مقاله مروری

فصلنامه علمی
سال ششم شماره ۱، شماره پیاپی ۲۱، بهار ۱۴۰۰
Vol. 6, No. 1, Issue No. 21
Spring 2021, Quarterly
صفحه ۶۰-۵۱

Iran Polymer Technology: Research and Development

مروری برفرایند تولید افزایشی با چاپگرهای پنج‌بعدی و کاربرد آن‌ها

شکوه دزیانیان، محمد آزادی*، ستار محمدی اسفرجانی

سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی مکانیک

چکیده ...

چاپ سه‌بعدی مدت زمان زیادی است که در زمینه‌های مختلف مهندسی، پزشکی، دندان‌پزشکی، هوافضا و دیگر صنایع مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در حالی که صنعت تولید افزایشی همچنان در حال کشف چاپگرهای سه‌بعدی جدید، مواد نوین و کاربردهای جدید است، تحقیقات در مورد سایر فناوری‌ها نیز در حال انجام است. از جمله چاپ چهاربعدی که توانایی تغییر شکل اشیا چاپ‌شده سه‌بعدی را در طول زمان دارد. در واقع در چاپ چهاربعدی، بعد چهارم زمان است. محققان در دانشگاه‌ها نیز مفهوم چاپ پنج‌بعدی را ارائه داده‌اند. در این فناوری، چاپگرقابلیت ساخت قطعات را در پنج محور مختلف دارد. همچنین در صنایع پزشکی از چاپ پنج بعدی به‌عنوان بررسی تغییرات فیزیولوژیکی یاد شده است. با توجه به این‌که بیش از نیمی از قطعاتی که توسط روش ساخت افزایشی تولید می‌شوند، از پلیمرها ساخته شده‌اند، آگاهی از آخرین فناوری چاپگرها برای پژوهشگران این حوزه مفید خواهد بود.

واژه‌های کلیدی:

تولید افزایشی،
چاپگر پنج‌بعدی،
چاپگر سه‌بعدی،
پلیمر

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

۱ مقدمه

تا قرن بیستم فناوری چاپ بسیار محدود بود و مردم روی کاغذ می‌نوشتند که به فناوری چاپ دوبعدی معروف است. مفهوم چاپ سه‌بعدی اولین بار توسط چارلز هال (Charles Hall) در سال ۱۹۸٤ مطرح شد، مفهومی در دنیای تولید که شامل ساخت مستقیم اشیا در سه‌بعد است (شکل ۱) [۱]. در حالی که ایده چاپ سه‌بعدی مدت زمان زیادی وجود دارد، این فناوری هنوز هم برای بسیاری از مردم به خوبی درک نشده است. دلیل آن این است که هزینه‌های مربوط به تولید انبوه قطعات به کمک این فناوری بسیار گران است و هنوز هم مواردی وجود دارد که باعث می‌شود که تولید متداول این محصول، ممکن نباشد [۲]. با این حال این فناوری روزبه‌روز در حال گسترش و بهبود است.

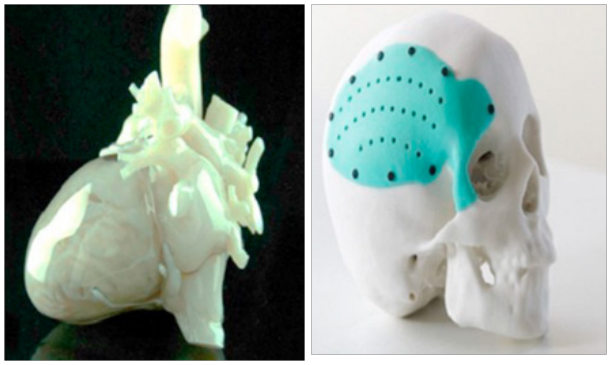
چاپ چهاربعدی برای اولین بار در سال ۲۰۱۳ معرفی شد و بلافاصله توجه زیادی را در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی از جمله مواد هوشمند و تحقیقات زیست‌پزشکی، جلب کرد. چاپ چهاربعدی به‌عنوان چاپ سه‌بعدی در طول زمان تعریف می‌شود. درواقع در این فرایند، بعد چهارم زمان است. تفاوت عمده در مورد چاپ چهاربعدی نسبت به چاپ سه‌بعدی توانایی تغییر شکل قطعه در طول زمان است. در این فرایند با اعمال محرک خارجی مانند دما، نور یا سایر محرک‌های محیطی به قطعه تولید شده به روش سه‌بعدی، تغییر شکل در جسم حاصل می‌شود. چاپ چهاربعدی به انواع مختلف مواد و مدل‌های سه‌بعدی متکی است. این فناوری از مواد قابل برنامه‌ریزی که امکان تغییرشکل دارند استفاده می‌کند [۳-٤].

در سالیان گذشته از فناوری چاپگرهای سه وچهاربعدی در زمینه‌های پزشکی [٦]، رباتیک [٦]، صنعت دفاعی [۷]، صنعت اتومبیل [۸]، صنعت ساختمان [۸]، مواد کامپوزیتی [۹]، هوانوردی [۱۰] برای ساخت قطعات استفاده شده است. با توجه به این‌که از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۱٦ افزایشی ۲۲۰ درصدی در تولید هواپیما وجود داشت، به‌دلیل افزایش ٤/۷ درصدی نرخ رشد سالانه تقاضای سفر، چشم‌انداز صنعت هواپیمایی، قابل توجه خواهد بود. رقابت آزاد بازار و فناوری، فرصت‌های بزرگی برای صنعت هوافضای جهانی فراهم می‌کند که در آن تقاضا برای هزینه‌های کم‌تر در تولید، سادگی در سرهم‌بندی در هر ساعت پرواز و ویژگی‌های آیرودینامیکی بهتر، به‌طور مداوم در حال افزایش است. فنون جدید چاپ چهاربعدی می‌توانند با به حداقل رساندن تعداد اجزا و زمان سرهم‌بندی از یک سو و از سوی دیگر، تغییر اساسی در فلسفه مباحث دینامیک محاسباتی (Computational Fluid Dynamics: CFD)، قدم به قدم پیش بروند [۱۰].

در حال حاضر، بیش از نیمی از قطعاتی که توسط روش ساخت افزایشی تولید می‌شوند از پلیمرها ساخته شده‌اند. مواد پلیمری مانند آکریلونیتریل بوتادی‌ان استایرن، پلی‌لاکتیک اسید، پلی‌آمید و پلی‌کربنات و رزین‌های اپوکسی در فناوری چاپ سه‌بعدی بسیار کاربرد دارند [۱۱]. مواد پلیمری برای ساخت محرک‌های نرم (Soft Actuators) مورد استفاده قرار می‌گیرند. محرک‌های نرم به‌طور فزاینده‌ای برای انواع کاربردها از رباتیک تا پزشکی زیستی مورد نیاز هستند. کوریا و همکاران به تحقیق در مورد توسعه مواد قابل چاپ برای برنامه‌های محرک نرم بر اساس مایعات یونی (Ionic Liquids) و پلیمر فلوئوره شده (Fluorinated)، پلی‌فلورید وینیلیدین (Polyvinylidene Fluoride: PVDF) پرداختند [۱۲].

مایعات یونی که دارای همان کاتیون-۱ (Cation)، بوتیل-۳ (Butyl)، متیل ایمیدازولیوم (Methylimidazolium)به اضافه آنیون‌های مختلف تری‌سیانومتانید (Tricyanomethanide)، دی‌سیانامید (Dicyanamide) و تیوسیانات (Thiocyanate) بودند، به ماتریس پلیمری پلی‌فلورید وینیلیدین در ٤۰ درصد وزنی اضافه شده‌اند و با روش نوشتن چاپ مستقیم پردازش می‌شود. پتانسیل مواد قابل چاپ قابل توسعه به‌عنوان محرک‌های نرم به‌صورت آزمایشی نشان داده شده و به‌صورت نظری ارزیابی شده است [۱۲].

اندازه‌گیری‌های رئولوژیکی از محلول‌های مایعات یونی/ فلورید وینیلیدین اجازه ایجاد ارتباط بین تنش برشی و گرانروی را دارد، در حالی که رفتار نازک شدن برش مشاهده می‌شود. به‌طور مستقل از آنیون مایعات یون، مایعات یونی‌های



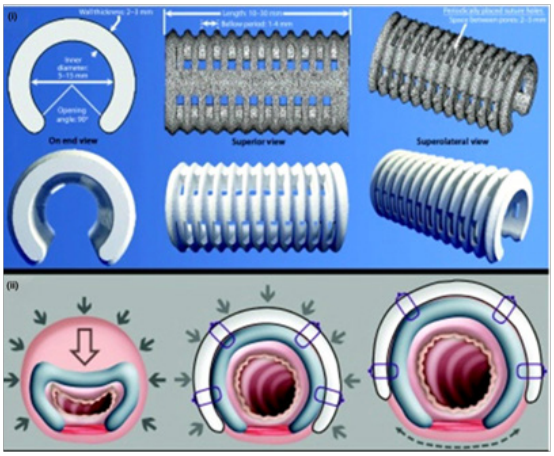
(الف) (ب)

شکل ۱ مدل‌های چاپ‌شده سه‌بعدی برای کاربرد پزشکی (الف) جمجمه چاپ سه‌بعدی و (ب) قلب چاپ‌شده سه‌بعدی [۵].

درگیر منجر به تغییر در مورفولوژی نمونه مربوط به تشکیل اسفرولیت‌های قابل‌توجهی کوچکتر از فلوراید وینیلیدین با مرزهای کاملاً مشخص و افزایش محتوای فاز β برقی و درجه تبلور پلیمر می‌شود. اختلاط مایعات یونی در ماتریس فلورید وینیلیدین باعث اثر پلاستیک‌سازی مکانیکی می‌شود. حداکثر هدایت یونی ۲/۵×۱۰×۵ (S/cm) برای کامپوزیت [متیل ایمیدازولیوم]، [دی–سیانامید]/هگزافلوروفسفات ۱–بوتیل–۳–متیل میدازولیوم (1-Butyl-3-methylimidazoliumhexafluo Rophosphate: Bmim) به‌دست آمده است. پتانسیل مواد قابل چاپ قابل توسعه به‌عنوان محرک‌های نرم به‌صورت آزمایشی نشان داده شده و به‌صورت نظری ارزیابی شده است ، بالاترین جابجایی ۱/۰ میلی‌متر در ولتاژ اعمال شده Vpp ٤ برای [متیل ایمیدازولیوم]، [دی‌سیانامید]/ هگزافلوروفسفات ۱–بوتیل–۳–متیل میدازولیوم (Bmim) به‌دست می‌آید. سرانجام، اجرای یک میکروگیرنده چاپی، پتانسیل مواد را برای کاربردها نشان می‌دهد [۱۲].

مواد کامپوزیت یا تقویت‌شده، به ویژه در کلاس پلیمرها، به‌دلیل برتری‌های فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و ساختاری، در حال تبدیل شدن به مواد برجسته برای طیف متنوعی از ابزارهای مهندسی و علمی هستند. در واقع، اعتبار اصلی برای تصدیق کامپوزیت‌های ماتریس پلیمری (Polymer Matrix Composite: PMC) به انواع مختلف تقویت‌کننده‌های طبیعی و مصنوعی اختصاص دارد که منجر به شیمی خوب سطحی می‌شود. با این حال، چالش‌های ذاتی فناوری‌های سنتی تولید، همیشه محدودیت‌هایی را در توسعه کامپوزیت‌های ماتریس پلیمرهای خاص برنامه ایجاد می‌کنند. با تکامل فناوری‌های چاپ سه‌بعدی این معضل قابل حل است. فناوری‌های چاپ سه بعدی قادر به تولید نمونه شکل‌های تقریباً خالص و با دقت بالا هستند [۹].

در مروری که بر روی ۱۷۱ مقاله تحقیقاتی درباره چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی و از آن جمله ۱۳ مقاله تحقیقاتی درباره چاپ چهاربعدی در حوزه پزشکی انجام شد نشان داد چاپ چهاربعدی مزایایی را برای پزشکان به ویژه در مناطقی که تحت پوشش فناوری‌های چاپ سه‌بعدی نیستند، فراهم می‌کند. چاپ چهاربعدی با افزودن هوشمند لایه‌به‌لایه از طریق داده‌های طراحی با کمک رایانه (Computer-Aided Design: CAD)، به ایجاد شی فیزیکی سه‌بعدی کمک می‌کند. این فناوری یک بعد از تغییر و تحول در طول زمان به ماده اضافه می‌کند که محصولات چاپی به عواملی مانند دما، رطوبت، زمان و غیره حساس می‌شوند. این فناوری می‌تواند پشتیبانی گسترده‌ای



شکل ۲ نمونه‌ای از کاربرد پلیمرها برای بازسازی بافت و اندام برای کودک زیر یک‌سال با مشکل تنفسی [۱۵].

را در زمینه پزشکی، به ویژه با کاشتنی‌های پزشکی، ابزار و دستگاه‌های بهتر و هوشمند فراهم کند. اکنون پزشکان و محققان می‌توانند با فناوری چاپ چهاربعدی، خدمات بهتری به بیمار ارائه کنند [۱۳].

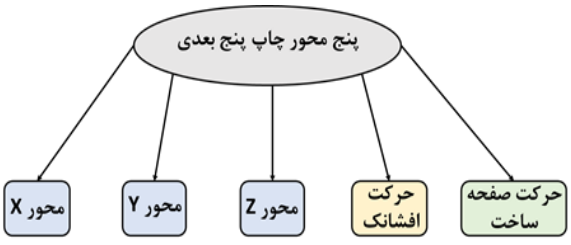
میائو و همکاران به چاپ چهاربعدی مواد پلیمری برای بازسازی بافت و اندام پرداختند. در آن تحقیق، نمونه‌ای پلیمری برای بازسازی بافت و اندام برای یک کودک زیر یکسال با مشکل تنفسی، ساخته شد (شکل ۲). نمونه تولیدشده با بزرگ‌تر شدن بیمار تا سه سالگی در اندازه راه هوایی تغییرات ایجاد کرد و پس از آن که مجاری تنفسی بالغ قادر به عملکرد بودند، کاملاً تخریب شد. این پروژه نشان داد که قطعات تولید شده با چاپگرهای چهاربعدی، اگر طراحی لازم صورت گیرد، می‌توانند با رشد یا تغییر بافت‌ها سازگار شوند که این موضوع در کودکان حیاتی است. نتیجه تحقیق آن‌ها نشان داد که چاپ چهاربعدی ممکن است بستر جدیدی را برای مطالعات زیست پزشکی در مورد بافت‌ها و اندام‌های مصنوعی عملکردی فراهم کند. ویژگی‌های پیشرفته چاپ چهاربعدی و انبوه مورد انتظار در زمینه‌های تحقیقاتی کشف‌نشده، مسیری سریع برای توسعه با طیف گسترده‌ای از چاپ چندبعدی، نه‌تنها در قلمرو بازسازی بافت و اندام، بلکه در تمام زمینه‌های علم و فناوری است [١٤–١٥].

در تحقیقی روش ساخت سازه‌های کامپوزیتی با هندسه‌های پیچیده با استفاده از چاپ چهاربعدی کامپوزیت‌ها ارائه شده است. در چاپ چهاربعدی کامپوزیت‌ها، ساختارهای پیچیده بدون استفاده از قالب‌های پیچیده ساخته می‌شوند. لایه‌های مسطح کامپوزیت‌ها روی قالب تخت رسوب می‌کنند. با استفاده از ناهمسانگردی ترتیب قرار دادن ورقه‌ها، بعد از پخت و سرد

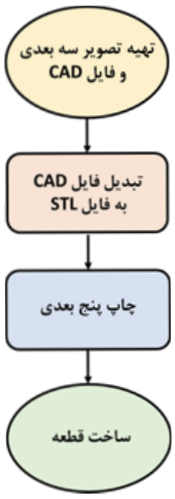
شکل ۳ محورهای چاپگر پنج‌بعدی [۱۶].

شدن در دمای اتاق، ورقه‌های تخت منحنی می‌شوند. در آن تحقیق، تنظیمات پیچیده چند حرف در حروف الفبا با استفاده از روش چاپ چهاربعدی کامپوزیت‌ها ساخته شده است. به طور خاص،حروف A، I، D، R، N، O، C ساخته شده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است این حروف، حروف اصلی کلمه CONCORDIA را تشکیل می دهند. ترتیب قرار دادن برای هر یک از حروف ارائه شده است[۱۶].

چاپ پنج‌بعدی شاخه جدیدی از تولید مواد افزایشی است. این فناوری در سال ۲۰۱۶ توسط دانشگاه‌های آمریکایی معرفی شد. در این فناوری، افشانک و صفحه ساخت جمعاً دارای پنج درجه آزادی هستند. در فناوری‌های چاپ سه‌بعدی حرکت در محورهای Y، X و Z منجر به تولید قطعه می‌شود. در این چاپگرها افشانک از لایه‌ای به لایه دیگر منتقل می‌شود و مقدار نازکی از فیلامنت اکسترودشده رسوب می‌کند، در واقع قطعه به برش‌های مسطح تقسیم شده، سپس آن را چاپ می‌کند. این بدان معنی است که طراحی‌ها می‌توانند به شدت محدود شوند. درحالی که در چاپگرهای پنج‌بعدی علاوه بر حرکت در این سه راستا، حرکت چرخشی حول دو محور نیز وجود دارد. در واقع اشیا در چاپ پنج‌بعدی برخلاف چاپ سه‌بعدی که چاپ یک‌جهته است، در محورها و زاویه‌های مختلف تولید می‌شوند و نوع جدیدی از چاپ را امکان‌پذیر می‌کند. در این فرایند هنگام ساخت قطعه، افشانک از پنج زاویه مختلف به اطراف حرکت می‌کند. این حرکات باعث می‌شود



شکل ٤ محورهای چاپگر پنج‌بعدی [۱۸].

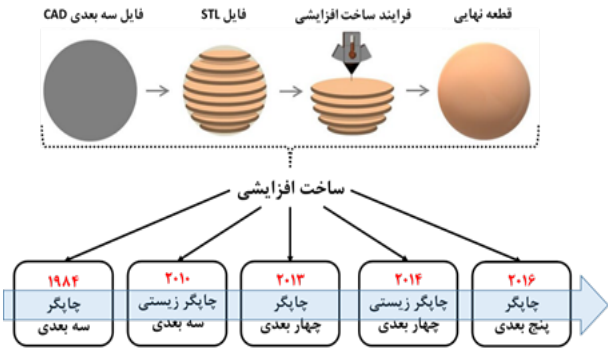


شکل ۵ روند چاپ پنج‌بعدی.

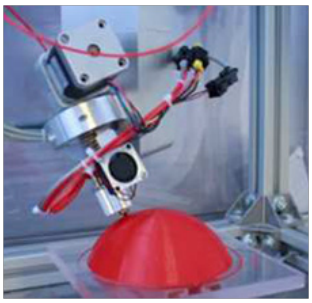
افشانک توانایی تولید لایه‌های منحنی به جای لایه‌های مسطح در چاپ سه‌بعدی را داشته باشند [۱۷]. شکل ٤ محورهای چاپگر پنج بعدی را نشان می‌دهد.

مراحل کار با دستگاه‌های چاپگر پنج‌بعدی همانند چاپگر سه‌بعدی است. به نحوی که ابتدا فایل CAD از قطعه مورد نظر تهیه می‌شود. این فایل را می‌توان از طریق انواع اسکنرهای سه‌بعدی یا سی تی اسکن‌ها در موارد پزشکی نیز به‌دست آورد. سپس فایل STL از این فایل تهیه شده و به دستگاه چاپگر ارسال می‌شود. سپس دستگاه شروع به ساخت قطعه می کند. فلوچارت استفاده از دستگاه در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل ٦ روند تکامل تولید افزایشی در طول زمان و طرح‌واره‌ای از فرایند ساخت نشان داده شده است.

به عنوان مثال، ساخت کلاه مقعر با چاپگرهای سه‌بعدی به مقدار زیادی مواد نگه‌دارنده (Support) نیاز دارد و طراحی آن بسیار پیچیده است. در حالی که چاپ پنج‌بعدی به‌دلیل



شکل ٦ روندتکامل تولید افزایشی و فرایند ساخت آن [۱۹].



شکل ۷ کلاه مقعر ساخته‌شده به روش چاپگر پنج‌بعدی [۲۰].

قابلیت چاپ لایه‌های منحنی، ساخت این نوع قطعات را آسان می‌کند. در شکل ۷ نمونه کلاه مقعر چاپ‌شده پنج‌بعدی نشان داده شده است. در این شکل به راحتی می‌توان فهمید که چگونه امکان ساخت با چاپگر سه‌بعدی وجود ندارد یا به سختی ممکن است [۲۰].

اثیری (Ethereal) و بنگالورو (Bengaluru) در هند، در چند سال گذشته در زمینه فناوری چاپ سه‌بعدی فعالیت می‌کنند. آن‌ها ایده مربوط به چاپگر پنج‌بعدی را پیدا کردند و توانستند اولین چاپگر پنج‌بعدی به نام Halo-5D را با موفقیت بسازند و بهترین جایزه CES2018 نوآوری را نیز کسب کنند. در شکل ۸ این دستگاه نشان داده شده است [۲۱].

۲ مزایای چاپگر پنج‌بعدی

طبیعت چاپ پنج‌بعدی ترکیبی از فنون افزایشی و کاهشی است [۲۲] و این بدین معناست که قطعات به کمک افزودن مواد به‌صورت لایه‌لایه به یکدیگر به نحوی ساخته می‌شوند که استفاده از مواد نگه‌دارنده کاهش می‌یابد. یکی از مزایای مهم این فناوری جدید استفاده از مواد ۲۵٪ کم‌تردرمقایسه با چاپ سه‌بعدی است [۱۸].

شکل ۸ چاپگر پنج‌بعدی Halo 5D.

یکی دیگر از مزایای چاپ پنج‌بعدی تولید اجسام پیچیده و مستحکم‌تر نسبت به قطعات ساخته‌شده به روش سه‌بعدی است. چاپ سه‌بعدی شامل افزودن لایه‌های مسطح برای ساخت جسم است و احتمال وجود نقاط ضعف در آن است؛ به نحوی که اگر نیروهایی خلاف جهت لایه‌ها به جسم اعمال شود و لایه‌ها را تحت فشار قرار دهند، باعث جدایش لایه‌ها از یکدیگر می‌شوند. با استفاده از فناوری چاپ پنج‌بعدی و تولید لایه‌های منحنی شکل از این امر جلوگیری شده است. به‌عنوان مطالعه‌ای موردی در آزمایشگاه تحقیقاتی میتسوبیشی الکتریک MERL، کلاهک‌های ساخته‌شده به روش سه‌بعدی و پنج‌بعدی تحت فشار قرار گرفتند. نتایج نشان داد کلاهک‌های چاپ‌شده سه‌بعدی فقط از عهده ۰/۱ مگاپاسکال برمی‌آیند و کلاهک‌های چاپ‌شده پنج‌بعدی قبل از شکستن ۳/۷ مگاپاسکال را تحمل می‌کنند. درنتیجه قطعات ساخته‌شده به روش پنج‌بعدی ۳ تا ۵ برابر قوی‌تر از اشیا ساخته‌شده به روش سه‌بعدی است [۲۳]. از دیگر مزایای چاپگرهای پنج‌بعدی می‌توان به برش فلزات نرم و مواد دیگر مانند نایلون اشاره کرد. همچنین از جواهرات در صنعت نمونه‌سازی خودرو می‌توان بهره‌مند شد [۲۰].

مزیت اصلی این فناوری ایجاد قطعه‌ای با لایه منحنی با مقاومت بهبودیافته است. مدل پنج‌بعدی چاپ‌شده امکان ساخت استخوان مصنوعی برای جراحی را فراهم می‌کند. از آن‌جا که استخوان‌های انسان صاف نیستند و دارای سطح منحنی هستند، بنابراین تولید استخوان‌های مصنوعی با چاپ پنج‌بعدی برای تأمین مقاومت عالی در این کاشتنی‌های استخوانی وجود دارد. چاپ سه‌بعدی در ساخت کاشت‌های پیچیده ارتوپدی منحنی، مناسب نیست؛ زیرا از لایه‌های مسطح استفاده می‌کند. نتایج آزمایش انجام‌شده نشان می‌دهد که اشیا چاپ‌شده پنج‌بعدی ۳ تا ۵ برابر قوی‌تر از شی چاپ‌شده سه‌بعدی هستند [۲۴].

۳ کاربرد چاپگرهای پنج‌بعدی

از چاپگرهای سه‌بعدی به‌منظور ساخت داربست استفاده می‌شود. اما چاپ سه‌بعدی در ساخت کاشت‌های پیچیده ارتوپدی منحنی، مناسب نیست؛ زیرا از لایه‌های مسطح استفاده می‌کنند. در جراحی ارتوپدی، کاشت‌های پیچیده و قوی که دارای سطوح خمیده هستند ضروری است. چاپ پنج‌بعدی، این کاشتنی‌های جراحی پیچیده را طبق عمل واقعی بیمار،چاپ می‌کنند و همچنین در برنامه‌ریزی جراحی، آموزش و یادگیری قابل استفاده است. بنابراین، چاپ پنج‌بعدی به‌راحتی می‌تواند ساختاری پیچیده و منحنی ایجاد کند؛ به‌نحوی که استحکام کافی را داشته باشد. پیش‌بینی می‌شود در آینده، مانند چاپ سه‌بعدی

و چهاربعدی، این فناوری می‌تواند نوآوری مختل‌کننده‌ای در ارتوپدی ایجاد کند. این فناوری توانایی ساخت کاشتنی‌های پیچیده‌ای را دارد که نیازهای فوری پزشکی و ارتوپدی را برآورده می‌کند [۲۵].

علاوه بر این با استفاده از چاپگرهای پنج‌بعدی امکان ساخت استخوان و دندان‌های مصنوعی برای جراحی فراهم شده است. از آنجا که استخوان و دندان‌های انسان صاف نیستند و دارای سطح منحنی هستند، بنابراین لازم است استخوان و دندان‌های مصنوعی با چاپ پنج‌بعدی تولید شود تا ماده استحکام کافی را داشته باشد [۲۷-۲۶]. درجدول ۱ کاربرد چاپگرهای پنج‌بعدی در زمینه‌های مختلف بیان شده است [۲۸].

۴ معایب چاپگر پنج‌بعدی

محدودیت اصلی این فناوری هزینه اضافی دو محور، طراحی و ساخت آن است. همچنین برای راه‌اندازی این دستگاه به نرم‌افزار و سخت افزارهای دقیق نیاز است. محدودیت دیگر نیاز به منابع انسانی بسیار ماهر برای کار و نگه‌داری چاپگر است [۲۹].

۵ چاپ چهار و پنج‌بعدی در صنایع پزشکی

در صنایع پزشکی از چاپگرهای سه‌بعدی به‌منظور مدل‌سازی آناتومیک برای موارد پیچیده جراحی، آموزش بیمار و دستیار (Residency) و برنامه‌ریزی تیم جراحی استفاده می‌شود. اکنون با اضافه کردن دو بعد دیگر، روند برنامه‌ریزی جراحی توسعه

جدول ۱ کاربرد چاپگرهای پنج‌بعدی.

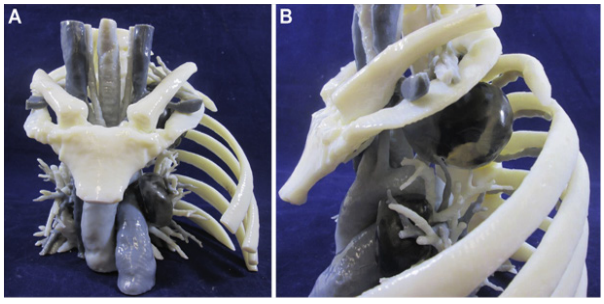
ردیف	کاربرد	توضیحات
۱	تجهیزات پزشکی	– تولید ابزار و تجهیزات پزشکی سفارشی با مقاومت بالا – تولید هر نوع ابزار یا تجهیزات منحنی مطابق با بیمار به کمک داده‌های CAD
۲	تجهیزات جراحی	– تولید تجهیزات جراحی با استحکام، ظاهر و دقت بهتر – برنامه‌ریزی جراحی، بررسی تغییرات و پاسخ به درمان در طول زمان و همچنین بررسی تغییرات فیزیولوژیکی
۳	داربست‌ها	– اندام‌های انسان به شکل هندسی نیستند. آن‌ها تا حدودی منحنی هستند. بنابراین، برای ساخت داربست‌های دقیق و متناسب، به قطعات منحنی نیاز داریم. – تولید هر نوع داربست با مقاومت بالا
۴	استخوان	– چاپ پنج‌بعدی به صاف شدن استخوان شکسته کمک می‌کند. – ایجاد کشش استخوان بر اساس میزان وزنی که گرفته‌شده
۵	لوله‌های پزشکی	– تولید لوله‌های پزشکی مانند لوله‌های مقطع جراحی با مقاومت بالاتر و طول عمر بیشتر
۶	صفحات نگه‌دارنده	– تولید صفحه نگه‌دارنده برای نگه‌داشتن محل شکستگی استخوان مانند مچ پا و زانو که استخوان‌های بزرگ تحریف‌کننده و فشرده وجود دارد.
۷	اتصال‌دهنده‌های پزشکی	– اتصال‌دهنده‌های پزشکی امکان تعامل بین کاشتنی‌های جراحی و بدن انسان را دارند. – خواص مکانیکی بهتر اتصال‌دهنده‌های پزشکی چاپ شده پنج‌بعدی
۸	اعضای مصنوعی	– پروتز وسیله‌ای مصنوعی است که جایگزین اعضای از دست رفته بدن در اثر بیماری، ضربه، تصادف و شرایط موجود در هنگام تولد می‌شود. – پروتزهای عمومی برای تحمل بار بدن انسان به مقاومت بالایی نیاز دارند. – تولید پروتزهای خاص بیمار با مقاومت بالا
۹	دریچه‌های قلب	– دریچه‌های قلب برای نگه‌داشتن حرکت خون در مسیر درست استفاده می‌شوند. – نتیجه قابل اطمینان با تولید دریچه‌های قلب چاپ‌شده توسط چاپگر پنج‌بعدی

شکل ۹ مدل آناتومیک قسمتی از بدن [۲۵].

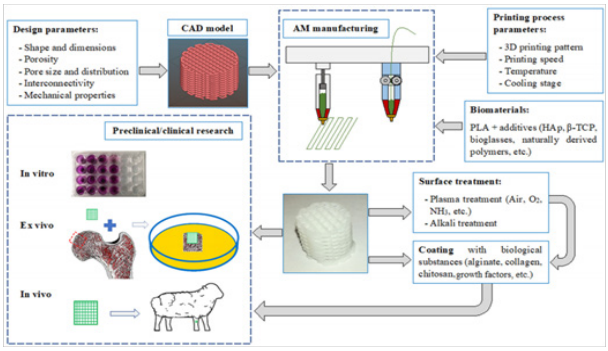
داده شده است. چاپ پنج‌بعدی در صنایع پزشکی، مفهومی غیر از آن‌چه بیان شد، دارد. گنجاندن اطلاعات در مورد میزان پاسخ به درمان با گذشت زمان، بعد چهارم است. در واقع در این موارد نیز بعد چهارم همان زمان است اما بعد پنجم فعالیت فیزیولوژیک است. فعالیت فیزیولوژیک به معنی بررسی نحوه کارکرد اندام‌های مختلف بدن است.

به‌عنوان مثال، بیمار مبتلا به تومور قفسه سینه برای چاپ پنج‌بعدی انتخاب شد. در بیمار توصیف‌شده، قبل از شروع درمان، سی‌تی‌اسکن قفسه سینه با وضوح بالا انجام شد. سپس با استفاده از داده‌های تصویربرداری توالی‌یافته از سی‌تی‌اسکن، مدل آناتومیک سه‌بعدی و پنج‌بعدی آماده شده تا به تیم‌های جراحی اجازه دهد به‌طور مستقیم مزایای اطلاعات ارائه شده توسط چاپ پنج‌بعدی را ارزیابی و مقایسه کنند. آناتومی انتخابی شامل آئورت، عروق و رگ‌های ریوی، بزرگ‌سیاهرگ زبرین، دنده‌های فوقانی، جناغ، ستون فقرات، شبکه بازویی و ریشه‌های عصب فوقانی قفسه سینه بود. شکل ۹ نشان‌دهنده مدل آناتومیک به‌دست‌آمده، به‌منظور استفاده در چاپگر سه و پنج‌بعدی است. چاپگر مورد استفاده در این پژوهش از نوع استریولیتوگرافی (Stereo-lithography) است [۲۷].

در شکل ۱۰نمونه چاپ‌شده، نشان داده شده است. قسمت



شکل ۱۰ مدل آناتومیک چاپ‌شده [۲۵].



شکل ۱۱ راهبردهای تولید بافت پلیمری با چاپگر سه‌بعدی و ارزیابی‌های خواص مدنظر [۳۱].

مشکی رنگ و جلا داده شده، نشان‌دهنده تومور در فرد بیمار است.چاپ مدل‌های پنج‌بعدی در بیماران مبتلا به تومورهای پیچیده، برنامه‌ریزی جراحی، انتخاب حاشیه برای برداشتن تومور، پیش‌بینی مشکلات احتمالی، آموزش دانشجویان و بیماران را تسهیل می‌کند. همچنین به‌کمک چاپ پنج‌بعدی می‌توان امکان ایجاد نمایشی ملموس از اثربخشی درمان در طول زمان (بعد چهارم) و فعالیت اندام‌ها (بعد پنجم) را بررسی کرد.

در پژوهشی دیگر به کمک سی‌تی‌اسکن بیمار، مدل سه‌بعدی انشعاب شریان محیطی استخوان ران به‌دست آمده، سپس به‌منظور بازسازی آن از دستگاه چاپگر پنج‌بعدی استفاده شده است [۲۹].

یکی از مواد پرکاربرد در صنایع پزشکی، پلیمر پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) است که می‌تواند با استفاده از دستگاه چاپگر سه‌بعدی با شکل‌های مختلف حتی پیچیده، همچون داربست (Scaffold)، تولید شود [۳۰]. برای دستیابی به خواص بیولوژیکی مدنظر در مهندسی بافت، گاهی از کامپوزیت‌سازی با زمینه پلیمری PLA استفاده می‌شود [۳۱]. در موارد پیشرفته‌تر، استفاده از طراحی یا به‌عبارت بهتر بهینه‌سازی توپولوژی، با هدف جایگزینی پلیمر طراحی‌شده و چاپ‌شده با بافت استخوان، کاربرد بیش‌تری دارد [۳۲-۳۳]. در این صورت، استفاده از فناوری چاپگرهای پنج‌بعدی، در مقایسه با چاپگرهای سه‌بعدی، کمک شایانی به ساخت ساختار مدنظر برای بافت، با هندسه پیچیده بهینه‌سازی شده، خواهد کرد. این گونه فرایندها و ارزیابی‌های بعدی برای دستیابی به خواص مورد نظر، در شکل ۱۱ آمده است.

۶ نتیجه‌گیری

چاپ سه‌بعدی، فرایندی افزایشی است که دارای سه محور

X، Y و Z است. چاپ سه‌بعدی به زمان زیادی برای ساخت قطعات نیاز دارد و روند کندی دارد که تأثیر منفی روی این فناوری دارد. با پدیدار شدن چاپ چهاربعدی می‌توان بر این اشکالات غلبه کرد. در این فناوری، از مواد هوشمند استفاده شده که دارای خواص خود ترمیم است و بعد چهارم زمان است. بنابراین این فناوری می‌تواند شامل ۷۰ تا ۹۰ درصد در زمان چاپ صرفه‌جویی باشد [۳٤]. در همه زمینه‌ها مانند مد، رشته‌های پزشکی و اتومبیل اجزای پلیمر صنعتی قابل استفاده است. اشکال چاپ چهاربعدی این است که قادر به ساخت قطعات پیچیده با سطح خمیده نیست. این اشکال چاپ چهاربعدی را می‌توان با چاپ پنج‌بعدی برطرف کرد. مفهوم تولید مواد افزایشی پنج بعدی چرخش سر افشانک و چرخش صفحه ساخت به‌منظور چاپ در ۵ محور مختلف است. چاپ پنج بعدی ۳ تا ٤ برابر قوی‌تر از چاپ سه بعدی و چهار بعدی است. در فناوری چاپ پنج بعدی، می‌توان سطح پیچیده منحنی را تولید کرد و کاربردهای آن عمدتا در زمینه‌های مختلف مانند پزشکی، اتومبیل و هوافضا است.

مراجع

1. Eyers D.R., Potter A.T., Industrial Additive Manufacturing: A Manufacturing Systems Perspective, *Computers in Industry*, 92-93, 208-218, **2017**.

2. Dezianian S., Study of Fatigue Behavior in Materials, Made fromAdditive Manufacturing Methods, BSc Thesis, Semnan University, Iran, **2020**

3. Yuan Siang L., Wan Ting S., Lay Poh T., Yunlong W., Yuekun L., Huaqiong L., 4D Printing and Stimuli-Responsive Materials in Biomedical Applications, *Acta Biomaterialia*, 92, 19-36, **2019**.

4. Gladman A.S., Matsumoto E.A., Nuzzo R.G., Mahadevan L., Lewis J.A., Biomimetic 4D Printing, *Nature Material*, 15, 413-418, **2016**.

5. Quanjin M., Rejab M.R.M., Idris M.S., Kumar N.M., Abdullah M.H., Reddy G.R., Recent 3D and 4D Intelligent Printing Technologies: A ComparativeReview and Future Perspective, *Procedia Computer Science*, 167, 1210-1219, **2020**.

6. Somolinos C.S., 4D Printing: An Enabling Technology for Soft Robotics, *Mechanically Responsive Materials for Soft Robotics*, **2020**.

7. Pei E., Loh G.H., Technological Considerations For 4D Printing: An Overview,*Progress in Additive Manufacturing*, 3, 95-107, **2018**.

8. Leist S.K., Zhou J., Current Status of 4D Printing Technology and The Potential of Light-Reactive Smart Materials as 4D Printable Materials, *Virtual and Physical Prototyping*, 11, 249-262, **2016**.

9. Singh S., Ramakrishna S., Berto F., 3D Printing of Polymer Composites: A Short Review, *Material Design & Processing Communications*, 2, 1-13, **2020**.

10. Ntouanoglou K., Stavropoulos P., Mourtzis D., 4D Printing Prospects for the Aerospace Industry: ACritical Review, *Procedia Manufacturing*, 18, 120-129, **2018**.

11. Hadith Vakili A., Talebpour Z., Development of Separation Methods by Polymer Tools Made with a 3D Printer, *Iranian Journal of Research and Development of Polymer Technology*, 4, 5-18, **2020**.

12. Correia D.M., Fernandes L.C., Pereira N., Barbosa J.C., Serra J.P., Pinto R.S., Costa C.M., Lanceros-Mendez S., All Printed Soft Actuators based on Ionic Liquid/Polymer Hybrid Materials, *Applied Materials Today*, 22, 100928, **2021**.

13. Javaid H., Haleem A., 4D Printing Applications in Medical Field: A Brief Review, *Clinical Epidemiology and Global Health*, 7, 317-321, **2019**.

14. Booth M.J., Schild V.R., Graham A.D., Olof S.N., Bayley, H., Light-Activated Communication in Synthetic Tissues, *Science Advances*, 4, 1-11, **2016**.

15. Miao S., Castro N., Nowicki M., Xia L., Cui H., Zhou X., Lee S.J., Sarkar K., Vozzi G., Tabata Y., Fisher J., Zhand L.G., 4D Printing of Polymeric Materials for Tissue and Organ Regeneration, *Materials Today*, 20, 577-591, **2017**.

16. Hoa S.V., Rosca D.I., Formation of Letters in The Alphabet Using 4D Printing of Composites, *Materials Today Communications*, 25, 101115, **2020**.

17. Abid H., Mohd J., 5D Printing and its Expected Applications in Orthopedics, *Journal of Clinical Orthopedics and Trauma*, 10, 809-810, **2019**.

18. Abid H., Mohd J., Future Applications of Five-Dimensional Printing in Dentistry, *Current Medicine Research and Practice*, 9, 85-86, **2019**.

19. Ghilan A., Chiriac A.P., Nita L.E., Rusu A.G., Neamtu I., Chiriac V.M., Trends in 3D Printing Processes for Biomedical Field: Opportunities and Challenges, *Journal of Polymers and the Environment*, 28, 1345-1367, **2020**.

20. Ravinder Reddy P., Anjani Devi P., Review on the Advancements to Additive Manufacturing-4D and 5D Printing, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 8, 397-402, **2018**.

21. David J., Ethereal Machines wins CES 2018 'Best of Innovation' Award for its Halo Hybrid 5D Printer, http://www.3ders.org/articles/20180111-ethereal-machines-wins-ces-2018-best-of-innovation-award-for-its-halo-hybrid-5d-printer.html, **2018**

22. Pramod K., Subarna R., Harsha H., Shweta B., Manish K., 4D and 5D Printing: Healthcare's New Edge, *3D Printing Technology in Nanomedicine*, 8, 143-163, **2019**.

23. MERL, Mitsubishi Electric Research Laboratories, Gives 5D Printing a New Shot, 3D Printing from Scratch.com/ 2016/07/merl-gives-5d-printing-a-new-shot,**2016**.

24. Haleem A., Javaid M., Vaishya R., 5D Printing and Its Expected Applications in Orthopaedics, *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 10, 809-810, **2019**.

25. Erin A., Jane S., Natalie E., Robert J., Robert Shen K., Mark S., Shanda H., From 3-Dimensional Printing to 5-Dimensional Printing: Enhancing Thoracic Surgical Planning and Resection of Complex Tumors, *The Annals of Thoracic Surgery*, 101, 1958-1962, **2016**.

26. Sathe G., Meet Ethereal Machine's Halo, a '5D Printer' That's Just Won the Best of Innovation CES 2018 Award, Gadgets 360 an NDTV Venture, https://gadgets.ndtv.com/others/features/meet-ethereal-machines-halo-a-5d-printer-thats-justwon-the-best-of-innovation-ces-2018-award-1779765, **2017**

27. Sadiq H.A., Pradeep P.P., Review on 4D and 5D Printing Technology, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7, 744-751, **2020**.

28. Abid H., Mohd J., Expected Applications of Five-Dimensional (5D) Printing in the MedicalField, *Current Medicine Research and Practice*, 9, **2019**.

29. Foresti R., 5D Printing of Nano-laden Fibre Aerogel, *European Journal of Applied Engineering and Scientific Research*, 1, 16, **2020**.

30. Azadi M., Dadashi A., Dezianian S., Kianifar M., Torkaman, S., Chiyani M., High-Cycle Bending Fatigue Properties of Additive-Manufactured ABS and PLA Polymers Fabricated by Fused Deposition Modeling 3D-Printing, *Forces in Mechanics*, 3, 1-11, **2021**.

31. Donate R., Monzon M., Aleman-Dominguez M.E., Additive Manufacturing of PLA-Based Scaffolds Intended for Bone Regeneration and Strategies to Improve Their Biological Properties, *e-Polymers*, 20, 571-599, **2020**.

32. Genova T., Rato I., Carossa M., Motta C., Cavagnetto D., Mussano F., Advances on Bone Substitutes through 3D Bioprinting, *International Journal of Molecular Sciences*, 21, 7012, **2020**.

33. Gregor A., Filova E., Novak M., Kronek J., Chlup H., Buzgo M., Blahnova V., Lukasova V., Bartos M., Necas A., Hosek J., Designing of PLA Scaffolds for Bone Tissue Replacement Fabricated by Ordinary Commercial 3D Printer, *Journal of Biological Engineering*, 11, 31, **2017**.

34. Prasansha R., Balasubramanian K., Breakthrough in the Printing Tactics for Stimuli-Responsive Materials: 4D Printing, *Chemical Engineering Journal*, 366, 264-304, **2019**.