادی هستند که با ظرفیت تبدیل پیکربندی و خواص خود، ساختار ماده را هنگامی که در معرض یک محرک خارجی قرار می‌گیرند، مورد عملکرد قرار می‌دهد. پیشرفت‌های اخیر در توسعه مواد و ویژگی‌های چاپ ۴بعدی، مواد هوشمند را در دسته تکنولوژی ساخت افزایشی قرار داده است [15] (شکل ۹).

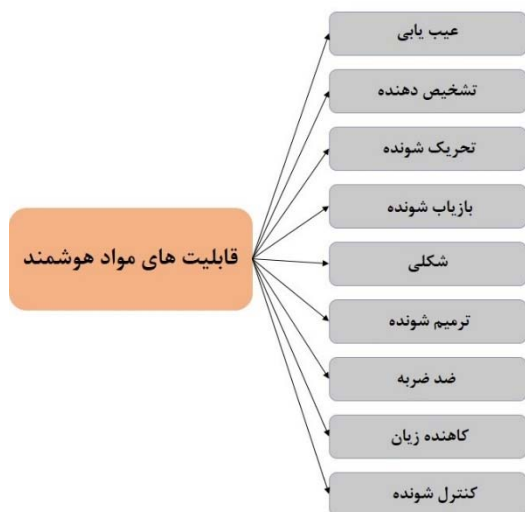


شکل ۹) کاربرد مواد هوشمند در ساخت افزایشی [13]

اصطلاح مواد هوشمند برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ ابداع شد و انواع مواد در حال حاضر با فناوری ساخت افزایشی مورد بهره‌برداری قرار داده شده است. به نظر می‌رسد مواد هوشمند در سال‌های آتی به‌دفعات بالاتری مورد استفاده قرار گیرند.

۳-۱- قابلیت‌های مواد هوشمند

تمرکز بر نتیجه واکنش یا رفتار آن، نکته بسیار مهمی در عملکرد مواد هوشمند است. پاسخ پیش‌بینی‌شده، خودتحریک‌شوندگی، خودعیب‌یابی، خودترمیم‌شوندگی و تغییر شکل، همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، از قابلیت‌های مواد هوشمند هستند. بسیاری از محصولاتی که از مواد با ویژگی‌های مواد هوشمند استفاده می‌کنند، مدت‌های بسیار طولانی است که بخشی از زندگی را فرا گرفته‌اند. برای مثال در عکاسی، از مواد هوشمند یا پاسخگو به محرک استفاده شده است که توانایی واکنش گرمایی، شیمیایی و نوری را دارند. بیشتر مواد هوشمند پاسخگو به محرک‌های تغییر شکل، خواص فیزیکی و ساختار شیمیایی هستند [16].

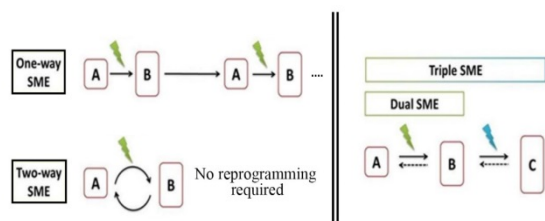


شکل ۱۰) قابلیت‌های مواد هوشمند

خودتحریک‌شوندگی وابسته به تغییر شکل و مواد است که در واکنش به محرک‌های خارجی یک تغییر مکان نسبت به مکان اولیه ایجاد می‌کند. کامپوزیت‌های پیزوالکتریک این ویژگی را نشان می‌دهند. ماده پیزوالکتریک یک ماده عملگر است که هنگامی که تحت اعمال تنش قرار می‌گیرد، یک بار الکتریکی تولید می‌کند [15]. فناوری در مرحله تحقیق و بررسی است و امید این است که در طی چند سال آتی، خودتحریک‌های مواد پیزوالکتریک بتوانند از طریق چاپ ۴بعدی ساخته شوند [17]. قابلیت خودترمیم‌شوندگی از آسیب‌های مکانیکی و حرارتی، اساس مواد هوشمند است. نخستین نوع از مواد خودترمیم‌شونده در پژوهش سال ۲۰۰۱ گزارش شده است. پوشش‌های خودترمیم بر پایه مواد گرماسخت برای جلوگیری از خوردگی و تخریب سطح ماده مورد استفاده قرار گرفته است. مکانوسفر

است که نسبت پایداری، نشان‌دهنده استحکام یک ماده برای اصلاح تغییر شکل موقت است.

در آزمایشگاه نیروی دریایی ایالات متحده آمریکا، آلیاژهای حافظه‌دار را بر اساس مواد نیکل و تیتانیوم به نام نیتینول (Nitinol) کشف کردند. نیتینول معمولاً شامل ۵۵٪ نیکل و ۴۵٪ تیتانیوم در فازهایی با خواص فیزیکی مختلف است. این آلیاژ دارای رفتار حافظه‌ای منحصربه‌فردی است که به‌عنوان تغییر شکل ترموالاستیک مارتنزیتی نامیده می‌شود که از تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت ناشی از افزایش دما در ناحیه خاص از فلز انجام گرفته و سپس سرد می‌شود که این عمل در مقیاس اتمی حاصل می‌شود. فاز با دمای بالاتر آستنیت است و دمای پایین‌تر فاز مارتنزیتی است. فاز مارتنزیتی با خنک کردن مواد از دمای بالاتر به دست می‌آید. آلیاژهای حافظه‌دار به‌طور گسترده‌ای در بسیاری از کاربردهای فیزیکی قابل استفاده هستند که نخستین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ گزارش شده است [21]. آلیاژهای واکنش‌دهنده در برابر محرک‌ها به دو دسته واکنش‌دهنده حرارتی و واکنش‌دهنده مغناطیسی تقسیم‌بندی می‌شوند. آلیاژهای حافظه‌دار حساس به گرما، آلیاژهای هوشمند واکنش‌دهنده به حرارت هستند. تغییر شکل مارتنزیتی ترموالاستیک ناشی از نیاز به شبکه کریستالی برای حفظ حداقل وضعیت انرژی در یک دمای معین است. تغییر شکل مارتنزیت برگشت‌پذیر در شبکه کریستالی، از مکانیزم بعد از بازسازی شکل در هر دو دسته آلیاژهای حافظه‌دار گرفته شده است [21]. دمای انتقال برای آستنیت به فاز مارتنزیتی معمولاً حدود ۱۰۰- تا ۱۵۰°C است [22]. اثر مواد حافظه‌دار دوطرفه، قابلیت است که در برخی از آلیاژهای حافظه‌دار برای بازیابی شکل در حرارتی بالاتر از دمای تغییر شکل و بازگشت به تنظیمات اولیه در دمای خنک‌شدگی است (شکل ۱۲). آلیاژهای حافظه‌دار، هنگام اعمال یک میدان مغناطیسی که ابعاد و پیکربندی را تغییر می‌دهند، مواد متاثر مغناطیسی یا مواد حافظه‌دار فرومغناطیسی نامیده می‌شوند و در سال ۱۹۹۶ در دانشگاه MIT کشف شده است. مکانیزم حرکت مرز دوقلویی، آثار رفتار آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی است که به‌عنوان مغناطیس شکلی شناخته می‌شود [23].



شکل ۱۲ اثر مواد حافظه‌دار شکلی یک‌طرفه یا دوطرفه [22]

حرکت مرز دوقلویی ساختار مارتنزیتی ناشی از تفاوت انرژی مغناطیسی است که انرژی مکانیکی مورد نیاز برای جابجایی اتم‌ها را در نزدیکی مرز از دست می‌دهند. تفاوت در قدرت مغناطیسی

(Mechanophores) یک گروه شیمیایی حساس مکانیکی است که شامل ویژگی‌های پلیمر هستند و هنگامی که تحت تاثیر آسیب مکانیکی قرار می‌گیرند، یک واکنش خودترمیم ایجاد می‌کنند که این مواد با نشانگر رنگی این واکنش را نمایان می‌کنند [18]. در پوشش‌های که توسط پاشش پودر صورت می‌گیرد، این تکنولوژی مورد استفاده قرار گرفته شده است که می‌توان در سازه‌های خودرویی، عمرانی و هوافضا از آن مورد بهره‌برداری قرار داد. عملکرد محصول، ایمنی مواد و دوام ساختارها را گسترش می‌دهد که بالابردن نرخ خستگی از ویژگی‌های قابل توجهی از مواد خودترمیم‌شونده اختصاص‌یافته به پوشش است. مواد با قابلیت خودعیب‌یابی هنگامی که تحت تنش و بار قرار می‌گیرند، برای اندازه‌گیری عوامل بارگذاری استفاده می‌شوند. قابلیت خودعیب‌یابی بسیار موثر و کاربردی است. مواد خودعیب‌یاب، شامل ترکیب عناصر حساس به یک ماده یا ساختار هستند که می‌توانند متغیرهایی مانند تنش، کرنش، فشار، ارتعاش، ضربه، خوردگی و دما را تشخیص دهد. مفهوم خودمونتاژی پایه و اساس چاپ ۴ بعدی است. تیپیتس، این قابلیت را با یک بطری حاوی قطعات جداگانه که تکان داده می‌شوند، بیان نمود؛ هنگامی که قطعات جدا از هم هستند برای تماس به یکدیگر متصل می‌شوند [19] (شکل ۱۱).



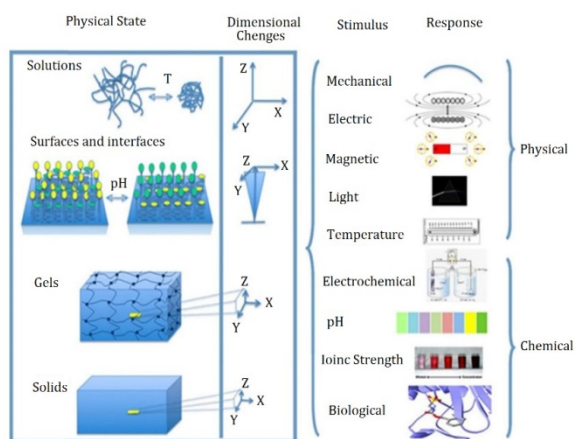
شکل ۱۱ مفهوم خودمونتاژی زیست-مولکولی [18]

۳-۲- مواد حافظه‌دار شکلی

تغییر شکل مواد چندکاره با قابلیت تبدیل شدن به شکل اولیه خود، پس از تغییر شکل به محض اینکه در معرض محرک خارجی قرار می‌گیرند، به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. مواد حافظه‌دار شکلی توانایی بازیابی شکل اولیه خود را پس از تغییر شکل به‌طور معمول دارند که این پدیده، اثر مواد حافظه‌دار شکلی نامیده می‌شود. اثر ترموالاستیک در ابتدا توسط ویلیام بولر در آزمایشگاه جنگ‌افزار نیروی دریایی ایالات متحده، مشاهده شد. یک شکل موقت می‌تواند برای مدت طولانی به‌صورت پایدار حفظ شود تا زمانی که یک محرک خاص برای ایجاد تغییر شکل، اعمال نمی‌شود. تمام مواد حافظه‌دار شکلی قادر هستند تا شکل اولیه خود را پس از تغییر شکل بازیابند [20]. نسبت پایداری شکل و نسبت بازیابی شکل، پارامترهایی هستند که برای ارزیابی عملکرد مواد حافظه‌دار شکلی مورد محاسبه قرار می‌گیرند. نسبت بازیابی شکل، توانایی بازیابی شکل اولیه را توصیف می‌کند. این در حالی

الکتریسیته، رطوبت و مغناطیس می‌تواند به‌عنوان یک محرک در ساختار پلیمرهای حافظه‌دار شکلی برای تحریک اثر مواد حافظه‌دار کار کند. اثر مواد حافظه‌دار شکلی در پلیمرهای حافظه‌دار شکلی متأثر از حرارت است که به‌وسیله حرارت به‌طور مستقیم از یک محیط مانند آب داغ و گاز داغ ایجاد می‌شود[28].

بعضی از پلیمرهای حافظه‌دار، هنگامی که در معرض نور فرابنفش قرار داده می‌شوند، قادر به تولید پیکربندی موقت جدید هستند. شکل اولیه ماده را در دمای محیط در طول موج‌های مختلف UV می‌توان بازیابی کرد[29] (شکل ۱۴).



شکل ۱۴) محرک‌ها و واکنش حاصل‌شده با تغییر ابعاد[27]

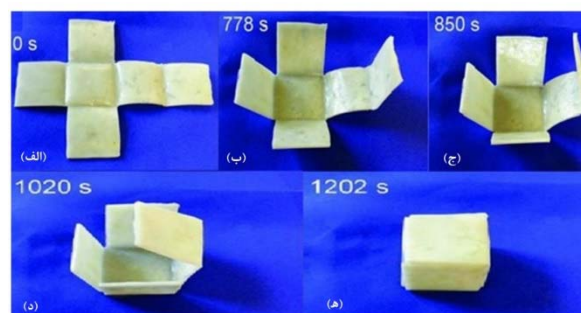
پلیمرهای فعال الکتریکی می‌توانند شکل و اندازه خود را به‌طور قابل توجهی در میدان الکتریکی تغییر دهند. ژل‌باکی، کامپوزیت‌های فلز-پلیمری-یونی نمونه‌ای از انواع پلیمرهای فعال الکتریکی هستند[30]. ساختارهای چاپی ۳ بعدی این پلیمرها در آینده نزدیک به‌طور قابل توجهی کاربرد خواهند داشت. ژل‌باکی به‌دلیل رفتار هوشمندانه خود، یکی از جدیدترین پلیمرهای فعال الکتریکی یونی است. ژل‌باکی‌ها شامل سه لایه هستند: لایه میانی یک الکترولیت است که ترکیبی از پلیمر و مایع یونی است. هر دو طرف این مایع توسط مواد پایه الکترولیت محصور شده است که شامل نانولوله‌های کربنی است[31]. ژل‌باکی در اثر اعمال ولتاژ بر روی الکترودها خم می‌شود.

انعطاف‌پذیری در پلیمرها به‌طور گسترده‌ای هنگامی که تحت تأثیر محرک شیمیایی قرار می‌گیرند، مشاهده می‌شود. مکانیزم‌ها برای پلیمرهای واکنش‌دهنده به محرک شیمیایی در مواد واکنش‌دهنده به محرک شیمیایی، واکنش‌هایی نظیر نرم‌شدن، حل‌شدن و تورم است. هیدروژل‌ها و ژل‌ها به‌طور گسترده‌ای برای اثر مواد حافظه‌دار شکلی همانند مواد حافظه‌دار واکنش‌دهنده به محرک شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند[32].

مواد حافظه‌دار کامپوزیتی با حداقل یک ماده حافظه‌دار آلیاژی یا پلیمرهای حافظه‌دار تشکیل شده است[33]. کامپوزیت‌های شیشه‌ای فلزی حافظه‌دار حجمی به‌عنوان نمونه‌هایی از کامپوزیت‌های حافظه‌دار هستند[34]. همان‌طور که در شکل ۱۵

ناشی از گرانش‌های گوناگون مغناطیسی در انواع دوقلوهای به یکدیگر وابسته است[24]. انرژی تولیدشده توسط میدان مغناطیسی بسیار بالاتر از انرژی ناشی از انتقال حرارت است. افزایش خاصیت مغناطیسی موجب افزایش فرکانس تحریک می‌شود[25]. لازم به‌ذکر است که اثر میدان مغناطیسی در آلیاژهای حافظه‌دار به‌خوبی عمل می‌کند.

پلیمرهای حافظه‌دار دسته‌ای از مواد پلیمری هستند که می‌توانند برای حفظ یک پیکربندی از پیش تعیین‌شده و برنامه‌ریزی‌شده مورد استفاده قرار گیرند، به‌صورتی که ساختار هنگامی در معرض یک عامل خارجی قرار می‌گیرد، به حالت اولیه خود بازگردانده شود[25]. پلیمرهای حافظه‌دار، مواد هوشمندی هستند که می‌توانند سه شکل را حفظ کنند و توسط گرما، نور و میدان مغناطیسی فعال شوند. مکانیزم بازیابی شکل بستگی به دمای انتقالی یک پلیمر حافظه‌دار خاص دارد که کاملاً نسبت به آلیاژهای حافظه‌دار متفاوت است. دمای انتقالی دمای پایینی است و لحظه‌ای است که مولکول‌ها در حالت انتقالی نسبتاً تعداد کمی هستند. تمام اثر مواد حافظه‌دار را می‌توان در پلیمرهای حافظه‌دار زمانی که توسط حرارتی تحریک شده‌اند، مشاهده نمود (شکل ۱۳).



شکل ۱۳) شروع سری زمانی هنگامی که یک مکعب پلیمری حافظه‌دار با یک چراغ فروسرخ حرارت داده می‌شود؛ سری الف تا ه در ۲۰ ثانیه[24]

پلیمرهای حافظه‌دار شکلی به دسته‌های گرماترم و گرماسخت طبقه‌بندی می‌شوند[26]. هر دو دسته پلیمرهای حافظه‌دار از لحاظ پیوند شیمیایی و فیزیکی در بیش از بیست نوع مختلف سنتز شده‌اند.

توانایی تولید ساده، وزن سبک، بازیابی نسبتاً بالای کرنش، از مزایای مهم پلیمرهای حافظه‌دار شکلی است. قابلیت تغییر شکل بهینه‌شده، می‌تواند در برنامه‌های گسترده‌ای همانند پزشکی و ربات‌های نرم مورد استفاده قرار گیرد[27]. بازیابی ضعیف و خواص مکانیکی پایین، آنها را برای بسیاری از کاربردهای مکانیکی نامناسب می‌سازند. برای غلبه بر کاستی‌های این مواد، تلاش‌های بسیاری در قالب کامپوزیت‌های حافظه‌دار انجام شده است. شکل بازیابی اولیه به‌طور کامل به قابلیت‌های مواد بستگی دارد و همچنین استفاده از یک محرک خاص در یک حوزه زمانی مشخص از جمله چالش‌های پیش روی این مواد است. گرما، نور،

کامپوزیت حافظه‌دار ضد فروالکتریک قبلی را با سرعت واکنش سریع ۲/۵ میلی‌ثانیه بهبود بخشید. میدان الکتریکی ناشی از انتقال فاز برای بسیاری از کاربردهای تحریک هوشمند امکان‌پذیر است [42].

۳-۳- مزایای پلیمرهای حافظه‌دار نسبت به آلیاژهای حافظه‌دار

پلیمرهای حافظه‌دار، دارای چگالی کمتری نسبت به آلیاژهای حافظه‌دار هستند که منجر به ساختار با وزن سبک می‌شود و می‌تواند در صنعت هوافضا و خودروسازی استفاده شود [43]. هزینه مواد اولیه و ساخت پلیمرهای حافظه‌دار بسیار پایین‌تر از هزینه تولید آلیاژهای حافظه‌دار است [44]. در سیستم‌های تولید، شکل پیچیده با مزایایی که پلیمرهای حافظه‌دار هستند، می‌توانند به راحتی با دقت ابعادی و کیفیت بالا تولید شوند [45]. پلیمرهای حافظه‌دار و هیدروژل‌های حافظه‌دار به عنوان مناسب‌ترین مواد ورودی در فرآیند چاپ ۴ بعدی تلقی می‌شوند [46]. در هیدروژل‌هایی که در فرآیند چاپ ۴ بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند، هیدروژل با یک پلیمر جذب می‌شود. هنگامی که ساختار چاپ‌شده در یک حلال غوطه‌ور می‌شود، هیدروژل متورم شده و منجر به تغییر شکل کلی ساختار می‌شود [47]. استحکام هیدروژل‌ها کم است و سختی نیز نسبتاً پایین است. در کامپوزیتی که در آن ژل نرم با پلیمرهای حافظه‌دار ترکیب می‌شود، می‌تواند این اثرات زیان‌آور را به طور موثری کاهش دهد [48].

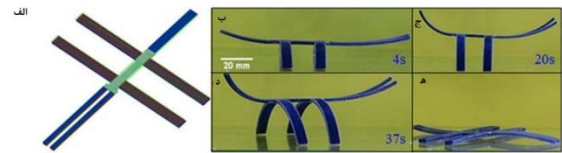
۴- ویژگی‌های فرآیند چاپ ۴ بعدی

۴-۱- اصول فرآیند چاپ ۴ بعدی

ساخت افزایشی از مواد هوشمند و تحت تاثیر محیط و زمان به عنوان فرآیند چاپ ۴ بعدی نامیده می‌شود. تربیت اسکالیر، مدیر آزمایشگاه ساخت افزایشی دانشگاه MIT، چاپ ۴ بعدی را، فرآیند چاپ مواد چندگانه تعریف نمود. در این ساختار چاپی، توانایی تغییر شکل مستقل در طول زمان مورد بحث است [49]. در انجمن آتلانتیک ایالات متحده آمریکا، چاپ ۴ بعدی به عنوان نوعی از چاپ ۳ بعدی از ساختارهای هوشمند تعریف شده است که قابلیت این را دارد تا هنگامی که تحت یک محرک از پیش تعیین شده از جمله گرما، جریان الکتریکی، فشار اسمزی، اشعه فرابنفش یا محرکی دیگر را تجربه نماید، به آن محرک‌ها با توجه به نوع محرک پاسخ دهد [50]. تغییر شکل پس از ساخت، یکی از ویژگی‌های بنیادین قطعات چاپی ۴ بعدی است. تغییر در تنظیمات و ویژگی‌های تحت تاثیر محرک‌های خارجی مختلف می‌تواند برای ایجاد انبساط، جمع شدن و تاشدن قطعات چاپ‌شده مورد استفاده قرار گرفته شود [51].

قطعات ۴ بعدی چاپ‌شده از ساخت افزایشی، یک یا ترکیبی از چند ماده هوشمند هستند که می‌توانند در طی یک زمان مشخص واکنشی را داشته باشند [47]. تفاوت در خواص مواد مانند انبساط حرارتی، انقباض، فشردن و غیره منجر به تغییر شکل ساختار خواهد شد. بنابراین، چاپ ۳ بعدی بخشی جدایی‌ناپذیر از چاپ

نشان داده شده است، با توجه به دمای انتقال مختلف ماده زمینه و دو الیاف، کامپوزیت‌ها می‌توانند سه شکل موقت را تحمل کنند و شکل اولیه از طریق حرارت بالاتر از دمای انتقال بازایی می‌شود [35].



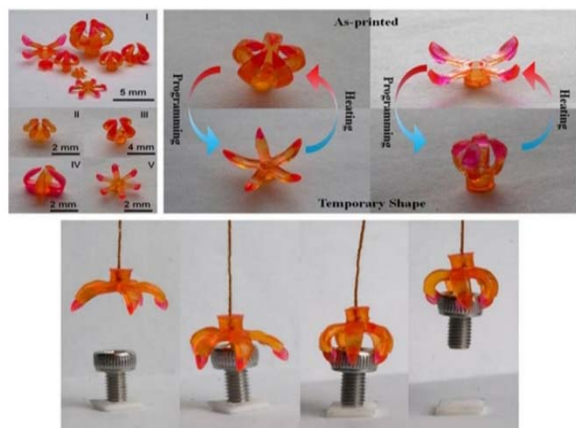
شکل ۱۵) اثر مواد حافظه‌دار شکلی [34]

مفهوم کامپوزیت‌های فعال چاپی که با الیاف پلیمرهای حافظه‌دار در زمینه‌ای الاستومری تقویت شده بود، در سال ۲۰۱۳ گزارش شد [36]. کامپوزیت‌های فعال پلیمری کامپوزیت‌های نسبتاً نرمی هستند که از الیاف پلیمری شیشه‌ای تقویت‌کننده ماده زمینه الاستومری تشکیل شده‌اند که تاثیر مواد حافظه‌دار را نشان می‌دهند. در این کامپوزیت‌ها، الیاف پلیمری شیشه‌ای به عنوان یک عضو در تغییر شکل از فرم اولیه به فرم بعدی عمل می‌کنند. مواد حافظه‌دار کامپوزیتی پلیمری به طور گسترده‌ای در لباس‌های ورزشی و عمل‌های کاشت در دندان پزشکی و پزشکی (استنت‌های قلبی عروقی) مورد استفاده قرار می‌گیرند [37].

هیدروژل‌ها در فرآیند چاپ ۳ بعدی به دلیل ویژگی‌های فوق‌العاده‌ای مانند واکنش دینامیکی، انبساط در آب در کاربردهای پزشکی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند [38]. موادی که دارای زمینه هیدروژلی هوشمند و محتوی آب هستند برای واکنش به عوامل مختلف محیطی مانند نور، pH، دما، استحکام یونی، میدان مغناطیسی و الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [39]. ساخت افزایشی هیدروژل‌های هوشمند، یک نمونه جدید معرفی شده در ساخت مواد سازگار با محیط و بافت‌ها است که از دستاوردهای فرآیند چاپ ۳ بعدی است. هیدروژل واکنش‌دهنده pH نسبت به تغییرات pH محیطی واکنش نشان می‌دهد [40]. هیدروژل‌های هوشمند دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند که می‌توانند از اثر ماده حافظه‌دار شکلی خودتبدیل‌شونده استفاده کنند. این ویژگی برای چاپ ۳ بعدی مواد سازگار با محیط و بافت می‌تواند مناسب باشد [40].

اثرات موجود در مواد حافظه شکلی موجود در سرامیک‌ها در دانشگاه MIT با هدف مبتنی بر گزارشی از سرامیک‌های حافظه‌دار شکلی در سال ۲۰۱۳ به ثبت رسیده است [41]. سرامیک حافظه‌دار، تحت تاثیر یک انتقال مارتنزیتی می‌شود که در آن ریزساختار از تتراگونال به ساختار اتمی مونوکلینیک تغییر می‌کند. سرامیک بر پایه زیرکونات تایتانات $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (Zirconate Titanate Pb(Zr, Ti)O3)، رفتار مواد حافظه‌دار ایزوتروپیک حجمی قابل توجهی را نشان داد که به عنوان کامپوزیت حافظه‌دار ضد فروالکتریک نامیده می‌شود. کاربرد میدان الکتریکی معکوس این است که می‌تواند فاز

ساختارهای خودتکامل و خودمونتاژی اجزاء، روش‌های مناسبی برای ساخت ساختار هوشمند و پیچیده هستند [61]. شرایط دیگری برای فرآیند چاپ ۴بعدی نیز در نظر گرفته شده است و ممکن است که دقیقاً برای به‌دست‌آوردن ابعاد هندسی روی اجزاء منفرد باشد که در روش خودمونتاژی مورد استفاده قرار می‌گیرد [49]. تغییر در برخی از خواص فیزیکی نیز می‌تواند در روش چاپ، موثر باشد؛ مانند نسبت تورم و ضریب انبساط حرارتی در ساختار قطعه‌ای که مورد ساخت است. اگر لایه دارای قابلیت انبساط حرارتی متفاوت باشد، لایه‌ها در صورت قرارگرفتن در معرض حرارت، تمایل به خم‌شدن را دارند. تکنولوژی چاپ ۴بعدی با ترکیبی بسیار جالب از علم و فناوری و تنوعی گسترده‌ای از مواد جدید روبه‌رو شده است. تکنولوژی جدید و در حال ظهور چاپ ۴بعدی، صنعت را به ساخت دستگاه‌های هوشمند با قابلیت‌های پیشرفته در طول زمان سوق می‌دهد [49] (شکل ۱۷).



شکل ۱۷) مواد چندگانه چاپ‌شده توسط چاپ ۴بعدی با گیرنده SMP که با محرک گرما کار می‌کند [48]

مکانیزم‌های مهندسی می‌توانند با انواع مواد مختلف و مدل‌سازی ریاضی از طریق چاپ ۴بعدی توسعه یابند. تفاوت فرآیند چاپ ۴بعدی مواد منفرد و موادی که از چند جزء تشکیل شده‌اند در مقدار تغییراتی است که در ساختار وجود دارد است. مواد منفردی که توسط چاپ ۴بعدی ساخته شده‌اند، مقدار کمی تحریک می‌شوند. درجه تغییر عاملی است که مشخص‌کننده این است که یک جزء از ماده به محض فعال‌شدن، شکل چگونه تغییر می‌کند. تغییرات در قطعات به‌ویژه شکل و تغییر ساختاری در چاپ ۴بعدی مواد چندجزئی، به‌صورت جدا از هم ارزیابی می‌شوند. خم‌شدن، فشردگی، کشش، پیچش همراه با پیچیدگی طراحی اولیه این قطعات ضروری است [62] (شکل ۱۸).

۴-۳- برگشت‌پذیری در چاپ ۴بعدی

چاپ ۴بعدی با طراحی پیشرفته در فرآیند چاپ ۳بعدی و اعمال اثر مواد حافظه‌دار شکلی مورد بررسی قرار گرفته شده است [63]. در چاپ ۴بعدی، پردازش مواد طبق الگویی که از پیش تعریف شده است، اقداماتی جهت ساخت نمونه صورت می‌گیرد؛ یعنی،

۴بعدی است. چاپگرهای ۳بعدی با استفاده از الگوهایی که در کامپیوتر طراحی می‌شود، به روش لایه به لایه، ماده را روی بستری چاپ می‌نماید تا یک قطعه با موادی مانند پلیمر، سرامیک و فلز ساخته شود.

محرک‌ها برای راه‌اندازی خواص و شکل ساختارهای چاپ‌شده، بنیادی هستند. در چاپ ۴بعدی، دانشمندان تعدادی محرک را برای تحریک قطعات چاپ‌شده استفاده کرده‌اند. این محرک‌ها شامل آب [52]، حرارت [53]، ترکیب گرما و نور [54] و ادغام آب و دما [55] هستند. محرک رطوبت در چاپ ۳بعدی توسط موسسه طراحی محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته شده است [56] (شکل ۱۶).



شکل ۱۶) بسته‌شدن دهانه در چاپ ۳بعدی (الف) و گشوده‌شدن آن (ب) به‌ترتیب در رطوبت نسبی بالا و پایین [55]

مواد هوشمند و طراحی هندسی بهینه، مهم‌ترین فاکتورهای هستند که در چاپ ۴بعدی مورد اهمیت هستند. دسته‌بندی مواد بایستی به‌صورت کامل و مشخص انجام گیرد؛ به این صورت که موادی با قابلیت‌های مواد حافظه‌دار شکلی هوشمند و قابلیت خودتبدیل‌شونده و چندمنظوره مورد بحث قرار گرفته شود. طراحی نیز در چاپ، تاثیر قابل توجهی بر ظرفیت مواد حافظه‌دار دارد؛ بنابراین طراحی مطلوب برای بازیابی شکل نیز لازم است. جن و همکاران، بیان دارند که واکنش می‌تواند دقیقاً از طریق ضخامت ساختار چاپ‌شده کنترل شود که آنها یک روش مبتنی بر طراحی بهینه برای بهبود شکل در تحقیقاتشان ارائه داده‌اند [57].

مدل‌سازی ریاضی برای طراحی و توزیع مواد در ساختار، بسیار مورد نیاز است. فرآیند چاپ ۴بعدی بر اساس ترتیب در توزیع مواد فعال و غیرفعال که برای دستیابی به رفتار مطلوب مورد نیاز است، عمل می‌کند. در ساختار چاپی ۴بعدی، دو یا سه حالت پایدار وجود دارد و کل ساختار هنگامی که تحت محرک خاص قرار می‌گیرد، ممکن است حالت خود را تغییر دهد [58]. مدل‌سازی ریاضی در چاپ ۴بعدی از عناصر بنیادین است و به سه دلیل می‌توان به این موضوع پرداخت؛ مورد اول پیش‌بینی تغییر شکل وابسته به زمان قطعه است. مورد دوم پیشگیری از سایش بین قطعات هنگام مونتاژ قطعات است و مورد سوم کاهش آزمایش‌های متعدد برای جلوگیری از افزایش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در زمان ساخت است [59]. گاهی اوقات مکانیزم تعامل اثر نیز برای ایجاد یک حرکت خاص در ساختار چاپ‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرد [60].

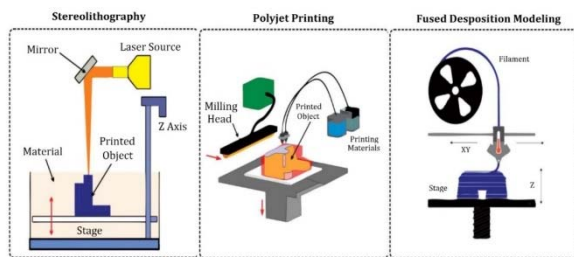
۴-۲- روش‌های چاپ

در چاپ ۴بعدی همچون دیگر فرآیندهای ساخت افزایشی، می‌توان از روش‌های متنوعی جهت ساخت قطعات بهره گرفت [61].

قرار گرفته و توسط چاپ ۴ بعدی ساخته شده است، قابل ذکر است [65].

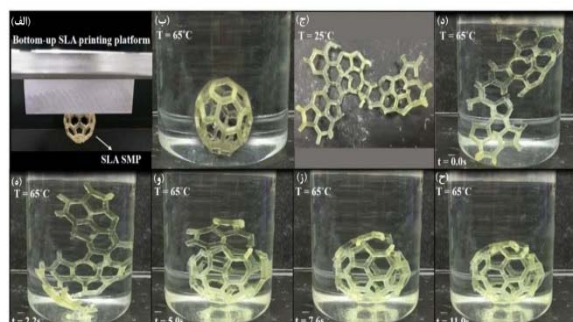
۴-۴-۴ مکانیزم چاپ ۴ بعدی

چاپ ماده از یک جزء یا چاپ موادی که از چند جزء تشکیل شده‌اند، از طریق چند تکنیک ساخت افزایشی صورت می‌پذیرد. این تکنیک‌ها شامل این موارد می‌شوند: تکنولوژی ذوب انتخابی، تکنولوژی پلی جت و تکنولوژی استریولیتوگرافی. انتخاب تکنیک‌های مناسب چاپ به‌طور عمده به یک ماده حافظه‌دار خاص و ساختار مورد نیاز بستگی دارد. مواد مختلف حافظه‌دار شکلی با تکنیک‌های فوق‌الذکر ساخته می‌شوند [65] (شکل ۲۰).



شکل ۲۰) سیستم‌های چاپ ۴ بعدی برای تولید مواد هوشمند با استفاده از تکنولوژی‌های ذوب انتخابی، پلی جت و استریولیتوگرافی [64]

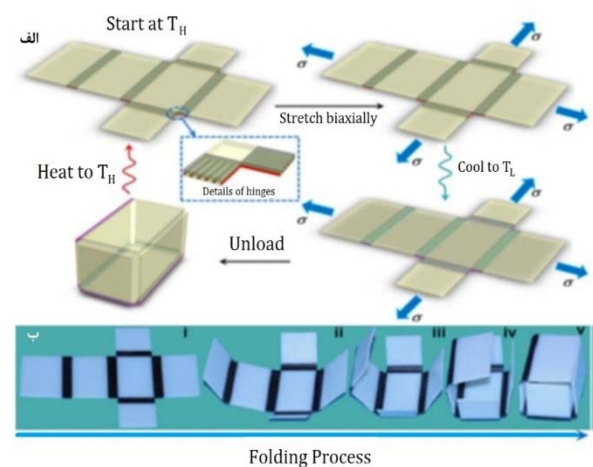
استریولیتوگرافی، به‌عنوان دشوارترین تکنیک در چاپ ۳ بعدی محسوب می‌شود، مخصوصاً هنگامی که پلیمرهای حافظه‌دار به‌صورت ساختاری تولید می‌شوند. این تکنولوژی توسط چوک هول در سال ۱۹۸۴ معرفی شد [66]. مکانیزم تکنولوژی استریولیتوگرافی بدین صورت است که اشعه فرابنفش بر سطح فوتوپلیمر مایع تابیده می‌شود. پلیمرها ترکیبی از مونومرها، فوتواینیاتورها (photoinitiators) و پلی‌اورتان هستند که به‌خوبی با یکدیگر ترکیب شده‌اند. پس از تابش اشعه و تبعیت از رفتار الگویی، جهت ایجاد ساختار صورت می‌گیرد. عملکرد مواد حافظه‌دار شکلی با بازیابی مجدد در این روش توسط چوئنگ و همکاران حاصل شد [51]. شبکه رزین فوتوپلیمر بر اساس یک مکانیزم تغییر فاز دو جزئی برای تشکیل یک پلیمر حافظه‌دار که قابل چاپ ۴ بعدی است، قابل استفاده است (شکل ۲۱).



شکل ۲۱) استریولیتوگرافی در چاپ حساس به حرارت SMP Buckminsterfullerene؛ از گشایش و بازیابی به الگوی چاپ اولیه که در مراحل مختلف (الف تا ح) در ۶۵ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است [51]

محصول به‌نحوی ساخته می‌شود که طبق الگویی از پیش تعریف‌شده در جهت‌های مختلفی اقدام به بازگشت شکل اولیه و شکل هدف نماید.

در این تحقیق، نشان داده شده است که در یک نمونه خاص، در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد ماده به حالت و شکل جمع‌شده و بسته قرار می‌گیرد ولی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به شکل بازشده تبدیل می‌شود. از این کاربرد می‌توان در ساخت چترهایی استفاده نمود که در طول روز که دمای هوا افزایش پیدا می‌کند، به‌صورت خودبه‌خود باز باشند و مانع نور و حرارت آفتاب شوند؛ در حالی که در طول شب که دیگر نیازی به بازبودن آن نیست به شکل بسته جمع شوند (شکل ۱۹).



شکل ۱۸) جعبه خودتاشونده PACS و صفحات تاثیرپذیر از پلاستیک سخت متصل شده است؛ الف) شماتیکی از پروتکل ترمومکانیکی برای دستیابی به جعبه خودتاشونده و گشوده‌شدن آن و ب) وضعیت مسطح که با تاشدن جعبه بسته خواهد شد [61]



شکل ۱۹) مفهوم برگشت‌پذیری در دماهای مختلف در چاپ ۴ بعدی [64]

بدین صورت تعامل انسان در مرحله ساخت و برنامه‌نویسی جهت الگوهای حرکتی محصول خواهد بود و پس از آن (پس از ساخت محصول)، بدون دخالت انسان، محصول مورد نظر طبق این الگوها، عمل‌ها و عکس‌العمل‌های تعریف‌شده را برای بازگشت به شکل اولیه یا شکل هدف در شرایط مختلف را خواهد داشت. باید توجه داشت که چرخه استفاده مجدد از سازه‌های چاپ ۴ بعدی در آینده به‌ویژه برای کاربردهای صنعتی امکان‌پذیر است. پلیمرهای حافظه‌دار دارای قابلیت بالایی در برگشت‌پذیری چاپ ۴ بعدی هستند [64]. برای مثال، امکان برگشت‌پذیری و تغییر شکل ساختار هیبرید هیدروژل با در نظر گرفتن خواص موادی که مورد استفاده

چاپگر پلیمر ۳ بعدی در نسخه آمریکایی دستگاه میکروبوت (MakerBot) برای ساخت صفحات کامپوزیتی با الیاف پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرد [67].

مدل‌سازی ذوب انتخابی با استفاده از تکنیک ساخت افزایشی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این چاپگرها از الیاف گرمانرم (قابل ارتجاع در برابر حرارت) استفاده می‌شود. بدین صورت که به الیاف تا نقطه ذوب حرارت داده می‌شود و سپس به‌صورت لایه به لایه برای ساخت یک قطعه، عملیات ساخت صورت می‌گیرد [68]. در سال ۲۰۱۵، یک سیستم چاپ ۳ بعدی که قابلیت پاشش چندجزئی را دارد با هزینه کم و دقت بالا برای ساخت چاپ ۴ بعدی پیشنهاد شده است [69]. مفهوم پاشش چندجزئی بدان معنا است که دستگاه توانایی پاشش چند نوع ماده مختلف را همزمان دارد و مواد هوشمند متنوعی را با توجه به نیاز و تقاضا برای تولید قطعات، چاپ می‌نماید. بدین صورت، قطعه توانایی این را دارد که عکس‌العمل خاصی را با توجه به طراحی‌های قبلی طراحان، از خود نشان دهد و در هر ناحیه خاصی از قطعه ماده مختلفی پاشیده شود. در تحقیق آمورن و همکاران یک بانک مواد هوشمند برای ساخت قطعات چندجزئی در نظر گرفته شده است [69]. در این سیستم ماده از طریق یک نازل در جایی که لایه به لایه حرارت داده می‌شود، حرکت داده شده است و سپس به‌صورت پس از ذوب، رسوبی را بر جای مورد نظر قرار می‌دهد. نازل می‌تواند به‌صورت افقی حرکت کند و پس از اینکه هر لایه جدید را تولید نمود، یک پله به بالا یا پایین حرکت نماید، یعنی علاوه بر حرکت افقی، توانایی حرکت قائم را در ساخت محصول نیز داشته باشد. این عمل کمک شایانی به الگوسازی هدفمند می‌کند. یکی از اهداف مهمی که در ساخت ۴ بعدی وجود دارد، شکلی و هدفمند بودن در حرکت محصول پس از محرک‌های محیط است. با این روش ساخت می‌توان تدابیری اندیشید که محصول پس از تحریک به جهت‌های خاصی حرکت کند [70]. مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده یا تکنولوژی ذوب انتخابی، در آینده برای ساخت افزایشی پلیمرهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. زیرا مواد با استحکام بالا و هدایت الکتریکی، همانند گرافن، هنگامی که با پلیمر حافظه‌دار شکلی ترکیب می‌شوند، بسیار موثر و کاربردی خواهند بود. گرافن یک لایه تک‌اتمی از اتم‌های کربن است که در یک شبکه شش وجهی قرار گرفته است. این مفهوم در ژانویه ۲۰۱۴ توسط آزمایشگاه گرافن ۳ بعدی ثبت شد [71].

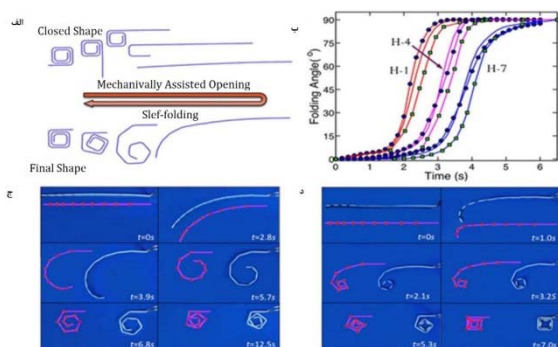
تکنولوژی پلی جت برای فرآیند چاپ ۴ بعدی مواد چندجزئی امکان‌پذیر است. نسخه چاپی ۳ بعدی پلی جت با رابط طراحی‌شده به کمک رایانه کاملاً شبیه به چاپ چاپگرهای جوهرافشان معمولی است. چاپگرهای پلی جت، مایع پلیمر را به‌صورت لایه‌ای ذخیره می‌کنند. تکنولوژی پیشرفته پلی جت می‌تواند مایع ماده چندجزئی را برای ساخت اجزاء ساخته‌شده از مواد مختلف ذخیره کند. کامپوزیت‌های مواد حافظه‌دار چندشکلی مدل حشره که از محصول چاپ‌شده به‌صورت ۴ بعدی است، توسط آبجکت ۲۶۰

(Object 260) ساخته شده است که یک چاپگر ۳ بعدی است و به‌صورت ساخت افزایشی تولید شده است [35]. مفهوم چاپ ۴ بعدی در ساخت افزایشی این تحقیق بدین صورت نمود پیدا می‌کند که با توجه به قابلیت‌های منحصربه‌فرد، قطعات در شرایط مختلف، واکنش‌های متنوعی را از خود نشان دهد. برای مثال، اگر یک کامپوزیت که در ۲ سوی آن الیاف متنوعی قرار گرفته شده باشد، توانایی این را دارد که در یک محیط، ۲ واکنش مختلفی را از خود بروز دهد که با افزایش گرما به یک سمت خاص و با کاهش دما به سمت دیگر تمایل خم‌شدن را داشته باشد. تکنولوژی پلی جت مربوط به کاربردهایی است که در آن دقت، درستی، سطح نهایی، سازه‌های مشکل و پیچیده در چاپ ۴ بعدی مورد اهمیت باشد. آزمایشگاه ساخت افزایشی دانشگاه MIT با شرکت‌های طراحی همانند استراتسیز (Stratasys) و اوتودسک (Autodesk) برای ایجاد یک راه حل کاربردی در مدل‌سازی و شبیه‌سازی تکنیک چاپ جدید برای سازه‌های هوشمند در حال همکاری است [35].

۵- چالش‌های محاسباتی در چاپ ۴ بعدی

۵-۱- مدل‌سازی و شبیه‌سازی چاپ ۴ بعدی

مدل‌سازی فرآیندهای مختلف و همچنین شبیه‌سازی این فرآیندها بخش جدایی‌ناپذیر از هر طراحی مهندسی شده است. برنامه‌های مدل‌سازی برای ساخت افزایشی به‌طور قابل توجهی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای یک مدل‌سازی دقیق و منظم، بایستی درکی عمیقی نسبت به رفتار مواد مورد استفاده در فرآیند را فراهم نمود. شبیه‌سازی فرآیند چاپ ۴ بعدی اخیراً توسط برنامه‌های اجزاء محدود همچون آباکوس مورد توجه بسیاری از محققان در این حیطه قرار گرفته است (شکل ۲۲).



شکل ۲۲ الف و ب: شبیه‌سازی آباکوس نوار بازیابی خودتاشونده که به دمای بالا و برنامه‌ریزی‌شده فعال شده است، ج و د: فرآیند تاشدن بعد از بخش مارپیچی با خواص مختلف مواد در بخش‌های مختلف مفصلی [45]

با استفاده از برنامه‌های تحلیلی و شبیه‌سازی می‌توان عوامل مختلفی را در تحلیل‌های خواص مکانیکی محصول ساخته‌شده توسط چاپ ۴ بعدی، مورد ارزیابی قرار داد. برای مثال، با استفاده از برنامه‌های تحلیلی مقدار نیروهای واردشده به هر قسمت از اعضای محصول ساخته‌شده توسط چاپ ۴ بعدی که تحت فشار

محیط، محصول به خود می‌گیرد را در نرم‌افزار رسم می‌نمایند. با این کار می‌توان برای عرضه محصول و همچنین به‌تصویر کشیدن آن (قبل و بعد از تغییر)، مدل انتضاعی را عرضه نمود^[74] (شکل ۲۴).



شکل ۲۴) چاپ ۳ بعدی پاشنه متصل‌شده به کفش^[72]

۵-۲- فرمت فایل‌های طراحی‌شده به کمک رایانه (CAD)

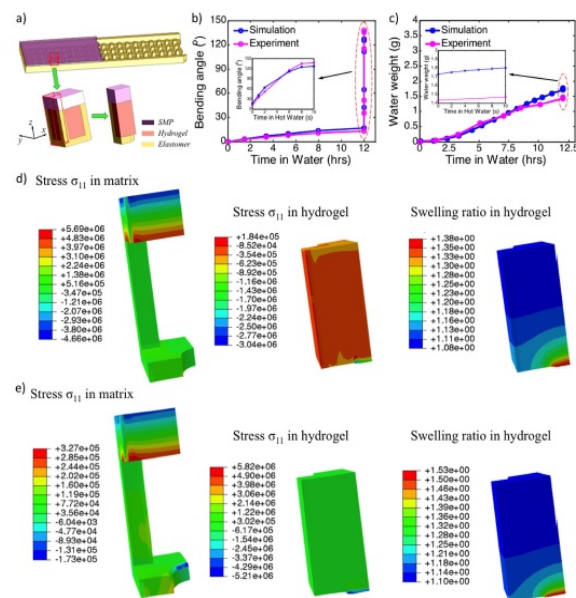
سیستم CAD، داده‌های ورودی را به فرمت STL تبدیل می‌کند و دستورالعمل‌های چاپ را به چاپگرها ارسال می‌نماید. فرمت STL تنها قطعات همگنی را نشان می‌دهد که ممکن است جنبه‌های دیگر مواد را به‌خوبی پوشش ندهد^[75]. اغلب چاپگرهای ساخت افزایشی تجاری با فرمت فایل STL سازگاری دارند. گرچه مشکلی که در این چاپگرها وجود دارد این است که قادر به نمایش تمامی اطلاعات مواد و پردازش آن نیستند. اخیراً فرمت‌های ساخت افزایشی AMF و MF3 طراحی شده است که برای غلبه بر ضعف‌هایی که در فرمت STL وجود دارند مورد کاربری قرار گرفته‌اند. این فرمت‌ها می‌توانند فایل‌های کوچکی را تولید کنند و منحنی‌های پیچیده را پیکربندی کنند و سطح مواد پیچیده را نیز نمایش دهند. AMF و MF3 بر اساس فرمت XML قابل گسترش هستند^[76]. این نکته قابل بیان است که در آینده با توجه به گسترش مواد و پیچیدگی‌های طراحی، فرمت‌های جدید برای چاپ ۴ بعدی نیاز است. در نظر گرفتن تمام نیازهای تولید از جمله هندسه، چگونگی فرآیند، جهت‌گیری قطعات، مسیر حرکت ابزار و تolerانس‌های موجود برای رسیدن به یک چاپ دقیق و بهینه ضروری است که بهتر است همگی این قیدها در یک فایل واحد قرار گرفته شوند.

۵-۳- توسعه نرم‌افزارها در چاپ ۴ بعدی

نرم‌افزار شبیه‌سازی چاپ ۴ بعدی پروجکت سیبورگ (Project Cyborg) در آزمایشگاه ساخت افزایشی دانشگاه MIT در حال تحقیق و توسعه است. هدف در نرم‌افزار سیبورگ، تولید برنامه‌ای متشکل از چند قسمت مجزا برای ایجاد شکل‌هایی با ابعاد متنوع است^[77]. یکی دیگر از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی چاپ ۴ بعدی به نام مدلر (Modeller) است که توسط موسسه علم و فناوری کره جنوبی طراحی شده است^[78]. روند تحقیق در توسعه نرم‌افزار چاپ ۴ بعدی مقداری پیچیده است؛ زیرا این تکنولوژی کامل نشده است و چالش‌های متنوعی را برای مهندسان و طراحان ایجاد می‌کند. اکنون، تمرکز بر شبیه‌سازی مواد حافظه‌دار شکلی است که بتواند به محققانی که در حوزه چاپ ۴ بعدی در این حیطه فعالیت دارند کمک کند^[16].

وارد شده توسط محرک‌های محیطی است را مورد سنجش قرار داد. همچنین با شبیه‌سازی اعمال شار حرارتی توسط نرم‌افزار در منطقه به‌خصوصی از سازه ساخته‌شده توسط چاپ ۴ بعدی که محرک آن حرارت است، چگونگی واکنش‌ها در اجزاء ماده مورد بررسی قرار می‌گیرد. حد انعطاف، نقطه شکست، کشش اعضا از مواردی است که در سازه‌های ساخته‌شده توسط چاپ ۴ بعدی اهمیت بسیار زیادی دارد^[72].

ماکو و همکاران، با استفاده از برنامه اجزاء محدود آباکوس موفق به شبیه‌سازی چاپ ۴ بعدی شدند^[46]. همان‌طور که در شکل ۲۳ مشخص است، یک قطعه در دماهای مختلف عکس‌العمل‌های متنوعی را از خود بروز می‌دهد که توسط مدل اجزاء محدود این عکس‌العمل‌ها را می‌توان به تصویر کشید. در موسسه فناوری گرجستان با استفاده از نرم‌افزار کامسول (COMSOL) توانسته‌اند که ساختار تیرهای کامپوزیتی یکنواخت ساخته‌شده با مواد فلزی که توسط فرآیند چاپ ۴ بعدی تولید شده است را شبیه‌سازی نمایند^[67]. همچنین در تحقیقی از مازول‌های نرم‌افزار مولتی‌فیزیک کامسول برای شبیه‌سازی تغییر شکل‌های انجام‌شده هنگام چاپ ۴ بعدی در مواد حافظه‌دار شکلی در دانشگاه زوریخ آلمان انجام شده است^[73].



شکل ۲۳) مدل اجزاء محدود چرخه و فعال‌ساز آب؛ a: شماتیک مدل اجزاء محدود، b: زاویه خم شدن نوار که به‌عنوان تابعی از زمان در آب در نظر گرفته شده است؛ این صفحه نشان‌دهنده زاویه خم شدن نوار است (هنگامی که در آب گرم غوطه‌ور است)، c: نتایج شبیه‌سازی FEA از وزن آب درون هیدروژل که به‌عنوان تابعی از زمان در نظر گرفته شده است، d: عکس‌العمل در درجه حرارت پایین و e: عکس‌العمل در درجه حرارت بالا^[46]

همچنین طراحی‌های اولیه در خصوص فرآیند چاپ ۴ بعدی برای تولید کفش و اجسام دیگر توسط برنامه سالیدورک (Solid Works) انجام شده است. ابتدا طرح اولیه محصول در نرم‌افزار رسم می‌شود و سپس در طرح بعدی، حالتی که پس از تحریک

۶- کاربردهای چاپ ۴ بعدی

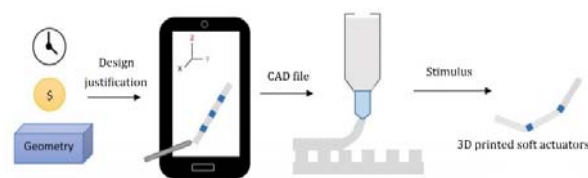
به علت مزایای متعدد در طراحی چاپ ۴ بعدی می‌توان این نتیجه را دریافت که این فرآیند نقش باورنکردنی در آینده‌ای نه‌چندان دور خواهد داشت [79]. از جمله این مزایا، ساختارهای چاپ‌شده را می‌توان به راحتی با کمترین هزینه و کاهش نیروی کار، حمل و نقل کرد [80]. قطعاتی که دارای قابلیت خودتحریک‌شوندگی را دارند با تولید به‌روش ساخت افزایشی، می‌تواند به محققان اجازه دهد که دستگاه‌های هوشمند متنوعی را بسازند. همچنین، استفاده از چاپ ۴ بعدی در زمینه‌های مختلف زیست‌پزشکی و الکترونیکی نیز جایگاهی می‌توانند داشته باشند [81]. ساخت محرک‌های نرم، شیرهای هوشمند و لباس‌های هوشمند نیز از کاربردهای دیگر این فناوری نوظهور است [82].

۶-۱- کاربرد چاپ ۴ بعدی در انرژی‌های تجدیدپذیر

اخیراً، فرآیند چاپ ۴ بعدی در زمینه انرژی تجدیدپذیر توسط مومنی و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است [83]. تفاوت هندسی گلبرگ‌های گل‌ها، الهام‌بخش فعالیت پژوهشی این محققان بوده است. آنها وسیله‌ای که جهت متمرکز کردن نور خورشید بود را توسط به‌کاربردن مواد هوشمند ساخته‌شده با فرآیند چاپ ۴ بعدی مورد استفاده قرار دادند که موجب افزایش جذب در میزان نور خورشید شد [84]. تیغه‌های توربین بادی چاپ‌شده توسط پرینتر چاپ ۴ بعدی مورد بررسی قرار گرفته شد. تیغه‌های توربین به‌صورت مجزا چاپ شده‌اند که پره‌های توربین عملکرد نسبتاً مناسبی داشتند [84].

۶-۲- کاربرد چاپ ۴ بعدی در اجزاء نرم رباتیک و پروتزها

تولید ربات‌های نرم به دلیل انعطاف‌پذیری، مورد اهمیت قرار گرفته‌اند. مواد شکلی و هیدروژل‌ها می‌توانند نقش مفیدی در توسعه اجزاء نرم ربات‌ها که قادر به انجام حرکات پیچیده هستند را داشته باشند. تمام ساختارهای چاپ ۴ بعدی نیاز به مواد و روش چاپ مناسب دارند؛ زیرا کنترل دقیق واکنش مکانیکی را هنگامی که با محرک درگیر می‌شوند، فراهم نماید (شکل ۲۵). محرک‌های نرم تولیدشده توسط این روش، امکان کاربردهای زیست‌پزشکی جدیدی را فراهم می‌کند. محرک نرم که در پروتز بدن انسان به کار می‌رود، می‌تواند یک زندگی سالم مجدد را در بزرگسالی تضمین کند [82].



شکل ۲۵) مکانیزم چاپ ۳ بعدی محرک‌های نرم در چاپ زیستی ۴ بعدی

۶-۳- کاربرد چاپ ۴ بعدی در بهداشت و درمان

چاپ ۴ بعدی در علوم زیستی با چاپ ۳ بعدی در این حیطه دارای تفاوت‌هایی است. زیرا اجزاء چاپ‌شده با گذشت زمان در یک

مسیر برنامه‌ریزی‌شده تکامل می‌یابند [85]. یک استنت قلب و عروق ساخته‌شده توسط چاپ ۴ بعدی، از واکنش گرماگیر مواد هوشمند بهره می‌برد که در تحقیقات انجام‌شده توسط جی و همکاران گزارش شده است [86]. تولید سنتی استنت‌ها به دلیل ویژگی‌های پیچیده هندسی، مشکلات خاصی دارند. یکی دیگر از کاربردهای چاپ ۴ بعدی در علوم زیستی در عمل‌های جراحی است [87]. به این صورت که استنت‌ها می‌توانند به شکل موقت، کمی تغییر شکل داده شوند و از طریق یک برش جراحی کوچک و پس از اصلاح و تغییر شکل اصلی خود از طریق محرک مایع یا حرارتی به بدن شخص وارد شوند. چاپ ۴ بعدی در علوم زیستی در حال ظهور و تکامل است که می‌تواند بسیاری از مشکلات در حال حاضر را در توسعه اندام‌ها حل نماید [88]. اندام‌های چاپ‌شده ۴ بعدی در آینده جایگزین اندام‌های معیوب انسان خواهند شد [89]. دریچه‌های قلب مانند اندام‌های بافت نرم می‌توانند از طریق سلول‌های فعال در فرآیند زیست چاپ ۴ بعدی، چاپ شوند [90].

۶-۴- کاربرد چاپ ۴ بعدی در لباس و مد

فرآیند چاپ ۴ بعدی در صنایع مد و جواهرات، انقلابی به وجود آورده است. در گذشته جنبه‌های طراحی در فرآیند چاپ ۳ بعدی مطرح بود. اما اکنون با در نظر گرفتن مواد که با چه شرایطی عمل کنند، تحقیقات انجام شده است. برای مثال پاشنه کفش دو حالت تخت و بلند نمایش داده می‌شود. این رویکرد زمانی به وقوع می‌انجامد که پاشنه کفش در معرض گرما باشد (شکل ۲۶). پلیمرهای حافظه‌دار شکلی در این پاشنه‌ها استفاده شده است، زیرا هر زمان مشتری بخواهد حالت پاشنه کفش خود را عوض می‌نماید. مشتری می‌تواند پاشنه را در مقابل دستگاه دست خشک‌کن یا سشوار قرار دهد و به‌فرم دل‌خواه آن را تبدیل نماید. مواد هوشمند می‌توانند در پارچه‌های چاپ‌شده ۴ بعدی برای اندازه استاندارد که با توجه به نوع شرایط تغییر رنگ دهند یا فرم خاصی را با توجه به دمای محیط حفظ نمایند، مورد استفاده قرار گیرند [75].

۷- نتیجه‌گیری

فرآیند چاپ ۴ بعدی از روش‌های ساخت و تولید مواد و اشیاء است که بر اساس تکنولوژی ساخت افزایشی گسترش داده شده است. در این مقاله به بررسی و معرفی عملکرد روش‌های ساخت افزایشی و بررسی مواد هوشمند در چاپ ۴ بعدی که می‌تواند نقش بسیار مهمی در فناوری‌های روز دنیا داشته باشد، پرداخته شده است. رویکردهای تجربی همراه با دانش تحلیلی و استفاده از نرم‌افزارهای مهندسی بسیار مهم است که به‌طور گسترده‌ای محققان در سراسر جهان آنها را مورد بررسی قرار می‌دهند. فرآیند چاپ ۴ بعدی، پیشرفت قابل توجهی در تکنولوژی ساخت افزایشی داشته است. در حقیقت، این روش افق‌های جدیدی را در تولید مواد به‌روزی صنعت و رشته‌های دیگر باز خواهد کرد. ترکیبی از هوشمندی مواد افزایشی و طراحی‌های بهینه، درهای زیادی را

ASTM International; 2013 [Unknown cited]. Available from:

<https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>

7- Mota R, Silva E, Lima F, Menezes L, Thiele ACS. 3D printed scaffolds as a new perspective for bone tissue regeneration: Literature review. *Materials Sciences and Applications*. 2016;7(8):430-452.

8- Moradi M, Meiabadi S, Kaplan A. 3D Printed parts with honeycomb internal pattern by fused deposition modelling, experimental characterization and production optimization. *Metals and Materials International*. 2019;25:1312-1325.

9- Bikas H, Stavropoulos P, Chrysosolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: A critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;83:389-405.

10- Chua CK, Wong CH, Yeong WY. Standards, quality control, and measurement sciences in 3D printing and additive manufacturing. 1st Edition. Amsterdam: Elsevier; 2017.

11- Moradi M, Karami Moghadam M, Shamsborhan M, Bodaghi M. The synergic effects of FDM 3D printing parameters on mechanical behaviors of bronze poly lactic acid composites. *Journal of Composites Science*. 2020;4(1):17.

12- Tan JH, Sing SL, Yeong WY. Microstructure modelling for metallic additive manufacturing: A review. *Virtual and Physical Prototyping*. 2019;15(1):87-105.

13- Casalino, G, Moradi M, Moghadam MK, Khorram A, Perulli P. Experimental and numerical study of AISI 4130 steel surface hardening by pulsed Nd:YAG laser. *Materials*. 2019;12(19):3136.

14- Leo DJ. Engineering analysis smart material systems. Hoboken: Wiley; 2007. pp.1-23.

15- Uchino K. Advanced Piezoelectric Materials. Sawston: Woodhead Publishing; 2010. P.p. 1-85.

16- Sun L, Huang WM, Ding Z, Zhao Y, Wang CC, Purnawali H, et al. Stimulus-responsive shape memory materials: A review. *Material & Design*. 2012;33:577-640.

17- Lang SB, Muensit S. Review of some lesser-known applications of piezoelectric and pyroelectric polymers. *Applied Physics A*. 2006;85:125-134.

18- Aissa B, Therriault D, Haddad E, Jamroz W. Self-healing materials systems: Overview of major approaches and recent developed technologies. *Advances Material Science and Engineering*. 2012;2012:Article ID 854203.

19- Muscat S, Stojceski F, Danani A. Elucidating the effect of static electric field on Amyloid Beta 1-42 supramolecular assembly. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*. 2020;96:107535.

20- Huang WM, Ding Z, Wang CC, Wei J, Zhao Y, Purnawali H. Shape memory materials. *Material Today*. 2010;13(7-8):54-61.

21- Zeng Z, Oliveira JP, Ao S, Zhang W, Cui J, Yan S, et al. Fabrication and characterization of a novel bionic manipulator using a laser processed NiTi shape memory alloy. *Optics & Laser Technology*. 2020;122:105876.

22- Otsuka K, Ren X. Recent developments in the research of shape memory alloys. *Intermetallics*. 1999;7(5):511-528.

23- Paul DI, McGehee W, O'Handley RC, Richard M. Ferromagnetic shape memory alloys: A theoretical approach. *Journal of Applied Physics*. 2007;101(12):123917.

به روی علوم پزشکی، صنعت هوا فضا، فضای مُد، انرژی‌های تجدیدپذیر، صنعت خودروسازی، محرک‌های ربات‌های نرم و بسیاری دیگر از علوم که از این تکنولوژی می‌تواند استفاده کند را باز نموده است. اثر مواد حافظه‌دار شکلی در مواد هوشمند از طریق روش‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. کاملاً مشخص است که فرآیند چاپ ءبعدی تا حد زیادی به توسعه بیشتر مواد هوشمند بستگی دارد و بایستی تمرکز اصلی در تحقیق فرآیندهای مورد نیاز صورت بپذیرد. بدون شک، در حال حاضر در دسترس بودن مواد هوشمند با کارایی بالا موجب پیشرفت چاپ ءبعدی می‌شود. با وجود توسعه مواد جدید، تحقیق در مورد استراتژی‌های چاپی برای وظایف و ساختارهای خاص نیز نیازمند به‌روزرسانی است. در مجموع استفاده بهینه از مواد با توجه به عملکرد آن ماده در زمان و شرایط خاص بسیار حائز اهمیت است که فرآیند چاپ ءبعدی دریچه‌ای به سوی این مهم است. بدون شک استفاده از این فرآیند در ساخت افزایشی مواد بسیار قابل استفاده است. تا اکنون در ایران استفاده از چاپ ءبعدی به دلیل جدید بودن این تکنولوژی مورد بهره‌برداری قرار گرفته نشده است که می‌تواند کاربردهای بسیار گسترده و متنوعی را داشته باشد.

تشکر و قدردانی: مورد از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان گواهی می‌کنند که این مقاله تا کنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است.

تعارض منافع: نویسندگان مقاله گواهی می‌کنند که در نگارش این مقاله هیچ تعارضی در منافع نویسندگان وجود ندارند.

سهم نویسندگان: محمود مرادی (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۴۰٪): مجتبی کرمی‌مقدم (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر نگارنده بحث (۳۰٪)، فاطمه عسگری (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی (۳۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع

- 1- Bodaghi M, Damanpack AR, Liao WH. Self-expanding/shrinking structures by 4D printing. *Smart Materials and Structures*. 2016;25(10):105034.
- 2- Forterre Y, Skotheim JM, Dumals J, Mahadevan L. How the Venus flytrap snaps. *Nature*. 2005;433:421-425.
- 3- Song K, Yeom E, Lee SJ. Real-time imaging of pulvinus bending in *Mimosa pudica*. *Scientific Reports*. 2014;4:6466.
- 4- Pei E. 4D Printing: Dawn of an emerging technology cycle. *Assembly Automation*. 2014;34(4):310-314.
- 5- Kwok TH, Wang CCL, Deng D. Four-dimensional printing for freeform surfaces: Design optimization of origami and kirigami structures. *Journal of Mechanical Design*. 2015;137(11):111413-111423.
- 6- ASTM. F2792-12a, Standard Terminology for additive manufacturing technologies [Internet]. Pennsylvania:

- applications. *Progress in Material Science*. 2011;56(7):1077-1135.
- 46- Mao Y, Ding Z, Yuan C, Ai S, Isakov M, Wu J, et al. 3D printed reversible shape changing components with stimuli responsive materials. *Scientific Reports*. 2016;6:24761.
- 47- Raviv D, Zhao W, McKnelly C, Papadopoulou A, Kadambi A, Shi B. Active printed materials for complex selfevolving deformations. *Scientific Reports*. 2014;4:7422.
- 48- Gladman AS, Matsumoto EA, Nuzzo RG, Mahadevan L, Lewis JA. Biomimetic 4D printing. *Nature Materials*. 2016;15:413-418.
- 49- Tibbits S. 4D printing: Multi-material shape change. *Architectural Design*. 2014;84(1):116-121.
- 50- Hoa SV, Cai X. Twisted composite structures made by 4D printing method. *Composite Structures*. 2020;238:111883.
- 51- Choong YYC, Maleksaeedi S, Eng H, Wei J, Su PC. 4D printing of high performance shape memory polymer using stereolithography. *Materials & Design*. 2017;126:219-225.
- 52- Yu K, Dunn ML, Qi HJ. Digital manufacture of shape changing components. *Extreme Mechanics Letters*. 2015;4:9-17.
- 53- Zhang Q, Zhang K, Hu G. Smart three-dimensional lightweight structure triggered from a thin composite sheet via 3D printing technique. *Scientific Reports*. 2016;6:22431.
- 54- Kuksenok O, Balazs AC. Stimuli-responsive behavior of composites integrating thermo-responsive gels with photo-responsive fibers. *Materials Horizons*. 2016;3:53-62.
- 55- Bakarich SE, Gorkin R, Panhuis MIH, Spinks GM. 4D printing with mechanically robust, thermally actuating hydrogels. *Macromolecular Rapid Communication*. 2015;36(12):1211-1217.
- 56- Zuluaga DC, Menges A. 3D printed hygroscopic programmable material systems. *Materials Research Society Proceeding*. 2015;1800:24-31.
- 57- Teoh JEM, Zhao Y, An J, Kai Chua C, Liu Y. Multi-stage responsive 4D printed smart structure through varying geometric thickness of shape memory polymer. *Smart Material Structure*. 2017;26(12):125001.
- 58- Zhou Y, Huang WM, Feng Kang S, Lian Wu X, Lu HB, Fu J, et al. From 3D to 4D printing: Approaches and typical applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;29:4281-4288.
- 59- Momeni F, Hassani SMM, Liu X, Ni J. A review of 4D printing. *Materials & Design*. 2017;122:42-79.
- 60- Lv H, Leng J, Liu Y, Du S. Shape-memory polymer in response to solution. *Advanced Engineering Materials*. 2008;10(6):592-595.
- 61- Tibbits S, Cheung K. Programmable materials for architectural assembly and automation. *Assembly Automation*. 2012;32(3):216-225.
- 62- Khoo ZX, Teoh JEM, Liu Y, Chua CK, Yang S, An J. 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping*. 2015;10(3):103-122.
- 63- Lee AY, An J, Chua CK. Two-Way 4D Printing: A review on the reversibility of 3D-printed shape memory materials. *Engineering*. 2017;3(5):663-674.
- 64- Naficy S, Gately R, Gorkin R, Xin H, Spinks GM. 4D printing of reversible shape morphing hydrogel structures. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2017;302(1):1600212.
- 24- Planes A, Mañosa L. Ferromagnetic shape-memory alloys. *Material Science Forum*. 2006;512:145-152.
- 25- Raasch J, Ivey M, Aldrich D, Nobes DS, Ayranci C. Characterization of polyurethane shape memory polymer processed by material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2015;8:132-141.
- 26- Miaudet P, Derré A, Maugey M, Zakri C, Piccione PM, Inoubli R, et al. Shape and temperature memory of nanocomposites with broadened glass transition. *Science*. 2007;318(5854):1294-1296.
- 27- Liu C, Qin H, Mather PT. Review of progress in shape-memory polymers. *Journal of Materials Chemistry*. 2007;17:1543-1558.
- 28- Langer R, Tirrell DA. Designing materials for biology and medicine. *Nature*. 2004;428:487-492.
- 29- Liu F, Urban MW. Recent advances and challenges in designing stimuli-responsive polymers. *Progress in Polymer Science*. 2010;35(1-2):3-23.
- 30- Lu F, Chen T, Xiang K, Wang Y. Ionic electro-active polymer actuator based on cobalt-containing nitrogen-doped carbon/conducting polymer soft electrode. *Polymer Testing*. 2020;84:106413.
- 31- Kruusamäe K, Mukai K, Sugino T, Asaka K. Impact of viscoelastic properties on bucky-gel actuator performance. *Journal of Intelligent Material Systems Structure*. 2014;25(18):2235-2245.
- 32- Osada Y, Matsuda A. Shape memory in hydrogels. *Nature*. 1995;376:219.
- 33- Tobushi H, Pieczyska E, Ejiri Y, Sakuragi T. Thermomechanical properties of shape-memory alloy and polymer and their composites. *Mechanics Advanced Material Structure*. 2009;16(3):236-247.
- 34- Hofmann DC. Shape memory bulk metallic glass composites. *Science*. 2010;329(5997):1294-1295.
- 35- Wu J, Yuan C, Ding Z, Isakov M, Mao Y, Wang T, et al. Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers. *Scientific Reports*. 2016;6:24224.
- 36- Ge Q, Qi HJ, Dunn ML. Active materials by four-dimension printing. *Applied Physics Letter*. 2013;103:131901.
- 37- Behl M, Razzaq MY, Lendlein A. Multifunctional shape-memory polymers. *Advance Material*. 2010;22(31):3388-3410.
- 38- Weiss RA, Izzo E, Mandelbaum S. New design of shape memory polymers: Mixtures of an elastomeric ionomer and low molar mass fatty acids and their salts. *Macromolecules*. 2008;41(9):2978-2980.
- 39- Dickey MD. Hydrogel composites: Shaped after print. *Nature Materials*. 2016;15:379-380.
- 40- Wang S, Lee JM, Yeong WY. Smart hydrogels for 3D bioprinting. *International Journal of Bioprinting*. 2015;1(1):3-14.
- 41- Bogue R. Smart materials: A review of capabilities and applications. *Assembly Automation*. 2014;34(1):16-22.
- 42- Uchino K. Antiferroelectric shape memory ceramics. *Actuators*. 2016;5(2):11.
- 43- Huang WM, Yang B, Fu YQ. Polyurethane shape memory polymers. Boca Raton: CRC Press; 2011.
- 44- Yang B, Huang WM, Li C, Chor JH. Effects of moisture on the glass transition temperature of polyurethane shape memory polymer filled with nano-carbon powder. *European Polymer Journal*. 2005;41(5):1123-1128.
- 45- Leng J, Lan X, Liu Y, Du S. Shape-memory polymers and their composites: Stimulus methods and

- Mechanical Sciences. 2020;173:105451.
- 78- Soltani A, Noroozi R, Bodaghi M, Zolfagharian A, Hedayati R. 3D printing on-water sports boards with bio-inspired core designs. *Polymers* 2020;12(1):250.
- 79- Chung S, Song SE, Cho YT. Effective software solutions for 4D printing: A review and proposal. *International Journal Precision Engineering Manufacturing-Green Technology*. 2017;4:359-371.
- 80- Felton SM, Tolley M, Shin B, Onal CD. Self-folding with shape memory composites. *Soft Matter*. 2013;9(32):1-7.
- 81- Ivanova O, Elliott A, Campbell T, Williams CB. Unclonable security features for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2014;1-4:24-31.
- 82- Zolfagharian A, Kouzani AZ, Khoo SY, AmiriMoghadam AA, Gibson I, Kaynak A. Evolution of 3D printed soft actuators. *Sensors Actuators A: Physical*. 2016;250:258-272.
- 83- Momeni F, Ni J. Nature-inspired smart solar concentrators by 4D printing. *Renew Energy*. 2018;122:35-44.
- 84- Momeni F, Sabzpoushan S, Valizadeh R, Morad MR, Liu X, Ni J. Plant leaf-mimetic smart wind turbine blades by 4D printing. *Renew Energy*. 2019;130:329-351.
- 85- An J, Chua CK, Mironov V. A perspective on 4D bioprinting. *International Journal Bioprinting*. 2016;2(1):3-5.
- 86- Ge Q, Sakhaei AH, Lee H, Dunn CK, Fang NX, Dunn ML. Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers. *Scientific Reports*. 2016;6:31110.
- 87- Kuribayashi K, Tsuchiya K, You Z, Tomus D, Umemoto M, Ito T. Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of Ni-rich TiNi shape memory alloy foil. *Materials Scientific Engineering: A*. 2006;419(1-2):131-137.
- 88- Mironov V. 4D Bioprinting: Biofabrication of rod-like and tubular tissue engineered constructs using programmable self-folding bioprinted biomaterials. *International Bioprinting Congress*, 24-25 July 2014, Biopolis, Singapore. Singapore: International Bioprinting Congress; 2014.
- 89- Morrison RJ, Hollister SJ, Niedner MF, Ghadimi Mahani M, Park AH, Mehta DK, et al. Mitigation of tracheobronchomalacia with 3D-printed personalized medical devices in pediatric patients. *Science Translational Medicine*. 2015;7(285):285ra64.
- 90- Ashammakhi N, Ahadian S, Zengjie F, Suthiwanich K, Lorestani F, Orive G, et al. Advances and future perspectives in 4D bioprinting. *Biotechnology Journal*. 2018;13(12):e1800148.
- 65- Miao S, Zhu W, Castro NJ, Nowicki M, Zhou X, Cui H, et al. 4D printing smart biomedical scaffolds with novel soybean oil epoxidized acrylate. *Scientific Reports*. 2016;6:27226.
- 66- Zhao T, Yu R, Li X, Chenga B, Zhang Y, Yang X, et al. 4D printing of shape memory polyurethane via stereolithography. *European Polymer Journal*. 2018;101:120-126.
- 67- Yang Y, Yuan W, Zhang X, Yuan Y, Wang C, Ye Y, et al. Overview on the applications of three-dimensional printing for rechargeable lithium-ion batteries. *Applied Energy*. 2020;257:114002.
- 68- Zhang Q, Yan D, Zhang K, Hu G. Pattern transformation of heat-shrinkable polymer by three-dimensional (3D) printing technique. *Scientific Reports*. 2015;5:8936.
- 69- Sitthi-amorn P, Ramos J, Yuwang W, Kwan J, Lan J, Wang w, et al. MultiFab: A machine vision assisted platform for multi-material 3D printing. *ACM Transactions Graphics*. 2015;34(4):1-11.
- 70- Boparai KS, Singh R, Singh H. Development of rapid tooling using fused deposition modeling: a review. *Rapid Prototyping Journal*. 2016;22(2):281-299.
- 71- Mirzaali MJ, de la Nava AH, Gunashekar D, Nouri-Goushki M, Veeger RP, Grossman Q, et al. Mechanics of bioinspired functionally graded soft-hard composites made by multi-material 3D printing. *Composite Structures*. 2020;237:111867.
- 72- Sossou G, Demoly F, Belkebir H, Jerry Qi H, Gomes S, Montavon G. Design for 4D printing: A voxel-based modeling and simulation of smart materials. *Materials & Design*. 2019;175:107798.
- 73- Kokkinis D, Schaffner M, Studart AR. Multimaterial magnetically assisted 3D printing of composite materials. *Nature Communication*. 2015;6:8643.
- 74- Zarek M, Layani M, Eliazar S, Mansour N, Cooperstein I, Shukrun E. 4D printing shape memory polymers for dynamic jewellery and fashionwear. *Virtual Physical Prototyping*. 2016;11(4):263-270.
- 75- Chiu WK, Yu KM. Direct digital manufacturing of three-dimensional functionally graded material objects. *Computer-Aided Design*. 2008;40(12):1080-1093.
- 76- Kontodina T, Tzetzis D, Davim JP, Kyratsis P. 5. Additive manufacturing for patient-specific medical use. In Paulo Davim J, editor. *Additive and Subtractive Manufacturing: Emergent Technologies*. Boston: De Gruyter; 2019.
- 77- Bodaghi M, Serjouei A, Zolfagharian A, Fotouhi M, Hafizur R, Durand D. Reversible energy absorbing meta-sandwiches by 4D FDM Printing. *International Journal of*