نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

دوره ۳۴، شماره ۵، شماره پیاپی۱۶۴، آذر و دی ۱۴۰۴، صفحه ۱۸-۳
ISSN: 1605-9719

DOI: https://doi.org/10.30506/mmep.2025.2059901.2237

پیشرفت های اخیر در روش های ساخت افزودنی مبتنی بر چاپ چهار بعدی

هادی صفی ولیلو
دانشجوی کارشناسی

موسی ساجد*
استادیار

علی‌رضا محمدی
دانشجوی کارشناسی،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه شهید مدنی آذربایجان،
تبریز

چکیده: امروزه ساخت افزودنی که با عنوان چاپ سه بعدی نیز شناخته می شود، نقش مهمی در تولید قطعات با هندسه پیچیده و خواص متفاوت در صنایع مختلف دارد. چاپ چهاربعدی فناوری دیگری در این زمینه است که بر پایه چاپ سه بعدی توسعه یافته است. بعد چهارم در این فناوری زمان است که سازه با گذشت زمان نسبت به محرک های خارجی واکنش نشان داده و تغییر شکل از خود نشان می دهد که نیازمند محرک های اضافی و مواد پاسخگو به محرک است. از فناوری چاپ سه بعدی برای سازه های استاتیکی و از فناوری چاپ چهار بعدی در سازه های دینامیکی استفاده می شود که مهم ترین نقطه تمایز بین چاپ سه بعدی و چاپ چهار بعدی به شمار می آید. در مطالعه حاضر ابتدا به بررسی تاریخچه این فناوری پرداخته شد. سپس روش های مورد استفاده در این فناوری مورد بررسی قرار گرفته و مواد هوشمند مورد استفاده جهت پاسخ به محرک های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. با پیشرفت این فناوری و نیازهای جدید در حوزه های مختلف، مطالعات بیشتری بر روی این فناوری در حال انجام است. در مطالعه حاضر علاوه بر پیشرفت ها چالش های پیش رو نیز مورد توجه بوده است و چشم انداز آینده این فناوری مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های راهنما: چاپ سه بعدی، چاپ چهار بعدی، خواص مکانیکی، مواد حافظه دار

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

Recent advances in additive manufacturing based on 4D-printing

Hadi Safi Valilu
BSc Student

Moosa Sajed*
Assistant Professor

Alireza Mohammadi
BSc Student,
Department of Mechanical Engineering,
Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz

Abstract: Nowadays, additive manufacturing, which is known as 3D printing, plays a significant role in producing parts with complex geometries and various properties that are used in different industries. 4D printing is another technology that is developed based on 3D printing. The fourth dimension in this technology is time, during which the structure responds to external stimuli and undergoes deformation, requiring additional actuators and responsive materials. 3D printing is used for static structures, while 4D printing is applied in dynamic structures, which is the most important distinguishing factor between the two technologies. In this study, the history of the technology is discussed. Then, the methods used in this technology and the smart materials employed to respond to various stimuli are explored. Because of the advancements in this technology and the diverse needs across different fields, more investigations are carrying out in the field. In addition to advances, challenges are also noticed and the future prospects of the technology are also discussed.

Keywords: 3D printing, 4D printing, Mechanical properties, Shape memory materials

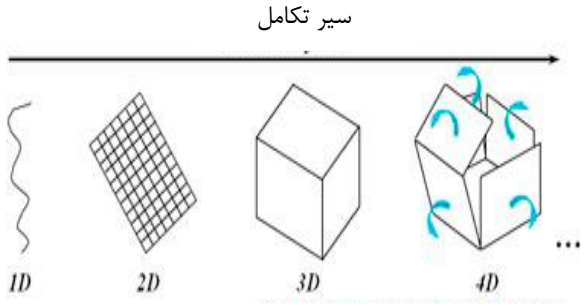
* نویسنده مسئول، sajed@azaruniv.ac.ir

۱- مقدمه

ساخت افزودنی[1] در حالت کلی به‌عنوان نمونه‌سازی سریع یا تولید لایه‌به‌لایه شناخته می‌شود [۱]. تولید افزودنی یا چاپ سه‌بعدی به تولید کالاهای پیچیده و با ارزش در صنایع مختلف کمک کرده است. پیشرفت در مواد و ماشین‌آلات، این فناوری را قادر به ایجاد طراحی‌های پیچیده، کاهش ضایعات و تولید سریع کرده است. این فناوری به‌ویژه در صنایع کالاهای مصرفی، بهداشت و درمان، خودرو و هوافضا پتانسیل بالا در پیشرفت دارد. همچنین تولید افزودنی امکان ساخت ایمپلنت‌ها و پروتزهای شخصی‌سازی‌شده را فراهم می‌کند. مزایای این فناوری شامل انعطاف‌پذیری طراحی، کاهش ضایعات، بهبود سازگاری زیستی و صرفه‌جویی در هزینه‌ها است. با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی می‌توان انواع قطعات پیچیده را تولید کرد که امروزه در صنایع گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].

باتوجه به گستره کاربرد چاپ سه‌بعدی، می‌توان گفت از چاپ سه‌بعدی برای ساخت و تولید سازه‌هایی استفاده می‌شود که در تعادل استاتیکی هستند و نسبت به عوامل مختلف هیچ‌واکنشی را نشان نمی‌دهند [۳]. اما در صنعت گاهی نیاز به سازه‌هایی می‌باشد که به عوامل مختلف واکنش نشان دهد، به دیگرسخن سازه قابلیت پاسخ گویی دینامیکی را داشته باشد. برای پاسخ به این نیاز از فناوری جدید به‌نام «چاپ چهاربعدی» در صنعت استفاده می‌شود. در فناوری چاپ چهاربعدی بعد چهارم زمان است. یعنی فناوری چاپ چهاربعدی به نمونه چاپ شده این قابلیت را می‌دهد که بعد از گذشت زمان تحت تاثیر عوامل خارجی واکنش نشان داده و یا عملکرد خود را تغییر دهد. از جمله عوامل خارجی می‌توان به اشعه فرابنفش، انرژی مغناطیسی، فشار، دما و ضربه اشاره کرد که ماده تولید شده نسبت به این عوامل واکنش نشان می‌دهد [۴].

شکل (۱) تصویر شماتیک از سازه‌های یک‌بعدی، دوبعدی، سه‌بعدی و چهاربعدی را نشان می‌دهد که سازه چهاربعدی ساختار تغییرشکل یافته سازه سه‌بعدی را باگذشت زمان نشان می‌دهد. پس می‌توان گفت چاپ چهاربعدی می‌تواند یک سازه ساده را به یک سازه پیچیده تبدیل کند و در کنار فناوری چاپ سه‌بعدی عمل کند. مومنی و همکاران نیز در یک مطالعه مروری به این فناوری پرداختند [۶]. موضوعات تحقیق در چاپ چهاربعدی به سه دسته اصلی زیر تقسیم می‌شوند: بهبود در سخت‌افزار، بهبود در اجزای تغییرشکل‌دهنده و تحلیل‌های عددی که چاپ شامل پنج جنبه مختلف است: تسهیلات چاپ سه‌بعدی، اجزای هوشمند (یعنی مواد حساس به محرک)، مدل‌سازی ریاضی، نوع محرک و مکانیزم تعامل.



شکل ۱ تصویر شماتیک مفاهیم یک‌بعدی، دوبعدی، سه‌بعدی و چهاربعدی[۵]

در این مطالعه مروری ابتدا بعد از اشاره به مفهوم فناوری چاپ چهاربعدی، نحوه تولید این سازه‌ها و نوع ماده مصرفی اولیه برای ساخت این سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. سپس روش‌های چاپ، انواع و تولید کامپوزیت‌های هوشمند مورد بررسی قرار گرفت. بعد از توضیحات کلی خود این فناوری کاربردهایی که امروزه این فناوری در صنایع گوناگون دارد مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که مشخص است هر فناوری علاوه بر مزیت‌های خود چالش‌هایی نیز به همراه دارد که مورد بررسی قرار گرفت. امروزه در مطالعات مختلف این چالش‌ها توسط پژوهشگرها مورد بررسی قرار می‌گیرد که هر راه حل برای این چالش‌ها پیشرفتی در این زمینه محسوب می‌شود که این مورد نیز مورد بررسی قرار گرفت. هدف کلی از ارائه این مقاله بررسی مختصر و مفید این فناوری و در اختیار گذاشتن پیشرفت‌های جدید برای اولین گام در مطالعه پژوهشگران جدید علاقه‌مند به این حوزه می‌باشد.

۲- اصول فناوری چاپ چهار بعدی

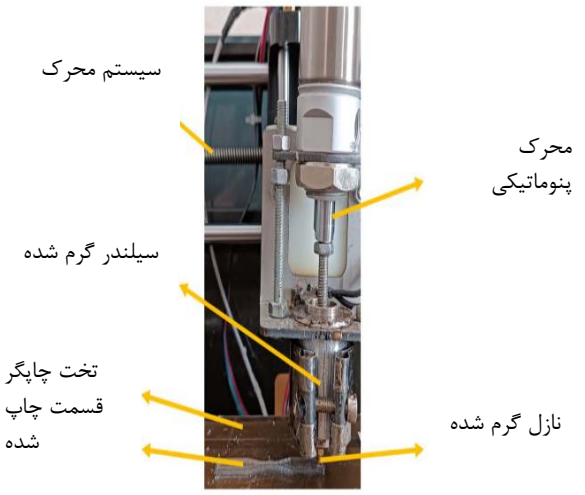
چاپ چهاربعدی به‌طورکلی با پیشرفت و توسعه چاپ سه‌بعدی حاصل شد. پیشرفت‌های اخیر در چاپ سه بعدی به محققان این امکان را داده است که اشکال پیچیده‌ای را ایجاد کنند که تولید آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های سنتی قدیمی غیرممکن بود[۶, ۷]. برای تولید انواع سازه‌ها به روش چاپ سه‌بعدی روش‌های مختلفی مانند استریولیتوگرافی (SLA)، سینتر لیزری انتخابی

[1] Additive manufacturing

(SLS)، مدل‌سازی با ساخت فرم آزاد توسط فیلامنت (FFF)، چاپ سه‌بعدی جت (3DP)، ذوب لیزری انتخابی (SLM)، نوشتن مستقیم جوهر (DIW)، ذوب با پرتو الکترون (EBM) وجود دارند، که هر روش بسته فرآیند تولید خود دارای نوع ماده اولیه متفاوت هستند [۸]. بیشتر مواد برای چاپ سه‌بعدی مانند فلزات، پلاستیک‌ها و سرامیک‌ها، برای چاپ چهار بعدی مناسب نیستند. بنابراین مواد که خواص خود را در طول زمان در پاسخ به محرک‌های خارجی مانند آب، دما و میدان مغناطیسی تغییر می‌دهند، برای چاپ چهاربعدی بسیار مهم هستند [۹]. طبق تحقیقات و نظرسنجی‌های انجام شده، روش ساخت فرم آزاد توسط فیلامنت(FFF) محبوب‌ترین روش برای استفاده در این فناوری می‌باشد، به‌طوری که طبق نظرسنجی‌های انجام شده بین این روش‌ها، روش ساخت فرم آزاد توسط فیلامنت ۴۱٪ آراء را به خود اختصاص داده است [۱۰]. در ادامه این روش را به علت محبوبیت بالا بین روش‌ها انتخاب کرده و توضیح داده‌ایم، سپس در بخش بعد از آن مواد مورد استفاده برای چاپ چهاربعدی مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۱- مدل رسوب ذوب‌شده[1]

مدل‌سازی رسوب‌گذاری ذوب شده همچنین به‌عنوان ساخت فیلامنت ذوب شده شناخته می‌شود که شامل استفاده از یک ماده ترموپلاستیک است. مواد اولیه مورد استفاده در این روش ترموپلاستیک‌ها می‌باشند که به‌طور رشته‌ای[2] از ماده مورد استفاده وارد دستگاه می‌شود [۱۱]. این فرآیند شامل تغذیه یک فیلامنت از یک کلاف بزرگ به سر اکسترودر چاپگر حرارتی متحرک[3] می‌باشد. سر اکسترودر توسط یک کامپیوتر کنترل می‌شود که شکل شیء چاپ شده را تعریف می‌کند. عملکرد دستگاه چاپ سه‌بعدی در این روش بر مبنای لایه‌لایه‌سازی مدل سه‌بعدی می‌باشد که برای ساخت هر لایه به صورت دوبعدی، فایل کامپیوتری طراحی شده به اسکریپت‌ها تبدیل می‌شوند [۱۲]. فیلامنت‌های مورد استفاده در این روش معمولاً ترموپلاستیک‌ها می‌باشند که شامل آکریلونیتریل بوتادین استایرن[4]، پلی لاکتیک اسید[5]، پلی کربنات[6]، پلی‌آمید[7]، ترفتالات گلیکول اصلاح شده پلی‌اتیلن[8] و پلی‌استایرن استفاده می‌شود که اکثر آنها زیست تخریب‌پذیر نیز می‌باشند [۱۳]. همچنین در این روش می‌توان به نوعی نحوه فرآیند را تغییر داد، به‌طور مثال بیاتی و همکاران در یک مطالعه به جای استفاده از فیلامنت‌های رشته از گلوله‌های الاستومری استفاده کردند. شکل (۲) نمونه‌ای از چاپ به روش FFF را نشان می‌دهد که به جای فیلامنت از گلوله‌های توپی استفاده شد [۱۴].



شکل ۲ دستگاه چاپ و اجزاء آن (FFF) [۱۴].

۲-۲- مواد مورد استفاده در چاپ چهار بعدی

مهم‌ترین بخش در چاپ چهار بعدی مواد هوشمند مورد استفاده در آنها می‌باشد. همانگونه که اشاره شد بعد چهارم زمان است، پس باید در انتخاب مواد سازنده از موادی هوشمند استفاده کنیم که نسبت به تغییرات مشخص واکنش نشان دهد. بنابراین، مواد هوشمند هسته اصلی چاپ چهاربعدی هستند و یکی از رایج‌ترین مواد هوشمند، مواد پاسخ‌دهنده به محرک‌ها هستند. این مواد پاسخ‌دهنده در دسته‌بندی‌های مختلف طبقه‌بندی می‌شوند.

نوع اول آنها تک متغیره نام دارد که با اعمال تحریک، سازه واکنش نشان داده و تغییر شکل می‌دهد اما پس از حذف محرک سازه به حالت اولیه خود باز می‌گردد که در این سازه‌ها از مواد تغییر شکل‌دهنده استفاده می‌شود[9]. نوع دوم آنها در دو حالت وجود دارد و از مواد حافظه شکل‌دار[10] استفاده می‌شود. حالت اول این نوع یک راهه نام دارد که پس از پاسخ به محرک برای اینکه شکل اصلی از شکل موقت بازیابی شود، یک مرحله برنامه‌نویسی جدید لازم است تا شکل موقت را در هر چرخه

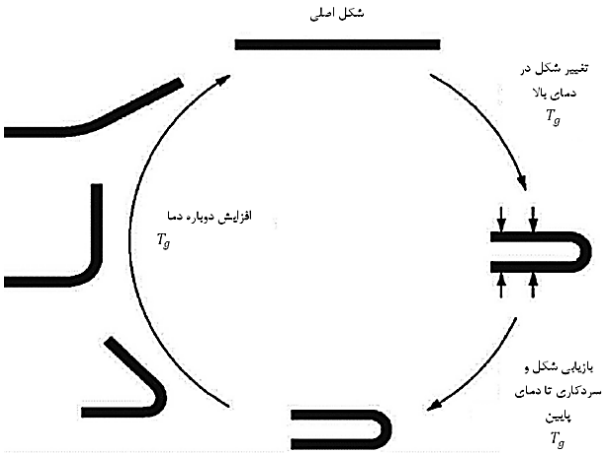
[1] Fusion deposition modeling
[2] Filament
[3] Nozzle
[4] ABS
[5] PLA
[6] PC
[7] Nylone
[8] PTEG
[9] Shape Changing Materials (SCM)
[10] Shape Memory Materials (SMM)

دوباره ایجاد کند. حالت دوم این نوع دو طرفه نام دارد که مواد حافظه شکل دوطرفه نیازی به فرآیند دوباره برنامه‌ریزی برای بازیابی شکل موقت ندارند. نوع سوم آنها نیز در دو حالت وجود دارد. حالت اول تغییر سه‌گانه و حالت دوم تغییر چند شکل است به‌طوری که مواد حافظه سه‌گانه با اثر حافظه سه‌گانه دارای یک شکل دائمی و دو شکل موقت هستند. پس به‌طور کلی می‌توان گفت مواد حافظه شکل‌دار می‌توانند شکل خود را تا زمانی که محرک مناسب اعمال شود حفظ کند؛ در حالی که مواد تغییر شکل‌دهنده نمی‌توانند شکل موقت خود را هنگام برداشتن محرک حفظ کند [۱۵]. زمان لازم برای انتقال یک ماده اعم از پاسخ به محرک ویا بازیابی می‌تواند تحت تأثیر عوامل داخلی و خارجی قرار گیرد. عوامل مؤثر داخلی به خواص ماده مربوط می‌شوند که غیر قابل تغییر هستند مانند چگالی ماده و ظرفیت حرارتی آن. تأثیرات خارجی شرایط محیطی هستند، برای مثال، دما، نرخ گرمایش و ضخامت هندسی که می‌توان آن‌ها را تغییر داد تا زمان بازیابی مدیریت شود [۱۶]. پس در حالت کلی می‌توان گفت فرآیند اثر حافظه شکلی شامل دو مرحله مهم برنامه‌ریزی و بازیابی می‌باشد. به‌طوری‌که ماده در مرحله برنامه‌ریزی به پیکربندی موقت خود تغییر کرده و پس از آن به شکل اولیه خود بازمی‌گردد. اما این روش دارای محدودیت می‌باشد زیرا بسته به خواص مکانیکی ماده متغیر است. به‌عنوان مثال، نسبت بازیابی می‌تواند به خاصیت کشسانی ماده بستگی داشته و نتواند به‌طور کامل به حالت اولیه خود بازگردد [۱۷]. پس انتخاب نوع ماده مناسب برای کاربردهای مختلف کلیدی‌ترین گام است.

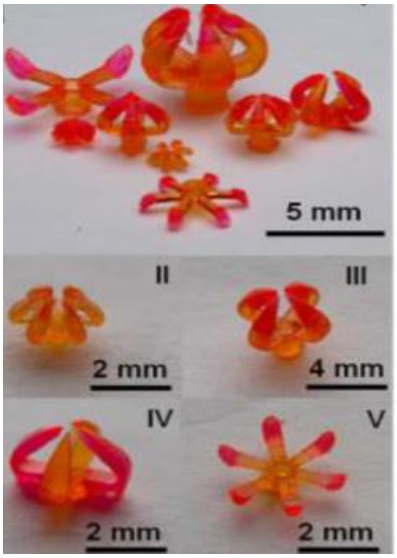
پلیمرهایی که ویژگی‌های حافظه شکل دارند به‌عنوان پلیمرهای حافظه شکل[1] شناخته می‌شوند و در چاپ چهاربعدی استفاده می‌شوند. پلیمرهای حافظه شکل قادرند هنگامی که در معرض یک محرک خارجی قرار می‌گیرند از یک شکل موقتی به یک شکل حفظ‌شده تبدیل شوند که به این پدیده "اثر حافظه شکل[2]" گفته می‌شود. شکل (۳) اثر حافظه شکل یک پلیمر حافظه شکل گرم‌شده را نشان می‌دهد. یک ماده که از پلیمر حافظه شکل تشکیل شده است، ابتدا تحت یک محرک خارجی گرم شده و تغییر شکل می‌دهد تا به دمای ذوب خود برسد. شکل حفظ‌شده آن پس از خنک‌شدن به زیر دمای انتقال شیشه‌ای[3] به دست می‌آید. شکل موقتی تا زمانی که دوباره به دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای گرم شود، حفظ می‌شود که پلیمر حافظه شکل را به شکل اولیه خود بازگرداند. این فرآیند می‌تواند به‌طور نامحدود با یک شکل موقتی متفاوت در هر چرخه تکرار شود [۹]. جی و همکاران [۱۸] یک تکنیک چاپ چهاربعدی را فرموله کردند که قادر به ایجاد ساختارهای چند ماده‌ای پلیمرهای حافظه شکل از طریق مجموعه‌ای از شبکه‌های کوپلیمر مبتنی بر متاکریلات بود که قابلیت سخت شدن با نور را داشتند. رویکرد آن‌ها منجر به ساخت یک گیره پلیمری حافظه شکل چند ماده‌ای شد که در شکل (۴) نشان داده شده است.

۲-۳- مواد پاسخ‌گو به انواع محرک

حال در این قسمت می‌خواهیم به موادی بپردازیم که در برابر انواع محرک‌ها مانند دما، نور، رطوبت و PH حساس هستند و همچنین به پاسخ سازه در برابر این محرک‌ها می‌پردازیم.

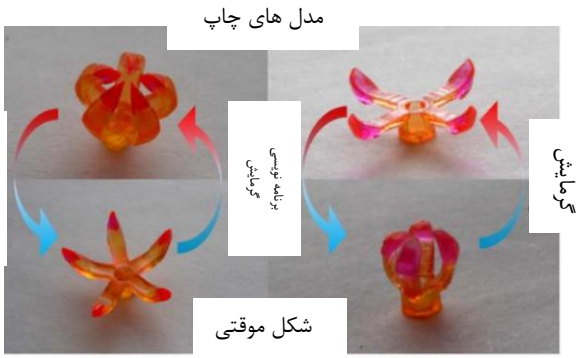


شکل ۳ اثر حافظه شکل پلیمری گرم شده[۹]

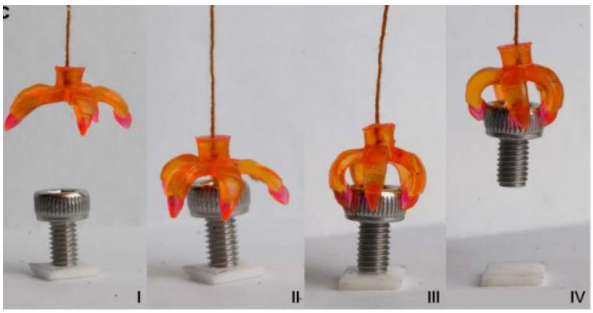


(الف)

[1] Shape memory polymers (SMPs)
[2] Shape memory Effect (SME)
[3] Tg



(ب)



(ج)

شکل۴ الف- گیره‌های چند ماده‌ای با طراحی‌های مختلف، ب- انتقال بین شکل چاپ شده و شکل موقت، ج- فرآیند گرفتن یک شیء[۱۸].

مواد پاسخ‌گو به دما: مواد هوشمند به محرک‌های حرارتی یا دما پاسخ می‌دهند و تغییر شکل آنها عمدتاً به دو مکانیزم اثر تغییر شکل و اثر حافظه شکل بستگی دارد. اثر حافظه شکل به توانایی مواد در بازگشت به شکل اصلی خود پس از تغییر شکل اشاره دارد و این مواد به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند، مانند پلیمرهای حافظه شکل و آلیاژهای حافظه شکل[1]. همانگونه که قبلاً هم اشاره شد، آلیاژهای حافظه شکلی به سه دسته یک‌طرفه، دوطرفه و سه‌طرفه تقسیم می‌شوند که بسته به تعداد تغییرات شکل متفاوت است. پلیمرهای حافظه شکل به‌دلیل ویژگی چاپ آسان، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و قادرند پس از تغییر شکل با استفاده از محرک مناسب به شکل اصلی خود بازگردند. پلیمرهای حافظه شکل دارای دمای انتقال شیشه‌ای هستند که بر ویژگی‌های آنها تأثیر می‌گذارد.

نیتینول (نیکل–تیتانیوم) به دلیل خواص خوب حافظه شکل، قابلیت کشش و استحکام بالا و ویژگی‌های پایدار چرخه‌ای به‌عنوان پرکاربردترین آلیاژ حافظه شکل شناخته می‌شود که آن را برای کاربردهای بیولوژیکی و عملگر مناسب‌تر می‌سازد. آلیاژ مبتنی بر نیکل-منگنز-گالیم نیز برای چاپ قطعات چهاربعدی با استفاده از تکنیک جت چسب مورد بررسی قرار گرفته است که در آن قطعات چاپ شده توانایی تبدیل شکل معکوس را در هنگام سرد شدن و گرم شدن نشان دادند. آلیاژهای حافظه شکل مبتنی بر مس نیز برای چاپ چهاربعدی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ زیرا می‌توانند به‌خوبی فرآیندهای پس از چاپ را تحمل کنند و از نظر هزینه مقرون به صرفه هستند[۱۹].

مواد پاسخ‌گو به نور: نور همچنین به‌عنوان یک محرک غیرمستقیم برای تغییر شکل مواد هوشمند عمل می‌کند. زمانی که ناحیه‌ای از یک ماده هوشمند که به نور حساس است که به آن ماده فوتو-حساس نیز گفته می‌شود و در معرض نور قرار می‌گیرد، نور را جذب کرده و در نهایت پدیده گرمایش را در آن ایجاد می‌کند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، گرما به‌عنوان یک محرک برای تغییر شکل مواد هوشمند عمل می‌کند؛ بنابراین تغییر شکلی در ماده فوتو-حساس اتفاق می‌افتد. به همین دلیل است که نور به‌عنوان یک محرک غیرمستقیم عمل می‌کند؛ زیرا تغییر را به‌طور مستقیم مانند گرما و رطوبت ایجاد نمی‌کند. ساختار خودجمع‌شونده متوالی توسط لیو و همکاران[۲۰] نشان داده شد که در آن نور توسط اتصالات جذب شده و آن‌ها گرم می‌شوند و در نتیجه تغییر شکل ایجاد می‌شود. نرخ جذب گرما توسط اتصالات بستگی به منبع نورهای استفاده شده و رنگ اتصالات دارد. در مطالعات انجام شده، نور به روشی متفاوت برای ایجاد تغییر شکل در ماده فوتو-حساس استفاده شد. از یک کروموفور که حساس به نور است، در برخی نقاط مشخص از یک بلوک پلیمری نفوذ داده شد تا تنها آن نقاط هنگام تابش نور به ساختار دچار تغییر شکل شوند. گزارش‌های دیگری نیز وجود دارد که در آن‌ها از نور فرابنفش ضعیف و نور مرئی برای تغییر شکل ساختار چهاربعدی استفاده شده است[۲۱].

مواد پاسخ‌گو به رطوبت: موادی که به رطوبت یا آب واکنش نشان می‌دهند به دلیل دامنه وسیعی از کاربردها توجه زیادی را جلب کرده‌اند. این نوع مواد هیدروژل‌ها نامیده می‌شوند؛ زیرا توانایی فوق‌العاده‌ای در واکنش به آب یا رطوبت دارند. در واقع آن‌ها یک نوع از شبکه‌های سه‌بعدی زنجیره‌های پلیمری هستند که از طریق پیوند متقابل تشکیل شده‌اند و می‌توانند تا ۲۰۰٪ از حجم اصلی خود پس از تماس با رطوبت منبسط شوند. هیدروژل‌ها به دلیل قابلیت‌های بالای خود در چاپ و توانایی انبساط، خم شدن و کشش مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد زیست‌سازگار و آسان برای چاپ هستند، اما پاسخ معکوس آن‌ها کند است و زمان زیادی برای خشک شدن نیاز دارند. برای حل

[1] Shape memory alloys

این مشکل، برنامه‌ریزی و ایجاد انبساط آنیزوتروپیک ضروری است. تحقیقات نشان داده‌اند که با ترکیب الیاف سلولزی و جوهر هیدروژل، می‌توان انبساط را کنترل کرد. همچنین، تغییر دما می‌تواند به کنترل عملکرد هیدروژل‌ها کمک کند. طراحی‌های خاص مانند لولا نیز برای جلوگیری از انبساط بیش از حد مؤثر بوده‌اند. در مجموع، پیشرفت‌های اخیر در این زمینه امکان توسعه ساختارهای پیچیده و کارآمدتری را فراهم کرده است[۱۹].

مواد پاسخ‌گو به PH: این مواد هوشمند قادرند به تغییرات PH پاسخ دهند و بر اساس مقدار PH دچار تغییرشکل و حجم شوند، این تغییر شکل در پاسخ به مقادیر مختلف PH، این مواد را برای فناوری چاپ چهاربعدی مناسب می‌سازد. پلی‌الکترولیت‌ها از جمله پلیمرهایی هستند که به PH حساس بوده و در چاپ چهاربعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ زیرا این پلیمر به‌دلیل وجود یک گروه جانبی قابل یونیزه می‌تواند پروتون‌ها را در هنگام تغییر PH دریافت یا اهداء کنند. هنگامی که یک پروتون آزاد می‌شود، زنجیره پلیمر به‌دلیل دافعه الکترواستاتیکی کشیده می‌شود که منجر به تغییر شکل در ساختار می‌گردد و هنگامی که پروتون پذیرفته می‌شود، ساختار خنثی می‌شود. پلی‌الکترولیت‌ها شامل پلی‌کاتیون‌ها یا پلی‌پایه‌ها (مانند نمک آمونیوم) هستند که به‌عنوان گروه عملکردی و پلی‌آنیون‌ها یا پلی‌اسیدها (گروه‌های کربوکسیل یا سولفونیک) به‌عنوان زنجیره‌های جانبی قابل یونیزه هستند. زنجیره‌های جانبی پروتون را در مقادیر PH بالاتر آزاد می‌کنند (کشیده می‌شوند) و در مقادیر PH پایین‌تر پروتون را قبول می‌کنند (خنثی می‌شوند). در حالی‌که گروه عملکردی پروتون را در مقادیر PH پایین‌تر آزاد کرده و در مقادیر PH بالاتر پروتون را قبول می‌کند[۱۹].

۳- کاربردهای چاپ چهار بعدی

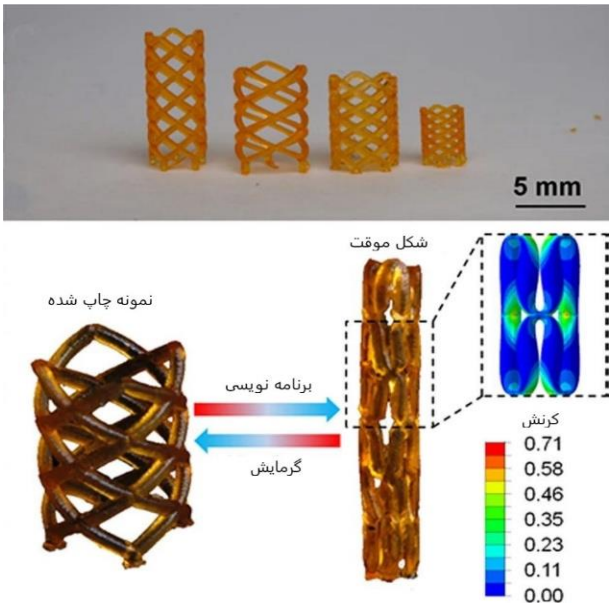
فناوری چاپ چهاربعدی با قابلیت منحصر به فرد تغییر شکل و تطبیق‌پذیری در پاسخ به محرک‌های محیطی، تحولات گسترده‌ای در صنایع مختلف ایجاد کرده است. در حوزه معماری و ساخت‌وساز، این فناوری امکان تولید مصالح هوشمند با قابلیت تغییرشکل بر اساس شرایط محیطی را فراهم آورده که منجر به خلق سازه‌های خودتاشونده و خودسازمان‌ده با فرم‌های پیچیده‌ای شده که پیش از این با روش‌های سنتی غیرقابل دستیابی بودند. سیستم‌های پوسته‌ای هوشمند با قابلیت تنظیم دینامیک از دیگر دستاوردهای این فناوری در این حوزه محسوب می‌شود[۲۲]. در پزشکی و مهندسی پزشکی، چاپ چهاربعدی انقلابی در ساخت ایمپلنت‌های هوشمند ایجاد کرده که قادرند با تغییرات آناتومیک بدن تطبیق پیدا کنند. تولید داربست‌های بافتی پویا که همراه با رشد سلول‌ها تکامل می‌یابند، سیستم‌های رهایش داروی هوشمند پاسخگو به محرک‌های بیولوژیکی و پروتزهای فعال با قابلیت تغییرشکل دینامیک از جمله پیشرفت‌های چشمگیر این حوزه است. همچنین ساخت اندام‌های مصنوعی با عملکردی مشابه بافت‌های زنده، افق‌های جدیدی در پیوند اعضاء گشوده است[۲۳-۲۶]. صنعت رباتیک نیز از مزایای این فناوری بهره‌مند شده است. توسعه ربات‌های نرم با قابلیت تغییرشکل پویا، ساخت عضلات مصنوعی پاسخگو به محرک‌های مختلف، تولید مفاصل رباتیک خودتنظیم و ایجاد پوست‌های مصنوعی حساس به فشار و دما، همگی از دستاوردهای چاپ چهاربعدی در این زمینه هستند[۲۳, ۲۴]. در صنایع هوافضا و خودروسازی این فناوری امکان تولید قطعات سبک‌وزن با قابلیت تغییرشکل در شرایط عملیاتی مختلف را فراهم کرده است. توسعه سیستم‌های بال و سطوح کنترلی هوشمند برای هواپیماها، ساخت قطعات خودترمیم‌شونده برای کاربردهای فضایی و تولید سیستم‌های خنک‌کننده فعال و خودتنظیم از دیگر کاربردهای مهم آن محسوب می‌شود . حوزه‌های نوظهوری مانند تولید منسوجات هوشمند با قابلیت تغییر ویژگی‌های فیزیکی، ساخت حسگرهای پوشیدنی تطبیق‌پذیر، توسعه سیستم‌های میکروسیال پویا و تولید فیلترهای هوشمند خودتنظیم نیز از این فناوری بهره می‌برند. با این حال، چالش‌هایی مانند نیاز به توسعه مواد هوشمند با حساسیت بالاتر، مسائل مقیاس‌پذیری و تولید انبوه و ضرورت استانداردسازی جدید همچنان وجود دارند. ادغام این فناوری با هوش مصنوعی برای ایجاد سیستم‌های خودیادگیر از جمله جهت‌گیری‌های آینده این حوزه به شمار می‌رود[۲۵]. در راستای پیشرفت‌های علمی و فناوری، تولید داربست‌های بافتی پویا که می‌توانند با رشد سلول‌ها تکامل یابند، به توسعه ربات‌های نرم با قابلیت تغییرشکل و تطبیق پویا با محیط و همچنین ساخت عضلات مصنوعی با پاسخگویی به محرک‌های مختلف منجر شده است؛ در حالی‌که تولید مفاصل رباتیک خودتنظیم با قابلیت یادگیری حرکتی، ایجاد پوست‌های مصنوعی حساس به فشار و دما برای ربات‌ها، ایمپلنت‌های استخوانی با قابلیت تطبیق با رشد بافت، سیستم‌های رهایش داروی فعال‌شونده با نشانگرهای زیستی و پوشش‌های هوشمند با قابلیت خودترمیمی برای کاربردهای صنعتی را نیز ممکن ساخته است[۳۶]. نمونه‌های موفق پیاده‌سازی این فناوری شامل استنت‌های عروقی با قابلیت تنظیم قطر بر اساس شرایط فیزیولوژیک، ایمپلنت‌های استخوانی

تطبیق‌پذیر با رشد بافت، سیستم‌های رهایش داروی فعال‌شونده با نشانگرهای زیستی و پوشش‌های هوشمند خودترمیم‌شونده برای کاربردهای صنعتی هستند که همگی گواه پتانسیل بالای این فناوری در تحول صنایع مختلف می‌باشند. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است یک استنت قلبی و عروقی با استفاده از این فناوری تولید شده است. این استنت که از پلیمرهای حافظه‌شکل در ساخت آن استفاده شده است پتانسیل بهتری نسبت به نمونه فلزی نشان داده است. در نتیجه این استنت دارای قابلیت تغییرشکل است و می‌تواند به محرک‌های حرارتی پاسخ دهد و مورفولوژی استنت تحت شرایط مورد نیاز تغییر کند[۲۶].

۴- چالش‌های چاپ چهار بعدی

چاپ چهاربعدی به‌عنوان تحولی نوین در فناوری‌های ساخت افزوده، امکان تولید اشیایی با قابلیت تغییرشکل و عملکرد پویا در پاسخ به محرک‌های محیطی مانند دما، رطوبت، نور یا میدان‌های الکترومغناطیسی را فراهم می‌کند. این فناوری که تکامل‌یافته چاپ سه‌بعدی محسوب می‌شود کاربردهای امیدوارکننده‌ای در حوزه‌های پزشکی (مانند ایمپلنت‌های هوشمند)، هوافضا (سازه‌های خودتغییرشکل)، رباتیک نرم و صنایع پیشرفته دارد. با این حال، توسعه و تجاری‌سازی این فناوری با چالش‌های متعددی روبرو است که نیازمند توجه جدی محققان و صنعتگران می‌باشد.

یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در زمینه مواد هوشمند مورد استفاده است. این مواد باید بتوانند به صورت کنترل‌شده‌ای به محرک‌های خارجی پاسخ داده و خواصی مانند حافظه شکلی، الاستیسیته قابل برنامه‌ریزی و پایداری مکانیکی در چرخه‌های متعدد تغییرشکل را از خود نشان دهند. در حال حاضر محدودیت‌های جدی در تنوع و عملکرد مواد هوشمند وجود دارد. به‌عنوان مثال، پلیمرهای حافظه‌شکل اگرچه قابلیت تغییرشکل دارند؛ اما معمولاً به محرک‌های دمایی محدود شده و زمان پاسخ‌دهی کندی دارند. هیدروژل‌ها که به محرک‌های رطوبتی پاسخ می‌دهند اغلب از استحکام مکانیکی پایینی برخوردارند. آلیاژهای حافظه‌دار نیز با وجود استحکام بالا، هزینه تولید بالایی داشته و کنترل دقیق دمای تبدیل آن‌ها چالش برانگیز است. توسعه مواد کامپوزیتی جدید که بتوانند چندین محرک مختلف (مثلاً همزمان به دما و رطوبت) پاسخ دهند و در عین‌حال خواص مکانیکی مطلوبی داشته باشند از نیازهای اساسی این حوزه محسوب می‌شود.



شکل ۵ نمونه استنت چاپ شده و واکنش آن به حرارت[۲۶]

چالش دیگر به پیچیدگی‌های طراحی و مدل‌سازی مربوط میشود. برخلاف چاپ سه‌بعدی که در آن طراحی‌ها ایستا هستند، در چاپ چهاربعدی باید رفتار دینامیک ماده و نحوه تغییرشکل آن در طول زمان را پیش‌بینی کرد. این امر نیازمند نرم‌افزارهای پیشرفته شبیه‌سازی چندفیزیکی است که بتوانند رفتار مواد هوشمند را تحت شرایط مختلف محیطی مدل‌سازی کنند. همچنین طراحی هندسه‌های مناسب که بتوانند به صورت کنترل‌شده‌ای تغییرشکل دهند به تخصص ویژه‌ای نیاز دارد. به‌عنوان مثال، طراحی الگوهای شبکه‌بندی خاص یا مناطق با ضخامت‌های متفاوت در یک قطعه می‌تواند نحوه و جهت تغییرشکل را کنترل کند. فقدان استانداردهای طراحی و ابزارهای نرم‌افزاری کاربرپسند، ورود طراحان به این حوزه را با مشکل مواجه کرده است.در زمینه فرآیندهای تولید نیز چالش‌های فنی متعددی وجود دارد. چاپ چهاربعدی نیازمند دقت بسیار بالایی در پارامترهای فرآیند مانند دمای چاپ، سرعت رسوب‌گذاری، الگوی پرینت و شرایط پسا پردازش است. هرگونه انحراف در این پارامترها میتواند منجر به نقص در عملکرد تغییرشکل شود. به‌عنوان مثال، در چاپ پلیمرهای حافظه‌شکل، توزیع نادرست دما ممکن است باعث شود برخی مناطق زودتر یا دیرتر از مناطق دیگر تغییرشکل دهند. همچنین، هماهنگ کردن رفتار مواد مختلف در چاپ چندماده‌ای (مانند ترکیب پلیمرهای با پاسخ دمایی متفاوت) نیاز به کنترل دقیق فرآیند دارد. محدودیت‌های فعلی در سرعت چاپ و ابعاد قابل تولید نیز از موانع مهم در مسیر تولید انبوه محسوب می‌شوند. از دیدگاه اقتصادی، هزینه بالای مواد هوشمند و تجهیزات تخصصی مورد نیاز برای چاپ

چهاربعدی، سرمایه‌گذاری در این حوزه را برای بسیاری از صنایع محدود کرده است. قیمت مواد هوشمند ممکن است ده‌ها برابر مواد معمولی مورد استفاده در چاپ سه‌بعدی باشد. همچنین، نبود زنجیره تأمین مطمئن برای این مواد و نیاز به شرایط خاص نگهداری (مانند کنترل رطوبت یا دما) بر پیچیدگی‌های لجستیکی می‌افزاید. از سوی دیگر، عدم بلوغ فناوری و نبود استانداردهای صنعتی مشخص، ریسک سرمایه‌گذاری در این حوزه را افزایش داده است. مسائل مربوط به مالکیت فکری و حفاظت از طراحی‌های نوآورانه نیز نیاز به توجه ویژه دارد. در حوزه کاربردهای پزشکی، چالش‌های ویژه‌ای مانند نیاز به مواد زیست‌سازگار با قابلیت تغییرشکل کنترل‌شده در محیط بدن وجود دارد. ایمپلنت‌های هوشمند باید بتوانند در پاسخ به محرک‌های فیزیولوژیکی (مانند تغییر PH یا دما) تغییرشکل داده و در عین‌حال از نظر مکانیکی با بافت‌های اطراف سازگار باشند. نگرانی‌هایی درباره سمیت احتمالی برخی مواد هوشمند و محصولات تجزیه آنها نیز وجود دارد که نیاز به تحقیقات بیشتر دارد. در کاربردهای صنعتی نیز مسائلی مانند دوام درازمدت مواد در چرخه‌های مکرر تغییرشکل، مقاومت در برابر خوردگی و پایداری در شرایط محیطی مختلف نیاز به بررسی دارند. برای غلبه بر این چالش‌ها، رویکردهای چند رشته‌ای ترکیب‌کننده تخصص در علوم مواد، مهندسی مکانیک، علوم کامپیوتر و حوزه‌های کاربردی مورد نیاز است. سرمایه‌گذاری در تحقیقات پایه‌ای برای توسعه نسل جدید مواد هوشمند، بهبود روش‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار مواد، استانداردسازی فرآیندهای تولید و کاهش هزینه‌ها از اولویت‌های اصلی محسوب می‌شوند. همکاری نزدیک بین دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و صنایع می‌تواند شتاب‌دهنده پیشرفت در این حوزه باشد. با وجود تمام چالش‌ها، چاپ چهاربعدی پتانسیل ایجاد تحول در بسیاری از صنایع را دارد و انتظار می‌رود در سال‌های آینده شاهد پیشرفت‌های چشم‌گیری در این فناوری باشیم[۹, ۱۹, ۲۷-۳۴].

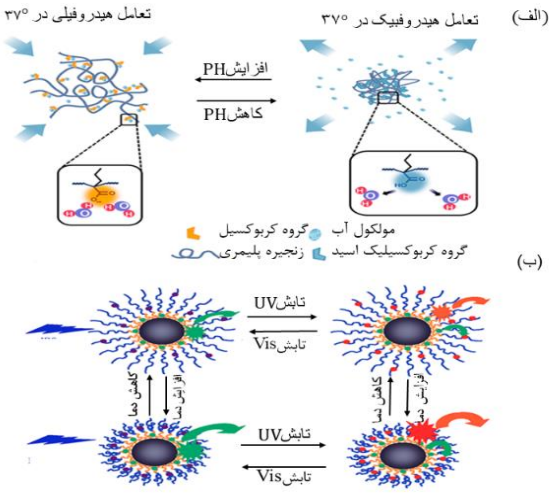
۵- پیشرفت‌های اخیر و آینده چاپ چهار بعدی

پیشرفت‌های اخیر در حوزه چاپ چهاربعدی تحولی عمده در زمینه‌های مختلف به‌ویژه در علوم زیستی و پزشکی به شمار می‌روند. برخلاف چاپ سه‌بعدی که مواد را به صورت استاتیک تولید می‌کند، چاپ چهاربعدی امکان تغییرشکل و عملکرد مواد را با توجه به تحریکات خاص فراهم می‌آورد. این تکنولوژی مبتنی بر مواد پلیمری و نانوکامپوزیت‌های پیشرفته‌ای است که قادرند به تغییرات محیطی مانند دما، نور، PH و سایر محرک‌های شیمیایی و بیولوژیکی واکنش نشان دهند. این ویژگی‌ها کاربردهای متنوعی نظیر مهندسی بافت، سیستم‌های تحویل دارو و حسگرها را فراهم می‌کنند. به‌عنوان مثال، مواد چاپ شده به‌صورت چهاربعدی می‌توانند به‌طور خودکار شکل خود را در پاسخ به تغییرات دما تغییر دهند که این امر در درمان‌های پزشکی به ویژه در زیرساخت‌های توموری و درمان‌های ضد درد بسیار مفید است. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که برقراری تعامل میان طراحان و مواد اولیه می‌تواند به ایجاد مواد چندکاربردی با قابلیت پاسخگویی به چندین محرک مختلف منجر شود. همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است ساختار مواد هوشمند در پاسخ به محرک‌های محیطی خود تغییر می‌کنند که در اکثر زمینه ها کاربرد دارند[۳۵].

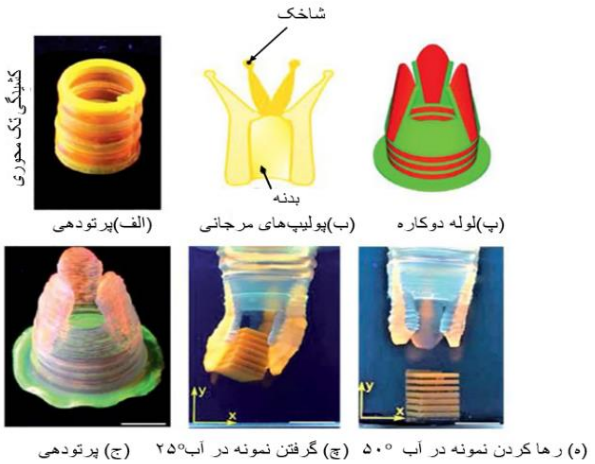
این مواد به‌طور الهام گرفته از طبیعت طراحی شده و قابلیت تغییرشکل دارند که آنها را برای ساخت اجزای پزشکی مانند استنت‌ها و ایمپلنت‌ها بسیار مناسب می‌سازد. با چاپ چهاربعدی، امکان ایجاد اندام‌های مصنوعی با ویژگی‌های مورد نیاز بیماران و همچنین چاپ بافت‌های زیستی امکان‌پذیر شده است. شایان ذکر است که فناوری چاپ چهاربعدی با وجود چالش‌هایی نظیر هزینه‌های بالای راه‌اندازی، زمان پایین چاپ و نیاز به مواد اولیه مناسب، همچنان با پتانسیل‌های بزرگ در حال پیشرفت است. به‌خصوص در زمینه‌های نوآوری و تغییر شکل‌های هوشمند، انتظارات زیادی برای آینده این فناوری وجود دارد. این انتظار می‌رود که با گذر زمان، چاپ چهار بعدی به یکی از ارکان اصلی تجارت و تولید در صنایع مختلف تبدیل شود و نقش مهمی در تسهیل فرایند تولید و بهبود کیفیت محصولات ایفا کند. همانطور که در شکل (۷) نشان‌دهنده واکنش یک ماده هوشمند به تغییرات دما است که با تغییرات دما سازه تغییر شکل می‌دهد[۳۶].

چاپ چهار بعدی به‌عنوان یک فناوری نوظهور در زمینه مهندسی بافت عروقی بسترهای جدیدی برای ایجاد بافت‌های پیچیده و عملکردی فراهم کرده است. این تکنیک که بر پایه چاپ سه بعدی بنا نهاده شده است، با افزودن بعد چهارم، یعنی زمان، به فرآیند تولید امکان ایجاد ساختارهایی را فراهم می‌آورد که می‌توانند به محرک‌های محیطی واکنش نشان دهند و به‌طور دینامیک تغییرشکل دهند. در گذشته، مهندسی بافت عروقی بسیاری از چالش‌ها را از جمله نیاز به تأمین اکسیژن و مواد مغذی برای سلول‌ها با محدودیت‌هایی مواجه بوده است. با این حال، پیشرفت‌های اخیر در زمینه چاپ چهار بعدی می‌تواند این مشکلات را به شکل چشمگیری حل کند. به‌عنوان مثال، این فناوری قادر است تا با استفاده از مواد هوشمند که به شرایط

محیطی پاسخ می‌دهند، ساختارهای توخالی با قابلیت رشد و تطابق با بافت‌های طبیعی را ایجاد کند. چاپ چهاربعدی می‌تواند در ترکیب با تکنیک‌های زیست‌پرینتینگ، به تولید بافت‌های عروقی متنوعی کمک کند، که می‌تواند قابلیت‌های بهتری نسبت به روش‌های سنتی در ایجاد بافت‌های عروقی از خود نشان دهد. این تکنیک نه تنها به تولید ساختارهای عروقی با دقت بالا کمک می‌کند، بلکه همچنین می‌تواند فرآیند بلوغ و تعدیل بافت‌ها بعد از چاپ را بهبود بخشد.



شکل ۶ الف- پاسخ یک ماده به تغییرات رطوبت و PH محیط، ب- پاسخ یک ماده به تغییرات پرتوهای محیط [۳۵].



شکل ۷ تغییر شکل مواد هوشمند چاپ شده چهاربعدی؛ الف- انبساط یک‌محوری یک لوله دو شکل‌پذیر، ب- ساختار یک پلیپ مرجانی، پ- نمایش شماتیک یک لوله با دو عملکرد، ج- لوله چاپ شده در چاپ چهاربعدی و پرتودهی شده، چ- گرفتن (سپس بلند کردن) مکعب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به‌دلیل انبساط یک‌محوری لوله هنگام معلق بودن در آب، هـ- با گرم شدن به ۵۰ درجه سانتی‌گراد، انگشتان باز شدند تا مکعب را آزاد کنند[۳۶].

به‌طور کلی، چاپ چهار بعدی به‌عنوان یک راهکار نوآورانه در مهندسی بافت، نه تنها برای فراهم آوردن ساختارها و مدل‌های عروقی کارآمد، بلکه برای بهبود و توسعه روش‌های درمانی در تقریباً تمامی بیماری‌های مربوط به سیستم عروقی، پتانسیل فوق‌العاده‌ای دارد. با ادامه تحقیقات و پیشرفت در این زمینه، انتظار می‌رود که چاپ چهار بعدی به یکی از روش‌های کلیدی در آینده درمان‌های پزشکی و مهندسی بافت تبدیل شود[۳۷]. به‌عنوان مثال، تکنیک‌های نوین چاپ چهار بعدی می‌توانند به تولید ساختارهای میکرو قابل تنفس و متناسب با نیازهای بیمار کمک کنند. به‌علاوه، استفاده از مواد هوشمند در این چاپ به جای مواد سنتی می‌تواند فرآیند بهبود و ترمیم بافت‌ها را شتاب بخشد و کیفیت زندگی بیماران را ارتقاء دهد. در آینده، انتظار می‌رود که چاپ چهاربعدی با پیشرفت مواد و تکنولوژی‌های جدیدی که بتوانند به‌طور مؤثرتری به نیازهای بالینی پاسخ دهند به یکی از روش‌های اصلی در مهندسی بافت‌های عروقی تبدیل شود. با بکارگیری این تکنیک‌ها می‌توان به تولید بافت‌های عروقی پیچیده و کامل نزدیک‌تر شد و در نهایت از آن‌ها در درمان بیماری‌های قلبی و عروقی در کنار سایر زمینه‌های بالینی استفاده کرد. به این ترتیب، چاپ چهار بعدی نه تنها قابلیت‌های علمی و تکنولوژیک را متحول خواهد کرد؛ بلکه امیدی به رویارویی با چالش‌های موجود در حوزه پزشکی و ترمیم بافت نیز خواهد بود[۳۷].

چاپ چهاربعدی به‌عنوان یک تکنولوژی نوظهور در زمینه ساخت و تولید مواد بیوداروها، سرعت بالایی در پیشرفت‌های خود داشته و به‌عنوان نقطه عطفی در تحولات عرصه پزشکی شناخته می‌شود. این تکنیک به مواد هوشمند این امکان را می‌دهد که بر اساس محرک‌های محیطی مانند دما، رطوبت و PH تغییرشکل و عملکرد دهند. استفاده از چاپ سه‌بعدی در ایجاد ابزارها و ساختارهای پیچیده به ویژه در زمینه مهندسی بافت، دارورسانی، ابزارهای جراحی و تشخیصی و همچنین ایمپلنت‌ها و پروتزها گسترش یافته است. تحقیقات اخیر نشان داده است که ترکیب مواد مختلف می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و زیستی آن‌ها منجر شود. به‌عنوان مثال، ادغام هیدروژل‌ها و پلیمرهای زیستی می‌تواند به ایجاد ساختارهای جدیدی منجر شود که در فرآیندهای ترمیم بافت و دارورسانی دارای کارایی بهتری هستند [۳۸]. از جمله موادی که به‌طور گسترده در چاپ چهاربعدی استفاده می‌شوند، می‌توان به پلیمرهای حافظه‌شکل و الاستومرهای مایع کریستالی اشاره کرد. این مواد به‌خصوص به دلیل قابلیت تغییرشکل و واکنش به محرک‌های خارجی، به‌طور فزاینده‌ای در پروژه‌های صنعتی و

علمی مورد توجه قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، چاپ چهاربعدی می‌تواند به تولید دستگاه‌های هوشمند، مواد متافیزیکی و حتی کاربردهای پزشکی مانند مهندسی بافت منجر شود.تکنیک‌های نوین مانند چاپ چند ماده‌ای و چاپ با استفاده از هیدروژل‌های کامپوزیتی نیز به سرعت در حال رشد هستند و قابلیت‌های جدیدی را برای کاربردهای پیچیده‌تری فراهم می‌آورند[۳۹]. به‌عنوان مثال، پلیمرهای حافظه‌شکل، الاستومرهای مایع بلورین و آلیاژهای حافظه‌دار، موانع خاص خود را دارند که نیاز به تحقیق بیشتر دارد.در پاسخ به این چالش‌ها، استفاده از روش‌های هوش مصنوعی به ویژه یادگیری ماشین به‌عنوان راهکاری بی‌نظیر برای تسریع در طراحی و کشف مواد و ساختارهای جدید مطرح شده است. با این حال، محدودیت‌های مربوط به نقص تفکر منطقی و قابل توضیح بودن در روش‌های متداول هوش مصنوعی، محققان را به سوی رویکردهای جدیدی مانند هوش مصنوعی نوروسیمبلیک سوق می‌دهد. این رویکرد با ترکیب توانایی‌های یادگیری شبکه‌های عصبی با استدلال منطقی و درک معنایی هوش مصنوعی سمبلیک، می‌تواند محیطی بهتر برای کاوش و کشف مواد فعال و ساختارهای پیچیده ایجاد کند.آینده چاپ چهاربعدی به پیشرفت در زمینه‌های مختلفی وابسته است. بهبود اتوماسیون در طراحی و چاپ، بهینه‌سازی ارزش‌های عملکردی و ایجاد مواد جدید با قابلیت‌های بیشتر می‌تواند امکان استفاده وسیع‌تری از این فناوری را در صنایع مختلف فراهم کند. پژوهش‌های آینده نیاز به تمرکز بر روی توسعه مواد هوشمند نسل آینده و ساختارهای تغییرشکل‌پذیر دارند تا بتوانند به ویژگی‌های مطلوب‌تری دست یابند و در نهایت به کاربردهای جدید و نوآورانه منجر شوند. با توجه به نوآوری‌ها و پیشرفت‌های پیوسته در این حوزه، فرصت‌های بیشتری برای بهره‌برداری از پتانسیل‌های چاپ چهاربعدی در آینده وجود خواهد داشت [۴۰]. چاپ چهاربعدی در مقیاس میکروسکوپی هنوز در مراحل ابتدایی خود قرار دارد. هیدروژل‌ها، مواد کریستالی مایع و مواد کامپوزیتی به‌عنوان مهم‌ترین دسته‌های مواد در این حوزه شناخته شده‌اند. هیدروژل‌ها به دلیل قابلیت جذب آب و تطبیق‌پذیری خود در محیط‌های بیولوژیکی، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی تغییر حجم دهند و به آن‌ها اجازه می‌دهند که به محرک‌های خارجی پاسخ دهند. از سوی دیگر، مواد کریستالی مایع، به دلیل توانایی آن‌ها در تغییر حالت در پاسخ به نور یا درجه حرارت، علاقه‌مندی‌های زیادی را به خود جلب کرده‌اند. یک چالش اصلی در این زمینه، توسعه مواد با قابلیت‌های پاسخگو و همچنین ناپایداری ساختارها است. به‌علاوه، برای تحقق قابلیت‌های چاپ چهاربعدی در مقیاس میکروسکوپی، نیاز به بهبود تکنیک‌های چاپ و طراحی مواد جدید وجود دارد. در آینده، انتظار می‌رود که از این فناوری در کاربردهای پیچیده‌تری مانند طراحی ساختارهای پیچیده‌تر و دقیق‌تر، تولید ربات‌های نرم و ایجاد سنسورهای پیشرفته بهره‌برداری شود. به‌طور کلی، پیشرفت‌های اخیر در زمینه چاپ چهاربعدی نویدبخش آینده‌ای روشن برای این فناوری هستند و لازم است که محققان بر روی چالش‌ها و محدودیت‌های موجود کار کنند تا بتوانند این فناوری را به صورت گسترده‌تری در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار دهند[۴۱]. در بین این مواد، ژل‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری و مدت‌زمان طولانی در کنار ویژگی‌های چالشی، در حوزه رباتیک نرم به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. چاپ چهاربعدی به محققان اجازه می‌دهد اشیاء پیچیده‌ای را طراحی کنند که به‌طور پیش‌برنامه‌ریزی شده قادر به تغییرشکل می‌باشند. این سوابق پیشرفت‌های اخیر در این زمینه، پتانسیل‌های عظیمی را در علم و فناوری، به ویژه در زمینه رباتیک نرم و دستگاه‌های بیونیک به نمایش می‌گذارد. با توجه به پیشرفت‌های جدید در زمینه چاپ چهار بعدی، محققان به دنبال ارائه راهکارهایی هستند که این فناوری را به کاربردهای گسترده‌تری در پزشکی، سنسورها و سیستم‌های رباتیک نرم برسانند. این فناوری به وابستگی کمتری به تأسیسات پیچیده و امکان ساخت سیستم‌های هوشمند و خودکار منجر می‌شود. در نهایت، محققان بر این باورند که با تمرکز بر بهبود ویژگی‌های مواد، روش‌های ساخت، طراحی و مدل‌سازی، می‌توانند چالش‌های موجود را برطرف کرده و آینده‌ای روشن برای چاپ چهاربعدی ایجاد کنند [۴۲]. تحقیقات اخیر نشان داده است که پرینت چهاربعدی می‌تواند به طراحی محصول‌های تطبیق‌پذیر کمک کند که به انرژی‌های محیطی نظیر رطوبت، دما و فشار پاسخ دهند. از طریق چاپ قابل برنامه‌ریزی، قطعات می‌توانند به صورت جمع‌شونده و با کارایی بالا تولید شوند؛ به گونه‌ای که حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی آن‌ها بهینه شود. همچنین این فناوری پتانسیل تغییر چشمگیری در زمینه رباتیک نرم دارد، جایی که می‌توان با استفاده از ساختارهای چاپی چهاربعدی بعدی، نیاز به موتورهای الکتریکی و حسگرهای پیچیده را کاهش داد.مواد هوشمند که در چاپ چهاربعدی استفاده می‌شوند، به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند، از جمله مواد حافظه‌دار که قادر به یادآوری شکل‌های مختلف هستند. این مواد می‌توانند به سرعت به شکل اصلی خود بازگشته و یا به اشکال جدیدی تغییر یابند، که این ویژگی‌ها موجب کاربردهای گسترده‌تری برای آن‌ها در آینده خواهد شد. انتظار می‌رود که چاپ چهاربعدی در آینده نه تنها در توسعه

سنسورها و ارگان‌های مصنوعی کاربردی شود؛ بلکه در طراحی و تولید قطعاتی که خود به‌خود بهبود یافته و ترمیم می‌شوند نیز پیشرفت کند. با پیشرفت در این فناوری، چالش‌هایی همچون ارتباط بین خواص فیزیکی و دیجیتال مواد و برنامه‌ریزی مناسب برای دستیابی به تحولات مورد نظر در زمان مشخص وجود دارند که نیازمند توجه و تحقیق بیشتر هستند. به‌طور کلی، آینده چاپ چهاربعدی با تمرکز بر توسعه مواد جدید، بهبود فرآیندهای چاپ و شناسایی کاربردهای نوآورانه نویدبخش ابداعات و تغییرات چشمگیری در صنایع مختلف خواهد بود [۴۳]. مهم‌ترین پیشرفت‌ها در چاپ چهاربعدی در سال‌های اخیر شامل تولید مواد زیست‌ماده‌ای و تجدیدپذیر است که کاهش زباله و مصرف انرژی را در ساخت‌وساز ممکن می‌سازد. این مواد به ویژه در ترکیب با فناوری چاپ چهاربعدی می‌توانند به‌طور خودکار اصلاح شوند یا خودراست‌سازی داشته باشند که به کاهش نیاز به تعمیر و نگهداری دستی کمک می‌کند. همچنین، چاپ چهاربعدی به معماران و مهندسان این اجازه را می‌دهد که طرح‌های پیچیده‌تری را خلق کنند که با استفاده از روش‌های سنتی قابل دست‌یابی نیستند. با این پیشرفت‌ها آینده چاپ چهاربعدی به سمت مقیاس‌پذیری بیشتر و کاهش هزینه‌ها حرکت می‌کند. تحقیقات در زمینه افزایش قابلیت‌های مواد و بهبود فناوری‌های چاپ باید ادامه یابد. به‌علاوه، رویکردهای بین‌رشته‌ای بین دانشمندان مواد و مهندسان برای توسعه موارد جدید و بهبود سازگاری با استانداردها و مقررات ساختمان ضرروی است. پذیرش عمومی از زیرساخت‌های چاپ‌شده به این فناوری بستگی دارد و همکاری بین نهادهای قانون‌گذار و صنعت برای به‌روزرسانی کدها و استانداردها برای استفاده از چاپ چهاربعدی حیاتی است. در نهایت، اگرچه چاپ چهاربعدی در مراحل اولیه تحقیقات قرار دارد، پتانسیل آن برای تغییر روش‌های طراحی، ساخت و نگهداری سازه‌ها شگفت‌انگیز است و می‌تواند به ساخت یک محیط زیست هوشمندتر، کارآمدتر و پایدارتر برای نسل‌های آینده کمک کند [۴۴].

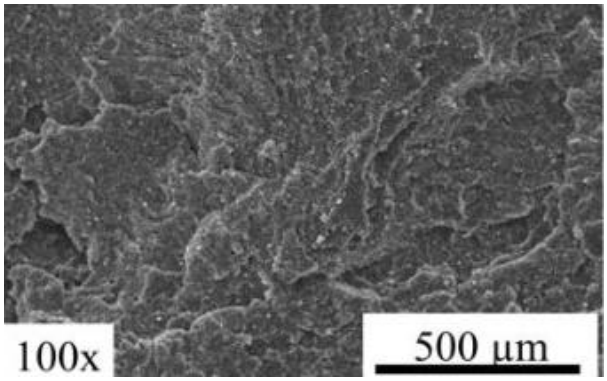
در پیشرفت‌ها و مطالعه‌های جدید انجام شده صمدی اقدم و همکاران [۴۵] به توسعه یک راه‌حل المان محدود برای تحلیل پاسخ ارتعاشی تیرهای کامپوزیتی چندلایه از آلیاژ حافظه‌دار پرداختند. با استفاده از معادلات حرکت تیر اویلر-برنولی و مدل پوراسادیون، روش نیومارک و تکنیک نیوتن-رافسون استفاده و اعتبارسنجی نتایج خود را با شبیه‌سازی تطبیق دادند. آنها در مطالعه خود به بررسی ویژگی‌های دینامیکی تیرهای آلیاژی حافظه‌شکل دو لایه و سه لایه پرداخته و پروفایل‌های انحراف-زمان، تنش-کرنش و سرعت-انحراف را پرداختند و نتیجه گرفتند که خاصیت هیسترزیس آلیاژهای حافظه‌شکل به کاهش دامنه‌های ارتعاشی در مراحل اولیه کمک کرده و ویژگی انرژی‌پذیری آن‌ها در تغییر فاز، آن‌ها را برای کنترل عملکرد دینامیکی در کاربردهای مهندسی مناسب می‌سازد. رحمت آبادی و همکاران [۴۶] نیز جهت بهبود اثر حافظه‌شکل برای پاسخ به حرارت-مغناطیس نانوکامپوزیت‌های پلی‌اتیلن ترفتالات گلیکول[1] برای چاپ چهاربعدی توسعه دادند که در آن نانوذرات اکسید آهن[2] به ماتریس پلی‌اتیلنی افزوده شد. نتایج آنها نشان داد که افزودن نانوذرات اکسید آهن به‌طور قابل توجهی مدول ذخیره و دمای انتقال شیشه‌ای کامپوزیت‌ها را افزایش می‌دهد که نشان‌دهنده بهبود سختی و خواص حرارتی است. به‌ویژه، کامپوزیت حاوی ۱۵٪ اکسید آهن به‌عنوان ترکیب بهینه شناخته شد و بالاترین استحکام کششی و تعادلی مطلوب بین یکپارچگی مکانیکی و انعطاف‌پذیری را نشان داد. همچنین آنها در مطالعه‌ای دیگر [۴۷] به بررسی نانوکامپوزیت‌های پلی‌اتیلن ترفتالات گلیکول اصلاح‌شده با کربن سیاه[3] پرداختند که نوعی پلیمر حافظه‌شکلی هستند و به روش چاپ چهاربعدی تولید می‌شوند. نانوکامپوزیت‌ها با غلظت‌های مختلف کربن سیاه (۰/۵٪، ۱٪ و ۳٪) طراحی کردند تا عملکرد پلی‌اتیلن را در کاربردهای چاپ چهاربعدی بهبود بخشند. آنها نتیجه گرفتند که افزودن کربن سیاه دمای انتقال شیشه‌ای را تغییر داده و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد، به‌طوری‌که کامپوزیت با ۱٪ کربن سیاه بهترین عملکرد را داشت. همچنین توزیع یکنواخت ذرات کربن سیاه تأثیر مثبتی بر خواص مکانیکی و قابلیت چاپ داشت.

رحمت آبادی و همکاران [۴۸] در مطالعه‌ای جدید به بررسی هم‌افزایی بین ترکیب پلیمرهای حافظه‌شکل ، چاپ چهاربعدی و برنامه‌ریزی سرد پرداختند تا عملکرد اثر حافظه‌شکل را بهبود بخشند و کاربردهای پزشکی ساختارهای متخلخل را افزایش دهند. ساختارهای متخلخل پلی‌لاکتیک اسید-پلی‌اورتان با الگوهای چاپ مختلف و تغییر شکل‌های اعمال شده تحت روش‌های فشرده‌سازی محدود و غیرمحدود در دمای اتاق برنامه‌ریزی سرد شدند و در فاز الاستیک بازیابی شدند. نسبت‌های تثبیت شکل و بازیابی شکل محاسبه و مورفولوژی مقطع عرضی با میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. مقادیر تثبیت شکل در محدوده ۳۹/۷۵٪ تا ۷۱/۲۷٪ بود، در حالی‌که نسبت‌های تقریباً کامل بازیابی شکل (۱۰۰٪) برای تمامی

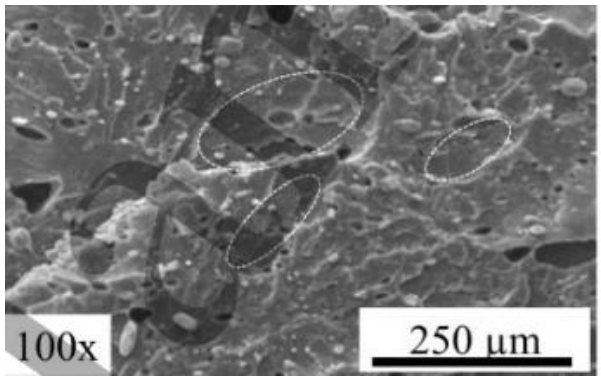
[1] (PETG)-Fe_3O_4
[2] Fe_3O_4
[3] PETG-CB

نمونه‌های متخلخل مشاهده شد. نسبت‌های پایین تثبیت شکل به وجود دو مرحله بازگشت و آرامش ساختار پس از بارگذاری در برنامه‌ریزی سرد نسبت داده می‌شود که ناشی از رفتار الاستیک و ویسکوالاستیک است. دمای انتقال شیشه‌ای ترکیب پلی‌لاکتیک‌اسید-پلی‌اورتان برابر با ۶۹ درجه سانتی‌گراد بود و به مواد خام منتقل شد که نشان‌دهنده احتمال وجود تعامل بین دو جزء است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی توزیع یکنواخت ذرات پلی‌اورتان و مورفولوژی قطره‌ای ماتریس در ترکیب پلی‌لاکتیک اسید-پلی‌اورتان را نشان داد. پس از چاپ، قطرات پلی‌اورتان کشیده شدند و مورفولوژی دریا-زیره‌ای در برخی نواحی مشاهده شد.

شکل (۸) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پلی‌لاکتیک اسید-پلی‌اورتان: الف- فیلامنت، ب- نمونه‌های چاپ شده [۴۸].

دگزیت و همکاران [۴۹] در یک مطالعه جدید یک سیستم کامپوزیت پلیمر حافظه‌دار حساس به دما که با استفاده پلی‌لاکتیک اسید و شیشه بیواکتیو را با چاپ چهاربعدی مبتنی بر حلال ایجاد کردند. تأثیر شیشه بیواکتیو بر قابلیت‌های حرارتی و حافظه‌شکلی کامپوزیت‌ها را مورد بررسی قرار دادند. افزایش درجه بلورینگی و ویژگی‌های ویسکوالاستیک این کامپوزیت منجر به بهبود خواص حافظه‌شکلی مانند ثبات شکل و بازیابی شکل شد. مطالعه آنها نشان داد که پتانسیل استفاده از پلیمرهای حافظه‌دار کامپوزیتی توسعه‌یافته از طریق فناوری چاپ چهاربعدی برای ایجاد اشکال پیچیده در ساختارهای خودجمع‌شونده و دستگاه‌های بیومدیکال هوشمند در آینده وجود دارد. همچنین ستوده و همکاران [۵۰] ترکیبی از پلی‌لاکتیک اسید و میکروذرات فریت استرانسیوم برای ایجاد یک فیلامنت کامپوزیتی ساختند. پس از چاپ و بازیابی شکل از حالت خمیده، برگشت‌پذیری قطعات چاپ شده با استفاده از آهنربای نئودیمیوم با درجه N42 آزمایش شد و برگشت‌پذیری قطعات به‌طور موفقیت‌آمیزی انجام شد. قابلیت کنترل فرآیند بازیابی شکل از طریق یک آزمایش تجربی با استفاده از مدل به‌دست‌آمده نشان داده شد. تفاوت ۳/۶۵٪ بین بازیابی شکل نمونه تجربی و مقدار بازیابی شکلی که از نرم‌افزار به‌دست آمده، دقت بالای مدل ارائه‌شده را نشان می‌دهد.

لی و همکاران [۵۱] پلی‌کربنات را به‌عنوان ماده پایه انتخاب کردند که دمای تغییر شکل حرارتی آن ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است و با فیبر کربن و نانولوله‌های کربنی ترکیب شد. این کامپوزیت سه‌گانه با مسیرهای هدایت‌پذیری "نقطه + خط" ساخته شد. این ماده تحت ولتاژ مستقیم ۵۰ ولت عملکرد الکتریکی برتر و رفتار حافظه‌دار شکل را از خود نشان داد. مسیر هدایت‌پذیری "نقطه + خط" عملکرد الکتریکی مطلوبی را بدون مانع شدن در عملکرد حافظه‌دار شکل پلی‌کربنات ارائه داد. نمونه‌های حافظه‌دار را به شکل U طراحی کردند تا خواص بازیابی شکل را افزایش دهند. یافته‌های آنها پتانسیل کاربردهای وسیع این ماده را در حوزه هوافضا برجسته می‌کند.

همانگونه که در بخش‌های قبلی اشاره شد، چاپ چهار بعدی در زمینه‌های پزشکی پیشرفت بالقوه‌ای داشته است. در این خصوص کانتاروس و همکاران [۵۲] به بررسی پتانسیل کاربردهای بهداشتی چاپ چهاربعدی پرداختند و به کاربردهایی همچون ایمپلنت‌های خودترمیم‌شونده، استنت‌های هوشمند، سیستم‌های تحویل داروی شخصی‌سازی‌شده و دستگاه‌های پروتزی پاسخ‌محور اشاره کردند. آنها به وضوح مطرح کردند که پیشرفت‌های حاصل از چاپ سه‌بعدی بستر مناسبی برای این نوآوری‌ها را فراهم کرده است، در حالی که ویژگی‌های منحصربه‌فرد مواد هوشمند روش‌های جدیدی برای مقابله با مسائل بهداشتی موجود ایجاد می‌کند. کاربرد گسترده چاپ چهاربعدی در پزشکی در حال حاضر با محدودیت‌های مواد، چالش‌های مقرراتی و چالش‌های مالی مواجه است. با وجود این چالش‌ها،

پیشرفت‌های مداوم در فناوری‌ها، همراه با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، پتانسیل غلبه بر این مشکلات را فراهم می‌آورد و بهبود دقت، کارایی و شخصی‌سازی دستگاه‌های پزشکی را ممکن می‌سازد. همچنین وو و همکاران [۵۳] نیز در یک مطالعه مروری به توسعه مواد هوشمند لیگنین و پتانسیل آن‌ها برای چاپ چهار بعدی پرداختند. لیگنین، دومین منبع فراوان زیست‌توده تجدیدپذیر و پایدار است. آنها در مطالعه خود وضعیت فعلی چاپ سه‌بعدی مواد لیگنین را دسته بندی کردند که شامل انتخاب و فرمولاسیون مواد لیگنین بر اساس تکنیک‌های مختلف چاپ، اصلاح شیمیایی لیگنین برای بهبود قابلیت چاپ و زمینه‌های کاربرد مرتبط است.

۶- نتیجه‌گیری

امروزه ساخت افزودنی با کاربرد گسترده‌ای که در صنعت ایجاد کرده است موجب شده تا ساخت سازه‌های پیچیده آسان شود. چاپ سه بعدی که همان ساخت افزودنی است توجه بسیار زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است.چاپ چهاربعدی نیز فناوری جدید می‌باشد که حالت پیشرفته چاپ سه‌بعدی است. بعد چهارم در این فناوری زمان می‌باشد. سازه‌های چاپ شده در چاپ چهاربعدی به محرک‌های خارجی پاسخ می‌دهند و این امر به آن‌ها اجازه می‌دهد تا برخی از ویژگی‌های خود را تغییر دهند. این رفتار پایه‌ای برای پیشرفت‌های انقلابی در زمینه رباتیک، بیومکانیک و صنعت فراهم می‌کند. مواد حافظه‌دار، شامل آلیاژها و پلیمرها، می‌توانند به یک پیکربندی موقت برنامه‌ریزی شوند و سپس در پاسخ به یک محرک خارجی (مانند تغییر دما، رطوبت، مواد مغناطیسی، حرارت و گرما یا PH، یا تماس با آب) به شکل اصلی که در آن پردازش شده‌اند، بازگردند. به خاطر این رفتار، مواد حافظه‌دار در حال حاضر توجه زیادی را در زمینه داروسازی جلب کرده‌اند؛ جایی که می‌توانند نوآوری‌های مهمی در درمان‌های کنونی ایجاد کنند. چاپ چهاربعدی شامل پردازش مواد حافظه‌دار از طریق چاپ سه‌بعدی است و بدین ترتیب تغییرشکل در طول زمان را به امکانات شخصی‌سازی متعدد این فناوری جدید تولید اضافه می‌کند. امروزه با تحقیق و دستیابی به مواد هوشمند و ساخت آنها می‌توان به اهداف مورد نظر جهت پاسخ سازه به یک محرک رسید.

فناوری چاپ چهاربعدی یکی از پیشرفته‌ترین نوآوری‌های عصر حاضر است که با افزودن بعد زمان به چاپ سه‌بعدی، امکان تغییرشکل، عملکرد یا ویژگی‌های مواد چاپ‌شده را در پاسخ به محرک‌های محیطی فراهم می‌کند. این فناوری با استفاده از مواد هوشمند و طراحی‌های محاسباتی، تحولی اساسی در صنایع مختلف ایجاد کرده است. در پزشکی، چاپ چهاربعدی امکان تولید ایمپلنت‌ها و استنت‌های هوشمندی را فراهم می‌کند که می‌توانند در بدن بیمار با توجه به شرایط فیزیولوژیکی تغییر شکل دهند. به‌عنوان مثال، رگ‌های خونی یا ساختارهای استخوانی چاپ‌شده می‌توانند به تدریج با رشد بافت‌های اطراف سازگار شوند. در مهندسی بافت، داربست‌های هوشمند چاپ‌شده قادرند با تحریک‌های مکانیکی یا شیمیایی، سلول‌ها را برای رشد هدایت کنند. در صنعت ساختمان، مصالحی مانند بتن یا کامپوزیت‌های هوشمند می‌توانند در برابر تغییرات دما یا رطوبت واکنش نشان داده و ترک‌ها را ترمیم کنند یا خواص عایق خود را تنظیم نمایند. کاربردهای نظامی و هوافضا نیز از این فناوری بهره می‌برند، مانند بال‌های هواپیما یا ماهواره‌هایی که قادرند در شرایط مختلف جوی یا مداری شکل خود را تغییر دهند تا کارایی بهینه داشته باشند. در رباتیک، ساختارهای نرم چاپ‌شده با قابلیت تغییر شکل، امکان حرکت و انطباق با محیط‌های پیچیده را فراهم می‌کنند. صنعت پوشاک نیز از این فناوری برای تولید لباس‌های هوشمند استفاده می‌کند که می‌توانند بر اساس دما یا رطوبت تغییر کنند یا حتی انرژی حرکتی را ذخیره نمایند. در حوزه انرژی، صفحات خورشیدی یا پنل‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌توانند با تغییر جهت یا ساختار، بازدهی خود را افزایش دهند. سیستم‌های هوشمند آبیاری در کشاورزی که بر اساس رطوبت خاک منبسط یا منقبض می‌شوند نیز از دیگر کاربردهای این فناوری هستند. چاپ چهاربعدی حتی در تولید محصولات مصرفی مانند مبلمان یا اسباب‌بازی‌هایی که بتوانند خود را مونتاژ یا تنظیم کنند نیز استفاده می‌شود. یکی از جذابترین کاربردها در تولید سیستم‌های میکروسیال است که می‌توانند جریان مایعات را بر اساس محرک‌های شیمیایی کنترل کنند. این فناوری با کاهش نیاز به مونتاژ دستی، افزایش بهره‌وری انرژی و امکان ایجاد سیستم‌های خودترمیم‌شونده، آینده صنعت را متحول خواهد کرد. هرچند چالش‌هایی مانند هزینه بالای مواد هوشمند نیاز به طراحی‌های پیچیده محاسباتی و محدودیت در اندازه چاپ وجود دارد، اما پتانسیل آن برای ایجاد انقلابی در تولید و طراحی غیرقابل‌انکار است. با پیشرفت مواد و الگوریتم‌ها انتظار می‌رود کاربردهای چاپ چهاربعدی در حوزه‌های بیشتری ظهور کند و زندگی روزمره را دگرگون سازد.

۷- مراجع

[1] E. Pei, J. Shen, and J. Watling, "Direct 3D printing of polymers onto textiles: experimental studies and

applications," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, no. 5, pp. 556-571, 2015, doi: https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0126.

[2] M. H. Mobarak *et al.*, "Recent advances of additive manufacturing in implant fabrication–A review," *Applied Surface Science Advances*, vol. 18, p. 100462, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100462.

[3] J. C. Breger *et al.*, "Self-folding thermo-magnetically responsive soft microgrippers," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 7, no. 5, pp. 3398-3405, 2015, doi: https://doi.org/10.1021/am508621s.

[4] S. Miyashita, S. Guitron, M. Ludersdorfer, C. R. Sung, and D. Rus, "An untethered miniature origami robot that self-folds, walks, swims, and degrades," in *2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, 2015: IEEE, pp. 1490-1496, doi: https://doi.10.1109/ICRA.2015.7139386 .

[5] M. Quanjin, M. Rejab, M. Idris, N. M. Kumar, M. Abdullah, and G .R. Reddy, "Recent 3D and 4D intelligent printing technologies: A comparative review and future perspective," *Procedia Computer Science*, vol. 167, pp. 1210-1219, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.434.

[6] Y. Y. C. Choong, S. Maleksaeedi, H .Eng, S. Yu, J. Wei, and P.-C. Su, "High speed 4D printing of shape memory polymers with nanosilica," *Applied Materials Today*, vol. 18, p. 100515, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100515.

[7] A. Nishiguchi, H. Zhang, S. r. Schweizerhof, M .F. Schulte, A. Mourran, and M. Möller, "4D printing of a light-driven soft actuator with programmed printing density," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 12, no. 10, pp. 12176-12185, 2020, doi: https://doi.org/10.1021/acsami.0c02781.

[8] S. A. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue, and C. Charitidis, "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," *Materials today*, vol. 21, no. 1, pp. 22-37, 2018, doi: https://doi.org/10/١٠١۶.j.mattod.2017.07.001.

[9] H. A. Alshahrani, "Review of 4D printing materials and reinforced composites: Behaviors, applications and challenges," *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, vol. 6, no. 2, pp. 167-185, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2021.03.006.

[10] Y. S. Alshebly, M. Nafea, M. S. M. Ali, and H. A. Almurib, "Review on recent advances in 4D printing of shape memory polymers," *European Polymer Journal*, vol. 159, p. 110708, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110708.

[12] J. Gardan, "Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends," *Virtual and physical prototyping*, vol. 14, no. 1, pp. 1-18, 2019, doi: https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1518016.

[12] N. Van de Werken, H. Tekinalp, P. Khanbolouki, S. Ozcan, A. Williams, and M. Tehrani, "Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective," *Additive Manufacturing*, vol. 31, p. 100962, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100962.

[13] C. Duty *et al.*, "What makes a material printable? A viscoelastic model for extrusion-based 3D printing of polymers," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35, pp. 526-537, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.008.

[14] A. Bayati *et al.*, "3D printed elastomers with superior stretchability and mechanical integrity by parametric optimization of extrusion process using Taguchi Method," *Materials Research Express*, vol. 12, no. 1, p. 015301, 2025, doi: https://DOI.org/10.1088/2053-1591/ada1a6.

[15] H. Ding, X. Zhang, Y. Liu, and S. Ramakrishna, "Review of mechanisms and deformation behaviors in 4D printing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 4633-4649, 2019, doi: https://doi.org/10.1007/s00170..٣-٠٣٨٧١-٠١٩-

[16] M. H. Ali, A. Abilgaziyev, and D. Adair, "4D printing: a critical review of current developments, and future prospects," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 701-717, 2019, doi: https://doi.org/1/٠/١٠٠٧s00170-019-04258-0.

[17] A. Y. Lee, J. An, and C. K. Chua, "Two-way 4D printing: a review on the reversibility of 3D-printed shape memory materials," *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 663-674, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.014.

[18] Q. Ge, A. H. Sakhaei, H. Lee, C. K. Dunn, N. X. Fang, and M. L. Dunn, "Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers," *Scientific reports*, vol. 6, no. 1, p. 31110, 2016, doi: https://doi.org/10.1038/srep31110.

[19] A. Ahmed, S. Arya, V .Gupta, H. Furukawa, and A. Khosla, "4D printing: Fundamentals, materials, applications and challenges," *Polymer*, vol. 228, p. 123926, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123926.

[20] Y. Liu, B. Shaw, M. D. Dickey, and J. Genzer, "Sequential self-folding of polymer sheets," *Science Advances*, vol. 3, no. 3, p. e1602417, 2017, doi: https://doi.org/10.1126/sciadv.1602417.

[21] J. Wu, Z. Zhao, X. Kuang, C. M. Hamel, D. Fang, and H. J. Qi, "Reversible shape change structures by grayscale pattern۴ D printing," *Multifunctional Materials*, vol. 1, no. 1, p. 015002, 2018, doi: https://doi.org/10.1088/2399-7532/aac322.

[22] A. Kantaros, T. Ganetsos, and D. Piromalis, "4D printing: technology overview and smart materials utilized," *Kantaros, A., Ganetsos, T. & Piromalis, D.(2023). 4D Printing: Technology Overview and Smart Materials Utilized. Journal of Mechatronics and Robotics*, vol. 7, no. 1, pp. 1-14, 2023, doi: https://doi.org/10.3844/jmrsp.2023.1.14.

[23] R. Sajjad *et al.*, "A review of 4D printing–technologies, shape shifting, smart polymer based materials, and biomedical applications," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 7, no. 1, pp. 20-36, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.08.002.

[24] S. Li, "Review on development and application of 4D-printing technology in smart textiles," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 18, p. 15589250231177448, 2023, doi: https://doi.org/10.1177/15589250231177448.

[25] P. E. Antezana *et al.*, "4D printing: The development of responsive materials using 3D-printing technology," *Pharmaceutics*, vol. 15, no. 12, p. 2743, 2023, doi: https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15122743.

[26] I. Sahafnejad-Mohammadi, M. Karamimoghadam, A. Zolfagharian, M. Akrami, and M. Bodaghi, "4D printing technology in medical engineering: a narrative review," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, no. 6, p. 233, 2022, doi: https://doi.org/10.1007/s40430-022-03514-x.

[27] S. Joshi *et al.*, "4D printing of materials for the future: opportunities and challenges. Appl Mater Today 18: 100490," ed, 2019.

[28] M. Ramezani and Z. Mohd Ripin, "4D printing in biomedical engineering: Advancements, challenges, and future directions," *Journal of functional biomaterials*, vol. 14, no. 7, p. 347, 2023, doi: https://doi.org/10.3390/jfb14070347.

[29] J. Andre and F. Demoly, "The status, barriers, challenges, and future in design for 4D printing," *Materials & Design*, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110193.

[30] F. K. Aldawood, "A comprehensive review of 4D printing: state of the arts, opportunities, and challenges," in *Actuators*, 2023, vol. 12, no. 3: MDPI, p. 101, doi: https://doi.org/10.3390/act12030101 .

[31] C. de Kergariou, F. Demoly, A. Perriman, A. Le Duigou, and F. Scarpa, "The design of 4D-printed hygromorphs: state-of-the-art and future challenges," *Advanced Functional Materials*, vol. 33, no. 6, p. 2210353, 2023, doi: https://doi.org/10.1002/adfm.202210353.

[32] M. C. Biswas, S. Chakraborty, A. Bhattacharjee, and Z. Mohammed, "4D printing of shape memory materials for textiles: mechanism, mathematical modeling, and challenges," *Advanced Functional Materials*, vol. 31, no. 19, p. 2100257, 2021, doi: https://doi.org/10.1002/adfm.202100257.

[33] H. Chu *et al.*, "4D printing: a review on recent progresses," *Micromachines*, vol. 11, no. 9, p. 796, 2020, doi: https://doi.org/10.3390/mi11090796.

[34] A. Mahmood, T. Akram, H. Chen, and S. Chen, "On the evolution of additive manufacturing (3D/4D printing) technologies: Materials, applications, and challenges. Polymers, 14 (21), 4698," ed, 2022.

[35] W. Zhou *et al.*, "4D-printed dynamic materials in biomedical applications: chemistry, challenges, and their future perspectives in the clinical sector," *Journal of medicinal chemistry*, vol. 63, no. 15, pp. 8003-8024, 2020, doi: https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.9b02115.

[36] U. K. Vates, S. Mishra, and N. J. Kanu, "Biomimetic 4D printed materials: A state-of-the-art review on concepts, opportunities, and challenges ",*Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 3313-3319, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.148.

[37] L. Zeenat, A. Zolfagharian, Y. Sriya, S. Sasikumar, M. Bodaghi, and F. Pati, "4D printing for vascular tissue engineering: Progress and challenges," *Advanced Materials Technologies*, vol. 8, no. 23, p. 2300200, 2023, doi: https://doi.org/10.1002/admt.202300200.

[38] G. A. Appuhamillage, S. S. Ambagaspitiya, R. S. Dassanayake, and A. Wijenayake, "3D and 4D printing of biomedical materials: Current trends, challenges, and future outlook," *Exploration of Medicine*, vol. 5, no. 1, pp. 17-47, 2024, doi: https://doi.org/10.37349/emed.2024.00203.

[39] X. Kuang *et al.*, "Advances in 4D printing: materials and applications," *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 2, p. 1805290, 2019, doi: https://doi.org/10.1002/adfm.201805290.

[40] O. Bougzime, C. Cruz, J.-C. André, K. Zhou, H. J. Qi, and F. Demoly, "Neuro-Symbolic Artificial Intelligence in Accelerated Design for 4D Printing: Status, Challenges ,and Perspectives," *Materials & Design*, p. 113737, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113737.

[41] C. A. Spiegel *et al.*, "4D printing at the microscale," *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 26, p. 1907615, 2020, doi: https://doi.org/۱۰/۱۰۰۲/adfm.201907615.

[42] K. Ahmed, M. N. I. Shiblee, A. Khosla, L. Nagahara, T. Thundat, and H. Furukawa, "Recent progresses in 4D printing of gel materials," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 167, no. 3, p. 037563, 2020, doi: https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab6e60.

[43] E. Pei and G. H. Loh, "Technological considerations for 4D printing: an overview," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 3, pp. 95-107, 2018, doi: https://doi.org/10.1007/s40964-018-0047-1.

[44] A. A. Firoozi and A. A .Firoozi, "A systematic review of the role of 4D printing in sustainable civil engineering solutions," *Heliyon*, vol. 9, no. 10, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20982.

[45] K. Samadi-Aghdam, P. Fahimi, H. Shahsavari, D. Rahmatabadi, and M. Baghani, "Vibration Analysis of Shape Memory Alloy Enhanced Multi-Layered Composite Beams with Asymmetric Material Behavior," *Materials*, vol. 18, no. 5, p. 1181, 2025, doi: https://doi.org/10.3390/ma18051181.

[46] D. Rahmatabadi *et al.*, "4D printing thermo-magneto-responsive PETG-Fe3O4 nanocomposites with enhanced shape memory effects," *Applied Materials Today*, vol. 40, p. 102361, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102361.

[47] D. Rahmatabadi *et al.*, "Poly (ethylene terephthalate) glycol/carbon black composites for 4D printing," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 325, p. 129737, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129737 .

[48] D. Rahmatabadi *et al.*, "4D printing of porous PLA-TPU structures: effect of applied deformation, loading mode and infill pattern on the shape memory performance," *Physica Scripta*, vol. 99, no. 2, p. 025013, 2024, doi: https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad1957.

[49] G. Dixit and P. M. Pandey, "Experimental investigations of temperature-sensitive shape memory polymer composites for 4D printing," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 38, no. 2, pp. 537-563, 2025, doi: https://doi.org/10.1177/08927057241254322.

[50] S. M. R. Sotoudeh, M. S. Yazdi, M. H. Hosseinzadeh, and M. Hassanpour, "Investigating the reversible performance of shape memory composites in 4D printing using magnetic field stimulation: Case study of polylactic acid/SrFe12O19 composite filament," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 10, no. 1, pp. 327-337, 2025, doi: https://doi.org/10.1007/s40964-024-00625-w.

[51] G. Li *et al.*, "4D printing of polycarbonate ternary composites and the biomimetic folding deployment mechanisms," *Advanced Composites and Hybrid Materials*, vol. 8, no. 1, pp. 1-12, 2025, doi: https://doi.org/1/۰/۱۰۰۷s42114-024-01090-3.

[52] A. Kantaros, F. I. T. Petrescu, and T. Ganetsos, "From stents to smart implants employing biomimetic materials: The impact of 4D printing on modern healthcare," *Biomimetics*, vol. 10, no. 2, p. 125, 2025, doi: https://doi.org/10.3390/biomimetics10020125.

[53] T. Wu *et al.*, "From 3D to 4D printing of lignin towards green materials and sustainable manufacturing," *Materials Horizons*, 2025, doi: https://doi.org/10.1039/D4MH01680G.