نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

دوره ۳۴، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۶۱، خرداد و تیر ۱۴۰۴، صفحه ۹۴-۷۴
ISSN: 1605-9719

DOI: https://doi.org/10.30506/mmep.2025.2049761.2222

چاپ چهاربعدی: تحول در ساخت ربات های نرم

ابوالفضل فورگی‌نژاد*
استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی بیرجند،
بیرجند

سید محمد امام
دانشیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشکده مهندسی،
دانشگاه اردکان، اردکان

مسعود رخش‌خورشید
دانشیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی بیرجند،
بیرجند

حسین افشاری
دانشجوی دکتری،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه بیرجند، بیرجند

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵
بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

چکیده: چاپ چهاربعدی به عنوان یک نوآوری تحول آفرین در حوزه ساخت افزایشی، امکانات جدیدی برای طراحی و ساخت ربات های نرم ارائه کرده است. این فناوری با ترکیب چاپ سه بعدی و مواد هوشمند، امکان تولید ساختارهایی را فراهم می کند که می توانند به طور پویا به تغییرات محیطی مانند دما، رطوبت، نور و میدان های مغناطیسی پاسخ دهند. در این مطالعه، انواع مواد هوشمند، روش های چاپ و کاربردهای چاپ چهاربعدی در حوزه های مختلف بررسی شده است. همچنین، ویژگی های مواد حافظه دار و تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند بر عملکرد و رفتار ربات های نرم مطالعه شده است. این ربات ها، که در بسیاری از موارد الهام گرفته از سیستم های زیستی هستند، با استفاده از مواد نرم و محرک های متنوع قادر به انجام حرکات پیچیده و سازگار با محیط می باشند. پژوهش های انجام شده نشان می‌دهد که چاپ چهاربعدی در مقایسه با روش های سنتی، از نظر زمان تولید، دقت و تطبیق پذیری عملکردی مزیت های قابل توجهی به ویژه در ساخت ربات‌های نرم دارد.

واژه‌های راهنما: ربات نرم، ساخت افزایشی، چاپ چهاربعدی، مواد هوشمند، عملگرها

4D Printing: An evolution in the manufacturing of soft robots

Abolfazl Foorginejad*
Assistant Professor,
Department of Mechanical Engineering,
Birjand University of Technology,
Birjand

Sayyed Mohammad Emam
Associate Professor,
Department of Mechanical Engineering,
Ardakan University, Ardakan

Masoud Rakhshkhorshid
Associate Professor,
Department of Mechanical Engineering,
Birjand University of Technology,
Birjand

Hossein Afshari
PhD Student,
Department of Mechanical Engineering,
University of Birjand, Birjand

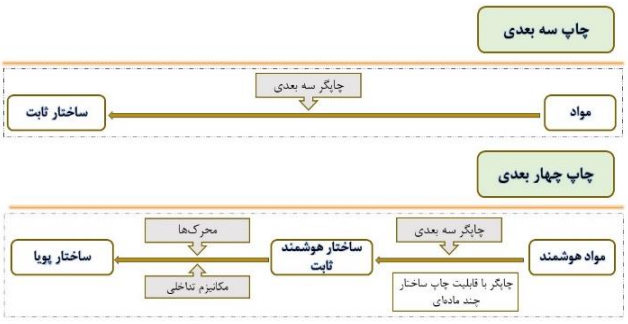
Abstract: 4D printing, as a groundbreaking innovation in the field of additive manufacturing, has provided new possibilities for the design and fabrication of soft robots. This technology, by integrating 3D printing and smart materials, enables the creation of structures that can dynamically respond to environmental changes such as temperature, humidity, light, and magnetic fields. This study explores various types of smart materials, printing methods, and the applications of 4D printing in different fields. It also investigates the properties of shape-memory materials and the impact of various process parameters on the performance and behavior of soft robots. These robots, inspired by biological systems, are capable of performing complex and adaptive movements using soft materials and diverse actuators. Research has shown that 4D printing, compared to traditional methods, offers significant advantages in terms of production time, precision, and functional adaptability, particularly in the fabrication of soft robots.

Keywords: Soft robot, Additive manufacturing, 4D printing, Smart materials, Actuators

* نویسنده مسئول، foorginejad@birjandut.ac.ir

۱- مقدمه

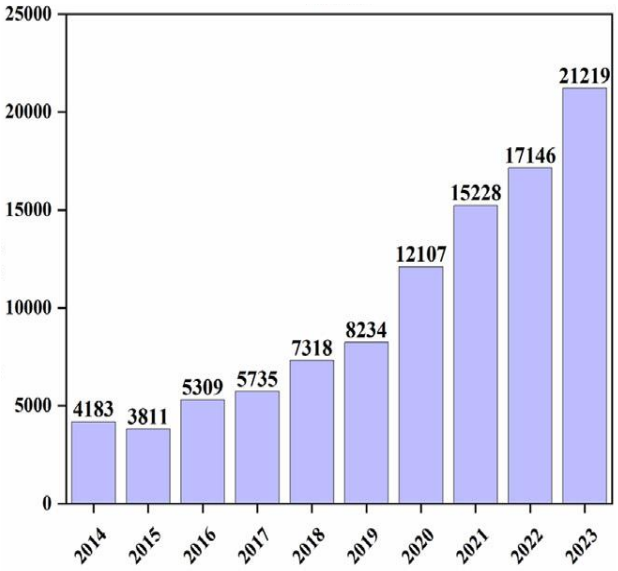
چاپ سه‌بعدی[1] یا ساخت افزایشی[2] فرآیندی است که در آن اشیاء سه‌بعدی به‌صورت لایه‌لایه از مواد مختلف تولید می‌شوند. این فناوری از یک مدل دیجیتال سه‌بعدی، معمولاً طراحی‌شده با نرم‌افزارهای کد[3] به‌عنوان مبنا استفاده می‌کند [۱]، [۲]، [۳]. سپس دستگاه چاپگر سه‌بعدی با استفاده از مواد مختلف مانند پلاستیک، فلز، رزین یا کامپوزیت‌ها، لایه‌ها را به‌صورت متوالی روی هم قرار می‌دهد تا شیء نهایی شکل بگیرد [۴]، [۵]. چاپ چهاربعدی[4] به‌عنوان یکی از جدیدترین تحولات در فناوری ساخت افزایشی، گامی فراتر از چاپ سه‌بعدی است که تفاوت آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. این فناوری توانایی طراحی و تولید سیستم‌های پیچیده و دینامیکی را دارد که نه تنها شکل یا ساختار آن‌ها قابل شخصی‌سازی است، بلکه با بکارگیری مواد هوشمند[5]، می‌توانند در پاسخ به عوامل محیطی مانند دما، رطوبت، نور، یا میدان مغناطیسی تغییر کنند [۶]، [۷]. استفاده از این مواد هوشمند با قابلیت خودترمیمی، نیاز به تعمیرات دستی را کاهش داده و درنتیجه باعث کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شوند[۸]. از سوی دیگر، انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات محیطی یا شرایط کاری باعث جلوگیری از آسیب‌های ناشی از فرسودگی و کاهش نیاز به تعویض قطعات می‌شود[۹]. این قابلیت‌ها باعث شده که این فناوری در حوزه‌های حساس مانند رباتیک نرم، پزشکی، هوافضا، معماری و طراحی صنعتی جایگاه ویژه‌ای پیدا کند [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]. به دلیل توانایی این فناوری در حل مسائل طراحی و تولید که پیش از این قابل دستیابی نبودند، تحقیقات و سرمایه‌گذاری‌های گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است. تحقیقات منتشر شده در سال‌های اخیر همانگونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، روند رو به رشد این فناوری را نشان می‌دهد.



شکل ۱ نمایش شماتیک تفاوت بین چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی

اهمیت این فناوری به‌قدری است که در حال تبدیل شدن به ابزاری استاندارد برای طراحی محصولاتی است که در آینده باید به‌طور مداوم با محیط سازگار شوند [۱۴]، [۱۵]، [۱۶].

مفهوم چاپ چهاربعدی نخستین بار در سال ۲۰۱۳ توسط اسکایلر تیبتس معرفی شد [۱۷]. این ایده که در ابتدا تنها یک مفهوم آزمایشگاهی بود، با پیشرفت در علم مواد و تکنیک‌های چاپ به یک فناوری کاربردی تبدیل شد [۱۸]، [۱۹].



شکل ۲ تعداد مقالات منتشر شده در زمینه چاپ چهاربعدی[۱۳]

ترکیب مواد حافظه‌دار مانند پلیمرها و آلیاژها با روش‌های چاپ پیشرفته باعث توسعه این فناوری در زمینه‌های گوناگون شد. به مرور زمان، شرکت‌ها و مؤسسات پژوهشی بیشتری به توسعه این فناوری پرداختند و آن را به یکی از حوزه‌های جذاب در تحقیقات میان‌رشته‌ای تبدیل کردند [۲۰]، [۲۱].

با رشد فناوری‌های چاپ چندموادی و کاهش هزینه تولید، استفاده از چاپ چهاربعدی در صنایع مختلف افزایش یافته است. پیشرفت در فناوری‌هایی مانند چاپ جوهرافشان و چاپ چندلایه‌ای نیز باعث شده که امکان تولید ساختارهای پیچیده‌تر و دقیق‌تر فراهم شود. در سال‌های اخیر، آزمایشگاه‌های تحقیقاتی در حوزه نانوفناوری، زیست‌فناوری و سیستم‌های پزشکی پیشرفته نقش مهمی در توسعه این فناوری ایفا کرده‌اند [۱۴]، [۲۰]، [۲۲]. تاریخچه این فناوری نشان‌دهنده یک مسیر تکاملی است که هر مرحله آن با دستاوردهای چشمگیری همراه بوده است.

[1] 3D Printing
[2] Additive Manufacturing
[3] Computer Aided Design (CAD)
[4] 4D Printing
[5] Smart Materials (SM)

پلیمرهای حافظه‌دار که می‌توانند پس از تغییر شکل به شکل اولیه خود بازگردند، از جمله پرکاربردترین مواد هوشمند در این فناوری هستند. علاوه بر این، هیدروژل‌ها که قابلیت واکنش به رطوبت یا تغییرات pH دارند و همچنین آلیاژهای حافظه‌دار که به محرک‌های حرارتی یا مکانیکی پاسخ می‌دهند، نقش حیاتی در کاربردهای پیشرفته ایفا می‌کنند [۲۳]، [۲۴]، [۲۵]. پیشرفت‌های اخیر در توسعه مواد هوشمند به تولید موادی منجر شده است که چند منظوره هستند و قابلیت پاسخ به چندین محرک مختلف را دارند. به‌عنوان مثال، مواد کامپوزیتی که شامل پلیمرهای حافظه‌دار و فیبرهای کربنی هستند، نه تنها مقاومت مکانیکی بالایی دارند؛ بلکه می‌توانند به تغییرات دمایی یا مکانیکی واکنش نشان دهند. این ویژگی‌ها باعث شده که این فناوری برای کاربردهایی مانند ساخت ایمپلنت‌های پزشکی، طراحی داروهای هوشمند و حتی توسعه رباتیک نرم بسیار جذاب باشد. اهمیت مواد هوشمند در چاپ چهاربعدی به‌قدری است که بخش عمده‌ای از تحقیقات این حوزه به بهبود ویژگی‌های این مواد اختصاص یافته است [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹].

همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، فناوری چاپ چهاربعدی در طیف وسیعی از صنایع به کار گرفته می‌شود.

شکل ۳ کاربردهای چاپ ۴بعدی

یکی از مهم‌ترین کاربردهای این فناوری در حوزه پزشکی است. از این فناوری برای تولید استنت‌های هوشمند، داربست‌های زیستی و حتی سیستم‌های دارورسانی استفاده می‌شود که می‌توانند به‌طور خودکار با شرایط بدن بیمار تطبیق پیدا کنند [۱۶]، [۲۰]، [۳۰]. در حوزه معماری، استفاده از چاپ چهاربعدی منجر به طراحی سازه‌هایی شده است که می‌توانند به‌صورت خودکار تغییرشکل دهند تا بهره‌وری انرژی را افزایش دهند [۳۱]، [۳۲]. قطعات تولید شده با این فناوری در صنعت هوافضا با قابلیت خودکار تغییرشکل و انطباق با شرایط محیطی، می‌توانند کارایی و دوام بیشتری داشته باشند [۳۳]، [۳۴]. به‌عنوان مثال، بال‌های هوشمندی که با استفاده از مواد حافظه‌دار تولید می‌شوند، جریان هوا را بهینه و مصرف سوخت را کاهش می‌دهند. این فناوری همچنین در صنایع خودروسازی، مد و طراحی صنعتی به‌کار گرفته شده است. در واقع، چاپ چهاربعدی با ارائه راهکارهای نوآورانه، کاربردهای متنوع و بی‌پایانی را ارائه می‌دهد [۱۱]، [۳۴]، [۳۵].

علی‌رغم مزیت‌های ذکر شده، فناوری چاپ چهاربعدی با چالش‌هایی نیز روبه‌رو است. یکی از این چالش‌ها هزینه بالای مواد هوشمند و فرآیندهای پیچیده تولید است. علاوه بر این، طراحی و شبیه‌سازی ساختارهای چهاربعدی نیازمند نرم‌افزارهای پیشرفته و تیم‌های چندرشته‌ای است که می‌تواند فرایند توسعه را کندتر کند [۳۷]، [۳۸]. با این حال، پیشرفت در زمینه‌های نانوفناوری و چاپ چندلایه‌ای می‌تواند این محدودیت‌ها را کاهش دهد و به گسترش استفاده از این فناوری کمک کند [۵]، [۲۷].

در حال حاضر ساخت قطعات فلزی و ربات‌های نرم در کانون توجه پژوهشگران حوزه ساخت افزایشی قرار گرفته است [۳۴]، [۳۵]، [۳۶]. در آینده، چاپ چهاربعدی می‌تواند به یک فناوری اصلی در حل چالش‌های جهانی مانند تغییرات اقلیمی و بهبود مراقبت‌های بهداشتی تبدیل شود. توسعه مواد زیست‌تخریب‌پذیر و سیستم‌های هوشمند برای مدیریت منابع طبیعی تنها بخشی از چشم‌اندازهای این فناوری است. همچنین، ترکیب این فناوری با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌تواند طراحی‌های خودمختار و پیچیده‌تری را ممکن سازد که به‌طور همزمان به چالش‌های فنی و اقتصادی پاسخ دهند. چاپ چهاربعدی بدون شک در مسیر تبدیل به یک فناوری انقلابی قرار دارد که تأثیر عمیقی بر صنایع مختلف خواهد گذاشت.

رباتیک نرم یکی از شاخه‌های نوظهور و در حال رشد سریع در عرصه رباتیک است. این ربات‌ها عمدتاً از مواد نرم و انعطاف‌پذیر به‌ویژه پلیمرهای پیشرفته ساخته شده‌اند که تعامل با انسان را ایمن‌تر و سازگارتر می‌سازند. مواد مورد استفاده در این ربات‌ها عمدتاً شامل سیلیکون، پلیمرهای نرم، الاستومرهایی مثل الاستومرهای ترموپلاستیک[1] و پلی‌یورتان‌های ترموپلاستیک[2]، کامپوزیت‌های پلیمری و مواد هوشمند است[۳۹]، [۴۰]. با این حال، ساخت این نوع ربات‌ها همچنان فرایندی چالش‌برانگیز است که نیازمند زمان و تلاش زیادی می‌باشد. ربات‌های نرم با الهام از اصول بیولوژیکی موجوداتی نظیر

[1] Thermoplastic Elastomer (TPE)

[2] Thermoplastic Polyurethane (TPU)

خرطوم فیل، چتر دریایی، اختاپوس و کرم‌ها طراحی شده‌اند و از مواد و ساختارهایی بهره می‌برند که این اشکال طبیعی را شبیه‌سازی می‌کنند. زمانی که این ربات‌ها توسط محرک‌هایی مانند فشار هوا، فشار سیال، ولتاژ الکتریکی، گرما، رطوبت یا نور فعال می‌شوند، تغییرشکل می‌دهند و حرکات پیچیده‌ای مانند خم شدن، کشیدگی، انقباض و چرخش را به‌طور مستقل یا ترکیبی انجام می‌دهند. ساختار منحصربه‌فرد و نوع تحریک این ربات‌ها به آن‌ها امکان می‌دهد تا با محیط‌های متغیر به‌خوبی سازگار شوند، اشیای مختلف را تشخیص دهند و تعامل مؤثری با آن‌ها داشته باشند [۷]، [۳۳]. این ویژگی‌ها، ربات‌های نرم را برای کاربردهایی که نیازمند دقت و حساسیت بالا هستند، به گزینه‌ای مناسب تبدیل کرده است.

در این مقاله، با بررسی جامع جنبه‌های مرتبط با چاپ چهاربعدی از جمله روش‌ها، مواد، محرک‌ها و کاربردها، به مرور جدیدترین دستاوردها در حوزه ربات‌های نرم پرداخته شده است.

۲- روش‌های چاپ چهار بعدی

روش‌های چاپ چهاربعدی عمدتاً بر پایه تکنیک‌های چاپ سه‌بعدی توسعه یافته‌اند و با استفاده از مواد هوشمند و فرآیندهای پیشرفته، امکان تولید ساختارهایی را فراهم می‌کنند که در پاسخ به محرک‌های خارجی تغییر شکل یا عملکرد دهند. یکی از روش‌های متداول مدل‌سازی با رسوب ذوبی می‌باشد [۴۱]، [۴۲]، [۴۳]. این فرآیند همچنین ساخت با رشته ذوب‌شونده[1] نیز نامیده می‌شود [۴۴]، [۴۵]، [۴۶]. در این روش، مواد ترموپلاستیک یا کامپوزیت‌های حافظه‌دار به‌صورت رشته‌ای ذوب می‌شوند و لایه‌به‌لایه روی هم قرار می‌گیرند. با طراحی خاص این لایه‌ها و استفاده از مواد هوشمند، محصول نهایی می‌تواند پس از چاپ در واکنش به محرک‌هایی مانند دما یا رطوبت تغییر شکل دهد. این روش به دلیل هزینه کمتر و قابلیت تولید با طیف گسترده‌ای از مواد، یکی از متداول‌ترین روش‌ها در چاپ چهاربعدی است [۴۷]. یکی دیگر از روش‌هایی که قادر به ساخت قطعات با دقت ابعادی بالا می‌باشد فتوپلیمریزاسیون مخزنی[2] می‌باشد. در این روش، از فوتوپلیمرهای هوشمند استفاده می‌شود که می‌توانند در معرض نور و یا شرایط محیطی تغییر شکل دهند. این مواد با ترکیباتی مانند پلیمرهای حافظه‌دار یا هیدروژل‌ها ترکیب می‌شوند. چاپ سه‌بعدی با رزین مایع در یک مخزن با استفاده از منبع نور لیزر یا ماوراء بنفش برای سخت شدن فوتوپلیمر در لایه‌های دلخواه انجام می‌شود [۴۷]. چاپ چهاربعدی با برنامه‌ریزی تغییرات با قرار دادن نواحی مختلف با خواص مکانیکی متفاوت صورت می‌پذیرد. در چاپ جوهرافشان، قطرات ریز جوهر حاوی مواد هوشمند به‌صورت دقیق روی سطح چاپ می‌شوند. این روش برای تولید ساختارهای پیچیده با دقت بالا بسیار مناسب است و امکان استفاده از چندین ماده به‌طور هم‌زمان را فراهم می‌کند. ساختارهای تولیدشده می‌توانند به محرک‌هایی مانند میدان مغناطیسی یا الکتریکی پاسخ دهند. روش‌های مبتنی بر لیزر شامل فرآیندهایی مانند تفجوشی انتخابی لیزر[3] و تفجوشی فلز انتخابی با لیزر[4] هستند که در آن‌ها لیزر برای ذوب کردن مواد پودری و ایجاد ساختارهای لایه‌به‌لایه استفاده می‌شود [۵]، [۴۸]. با استفاده از مواد هوشمند مانند آلیاژهای حافظه‌دار، ساختارهای تولیدشده می‌توانند تحت تأثیر دما یا تنش مکانیکی، عملکرد خود را تغییر دهند. روش‌های متداول مورد استفاده در چاپ چهاربعدی در شکل (۴) نشان داده شده است.

۳- مواد هوشمند

در انتخاب مواد برای چاپ چهاربعدی، هوشمندی مواد و قابلیت چاپ دو فاکتور اصلی می‌باشند. ماهیت مواد هوشمند به ارتباط بین عملکرد فنی (مانند حسگر، مبدل یا محرک)، نوع محرک و ویژگی‌های ذاتی مواد (مانند فلز، آلیاژ، پلیمر یا سرامیک) بستگی دارد. انتخاب موادی که توانایی پاسخگویی به تعامل با یک محرک را داشته باشند، امری ضروری است [۱۹]. ماده هوشمند ماده‌ای است که رفتار خود را به‌صورت خاص برای واکنش به یک محرک خاص تغییر می‌دهد. این مواد به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان، به عنوان محرک‌های غیرمتعارف شناخته می‌شوند، چرا که ساختار آن‌ها شامل قابلیت حسگری، تحریک و توانایی مکانیکی است. همچنین این مواد را مواد فعال می‌نامند زیرا رفتار آن‌ها در اثر محرک‌های خارجی همواره در حال تغییر است [۴۹].

۳-۱- پلیمرهای حافظه‌دار

پلیمرهای حافظه‌دار[5] موادی هوشمند هستند که می‌توانند شکل خود را تحت شرایط خاصی تغییر داده و پس از حذف محرک به

[1] Fused Filament Fabrication (FFF)
[2] Vat Photopolymerization
[3] Selective Laser Sintering (SLS)
[4] Direct Metal Laser Sintering (DMLS)
[5] Shape Memory Polymers (SMPs)

شکل اولیه بازگردند. این پلیمرها معمولاً دارای دو فاز مجزا هستند: یک فاز موقت که به‌وسیله تغییر دما، نور، یا میدان الکتریکی تثبیت می‌شود و یک فاز دائمی که به ساختار شیمیایی و خواص مکانیکی پایه پلیمر بستگی دارد. هنگامی که پلیمر به شکل موقت تغییر داده شود، تحریک مناسب (مانند افزایش دما یا تابش نور) باعث آزادسازی انرژی ذخیره شده در پلیمر و بازگشت آن به شکل اصلی‌اش می‌شود. پلیمرهای حافظه‌دار با خواصی مانند وزن کم، هزینه پایین، و امکان تولید انبوه، یکی از نویدبخش‌ترین مواد در فناوری‌های پیشرفته مانند چاپ چهاربعدی به‌شمار می‌روند [۲۷]، [۲۸].

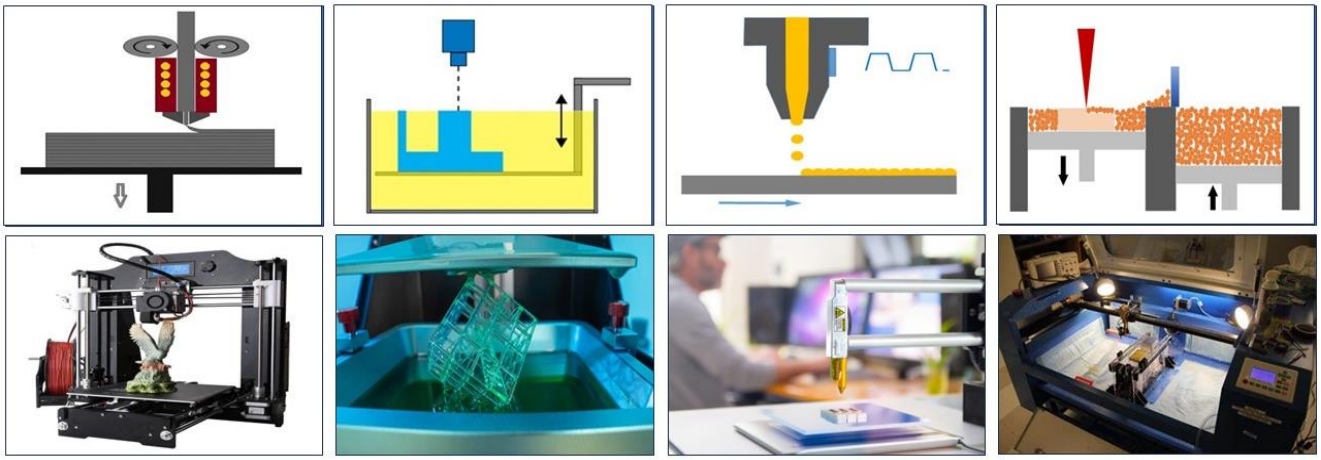
فرآیند چرخه حافظه شکلی شامل تغییر شکل، تثبیت شکل و تخلیه تنش خارجی است. پلیمر باید ابتدا تحت تنش خارجی همراه با فرآیند گرمایش قبل از انجام فرآیند حافظه‌شکل تغییر شکل داده شود. اگر محرک خارجی وجود نداشته باشد، شکل فعلی خود را برای مدت طولانی حفظ می‌کند. هنگامی که یک پلیمر حافظه‌دار تحت یک محرک دمایی خاص قرار می‌گیرد، مطابق شکل (۵) تحت یک انتقال فاز برگشت‌پذیر قرار گرفته و قادر می‌شود تا شکل اولیه خود را از حالت تغییر شکل موقت بازیابی کند. لازم به ذکر است که مطابق شکل (۵)، شکل دهی در دمای بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای[1] انجام می‌شود. این فرآیند توسط خواص ترمومکانیکی پلیمر حافظه‌دار کنترل می‌شود و برای کاربردهای متنوع آن در زمینه‌های مختلف، از جمله ایمپلنت‌های زیست‌پزشکی و مهندسی هوافضا، حیاتی است. فرآیند بازیابی یکی از ویژگی‌های کلیدی پلیمر حافظه‌دار است که به آن‌ها اجازه می‌دهد رفتار حافظه‌شکلی را نشان داده و پس از قرار گرفتن در معرض یک محرک مناسب، شکل اصلی خود را بازیابی کنند [۲۳]، [۲۷]، [۵۰].

پلی‌یورتان حافظه‌دار و پلی‌استر حافظه‌دار دو نوع مهم از پلیمرهای حافظه‌دار هستند. در پلی‌استر حافظه‌دار از پلی‌استر به‌عنوان ماده پایه استفاده می‌کند. این پلیمرها دارای ویژگی حافظه‌شکل مشابه با پلی‌یورتان حافظه‌دار هستند و می‌توانند پس از تغییر شکل به حالت اولیه خود برگردند، با این تفاوت که به‌طور معمول در دماهای متفاوت از پلی‌یورتان‌ها عمل می‌کنند و خصوصیات مکانیکی متفاوتی دارند. معمولاً مقاومت به سایش پلی‌استر حافظه‌دار نسبت به پلی‌یورتان حافظه‌دار بیشتر است. این ویژگی می‌تواند در کاربردهای صنعتی و محیط‌های سخت مفید باشد [۵۱].

۳-۲- آلیاژهای حافظه‌دار

آلیاژهای حافظه‌دار[2] یکی از مواد پیشرفته‌ای هستند که در چاپ چهاربعدی نقش کلیدی ایفا می‌کنند. خاصیت حافظه‌داری آن‌ها به تغییرات ساختاری در سطح میکروسکوپی بازمی‌گردد که هنگام گرم‌شدن یا سردشدن اتفاق می‌افتد. این ویژگی به‌ویژه در چاپ چهاربعدی که بر تغییر شکل کنترل‌شده مواد در پاسخ به محرک‌ها تمرکز دارد، بسیار مهم است.

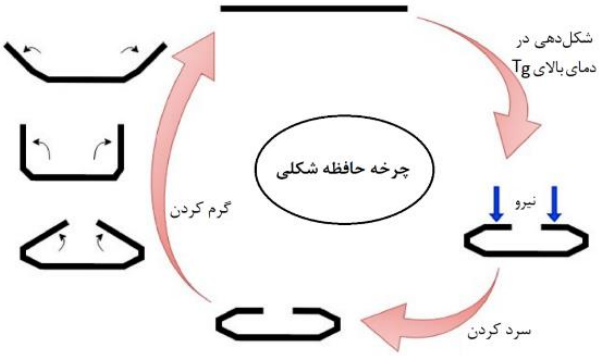
آلیاژهای حافظه‌دار به دلیل استحکام بالا، مقاومت به خستگی و قابلیت تحمل تغییرات مکرر، در تولید سازه‌های پیچیده و محصولات هوشمند کاربرد دارند. کنترل دقیق فرآیند چاپ سه‌بعدی، همراه با انتخاب آلیاژهای حافظه‌دار مناسب، امکان تولید محصولاتی را فراهم می‌کند که نه‌تنها از نظر طراحی بلکه از نظر عملکرد نیز هوشمند و چندمنظوره باشند [۵۲]، [۵۳].



شکل ۴ روش‌های متداول چاپ چهاربعدی

[1] Glass transition temperature (Tg)

[2] Shape Memory Alloys (SMAs)



شکل ۵ فرآیند چرخه پلیمرهای حافظه‌دار[۵۰]

آلیاژهای حافظه‌دار آهنی، به‌ویژه آلیاژ BIA Fe-SM نشان داده است که این مواد قادر به جذب انرژی و بازگشت هندسی قابل توجهی هستند. این مواد می‌توانند تا ۹۸/۷ درصد از شکل خود را پس از تغییر شکل بازیابی کنند [۵۴]. آلیاژهای حافظه‌دار مسی مانند Cu–13Al–5Fe نرخ بازیابی حافظه‌شکل بالای ۱۰۰ درصد را در دماهای بالا نشان می‌دهد [۵۵]. آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی مثل آلیاژهای Ni–Mn–Ga بر ویژگی‌های مغناطیسی و چالش‌های کنترل ساختار میکروسکوپی در فرایند چاپ چهاربعدی تمرکز دارد [۵۶].

۳-۳- سرامیک‌های حافظه‌شکلی

سرامیک‌های حافظه‌شکلی[1] مواد پیشرفته‌ای هستند که اخیراً در چاپ چهاربعدی به کار گرفته شده‌اند و پتانسیل بالایی برای کاربردهای هوشمند دارند. رفتار حافظه‌شکلی در این مواد به تغییرات ساختاری خاص در مقیاس میکروسکوپی و همچنین به خواص مکانیکی و حرارتی وابسته است. یکی از مزایای برجسته سرامیک‌های حافظه‌شکلی، مقاومت بالا در برابر حرارت و خستگی مکانیکی است که آن‌ها را برای کاربردهای دمای بالا و محیط‌های خشن مناسب می‌کند. فرآیند تولید این مواد شامل چاپ سه‌بعدی اولیه و سپس اعمال فرآیندهای حرارتی یا شیمیایی برای تثبیت ساختار حافظه‌شکلی آن‌ها است. قابلیت بازیابی شکل در این سرامیک‌ها اغلب به دلیل انتقال فاز برگشت‌پذیر در ساختار کریستالی آن‌ها است که باعث می‌شود قطعات بتوانند تغییرات قابل‌توجهی را تحمل کنند و همچنان به شکل اولیه خود بازگردند. با پیشرفت فناوری چاپ چهاربعدی، قابلیت‌های سرامیک‌های حافظه‌شکلی در طراحی محصولات هوشمند و پاسخ‌گو به محرک‌های محیطی به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۵۷]، [۵۸].

استفاده از سرامیک‌های مبتنی بر SiOC با لایه غنی از Al_2O_3 امکان ساخت هندسه‌های پیچیده با قابلیت بازگشت به شکل اولیه را فراهم می‌آورد [۵۷]

۳-۴- هیدروژل‌ها

هیدروژل‌ها[2] یکی از مواد پرکاربرد در چاپ چهاربعدی هستند که به دلیل خواص منحصربه‌فرد خود مانند توانایی جذب آب، انعطاف‌پذیری بالا و پاسخ‌گویی به محرک‌های محیطی نظیر pH، دما و نور توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این مواد از شبکه‌های سه‌بعدی پلیمری ساخته شده‌اند که توانایی تغییر حجم یا شکل در واکنش به محرک‌ها را دارند [۵۹].

داربست‌های متخلخل سه‌بعدی در مهندسی بافت به‌عنوان محیطی مناسب برای بازسازی بافت‌ها و اندام‌ها عمل می‌کنند. این داربست‌ها عمدتاً به‌عنوان الگویی برای تشکیل بافت طراحی شده‌اند و معمولاً با سلول‌ها کشت می‌شوند. گاهی اوقات نیز عوامل رشد به آن‌ها افزوده می‌شود یا تحت تأثیر محرک‌های بیوفیزیکی در یک واکنش‌گر زیستی قرار می‌گیرند [۵۸]. یکی از ویژگی‌های برجسته هیدروژل‌ها، سازگاری زیستی و توانایی تنظیم دقیق خواص مکانیکی و شیمیایی آن‌ها است. این ویژگی‌ها هیدروژل‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای پزشکی و زیست‌مهندسی بویژه ساخت داربست‌های مهندسی بافت تبدیل کرده‌اند. هیدروژل‌ها در تحویل دارو یکی از مهم‌ترین کاربردهای چاپ چهاربعدی هستند که قابلیت بهبود چشمگیری در کارایی و دقت سیستم‌های درمانی دارند. این مواد به دلیل توانایی تنظیم خواص شیمیایی و مکانیکی، قابلیت بارگذاری و آزادسازی کنترل‌شده دارو را دارند. این سیستم‌ها می‌توانند دارو را در محل مورد نظر بدن به شکل دقیق و در زمان مناسب آزاد کنند، که منجر به کاهش عوارض جانبی و افزایش اثربخشی درمان می‌شود [۶۰]، [۶۱]. در ادامه برخی از انواع هیدروژل‌های بکار رفته در تکنولوژی چاپ چهاربعدی اشاره شده است.

جوهرهای هیدروژل گرانولی مبتنی بر اسید هیالورونیک دارای قابلیت عملکرد پاسخگو به دما هستند[۶۲]. این نوع از هیدروژل‌ها به دلیل خواص رقیق‌شونده برشی و ساختار متخلخل خود، به راحتی در هنگام انسداد از همدیگر جدا می‌شوند و این ساختار متخلخل باعث تسریع در فعالیت‌های دینامیکی می‌شود. هیدروژل‌های مغناطیسی معمولاً از پلیمرهای طبیعی مانند کیتوزان، ژلاتین و اسید هیالورونیک تشکیل شده‌اند که با نانوذرات مغناطیسی مانند Fe_3O_4 تقویت می‌شوند[۶۳]. افزودن

[1] Shape-Memory Ceramics
[2] Hydrogels

ذرات فرومغناطیسی به این هیدروژل‌ها اجازه می‌دهد که به میدان‌های مغناطیسی پاسخ دهند.

۳-۵- مواد مغناطیسی هوشمند

مواد مغناطیسی هوشمند[1] در چاپ چهاربعدی از جمله موادی هستند که به دلیل قابلیت‌های منحصربه‌فردشان، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این مواد شامل ذرات مغناطیسی تعبیه‌شده در یک ماتریس پلیمری یا الاستومری هستند که می‌توانند در پاسخ به میدان‌های مغناطیسی خارجی تغییر شکل دهند یا حرکت کنند. این ویژگی‌ها امکان طراحی سازه‌های هوشمند و قابل برنامه‌ریزی را فراهم می‌کند که می‌توانند به‌صورت بی‌سیم کنترل شوند. به عنوان مثال، این مواد می‌توانند برای تولید ربات‌های نرم، محرک‌ها، و سیستم‌های میکرو-نانوکنترل استفاده شوند؛ جایی که کنترل از راه دور و دقت بالا اهمیت دارد [۶۴]، [۶۵]، [۶۶].

پلیمرهای حافظه‌شکلی مغناطیسی مانند نمونه‌هایی که از نانوکامپوزیت‌های $PLA/PMMA/Fe_3O_4$ ساخته می‌شوند، دارای قابلیت‌های عالی در بازیابی شکل و فعال‌سازی از راه دور هستند. این مواد به‌طور خاص در کاربردهای بیومدیکال مفید هستند و بازیابی سریع شکل و استحکام مکانیکی بالا را ارائه می‌دهند که آن‌ها را برای ایمپلنت‌های حداقل تهاجمی ایده‌آل می‌کند[۶۷].

۳-۶- مواد حساس به الکتریسیته

مواد حساس به الکتریسیته[2] یکی از دسته‌های مهم مواد هوشمند در چاپ چهاربعدی هستند که به محرک‌های الکتریکی پاسخ می‌دهند. این مواد می‌توانند با اعمال یک میدان الکتریکی، تغییراتی در شکل، اندازه، یا خواص مکانیکی خود ایجاد کنند. این خاصیت ناشی از تعاملات بین بارهای الکتریکی و ساختار مولکولی یا میکروسکوپی مواد است. این مواد در تولید ربات‌های نرم، حسگرها، و محرک‌های قابل کنترل با سیگنال‌های الکتریکی به کار می‌روند [۶۸]، [۶۹]. نانکامپوزیت‌های پلیمر حافظه‌دار شامل نانوذرات بورون نیترید شش‌گوش[3] موجب افزایش پایداری حرارتی و تسریع بازیابی شکل می‌شود؛ در حالی‌که لایه‌های پلی‌استایرن سولفونات/گرافن[4] رفتار پاسخ‌دهی الکتریکی را فراهم می‌آورد [۷۰].

۳-۷- پلیمرهای حساس به نور

پلیمرهای حساس به نور[5] یکی از دسته‌های مهم مواد هوشمند در چاپ چهاربعدی هستند که در پاسخ به محرک‌های نوری تغییراتی در ساختار، خواص یا شکل خود نشان می‌دهند. این پلیمرها از واحدهای مولکولی ویژه‌ای تشکیل شده‌اند که می‌توانند با جذب نور در طول‌موج خاص (مانند فرابنفش یا مادون قرمز) دچار تغییرات شیمیایی یا فیزیکی شوند. این تغییرات می‌تواند شامل شکستن یا تشکیل پیوندهای شیمیایی، تغییر در آرایش زنجیره‌های پلیمری، یا انقباض و انبساط ماده باشد. به دلیل این ویژگی‌ها، پلیمرهای حساس به نور در طراحی سازه‌های هوشمند و دینامیک در چاپ چهاربعدی استفاده می‌شوند. یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد این پلیمرها، قابلیت کنترل از راه دور است. نور به‌عنوان یک محرک تمیز و غیرتماسی می‌تواند به‌دقت برای تغییر ویژگی‌های ماده به کار رود. این مواد می‌توانند در پاسخ به نور خورشید باز یا بسته شوند، که برای طراحی دستگاه‌های ذخیره انرژی یا سیستم‌های تهویه خودکار مفید است [۷۱]، [۷۲].

در حوزه زیست‌پزشکی، پلیمرهای حساس به نور پتانسیل بالایی برای ساخت داربست‌های مهندسی بافت یا سیستم‌های تحویل دارو دارند. این مواد می‌توانند با تحریک نوری کنترل‌شده، دارو را به‌صورت هدفمند آزاد کنند یا تغییرات ساختاری ایجاد کنند که به بازسازی سلول‌ها کمک می‌کند [۷۱]، [۷۳].

کامپوزیت‌های مبتنی بر لیگنین[6] به‌عنوان ساختاری با قابلیت تبدیل فوتوترمال در کامپوزیت‌های زیستی و قابل تجزیه PLA[7] می‌باشند که به‌طور مؤثر حافظه‌شکل تحت تابش لیزر مادون قرمز فعال می‌شود. این روش محیط‌زیست‌دوست، پتانسیل استفاده در اجزای محرک در کاربردهای مختلف را نشان می‌دهد[۷۴].

۳-۸- مواد مغناطیس‌کششی

مواد مواد مغناطیس‌کششی[8] دسته‌ای از مواد هوشمند هستند که که در پاسخ به میدان مغناطیسی تغییر شکل می‌دهند. این

[1] Smart Magnetic Materials (SMMs)
[2] Electroresponsive materials
[3] Hexagonal boron nitride (HBN)
[4] Polystyrene sulfonate/graphene (PANI: PSS/GR)
[5] Photoresponsive polymers
[6] Lignin-based composites
[7] Polylactic Acid
[8] Magnetostrictive materials

ویژگی به دلیل تغییرات در ساختار کریستالی مواد در حضور میدان مغن اطیسی ایجاد می‌شود، که باعث انبساط یا انقباض مکانیکی می‌گردد. این مواد در چاپ هوشمند و چهاربعدی نقش کلیدی دارند، زیرا می‌توانند برای ایجاد حرکت، تغییر شکل، یا تولید نیرو به‌صورت کنترل‌شده مورد استفاده قرار گیرند. رفتار این مواد به طراحان اجازه می‌دهد سازه‌هایی را بسازند که در پاسخ به سیگنال‌های مغناطیسی به‌طور فعال عمل کنند و برای کاربردهایی که به کنترل از راه دور و دقت بالا نیاز دارند، مناسب هستند. در چاپ چهاربعدی، مواد مواد مغناطیس‌کششی به‌ویژه برای ساخت عملگرها[1]، حسگرها، و ربات‌های نرم استفاده می‌شوند. این مواد امکان طراحی دستگاه‌هایی را فراهم می‌کنند که بدون نیاز به منبع انرژی داخلی، تنها با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی کار کنند. در رباتیک نرم، این مواد می‌توانند برای حرکت بازوهای رباتیک یا تغییر شکل سازه‌ها استفاده شوند. علاوه بر این، در سیستم‌های هوشمند، از مواد مواد مغناطیس‌کششی برای تولید سازه‌هایی با قابلیت تغییر ساختار یا تنظیم خواص مکانیکی در زمان واقعی بهره می‌برند [۷۵].
مواد مغناطیسی هوشمند می‌توانند به انواع محرک‌های خارجی مانند میدان‌های مغناطیسی، دما، نور، یا رطوبت پاسخ دهند. درحالیکه مواد مغناطیس‌کششی تنها در پاسخ به میدان‌های مغناطیسی تغییر شکل می‌دهند. مواد مغناطیس‌کششی معمولاً از ذرات مغناطیسی مانند NdFeB و ماتریکس‌های نرم مانند کوپلیمرهای بلوک استایرن-ایزوپرن ساخته می‌شوند. این ترکیب به این مواد قابلیت کشش بالا و تغییرات شکل پیچیده تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی را می‌دهد [۷۶].

۴- محرک‌ها

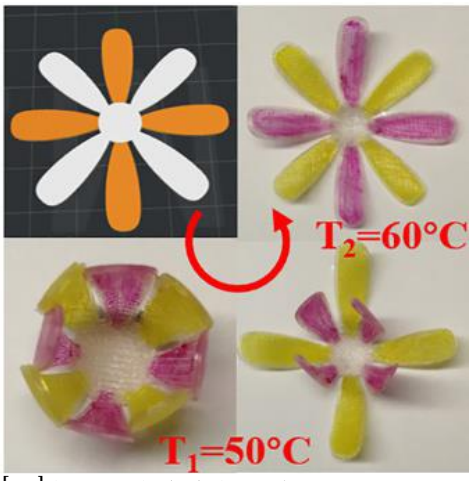
ایده چاپ چهاربعدی تنها بر توانایی خودمونتاژ برای انجام وظایف محول‌شده متکی نیست. این فناوری در واقع بر استفاده از چاپ سه‌بعدی همراه با مواد فعال پاسخگو به محرک‌های خارجی تمرکز دارد. این مواد با گذشت زمان تحت تأثیر محرک‌هایی مانند دما، رطوبت، pH، شدت نور، یا میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی تغییرات فیزیکی یا شیمیایی را تجربه می‌کنند. چاپ چهاربعدی معمولاً بر اساس پدیده حافظه شکل[2] عمل می‌کند. این پدیده به خاصیتی اشاره دارد که در آن یک ماده شبه‌پلاستیکی، پس از تغییر شکل، در حضور یک محرک خاص به حالت اولیه خود بازمی‌گردد [۷۷]، [۷۸]، [۷۹]. چاپ چهاربعدی با این ویژگی، امکان ایجاد تغییرات هدفمند در عملکرد و رفتار اشیاء را فراهم کرده است. این فناوری با افزودن قابلیت‌های دینامیک و تطبیق‌پذیری به سازه‌های سه‌بعدی، می‌تواند پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه‌هایی مانند بیومیمیکری (الهام از طبیعت) و رباتیک نرم ایجاد کند.
رطوبت یکی از محرک‌های اصلی در چاپ چهاربعدی است که می‌تواند رفتارهای مختلفی مانند انبساط، انقباض، تحریک، و تغییر شکل را در مواد القا کند. مواد پاسخگو به رطوبت قادرند در حضور این محرک، به‌طور خودکار سطوح را خم کنند، تا شوند، یا اشکال جدیدی ایجاد کنند که باعث افزایش سازگاری آن‌ها در محیط‌های متغیر می‌شود. از ویژگی‌های جالب دیگر، خاصیت خودترمیمی این مواد در شرایط مرطوب است که می‌تواند تخلخل‌ها را تنظیم کرده و یکپارچگی و نفوذپذیری ساختار را بهبود بخشد. علاوه بر این، برخی از این مواد هنگام مواجهه با رطوبت، تغییر رنگ می‌دهند و به عنوان حسگرهای بصری عمل می‌کنند. این رفتارها کاربردهای متنوعی در رباتیک نرم، منسوجات هوشمند، حسگرهای تطبیقی، و دیگر حوزه‌هایی دارند که نیاز به مواد چندمنظوره و پاسخگو دارند [۸۰]، [۸۱]، [۸۲].

هر یک از محرک‌های خارجی مانند دما، نور، مغناطیس، و الکتریسیته در فناوری چاپ چهاربعدی نقش مهمی دارند و ویژگی‌های منحصربه‌فردی را به مواد اضافه می‌کنند. در پژوهش‌های علمی، تأثیر این متغیرها بر عملکرد و رفتار مواد به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. محرک‌ها برای فناوری چاپ چهاربعدی به همراه مزایا، معایب و کاربردهای بالقوه مربوطه در جدول (۱) ارائه شده است. در شکل (۶) نمونه‌ای از یک پلیمر حافظه‌دار نشان داده شده است که با محرک دما تغییر شکل می‌دهد. شکل (۷) نمونه‌ای از چرخه مرطوب کردن - خشک کردن را نشان می‌دهد. با چاپ چهاربعدی و استفاده از محرک‌های مناسب امکان تغییر شکل از حالت یک‌بعدی به دوبعدی و از دوبعدی به سه‌بعدی امکان‌پذیر است که حالت‌های مختلف تغییر شکل در شکل (۸) نشان داده شده است.

۵- کاربردها

طی سال‌های اخیر، چاپ چهاربعدی از یک ایده مفهومی به یک واقعیت عملی تبدیل شده و توانسته است چالش‌هایی را حل کند که ساختارهای ثابت و سنتی از عهده آن‌ها برنمی‌آیند.

[1] Actuators
[2] Shape Memory Effect (SME)

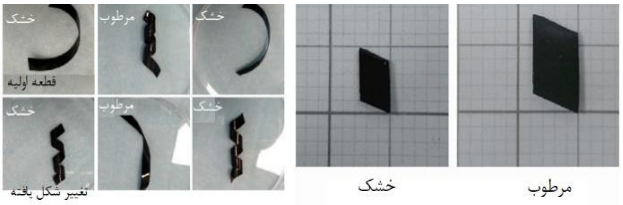


شکل ۶ تغییر شکل پلیمر حافظه‌دار با تغییر دما [۶۰]

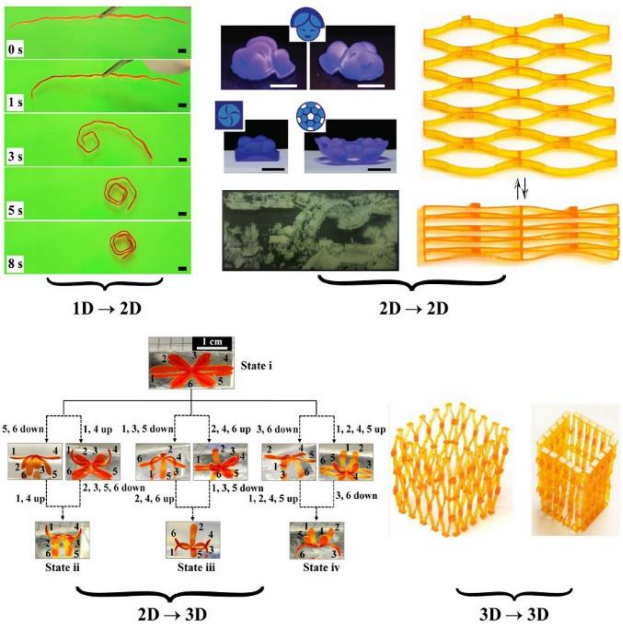
جدول ۱ محرک‌های بکار رفته در چاپ چهار بعدی [۸۲]

محرک	مزایا	محدودیت‌ها	کاربردها
دما	❖ کاربرد راحت ❖ قابل کنترل در قطعات عملگرهای مکانیکی	❖ امکان آسیب رساندن ❖ پاسخ کند ❖ پیچیدگی	❖ زیست فناوری ❖ دارو رسانی ❖ مهندسی بافت
نور	• سوئیچ سریع • تمرکز و دقت بالا • زیست سازگار • پایداری • کنترل خواص مکانیکی	• تولید حرارت • کاهش تغییرات شکل • برخورداری از پتانسیل سمیت	• دارو رسانی • وسایل اپتیک
آب	❖ قابل کنترل ❖ فرآیند ساده ❖ کاهش‌دهنده حرارت	❖ زمان واکنش کند	❖ دارو رسانی
مغناطیس	• پاسخ سریع • امن • قابل کنترل از راه دور	• بسیار واکنش‌پذیر • میل ترکیبی • چگالی بالا • عوارض در سیستم‌های زیستی همراه با نانوذرات	• دارو رسانی • اهداف اتصالی
pH	❖ امکان دستیابی به رفتارهای متفاوت در ساختارها ❖ پاسخ بهبود یافته ❖ زیست تجزیه‌پذیر ❖ زیست‌سازگار	❖ محدودیت‌های کاربری	❖ دارو رسانی ❖ رباتیک نرم ❖ پزشکی ❖ بسته‌بندی مواد غذایی ❖ مهندسی بافت
الکتریکی	• سرعت • کنترل از دور	• افزایش درجه حرارت باعث از دست رفتن سلول می‌شود.	• دارو رسانی • عضلات مصنوعی • تولید بافت
رطوبت	❖ ایجاد رفتارهای متنوع ❖ هزینه پایین ❖ دوستدار محیط زیست	❖ پاسخ کند ❖ نیاز به کنترل دقیق	❖ ماهیچه‌های مصنوعی ❖ سنسورها ❖ زیست‌فناوری

این فناوری با بهره‌گیری از مواد جدید و نوآورانه و تکنیک‌های تولید پیشرفته، مزایای قابل‌توجهی را در حوزه‌های مختلف به نمایش گذاشته است. از جمله این مزایا می‌توان به آزادی بی‌نظیر در طراحی محصولات، تولید کالاهای سفارشی، ساخت اشیاء بزرگ از طریق واکنش به محرک‌ها، دیجیتالی کردن دنیای فیزیکی، ساده‌سازی فرآیندهای تولید و ارتقای مفهوم و ارزش طراحی اشاره کرد. پاسخ ساختارهای سه‌بعدی برنامه‌ریزی‌شده به محرک‌های خارجی، افق‌های جدیدی را برای استفاده از مواد هوشمند چاپ چهاربعدی در کاربردهای متنوع گشوده است. این فناوری در حال تحول، پتانسیل بالایی برای تغییر و بهبود در صنایع مختلف ارائه می‌دهد و نشان‌دهنده آینده‌ای خلاقانه در تولید و طراحی است [۸۵].



شکل ۷ چرخه مرطوب کردن-خشک کردن در چاپ چهاربعدی[۸۳]



شکل ۸ حالت‌های مختلف تغییر شکل در ابعاد متفاوت [۸۴]

چاپ چهاربعدی توجه چشمگیری را از سوی مراکز علمی و صنایع مختلف به خود جلب کرده و در حوزه‌های گوناگون مورد توجه قرار گرفته است. این فناوری با افزودن بُعد "زمان" به ساختار اشیای چاپ سه‌بعدی، امکان تغییر شکل یا رفتار آن‌ها را در طول زمان و در واکنش به محرک‌های خارجی فراهم می‌کند. به همین دلیل، توسعه چاپ چهاربعدی تا حد زیادی به پیشرفت فناوری‌های چاپ سه‌بعدی و مواد هوشمند وابسته است. استفاده از مواد هوشمند در فرآیند ساخت افزایشی، ویژگی‌های هوشمند و نوآورانه‌ای را به همراه داشته و به سرعت دامنه کاربردهای بالقوه این فناوری را گسترش داده است. هرچند چاپ چهاربعدی هنوز در مراحل تحقیقاتی قرار دارد؛ اما پتانسیل قابل‌توجهی در حوزه‌هایی همچون زیست‌پزشکی، رباتیک نرم، تجهیزات دفاعی، هنر مجسمه‌سازی، صنعت هوافضا و بسیاری از زمینه‌های دیگر از خود نشان داده است [۱۱]، [۲۰]، [۳۰]، [۳۴]، [۸۶]. این فناوری نوظهور چشم‌اندازهای امیدوارکننده‌ای برای آینده رقم زده و راه را برای تحول در صنایع مختلف هموار می‌سازد. برخی از مهم‌ترین کاربردهای چاپ چهاربعدی در جدول (۲) لیست شده است.

۶- ربات‌های نرم

ربات‌ها به یکی از عناصر کلیدی در صنایع تولیدی تبدیل شده‌اند و حضور آن‌ها در بخش‌های مختلف مانند هوافضا، خودروسازی، پزشکی، کشاورزی، نظامی، تولید و آموزش به امری رایج بدل شده است. افزایش تقاضا برای این ماشین‌ها در زمینه‌های گوناگون، تحقیقات گسترده آکادمیک و صنعتی را به‌منظور بهبود عملکرد و تطبیق‌پذیری آن‌ها برانگیخته است [۹۷]. در گذشته، ربات‌ها اغلب به‌عنوان ماشین‌هایی بزرگ و سنگین با درجه‌های آزادی محدود شناخته می‌شدند که معمولاً در محیط‌های ایزوله نظیر کارخانه‌ها، برای انجام وظایف تکراری و پرقدرت به کار می‌رفتند؛ اما ظهور حوزه رباتیک نرم در حال تغییر این تصور است. ربات‌های نرم برای به‌کارگیری در محیط‌هایی طراحی شده‌اند که نیازمند تعامل ایمن میان انسان و ماشین و همچنین سازگاری با محیط‌های متنوع با سختی‌های متفاوت هستند. این ویژگی‌ها آن‌ها را برای انجام وظایف ظریف و پیچیده در محیط‌های غیرقابل پیش‌بینی ایده‌آل می‌سازد [۹۸].

ساخت ربات‌های نرم به دلیل سادگی نسبی و نیاز به حداقل مونتاژ، فرآیند ساده‌تری نسبت به ربات‌های سنتی با بدنه سخت دارد و از پیچیدگی‌های ساخت آن‌ها اجتناب می‌کند. هزینه تولید این ربات‌ها نیز به‌ویژه با استفاده از روش‌هایی مانند ساخت افزایش، شامل چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی، به‌طور قابل توجهی کمتر است [۹۹]. با وجود مزایای متعدد، ربات‌های نرم با محدودیت‌هایی نیز مواجه هستند. این محدودیت‌ها شامل کاهش سرعت، نیروهای خروجی محدود (معمولاً بین ۵۰ تا ۱۰۰ نیوتن، اگرچه در مواردی می‌توانند نیروهای بیشتری تولید کنند

[۱۰۰]) و دوام کمتر در مقایسه با ربات‌های سنتی است که توانایی تولید نیروهایی در حد چند هزار نیوتن را دارند. با این حال، ربات‌های نرم می‌توانند به‌عنوان مکمل ربات‌های سنتی عمل کنند و در برخی موارد، منجر به توسعه ربات‌های هیبریدی شوند. ربات‌های هیبریدی ایده‌آل قادر به تنظیم سختی خود خواهند بود (یعنی سازگاری قابل برنامه‌ریزی)، به‌طوری که بتوانند از حالتی بسیار نرم (با مدول یانگ در حدود ۰/۱ کیلوپاسکال، مشابه بافت‌های بیولوژیکی) تا حالتی بسیار سخت (با مدول یانگ در محدوده گیگاپاسکال) تغییر کنند [۱۰۱]. این ویژگی امکان سازگاری با سختی محیط‌های مختلفی که با آن‌ها تعامل دارند را فراهم می‌کند و برای سیستم‌های رباتیک نرم، بسیار مطلوب است. توانایی تغییر شکل در ربات‌های نرم، آن‌ها را قادر می‌سازد تا در محیط‌هایی با فضای محدود و پویا به‌راحتی حرکت کنند و تعامل ایمنی با انسان‌ها داشته باشند.

عملگرها به‌عنوان ماهیچه‌های مصنوعی، نقش اساسی در توانمندسازی رباتیک نرم برای انجام وظایف طراحی‌شده ایفا می‌کنند. روش فعال‌سازی انتخاب‌شده تأثیر مستقیمی بر طراحی، ساخت، مدل‌سازی و کارایی ربات‌های نرم دارد.

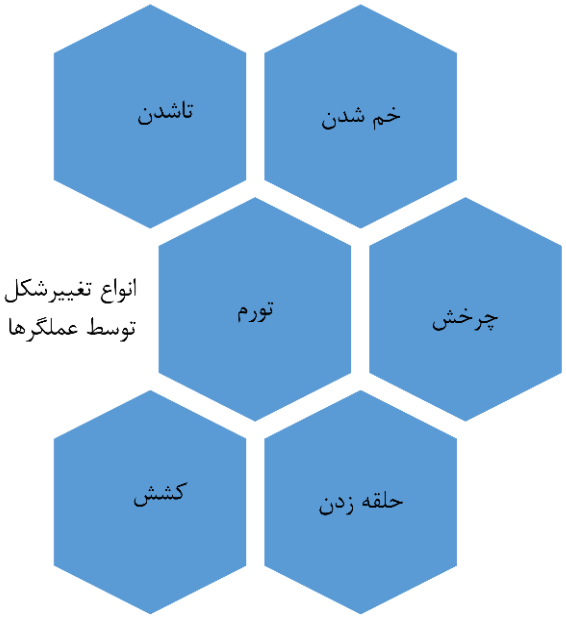
جدول ۲ کاربردهای چاپ چهاربعدی

دسته	عنوان	کاربرد
پزشکی و سلامت [۳۰]، [۸۷]	ایمپلنت‌های هوشمند	ساخت ایمپلنت‌هایی که به شکل و ساختار بدن بیمار تنظیم می‌شوند.
	دارورسانی هدفمند	ساخت کپسول‌هایی که دارو را در محیط خاصی از بدن آزاد می‌کنند.
	بافت‌سازی و مهندسی زیستی	تولید داربست‌های زیستی هوشمند برای رشد سلول‌ها و ساخت بافت‌های انسانی.
معماری [۳۱]، [۳۲]	مواد خودترمیم‌شونده	استفاده از مواد چاپی که در صورت آسیب‌دیدگی، خود را تعمیر می‌کنند.
	ساختمان‌های هوشمند	ساخت قطعاتی که می‌توانند به تغییرات محیطی مانند دما یا رطوبت واکنش نشان دهند و عملکرد سازه را بهینه کنند.
صنایع هوافضا [۳۴]، [۸۸]	قطعات هوشمند	تولید اجزایی که در پاسخ به تغییرات دما یا فشار در محیط فضا تغییر شکل می‌دهند و عملکرد بهتری ارائه می‌دهند.
	سیستم‌های استقرار خودکار	ساخت قطعاتی که پس از ارسال به فضا یا رسیدن به مقصد، به صورت خودکار به شکل موردنظر تبدیل می‌شوند.
رباتیک و اتوماسیون [۶]، [۸۹]	ربات‌های نرم	ساخت ربات‌هایی که می‌توانند شکل و عملکرد خود را بر اساس شرایط تغییر دهند.
	قطعات سازگار	تولید بخش‌هایی که می‌توانند با محیط و نیازهای کاری تغییر شکل دهند.
انرژی و محیط‌زیست [۹۳]، [۹۰]	پنل‌های خورشیدی هوشمند	ساخت پنل‌هایی که زاویه خود را برای بهینه‌سازی جذب نور خورشید تغییر می‌دهند.
	سیستم‌های تصفیه آب	تولید فیلترهای هوشمند که با تنظیم ساختار خود، کارایی بیشتری در تصفیه آب ارائه می‌دهند.
صنایع نظامی [۳۵]، [۹۴]، [۹۵]	استتار هوشمند	تولید موادی که قابلیت تغییر رنگ و ظاهر برای استتار را دارند.
	ساختارهای خودآرایشی	ساخت تجهیزاتی که پس از حمل، به شکل مناسب برای استفاده تبدیل می‌شوند.
صنایع دریایی [۸۵]، [۸۶]	استتار هوشمند	تولید موادی که قابلیت تغییر رنگ و ظاهر برای استتار را دارند.
	ساختارهای خودآرایشی	ساخت تجهیزاتی که پس از حمل، به شکل مناسب برای استفاده تبدیل می‌شوند.

محرک‌های نرم، بسته به مکانیسم فعال‌سازی‌شان، به پنج دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

- تحریک تاندون
- پلیمرهای الکترواکتیو مانند محرک‌های الاستومری دی‌الکتریک و محرک‌های کامپوزیتی پلیمری یونی
- مواد حافظه‌دار شامل آلیاژهای حافظه‌دار و پلیمرهای حافظه‌دار
- محرک‌های سیال نرم
- محرک‌های هیبریدی

هر یک از این دسته‌ها ویژگی‌ها و مزایای خاص خود را دارند و بر اساس نیازهای عملکردی، در کاربردهای مختلف رباتیک نرم مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملگرهای ربات‌های نرم با استفاده از مواد هوشمند نظیر پلیمرها و آلیاژهای حافظه‌دار، تحت تأثیر محرک‌هایی مانند حرارت، رطوبت، نور، میدان مغناطیسی یا الکتریسیته تغییر شکل می‌دهند. این تغییر شکل‌ها همانگونه که در شکل (۹) نشان داده شده است، شامل خم شدن، چرخش، کشیدگی، تورم، چین‌خوردگی و باز و بسته شدن هستند که با طراحی دقیق هندسه و ترکیب مواد کنترل می‌شوند. این قابلیت‌ها امکان ایجاد حرکت‌های پیچیده و عملکردهای دینامیکی را بدون نیاز به قطعات مکانیکی سخت فراهم می‌کنند [۱۰۲].



شکل ۹ تغییرشکل در عملگرهای ربات‌های نرم

علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر در توسعه ربات‌های نرم چاپ چهار بعدی از منظر مواد و طراحی، کنترل دقیق این ربات‌ها در شرایط متنوع همچنان یک چالش جدی محسوب می‌شود. روش‌های سنتی کنترل استاتیک به دلیل پیچیدگی‌های خاص این ربات‌ها کارآمد نیستند. ربات‌های نرم به واسطه ویژگی‌های ویسکوالاستیک، درجات آزادی بالا، و خواص فیزیکی و شیمیایی متغیر در طول زمان، همراه با سختی ناهمگن مواد و تأثیرات محیط اطراف، دارای دینامیک‌های غیرخطی هستند که مدل‌سازی و کنترل آن‌ها را دشوار می‌کند. این چالش‌ها پژوهشگران را به سمت بهره‌گیری از روش‌های مدل‌سازی و کنترل مبتنی بر داده سوق داده است، که می‌تواند به تحقق ربات‌های نرم چاپ چهار بعدی خودران کمک شایانی کند [۱۰۳].

روش‌های کنترلی برای ربات‌های نرم به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: کنترل‌کننده‌های استاتیک و کنترل‌کننده‌های دینامیک [۱۰۴]. کنترل‌کننده‌های استاتیک معمولاً بر پایه مدل‌هایی با انحنای ثابت، نظریه پرتو، و روش‌های مبتنی بر نظریه میله کوسرات طراحی می‌شوند. هرچند این رویکردها در کاربردهای واقعی محدودیت‌هایی دارند، از جمله هزینه‌های بالای محاسباتی و وابستگی به مفروضات حالت پایدار. یکی از توسعه‌های مهم در این زمینه، کنترل‌کننده‌های انطباقی/نیروی هیبریدی بدون نیاز به حسگر نیرو است که برای کنترل اثرات جفت‌شدگی میان مدل‌های نیروی حرکتی و استاتیکی ربات‌های نرم طراحی شده‌اند. با این حال، وجود مشکلاتی مانند اصطکاک، پسماند و ویژگی‌های غیرخطی مواد، موجب بروز انحرافاتی در مدل می‌شود. حتی با بهره‌گیری از کنترل‌کننده‌های استاتیک هوشمند مانند شبکه‌های عصبی یا منطق فازی، نتایج بهبودی چشمگیری نشان نمی‌دهند؛ چرا که این کنترل‌کننده‌ها قادر به در نظر گرفتن اثرات جفت‌شدگی دینامیک ربات‌های نرم نیستند [۱۰۵]، [۱۰۶].

کنترل‌کننده‌های دینامیکی برای مدیریت دینامیک چندبعدی و غیرخطی ربات‌های نرم در محیط‌های پیچیده و نامطمئن توسعه یافته‌اند. این کنترل‌کننده‌ها نیازمند مدلی دقیق از دینامیک ربات و اطلاعات بازخورد حسگرها هستند. در مطالعات اولیه، یک کنترل‌کننده گشتاور مبتنی بر مشتق متناسب ترکیبی[1] معرفی شده که عملکرد آن در مقایسه با کنترل‌کننده‌های حالت لغزشی و پیش‌بینی مدل[2] به دلیل عدم قطعیت‌های مدل، ضعیف‌تر است. کنترل‌کننده‌های حالت لغزشی اغلب برای کنترل خمش ربات‌های نرم، با استفاده از پارامترهای دینامیکی اویلر-لاگرانژی در محرک‌های ساده، به کار گرفته شده‌اند. از سوی دیگر، کنترل‌کننده‌های پیش‌بینی مدل نیز در

[1] Proportional-Derivative Combined (PD-Com)

[2] Model Predictive Control (MPC)

مدل‌های دینامیکی پیچیده به دلیل نیاز به چرخه‌های کنترلی سریع، عملکرد محدودی دارند. روش‌های یادگیری مستقیم سیاست‌های کنترلی حلقه بسته نیز به عنوان راه‌حلی برای کاهش عدم قطعیت‌های مدل پیشنهاد شده‌اند. اما این رویکردها زمان‌بر بوده و مستعد به دام افتادن در بهینه‌های محلی هستند. علاوه بر این، آن‌ها قادر به پوشش کامل تغییرات سریع مورفولوژیکی در دینامیک ربات‌های نرم نیستند [۸۴]، [۱۰۵]، [۱۰۶].

بشر همواره با الهام از الگوهای موجود در طبیعت، ابزارها و فناوری‌های مورد نیاز خود را توسعه داده است. این رویکرد، پایه‌گذار علمی نوین به نام بیومیمتیک شده است [۱۰۷]. ربات‌های نرم با الهام از اصول بیولوژیکی موجوداتی مانند خرطوم فیل، چتر دریایی، اختاپوس و کرم‌ها طراحی می‌شوند یکی از شاخه‌های پیشرو در علم بیومیمتیک[1] بوده و با استفاده از مواد و ساختارهایی که این اشکال طبیعی را شبیه‌سازی می‌کنند، توسعه یافته‌اند. این ربات‌ها عموماً از مواد نرم و انعطاف‌پذیر، به‌ویژه پلیمرهای پیشرفته، ساخته می‌شوند که امکان تعامل ایمن‌تر و سازگارتر با انسان و محیط را فراهم می‌کنند. طراحی و ساخت این ربات‌ها نه تنها به تقلید حرکات پیچیده و انعطاف‌پذیری موجودات زنده کمک می‌کند، بلکه کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌هایی نظیر پزشکی، رباتیک همراه، و اکتشافات محیطی دارد. کئونگ و هووا محرک چاپ سه‌بعدی مبتنی بر تاشو را برای مونتاژ یک ربات نرم و مستقل با حرکت کرم‌مانند به کار بردند [۹۳]. طراحی این محرک به‌راحتی از طریق نرم‌افزار کد قابل تغییر بود. در طراحی ربات کرم‌مانند، محرک‌ها دارای یک پروفایل خمشی در دو انتها و یک پروفایل تقویت‌شونده در مرکز بودند. این ویژگی به محرک اجازه می‌داد بیش از یک درجه آزادی داشته باشد، که برای حرکت ضروری است. آن‌ها برای مونتاژ این ربات، از دو محرک پنوماتیکی استفاده کردند. با تعیین توالی فعال‌سازی بخش‌ها، ربات می‌تواند با حرکتی شبیه به راه رفتن کرم‌مانند پیشروی کند، همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. لینزا و همکاران با الهام از ماهیچه‌های خرطوم فیل، یک استراتژی طراحی چندالیافی مبتنی بر الاستومر کریستال مایع[2] برای بازوهای رباتیک نرم را توسعه دادند [۱۰۹]. در ربات نرم پیشنهاد شده، مجموعه‌ای از الیاف عضلانی مصنوعی به صورت گسسته طراحی شدند که می‌توانستند به‌طور انتخابی فعال شوند. این ویژگی امکان ایجاد تغییر شکل‌های چندوجهی و انتقال پیوسته بین حالت‌های حرکتی مختلف را فراهم می‌کند. طرح‌بندی ساده و منطقی الیاف مارپیچ و مستقیم مبتنی بر الاستومر کریستال مایع می‌تواند طیف گسترده‌ای از تغییر شکل‌های متنوع را امکان‌پذیر کند. این تغییر شکل‌ها شامل خمش خالص، پیچش، ترکیب خمش و پیچش و همچنین خمش متمرکز در ناحیه دیستال است. این قابلیت‌ها از طریق انتخاب دقیق و فعال‌سازی متوالی الیاف به دست می‌آیند. شکل (۱۱) ربات نرم توسعه یافته را نشان می‌دهد.

اسپارمن و همکاران یک روش ساخت افزایشی مبتنی بر سیلیکون به نام چاپ مایع سریع[3] برای ساخت گریپرهای پنوماتیکی نرم را توسعه دادند [۱۱۰]. نتایج بدست آمده نشان داد گریپرهای تولیدشده با روش چاپ سریع ماده از نظر دامنه ازدیاد طول عملکردی مشابه دارند، اما در تکرارپذیری و طول عمر، نسبت به سایر روش‌ها دارند. همچنین، نمایش یک محرک پیچیده و چندمحفظه‌ای طراحی‌شده، توانایی‌های چاپ مایع سریه در مقایسه با سایر روش‌های موجود، از جمله مزایای سرعت، مقیاس و پیچیدگی طراحی را به‌خوبی نشان داد. در شکل (۱۲) گریپر ساخته شده توسط آن‌ها در دو وضعیت آزاد و وضعیت خم شده و جمع شده گریپر نشان داده شده است. مهرپویا و همکاران از روش مدل‌سازی با رسوب ذوبی برای ساخت یک گریپر از جنس پلی‌لاکتید دارای ویژگی حافظه شکل استفاده نمودند [۱۱۱]. ویژگی حافظه شکل امکان طراحی و ساخت سازه‌های تبدیل‌کننده شکل را فراهم می‌کند و می‌تواند فرآیند تولید محصولات تاشو را ساده‌تر کند. این محصولات تنها با اعمال نیروهای مکانیکی به شکل دلخواه برنامه‌ریزی می‌شوند. در این روش، اوریگامی به‌عنوان یک پلتفرم ساده برای تغییر شکل ساختارها به کار می‌رود. تغییر شکل‌ها از طریق تا کردن مواد در بخش‌های نازک‌تر (لولاها) صورت می‌گیرد. آن‌ها، اثرات پارامترهای مختلف، از جمله ضخامت کل، ارتفاع لایه، دمای نازل، و دمای فعال‌سازی بر بازیابی شکل سازه‌های اوریگامی برنامه‌ریزی‌شده، در گریپر ساخته شده مورد بررسی قرار دادند. شکل (۱۳) گریپر طراحی شده را در سه وضعیت رها کردن، گرفتن و پرکردن گپ نشان می‌دهد.

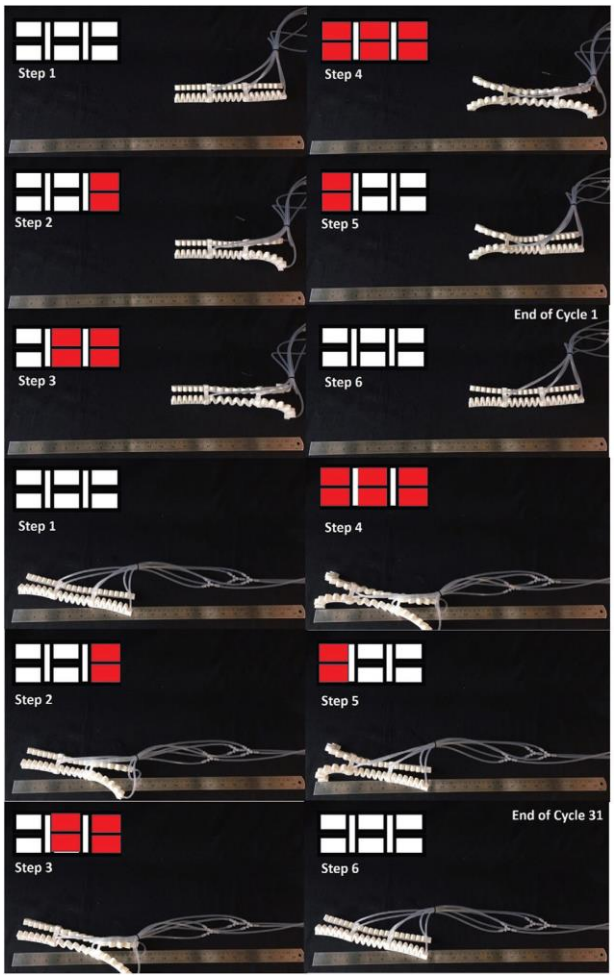
نرم‌افزارهای شبیه‌سازی نقش حیاتی در توسعه چاپ چهاربعدی و ساخت ربات‌های نرم ایفا می‌کنند و به پژوهشگران این امکان را می‌دهند که سیستم‌های رباتیکی پیچیده را طراحی، تحلیل و بهینه‌سازی کنند. این نرم‌افزارها امکان ادغام مواد و مکانیسم‌های فعال‌سازی مختلف را فراهم می‌آورند و منجر به

[1] Biomimetics
[2] Liquid Crystal Elastomer (LCE)
[3] Rapid Liquid Printing (RLP)

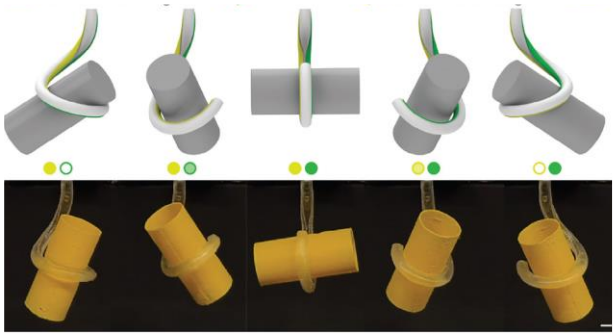
کاربردهای نوآورانه در رباتیک نرم می‌شوند. ابزارهای شبیه‌سازی در ایجاد طراحی‌های ربات نرم ترکیبی که اجزای نرم و سخت را با هم ترکیب می‌کنند، کمک می‌کنند و عملکرد آن‌ها را برای انجام کارهایی مانند گرفتن و توان‌بخشی بهبود می‌دهند [۱۱۲]. نرم‌افزارها در برنامه‌ریزی پروفایل‌های مغناطیسی مواد کمک می‌کنند و این امکان را می‌دهند که کنترل دقیقی بر فعال‌سازی گیره‌های نرم در واکنش به میدان‌های مغناطیسی خارجی ایجاد شود [۱۱۳]. ابزارهایی مانند MATLAB برای شبیه‌سازی دینامیکی ربات‌های نرم موازی استفاده می‌شوند تا طراحی آن‌ها برای حرکت مؤثر و استفاده بهینه از فضای کاری بهینه شود [۱۱۴]. نرم‌افزارهایی مانند آباکوس و انسیس برای تحلیل عملکرد محرک‌های نرم استفاده می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که طراحی‌ها ویژگی‌های مکانیکی مورد نیاز را دارند[۱۱۵]، [۱۱۴]. نرم‌افزارهای شبیه‌سازی از توسعه ربات‌های نرم خودپایدار که حرکت بیولوژیکی را شبیه‌سازی می‌کنند، پشتیبانی می‌کنند و این امکان را برای کاربردها در محیط‌های محدود فراهم می‌آورد [۱۱۶]. ادغام هیدروژل‌های هوشمند در شبیه‌سازی‌ها امکان ایجاد ربات‌های بیونیک[1] را فراهم می‌کند که به سرعت به محرک‌ها واکنش نشان می‌دهند و پتانسیل کاربرد در دستگاه‌های بیومیمتیک را نشان می‌دهند [۱۱۷]. بهینه‌سازی توپولوژی[2] به‌عنوان یک روش شبیه‌سازی برای طراحی ساختارهای پیچیده و کارآمد برای محرک‌های نرم به کار می‌شود [۱۱۸]. با استفاده از این تکنیک، به‌طور خودکار ساختارهایی با ویژگی‌های مطلوب تولید می‌شود. طراحی‌های بهینه‌شده سپس با استفاده از فرآیند چاپ سه‌بعدی یا چهاربعدی به مرحله تولید می‌روند. اگرچه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی به‌طور قابل توجهی طراحی و عملکرد ربات‌های نرم چاپ شده چهاربعدی را بهبود می‌بخشند، چالش‌هایی در مدل‌سازی دقیق تعاملات پیچیده میان مواد و محرک‌های محیطی باقی می‌ماند که می‌تواند بر عملکرد واقعی تاثیر بگذارد.

۷- نتیجه‌گیری

چاپ چهاربعدی به عنوان یک فناوری پیشرو، انقلابی در روش‌های طراحی و تولید ایجاد کرده است. این فناوری با افزودن بُعد زمان به اشیای چاپ‌شده، امکان تغییر شکل و رفتار آن‌ها را در واکنش به محرک‌های خارجی فراهم می‌کند. در حوزه رباتیک نرم، چاپ چهاربعدی با استفاده از مواد هوشمند مانند پلیمرهای حافظه‌دار و هیدروژل‌ها، ساختارهایی با قابلیت حرکت و تغییر شکل پویا ارائه داده که می‌توانند به‌طور مستقیم از طبیعت الهام بگیرند. مزایای این فناوری شامل کاهش هزینه‌های تولید، افزایش آزادی طراحی، و تطبیق‌پذیری بیشتر محصولات با شرایط محیطی است. علاوه بر این، روش‌های پیشرفته چاپ مانند مدل‌سازی رسوب ذوبی و چاپ جوهرافشان، امکان تولید ساختارهای پیچیده‌تر با دقت بالا را فراهم کرده‌اند.



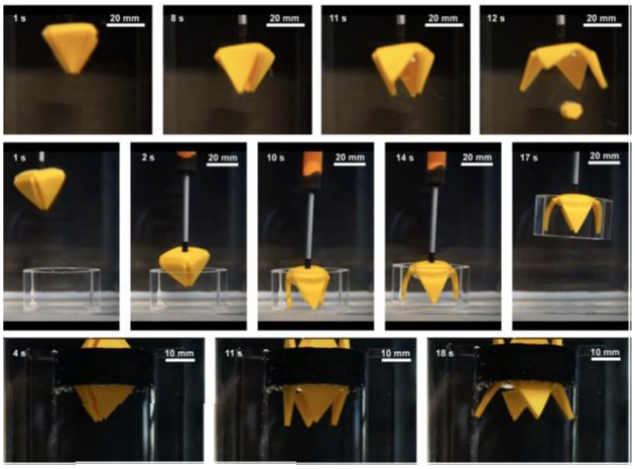
شکل ۱۰ ربات نرم کرم مانند [۱۰۸]



شکل ۱۱ ربات نرم الهام گرفته شده از خرطوم فیل [۱۰۹]

[1] Bionic
[2] Topology optimization (TO)

شکل ۱۲ گریپر ساخته شده با چاپ مایع سریع [۱۱۰]



شکل ۱۳ گریپر الهام گرفته شده از اریگامی [۱۱۱]

با وجود این مزایا، چالش‌هایی مانند هزینه بالای مواد هوشمند، پیچیدگی فرآیندهای تولید و نیاز به مدل‌سازی دقیق همچنان وجود دارد. پیشرفت در تکنولوژی‌های مرتبط و توسعه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی می‌تواند این محدودیت‌ها را کاهش دهد. همچنین، کاربردهای متنوع چاپ چهاربعدی در صنایع مختلف، از جمله تولید ایمپلنت‌های هوشمند در پزشکی، طراحی سازه‌های خودترمیم‌شونده در معماری و ساخت قطعات قابل‌تنظیم در هوافضا، اهمیت آن را دوچندان کرده است.

این مطالعه بر نقش کلیدی چاپ چهاربعدی در تسهیل ساخت ربات‌های نرم تأکید دارد و مسیرهای آینده این فناوری را برای توسعه بیشتر، به‌ویژه با ترکیب آن با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، هموار می‌کند. این ترکیب می‌تواند به تولید ربات‌های هوشمندتر و کاربردی‌تر منجر شود که توانایی سازگاری با چالش‌های پیچیده دنیای مدرن را دارند.

۸- مراجع

[1] H. Afshari, F. Taher, S. A. Alavi, M. Afshari, M. R. Samadi, and F. Allahyari, "Studying the effects of FDM process parameters on the mechanical properties of parts produced from PLA using response surface methodology," *Colloid and Polymer Science*, vol. 302, no. 6, pp. 955-970, 2024, https://doi.org/10.1007/s00396-024-05246-x.

[2] A. Chalgham, A. Ehrmann, and I. Wickenkamp, "Mechanical properties of FDM printed PLA parts before and after thermal treatment," *Polymers*, vol. 13, no. 8, p. 1239, 2021, https://doi.org/10.3390/polym13081239.

[3] A. Foorginejad, S. Khatibi, H. Torshizi, S. M. Emam, and H. Afshari, "Enhancement of Additive Manufacturing Processes for Thin-Walled Part Production Using Gas Metal Arc Welding (GMAW) with Wavelet Transform," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 21, p. 9909, 2024, https://doi.org/10.3390/app14219909.

[4] T. Yao, Z. Deng, K. Zhang, and S. Li, "A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations," *Composites Part B: Engineering*, vol. 163, pp. 393-402, 2019, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.025.

[5] M. Afshari, S. Bakhshi, M. R. Samadi, and H. Afshari, "Optimizing the mechanical properties of TiO2/PA12 nano-composites fabricated by SLS 3D printing," *Polymer Engineering & Science*, vol. 63, no. 1, pp. 267-280, 2023, https://doi.org/10.1002/pen.26203.

[6] A. Zolfagharian, M. Lakhi, S. Ranjbar, M. Sayah Irani, M. Nafea, and M. Bodaghi, "4D printing parameters optimisation for bi-stable soft robotic gripper design," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 45, no. 4, p. 224, 2023, https://doi.org/10.1007/s40430-023-04171-4.

[7] M. Mohammadi, A. Zolfagharian, M. Bodaghi, Y. Xiang, and A. Z. Kouzani, "4D printing of soft orthoses for tremor suppression," Bio-Design and Manufacturing, vol. 5, no. 4, pp. 786-807, 2022, https://doi.org/10.1007/s42242-022-00199-y.

[8] S. T. Gobena and A. D. Woldeyohannes, "Comparative review on the application of smart material in additive manufacturing: 3D and 4D printing," *Discover Applied Sciences*, vol. 6, no. 7, p. 353, 2024, https://doi.org/ 10.1007/s42452-024-05999-8.

[9] A. Kantaros, T. Ganetsos, and D. Piromalis, "3D and 4D printing as integrated manufacturing methods of industry 4.0," Kantaros, A., Ganetsos, T. & Piromalis, D.(2023). *3D and 4D Printing as Integrated Manufacturing Methods of Industry*, vol. 4, pp. 12-22, 2023, https://doi.org/ 10.3844/ajeassp.2023.12.22.

[10] E. Yarali et al., "Magneto-/electro-responsive polymers toward manufacturing, characterization,

and biomedical/soft robotic applications," *Applied Materials Today*, vol. 26, p. 101306, 2022, https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101306.

[11] A. Zolfagharian, A. Kaynak, and A. Kouzani, "Closed-loop 4D-printed soft robots," *Materials & Design*, vol. 188, p. 108411, 2020, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108411.

[12] R. Hamzehei, A. Serjouei, N. Wu, A. Zolfagharian, and M. Bodaghi, "4D metamaterials with zero poisson's ratio, shape recovery, and energy absorption features," *Advanced Engineering Materials*, vol. 24, no. 9, p. 2200656, 2022, https://doi.org/10.1002/adem.202200656.

[13] J. Chen, C. Virrueta, S. Zhang, C. Mao, and J. Wang, "4D printing: the spotlight for 3D printed smart materials," *Materials Today*, 2024, https://doi.org/10.1016/j.mattod.2024.06.004.

[14] Z. M. Jessop, A. Al-Sabah, M. D. Gardiner, E. Combellack, K. Hawkins, and I. S. Whitaker, "3D bioprinting for reconstructive surgery: principles, applications and challenges," *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, vol. 70, no. 9, pp. 1155-1170, 2017, https://doi.org/10.1016/j.bjps.2017.06.001.

[15] J. An, C. K. Chua, and V. Mironov, "A perspective on 4D bioprinting," *International Journal of Bioprinting*, vol. 2, no. 1, 2016, https://doi.org/10.18063/IJB.2016.01.003.

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

[17] S. Tibbits, "4D printing: multi-material shape change," *Architectural design*, vol. 84, no. 1, pp. 116-121, 2014, https://doi.org/10.1002/ad.1710.

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

[19] Z. X. Khoo et al., "3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 10, no. 3, pp. 103-122, 2015, https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054.

[20] A. Sydney Gladman, E. A. Matsumoto, R. G. Nuzzo, L. Mahadevan, and J. A. Lewis, "Biomimetic 4D printing," *Nature materials*, vol. 15, no. 4, pp. 413-418, 2016, https://doi.org/10.1038/nmat4544.

[21] C. He, M. Zhang, and C. Guo, "4D printing of mashed potato/purple sweet potato puree with spontaneous color change," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 59, p. 102250, 2020, https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102250.

[22] A. S. Mathews, S. Abraham, S. K. Kumaran, J. Fan, and C. Montemagno, "Bio nano ink for 4D printing membrane proteins," *RSC advances*, vol. 7, no. 66, pp. 41429-41434, 2017, https://doi.org/10.1039/C7RA07650A.

[23] C. M. Yakacki, R. Shandas, D. Safranski, A. M. Ortega, K. Sassaman, and K. Gall, "Strong, tailored, biocompatible shape-memory polymer networks," *Advanced functional materials*, vol. 18, no. 16, pp. 2428-2435, 2008, https://doi.org/10.1002/adfm.200701049.

[24] T. Xie, "Tunable polymer multi-shape memory effect," *Nature*, vol. 464, no. 7286, pp. 267-270, 2010, https://doi.org/10.1038/nature08863.

[25] J. Wu et al., "Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers," *Scientific reports*, vol. 6, no. 1, p. 24224, 2016, https://doi.org/10.1038/srep24224.

[26] N. Roudbarian, M. Baniasadi, P. Nayyeri, M. Ansari, R. Hedayati, and M. Baghani, "Enhancing shape memory properties of multi-layered and multi-material polymer composites in 4D printing," *Smart Materials and Structures*, vol. 30, no. 10, p. 105006, 2021, https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac1b3b.

[27] X. Wan, Y. He, Y. Liu, and J. Leng, "4D printing of multiple shape memory polymer and nanocomposites with biocompatible, programmable and selectively actuated properties," *Additive Manufacturing*, vol. 53, p. 102689, 2022, https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102689.

[28] X. Wang, Y. He, Y. Liu, and J. Leng, "Advances in shape memory polymers: Remote actuation, multi-stimuli control, 4D printing and prospective applications," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 151, p. 100702, 2022, https://doi.org/10.1016/j.mser.2022.100702.

[29] F. Shadianlou, A. Foorginejad, and Y. Yaghoubinezhad, "Hydrothermal synthesis of zirconia-based nanocomposite powder reinforced by graphene and its application for bone scaffold with 3D printing," *Advanced Powder Technology*, vol. 33, no. 2, p. 103406, 2022, https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.103406.

[30] M. Javaid and A. Haleem, "4D printing applications in medical field: a brief review," *Clinical Epidemiology and Global Health*, vol. 7, no. 3, pp. 317-321, 2019, https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.09.007.

[31] D. Niazy, M. Ashraf, M. Bodaghi, and A. Zolfagharian, "Resilient city perspective: 4D printing in art, architecture and construction," *Materials Today Sustainability*, p. 100708, 2024, https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100708.

[32] H. Yi and Y. Kim, "Prototyping of 4D-printed self-shaping building skin in architecture: design, fabrication, and investigation of a two-way shape memory composite (TWSMC) façade panel," *Journal of Building Engineering*, vol. 43, p. 103076, 2021, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103076.

[33] W. Gao et al., "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering," *Computer-aided design*, vol. 69, pp. 65-89, 2015, https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001.

[34] K. Ntouanoglou, P. Stavropoulos, and D. Mourtzis, "4D printing prospects for the aerospace industry: a critical review," *Procedia manufacturing*, vol. 18, pp. 120-129, 2018, https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.11.016.

[35] A. Raina, M. I. U. Haq, M. Javaid, S. Rab, and A. Haleem, "4D printing for automotive industry applications," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, pp. 1-9, 2021, https://doi.org/10.1007/s40033-021-00284-z.

[36] A. Foorginejad, M. Azargoman, V. Babaiyan, N. Mollayi, and M. Taheri, "Application of the extreme learning machine for modeling the bead geometry in gas metal arc welding process," *AUT Journal of Modeling and Simulation*, vol. 51, no. 2, pp. 121-130, 2019, https://doi.org/10.22060/miscj.2019.15189.5127.

[37] F. Demoly and J.-C. André, "4D printing: bridging the gap between fundamental research and real-world applications," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 13, p. 5669, 2024, https://doi.org/10.3390/app14135669.

[38] X. Wan et al., "Recent Advances in 4D Printing of Advanced Materials and Structures for Functional Applications," *Advanced Materials*, p. 2312263, 2024, https://doi.org/10.1002/adma.202312263.

[39] K. Belal, "Material modeling and design of soft robots," *Benha Journal of Applied Sciences*, vol. 9, no. 5, pp. 135-140, 2024, https://doi.org/10.21608/bjas.2024.282799.1402.

[40] P. K. Shingo, M. I. Ahmed, R. Vijayanathan, P. Das, and M. M. R. Sakib, "Innovations and Challenges in Soft Robotic Dynamics: Advanced Modeling, Interaction, and Control Mechanisms," *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, vol. 2, no. 5, pp. 760-773, 2024, https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2(5).67.

[41] A. Foorginejad, M. Azargoman, N. Mollayi, and M. Taheri, "Modeling of weld bead geometry using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in additive manufacturing," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 6, no. 1, pp. 160-170, 2020, https://doi.org/10.22055/JACM.2019.29077.1555.

[42] A. Foorginejad, S. Mohammad Emam, H. Jamshidi, and S. Ranjbar, "Image processing technique for measuring the weld dilution and heat-affected zone to model the gas metal arc welding process by a neuro-fuzzy system," *Journal of Optical Technology*, vol. 90, no. 12, pp. 743-752, 2023, https://doi.org/10.1364/JOT.90.000743.

[43] H. Hardani, M. Afshari, F. Allahyari, M. R. Samadi, H. Afshari, and E. M. M. Medina, "Optimization of FFF process parameters to improve the tensile strength and impact energy of polylactic acid/carbon nanotube composite," *Polymer Engineering & Science*, vol. 64, no. 10, pp. 5047-5060, 2024, https://doi.org/10.1002/pen.26900.

[44] H. Hardani, M. Afshari, M. R. Samadi, H. Afshari, and S. A. López, "An enhancement in the tensile modulus and bending resistance of polylactic acid/carbon nanotube composite by optimizing FFF process parameters," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, p. 08927057241268831, 2024, https://doi.org/10.1177/08927057241268831.

[45] F. Taher, M. Afshari, A. Houmani, M. R. Samadi, S. Bakhshi, and H. Afshari, "Simultaneous enhancement of the impact strength and tensile modulus of PP/EPDM/TiO2 nanocomposite fabricated by fused filament fabrication," *Colloid and Polymer Science*, vol. 302, no. 3, pp. 393-407, 2024, https://doi.org/10.1007/s00396-023-05209-8.

[46] V. Abdollahi, A. Foorginejad, K. Khalili, "Additive manufacturing and biomedical 3d printing," *Mechanical Engineering*, pp. 43-53, 2020, [in Persian] , https://doi.org/10.30506/mmep.2020.120314.1796.

[47] A. Andreu et al., "4D printing materials for vat photopolymerization," *Additive Manufacturing*, vol. 44, p. 102024, 2021, https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102024.

[48] K. Ishfaq, M. Abdullah, and M. A. Mahmood, "A state-of-the-art direct metal laser sintering of Ti6Al4V and AlSi10Mg alloys: Surface roughness, tensile strength, fatigue strength and microstructure," *Optics & Laser Technology*, vol. 143, p. 107366, 2021, https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107366.

[49] Z. Zhang, K. G. Demir, and G. X. Gu, "Developments in 4D-printing: a review on current smart materials, technologies, and applications," *International Journal of Smart and Nano Materials*, vol. 10, no. 3, pp. 205-224, 2019, https://doi.org/10.1080/19475411.2019.1591541.

[50] Y. Q. Fu, W. M. Huang, J. Luo, and H. Lu, "Polyurethane shape-memory polymers for biomedical applications," in *Shape Memory Polymers for Biomedical Applications*: Elsevier, 2015, pp. 167-

195, https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-698-2.00009-X.

[51] Zhou, K., Zhang, Q., Gong, J., Shen, H., Luo, H., Chen, S., ... & Zhang, Y. (2024). Dynamic Non-Covalent Bonds Powering Enhanced Temporary Shape Retention Temperature and Mechanical Robustness in *Shape Memory Polyurethane. ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 16(46), pp. 64031-64041, https://doi.org/10.1021/acsami.4c14965.

[52] M. P. Caputo, A. E. Berkowitz, A. Armstrong, P. Müllner, and C. V. Solomon, "4D printing of net shape parts made from Ni-Mn-Ga magnetic shape-memory alloys," *Additive Manufacturing*, vol. 21, pp. 579-588, 2018, https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.028.

[53] H. Lu et al., "Ultrahigh-performance TiNi shape memory alloy by 4D printing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 763, p. 138166, 2019, https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138166.

[54] A. Jafarabadi, I. Ferretto, M. Mohri, C. Leinenbach, and E. Ghafoori, "4D printing of recoverable buckling-induced architected iron-based shape memory alloys," *Materials & Design*, vol. 233, p. 112216, 2023, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112216.

[55] Y. Gao, Z. Jian, B. Wang, Z. Zhang, J. Jian, and Q. Gao, "4D forming shape memory component of Cu–13Al–5Fe alloy based on laser powder bed fusion of metal powders," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 866, p. 144693, 2023, https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144693.

[56] A. Milleret, "4D printing of Ni–Mn–Ga magnetic shape memory alloys: a review," *Materials Science and Technology*, vol. 38, no. 10, pp. 593-606, 2022, https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2062655.

[57] G. Liu et al., "4D additive–subtractive manufacturing of shape memory ceramics," *Advanced Materials*, vol. 35, no. 39, p. 2302108, 2023, https://doi.org/10.1002/adma.202302108.

[58] S. Chen et al., "Lightweight and geometrically complex ceramics derived from 4D printed shape memory precursor with reconfigurability and programmability for sensing and actuation applications," *Chemical Engineering Journal*, vol. 455, p. 140655, 2023, https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140655.

[59] S. Liu, X. Chen, and Y. Zhang, "Hydrogels and hydrogel composites for 3D and 4D printing applications," in *3D and 4D printing of polymer nanocomposite materials*: Elsevier, 2020, pp. 427-465, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816805-9.00014-4.

[60] S. Malekmohammadi et al., "Smart and biomimetic 3D and 4D printed composite hydrogels: opportunities for different biomedical applications," *Biomedicines*, vol. 9, no. 11, p. 1537, 2021, https://doi.org/10.3390/biomedicines9111537.

[61] Y. Dong et al., "4D printed hydrogels: fabrication, materials, and applications," *Advanced Materials Technologies*, vol. 5, no. 6, p. 2000034, 2020, https://doi.org/10.1002/admt.202000034.

[62] K. Nakamura, N. Di Caprio, and J. A. Burdick, "Engineered Shape-Morphing Transitions in Hydrogels Through Suspension Bath Printing of Temperature-Responsive Granular Hydrogel Inks," *Advanced Materials*, vol. 36, no. 47, p. 2410661, 2024, https://doi.org/10.1002/adma.202410661.

[63] A. Abou-Okeil, R. Refaei, S. E. Moustafa, and H. M. Ibrahim, "Magnetic hydrogel scaffold based on hyaluronic acid/chitosan and gelatin natural polymers," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 28206, 2024, https://doi.org/10.1038/s41598-024-78696-6.

[64] Y. Zhang et al., "4D printing of magnetoactive soft materials for on-demand magnetic actuation transformation," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 13, no. 3, pp. 4174-4184, 2021, https://doi.org/10.1021/acsami.0c19280.

[65] J. Lu, H. Cui, J. Xu, J. Zhang, and Z. Li, "4D printing technology based on magnetic intelligent materials: Materials, processing processes, and application," *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 11, no. 3, pp. 1025-1041, 2024, https://doi.org/10.1089/3dp.2023.0125.

[66] F. Shadianlou, A. Foorginejad, and Y. Yaghoubinezhad, "Fabrication of zirconia/reduced graphene oxide/hydroxyapatite scaffold by rapid prototyping method and its mechanical and biocompatibility properties," *Ceramics International*, vol. 48, no. 5, pp. 7031-7044, 2022, https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.261.

[67] H. Doostmohammadi, M. Baniassadi, M. Bodaghi, and M. Baghani, "4D Printing of Magneto-Thermo-Responsive PLA/PMMA/Fe3O4 Nanocomposites with Superior Shape Memory and Remote Actuation," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 309, no. 9, p. 2400090, 2024, https://doi.org/10.1002/mame.202400090.

[68] A. Y. Chen, E. Pegg, A. Chen, Z. Jin, and G. X. Gu, "4D printing of electroactive materials," *Advanced Intelligent Systems*, vol. 3, no. 12, p. 2100019, 2021, https://doi.org/10.1002/aisy.202100019.

[69] H. Zhang et al., "4D printing of Ag nanowire-embedded shape memory composites with stable and controllable electrical responsivity: implications for

flexible actuators," *ACS Applied Nano Materials*, vol. 5, no. 5, pp. 6221-6231, 2022, https://doi.org/10.1021/acsanm.2c00264.

[70] H. Zhang et al., "4D printing of shape memory polymer nanocomposites for enhanced performances and tunable response behavior," *European Polymer Journal*, vol. 201, p. 112568, 2023, https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112568.

[71] B. Du et al., "Recent development of photoresponsive materials toward 3D printing: From materials to application," *Journal of Polymer Science*, 2024, https://doi.org/10.1002/pol.20240084.

[72] Y. Cao, Y. Wu, Y. Huang, H. Xiang, and L. Zhang, "Photo/thermal dual-responsive azobenzene-based photosensitive resin for 4D printing," *Chemical Engineering Journal*, vol. 498, p. 155140, 2024, https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155140.

[73] Amisha, S. Thakur, and A. Singh, "Photo Responsive Material for 4D Printing in Tissue Engineering," in *Engineered Biomaterials: Synthesis and Applications*: Springer, 2023, pp. 429-463, https://doi.org/10.1007/978-981-99-6698-1_14.

[74] Z. Ren et al., "4D printing light-driven actuator with lignin photothermal conversion module," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 253, p. 126562, 2023, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126562.

[75] N. Ahmed, R. Deffley, B. Kundys, and N. Morley, "3D printing of magnetostrictive property in 17/4 ph stainless steel," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 585, p. 171115, 2023, https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171115.

[76] M. Wajahat, J. H. Kim, J. H. Kim, I. D. Jung, J. Pyo, and S. K. Seol, "4D Printing of Ultrastretchable Magnetoactive Soft Material Architectures for Soft Actuators," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 15, no. 51, pp. 59582-59591, 2023, https://doi.org/10.1021/acsami.3c12173.

[77] M. Barletta, A. Gisario, and M. Mehrpouya, "4D printing of shape memory polylactic acid (PLA) components: Investigating the role of the operational parameters in fused deposition modelling (FDM)," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 61, pp. 473-480, 2021, https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.11.036.

[78] Y. S. Lui, W. T. Sow, L. P. Tan, Y. Wu, Y. Lai, and H. Li, "4D printing and stimuli-responsive materials in biomedical aspects," *Acta biomaterialia*, vol. 92, pp. 19-36, 2019, https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.05.005.

[79] M. Navaf et al., "4D printing: A new approach for food printing; effect of various stimuli on 4D printed food properties. A comprehensive review," *Applied Food Research*, vol. 2, no. 2, p. 100150, 2022, https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100150.

[80] A. Mandal and K. Chatterjee, "Emerging trends in humidity-responsive 4D bioprinting," *Chemical Engineering Journal*, vol. 455, p. 140550, 2023, https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140550.

[81] K. Kim et al., "4D printing of hygroscopic liquid crystal elastomer actuators," *Small*, vol. 17, no. 23, p. 2100910, 2021, https://doi.org/10.1002/smll.202100910.

[82] M. Mehrpouya and W. M. Huang, "Origami-inspired 4D printing," in *Smart Materials in Additive Manufacturing*: Elsevier, pp. 373-394, 2022, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824082-3.00002-7.

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

[84] A. Zolfagharian, A. Kaynak, A. Noshadi, and A. Z. Kouzani, "System identification and robust tracking of a 3D printed soft actuator," *Smart Materials and Structures*, vol. 28, no. 7, p. 075025, 2019, https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab1cce.

[85] 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, https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2021.03.006.

[86] S. S. Mohol and V. Sharma, "Functional applications of 4D printing: a review," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 27, no. 8, pp. 1501-1522, 2021, https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2020-0240.

[87] K. Osouli-Bostanabad et al., "Traction of 3D and 4D printing in the healthcare industry: from drug delivery and analysis to regenerative medicine," *ACS Biomaterials Science & Engineering*, vol. 8, no. 7, pp. 2764-2797, 2022, https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.2c00094.

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

[89] X. Li, J. Shang, and Z. Wang, "Intelligent materials: a review of applications in 4D printing," *Assembly Automation*, vol. 37, no. 2, pp. 170-185, 2017, https://doi.org/10.1108/AA-11-2015-093.

[90] K. L. Ameta, V. S. Solanki, V. Singh, A. P. Devi, R. Chundawat, and S. Haque, "Critical appraisal and

systematic review of 3D & 4D printing in sustainable and environment-friendly smart manufacturing technologies," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 34, p. e00481, 2022, https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00481.

[91] J. Choi, O.-C. Kwon, W. Jo, H. J. Lee, and M.-W. Moon, "4D printing technology: a review," *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 2, no. 4, pp. 159-167, 2015, https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0039.

[92] F. Momeni and J. Ni, "Nature-inspired smart solar concentrators by 4D printing," *Renewable Energy*, vol. 122, pp. 35-44, 2018, https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.062.

[93] J. V. Vaghasiya and M. Pumera, "The rise of 3D/4D-printed water harvesting materials," *Materials Today*, 2024, https://doi.org/10.1016/j.mattod.2024.06.007.

[94] K. R. Hossain et al., "Application of 3D printing technology in the military," *Journal of Chemistry Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 103-116, 2023, https://doi.org/10.22034/jchemlett.2023.395069.1113.

[95] M. Bisić and A. Pandžić, "Advances in Additive Manufacturing Application in Military Industry," in *International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies*, 2023, pp. 168-187, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-031-46432-4_14.

[96] A. Sözen and G. Neşer, "A Critical Systematic Scoping Review on the Applications of Additive Manufacturing (AM) in the Marine Industry," *Polymers*, vol. 17, no. 1, p. 4, 2024, https://doi.org/10.3390/polym17010004.

[97] C. Lee et al., "Soft robot review," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 15, pp. 3-15, 2017, https://doi.org/10.1007/s12555-016-0462-3.

[98] C. Tawk and G. Alici, "A review of 3D-printable soft pneumatic actuators and sensors: research challenges and opportunities," *Advanced Intelligent Systems*, vol. 3, no. 6, p. 2000223, 2021, https://doi.org/10.1002/aisy.202000223.

[99] X. Zhai, L. Jin, and J. Jiang, "A survey of additive manufacturing reviews," *Materials Science in Additive Manufacturing*, vol. 1, no. 4, p. 21, 2022, https://doi.org/10.18063/msam.v1i4.21.

[100] S. Li, D. M. Vogt, D. Rus, and R. J. Wood, "Fluid-driven origami-inspired artificial muscles," *Proceedings of the National academy of Sciences*, vol. 114, no. 50, pp. 13132-13137, 2017, https://doi.org/10.1073/pnas.1713450114.

[101] J. Jiao et al., "Stiffness-tunable and shape-locking soft actuators based on 3D-printed hybrid multi-materials," *Soft Science*, vol. 2, no. 4, p. 20, 2022, https://doi.org/10.20517/ss.2022.19.

[102] A. Pagoli, F. Chapelle, J.-A. Corrales-Ramon, Y. Mezouar, and Y. Lapusta, "Review of soft fluidic actuators: Classification and materials modeling analysis," *Smart Materials and Structures*, vol. 31, no. 1, p. 013001, 2021, https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac383a.

[103] A. Prituja, H. Banerjee, and H. Ren, "Electromagnetically enhanced soft and flexible bend sensor: A quantitative analysis with different cores," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 9, pp. 3580-3589, 2018, https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2817211.

[104] T. George Thuruthel, Y. Ansari, E. Falotico, and C. Laschi, "Control strategies for soft robotic manipulators: A survey," *Soft robotics*, vol. 5, no. 2, pp. 149-163, 2018, https://doi.org/10.1089/soro.2017.0007.

[105] A. Melingui, O. Lakhal, B. Daachi, J. B. Mbede, and R. Merzouki, "Adaptive neural network control of a compact bionic handling arm," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 6, pp. 2862-2875, 2015, https://doi.org/10.1109/TMECH.2015.2396114.

[106] P. Qi, C. Liu, A. Ataka, H.-K. Lam, and K. Althoefer, "Kinematic control of continuum manipulators using a fuzzy-model-based approach," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 8, pp. 5022-5035, 2016, https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2554078.

[107] A. Foorginejad and M. Lakhi, "Designing and creating a mouse using nature-inspired shapes," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 6, no. 4, pp. 841-847, 2020, https://doi.org/10.22055/JACM.2019.29701.1628.

[108] B. A. W. Keong and R. Y. C. Hua, "A novel fold-based design approach toward printable soft robotics using flexible 3D printing materials," *Advanced Materials Technologies*, vol. 3, no. 2, p. 1700172, 2018, https://doi.org/10.1002/admt.201700172.

[109] S. Leanza, J. Lu-Yang, B. Kaczmarski, S. Wu, E. Kuhl, and R. R. Zhao, "Elephant Trunk Inspired Multimodal Deformations and Movements of Soft Robotic Arms," *Advanced Functional Materials*, p. 2400396, 2024, https://doi.org/10.1002/adfm.202400396.

[110] B. Sparrman et al., "Printed silicone pneumatic actuators for soft robotics," *Additive Manufacturing*, vol. 40, p. 101860, 2021, https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101860.

[111] M. Mehrpouya, A. Azizi, S. Janbaz, and A. Gisario, "Investigation on the functionality of thermoresponsive origami structures," *Advanced Engineering Materials*, vol. 22, no. 8, p. 2000296, 2020, https://doi.org/10.1002/adem.202000296.

[112] X. Huang et al., "4D Printing Hybrid Soft Robots Enabled by Shape-Transformable Liquid Metal Nanoparticles," *Advanced Materials*, vol. 36, no. 46, p. 2409789, 2024, https://doi.org/ 10.1002/adma.202409789.

[113] D. Kehret, S. Junk, H. Einloth, and B. E. Rapp, "4D printing of magnetoresponsive soft gripper and phenomenological approach for required magnetical actuation field," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-13, 2024, https://doi.org/ 10.1007/s00170-024-14605-5.

[114] A. Zolfagharian et al., "Silicon-based soft parallel robots 4D printing and multiphysics analysis," *Smart Materials and Structures*, vol. 31, no. 11, p. 115030, 2022, https://doi.org/ 10.1088/1361-665X/ac976c.

[115] A. Zolfagharian, L. Durran, S. Gharaie, B. Rolfe, A. Kaynak, and M. Bodaghi, "4D printing soft robots guided by machine learning and finite element models," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 328, p. 112774, 2021, https://doi.org/ 10.1016/j.sna.2021.112774.

[116] L. Ren et al., "4D Printed Self-Sustained Soft Crawling Machines Fueled by Constant Thermal Field," *Advanced Functional Materials*, p. 2400161, 2024, https://doi.org/ 10.1002/adfm.202400161.

[117] X. Xia et al., "4D-Printed Bionic Soft Robot with Superior Mechanical Properties and Fast Near-Infrared Light Response," *ACS Applied Polymer Materials*, vol. 6, no. 6, pp. 3170-3178, 2024, https://doi.org/10.1021/acsapm.3c02936.

[118] A. Zolfagharian, M. Denk, M. Bodaghi, A. Z. Kouzani, and A. Kaynak, "Topology-optimized 4D printing of a soft actuator," *Acta Mechanica Solida Sinica*, vol. 33, pp. 418-430, 2020, https://doi.org/10.1007/s10338-019-00137-z.