



فصلنامه علمی  
سال یازدهم شماره ۲، شماره پیاپی ۴۲ تابستان ۱۴۰۵  
Vol. 11, No. 2 Issue No. 42  
Summer 2026, Quarterly  
صفحه ۵۷-۷۱

Iran Polymer Technology;  
Research and Development

## واژه‌های کلیدی:

پلیمرهای چاپ شده  
سه بعدی،  
پلیمرهای چاپ شده  
چهار بعدی،  
استخراج فاز جامد،  
آماده سازی نمونه.

# پلیمرهای چاپ سه بعدی و چهار بعدی در استخراج فاز جامد و حذف آلاینده‌ها

سیده بنت الهدی حسینیان، مصیب واحدناوان، میلاد غنی\*  
۱. مازندران، بابلسر، دانشگاه مازندران، دانشکده شیمی، گروه شیمی تجزیه.

## چکیده ...

پرداختن به چالش‌های زیست محیطی جهانی، مستلزم بهره‌گیری از مواد پیشرفته‌ای است که توانایی بالایی در حذف مؤثر آلاینده‌ها به واسطه استخراج فاز جامد، داشته باشند. این مقاله مروری، به بررسی تازه‌ترین پیشرفت‌ها در زمینه پلیمرهای تولید شده با فناوری‌های چاپ سه بعدی (3D) و چهار بعدی (4D)؛ پلیمرهای پاسخ‌گو به محرک می‌پردازد. در این میان، نشان داده شده است که چگونه ساختارهای چاپ شده به روش سه بعدی، با فراهم کردن هندسه‌های قابل تنظیم، افزایش تخلخل و سطح ویژه‌ی بیشتر، می‌توانند عملکرد جذب آلاینده‌ها را بهبود بخشند. علاوه بر این، استفاده از پلیمرهای هوشمند پاسخ‌گو در فناوری چاپ چهار بعدی، امکان ایجاد تغییر شکل یا آزادسازی کنترل شده را در پاسخ به محرک‌های خارجی، مانند دما یا pH فراهم می‌کند؛ قابلیت‌هایی که سطح جدیدی از کنترل عملکردی را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد. در این مطالعه، فناوری‌های مختلف چاپ، از جمله مدل سازی رسوب ذوبی (FDM)، استریولیتوگرافی (SLA)، پردازش نوری دیجیتال (DLP) و نگارش مستقیم جوهر (DIW)، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین، راهبردهای گوناگون عامل دار سازی پلیمرها، فرمول بندی کامپوزیت‌ها و عملکرد این مواد در حذف فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی و باقی مانده‌های دارویی از نمونه‌های پیچیده، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این مرور جامع، ضمن برجسته ساختن دستاوردهای علمی اخیر، چالش‌های موجود را نیز مورد توجه قرار می‌دهد و می‌تواند مسیر پژوهش‌ها و نوآوری‌های آینده را در توسعه‌ی مواد پلیمری چاپ سه بعدی و چهار بعدی پایدار و پربازده هموار سازد.

\*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

m.ghani@umz.ac.ir

## ۱ مقدمه

صنعت چاپ سه بعدی که با عنوان ساخت افزایشی (Additive Manufacturing: AM) نیز شناخته می شود، فرایندی نوآورانه برای تولید اجسام سه بعدی است که در آن، مواد، بر اساس طرح های تولید شده به وسیله رایانه، به صورت لایه لایه روی هم قرار می گیرند. این فناوری که در دهه ی ۱۹۷۰ به عنوان روشی تحول آفرین ظهور کرد، در ابتدا تنها در اختیار دارندگان حق ثبت اختراع بود. امروزه، چاپ سه بعدی به طیف گسترده ای از روش های ساخت گسترش یافته است که هر یک، با بهره گیری از رویکردهای خاصی لایه گذاری، مدل های طراحی شده به کمک رایانه (CAD) را به اشیای فیزیکی تبدیل می کنند [۱]. این فناوری، به دلیل توانایی در تولید ساختارهای پیچیده با دقت بالا، کاهش اتلاف مواد و فراهم کردن امکان سفارشی سازی، به طور گسترده در صنایعی مانند پزشکی، هوافضا و ساخت وساز مورد استفاده قرار گرفته است. برخلاف روش های سنتی تولید، که معمولاً به ابزارآلات پرهزینه نیاز دارند و مقدار قابل توجهی ضایعات ایجاد می کنند، چاپ سه بعدی امکان استفاده از مواد گوناگون را در چرخه ی تولید فراهم می سازد و بسیاری از محدودیت های موجود را برطرف می کند [۲].

چاپ چهاربعدی، با افزودن بعد زمان و بهره گیری از مواد هوشمند، مانند پلیمرهای حافظه دار و هیدروژل ها، دامنه ی نوآوری را گسترش داده است. این مواد، می توانند در پاسخ به محرک های محیطی، از جمله نور، دما یا pH، واکنش نشان دهند و در طول زمان دچار تغییر شوند [۳]. این فناوری، امکان تولید ساختارهای سازگار و بویایی را فراهم می کند که قادرند نسبت به شرایط محیطی، مانند دما، pH یا رطوبت، پاسخ دهند. با وجود آنکه فناوری های چاپ سه بعدی و چهاربعدی ابزارهایی امیدبخش برای تولید مواد قابل تنظیم و پاسخ گو به شمار می روند، تأثیر عملی آن ها در کاربردهایی نظیر استخراج فاز جامد (SPE) همچنان در حال بررسی است و باید با نگاهی واقع بینانه، هم قابلیت ها و هم محدودیت های کنونی این فناوری ها را در نظر گرفت [۲، ۴]. محصولات مصرفی، مانند کفش های سفارشی، عینک و جواهرات، از فناوری چاپ سه بعدی برای تولید محصولات منحصربه فرد و متناسب با نیاز کاربران استفاده کرده اند. فناوری چاپ چهاربعدی نیز این قابلیت را گسترش داده و امکان تولید محصولات منحصربه فرد مانند مبلمان تاشونده و پوشاک انعطاف پذیر را فراهم کرده است. همچنین، حوزه ی رباتیک نرم، از پلیمرهای انعطاف پذیر تولید شده به روش چاپ سه بعدی بهره ی فراوانی برده است، زیرا این مواد، می توانند حرکات تطبیقی ایجاد کنند و عملکرد قطعات رباتیکی را بهبود

بخشند. این فناوری ها در زمینه های آموزشی و نمونه سازی نیز کاربرد گسترده ای پیدا کرده اند و اهمیت خود را به خوبی نشان داده اند [۴، ۵]. علاوه بر این، طراحان و مهندسان می توانند با استفاده از این روش ها، ایده های خود را در مدت زمان کوتاهی ارزیابی کرده، به صورت مرحله به مرحله آن ها را اصلاح و تکمیل کنند. پیشرفت فناوری چاپ چهاربعدی، امکان تولید قطعات الکترونیکی پیچیده، مانند نمایشگرهای تاشو و حسگرهای سازگارپذیر، را نیز فراهم کرده است. این پیشرفت ها به کمک پلیمرهای رسانا و پاسخ گو به محرک حاصل شده اند. افزون بر این، فناوری های مذکور در حوزه ی محیط زیست نیز، دستاوردهای قابل توجهی داشته اند؛ به طوری که از آن ها برای تولید پلیمرهای متخلخل در فرایند تصفیه ی آب و همچنین ساخت مواد حافظه دار برای سامانه های صافش استفاده شده است [۵، ۶]. با وجود ظرفیت بالای فناوری های چاپ سه بعدی و چهاربعدی، این فناوری ها، همچنان با محدودیت هایی روبه رو هستند. یکی از مهم ترین چالش ها، به محدودیت مواد مورد استفاده مربوط می شود؛ زیرا همه ی پلیمرها استحکام مکانیکی، پایداری حرارتی یا دوام کافی را برای برخی کاربردهای تخصصی ندارند. همچنین، فرایند ساخت لایه به لایه ممکن است باعث ایجاد خطوط قابل مشاهده یا سطوح ناهموار شود و در نتیجه، قطعه ی نهایی به عملیات پس پردازش نیاز پیدا کند. از سوی دیگر، هزینه ی زیاد مواد هوشمند و چاپگرهای پیشرفته باعث شده است که فناوری چاپ چهاربعدی هنوز به طور گسترده مورد استفاده قرار نگیرد. با این حال، پیشرفت های پیوسته در حوزه ی علوم مواد و فناوری، به تدریج در حال برطرف کردن این محدودیت ها هستند و زمینه را برای گسترش کاربرد پلیمرهای چاپ شده سه بعدی و چهاربعدی در حوزه های مختلف فراهم می کنند [۴-۶].

فناوری ساخت افزایشی در سال های اخیر، زمینه را برای توسعه ی نانوذراتورهای تریوالکتریک پیشرفته و ماهیچه های مصنوعی مبتنی بر تغییر فاز، فراهم کرده است. این دو حوزه، که به سرعت در حال پیشرفت هستند، از ساختارهای چاپ شده ی سه بعدی و چهاربعدی برای بهبود عملکرد استفاده می کنند و کاربردهایی مانند کنترل خودکار ارتعاشات را در بر می گیرند. در پژوهشی که از سوی انتشارات وایلی منتشر شده است، ساخت این ماهیچه های نرم مبتنی بر الاستومر سیلیکونی روی قالب های اختصاصی شرح داده شده است. در این فرایند، ساختارها با الیاف کربنی و اتانول تزریق می شوند و در پاسخ به تحریک الکتریکی، دچار انبساط ناشی از تغییر فاز و تغییر در میزان سختی می شوند. در این سامانه ها، کنترل کننده های غیرخطی مبتنی بر یادگیری

فناوری‌هایی عملی، پایدار و سازگارپذیر خواهد داشت [۷۸]. استخراج فاز جامد (Solid-Phase Extraction: SPE) روشی رایج در آماده‌سازی نمونه‌ها است که برای جداسازی انتخابی و پیش‌تغلیظ گونه‌ها از محیط‌های مایع پیچیده به کار می‌رود. این روش با حل مشکلات تجزیه‌ای مانند غلظت پایین گونه‌ها و تداخل‌های بافتی، عمل جداسازی را از طریق توزیع گونه‌ها بین فاز مایع و جاذب جامد در طی فرایندهای جذب و واجذب انجام می‌دهد. SPE در سال‌های اخیر به‌عنوان جایگزینی مناسب برای روش‌های کلاسیک مانند استخراج مایع-مایع (Liquid-Liquid Extraction: LLE) مورد توجه گسترده قرار گرفته است، زیرا مصرف حلال در آن کمتر، زمان انجام فرایند کوتاه‌تر و قابلیت خودکارسازی بالاتری دارد. همچنین در شیمی تجزیه، به دلیل افزایش بازیابی گونه و انتخاب‌پذیری بالاتر، کاربرد بسیار گسترده‌ای پیدا کرده است [۹]. اتصال SPE به سامانه‌های تجزیه‌ای پیشرفته، مانند کروماتوگرافی مایع-طیف‌سنجی جرمی (LC-MS) یا کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC)، موجب افزایش حساسیت و دقت اندازه‌گیری می‌شود. در این میان، جاذب‌های پلیمری مورد استفاده در SPE به دلیل پایداری شیمیایی و حرارتی بالا، تنوع‌پذیری در عامل‌داری و بازده بازیابی قابل توجه، به‌ویژه در کاربردهایی که نیاز به انتخاب‌پذیری بالا و حداقل تداخل پس‌زمینه دارند، بسیار مؤثر هستند. این جاذب‌ها به‌طور گسترده در بررسی‌های محیط‌زیستی، دارویی و غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در حوزه‌ی کاربرد محیط‌زیست، از SPE برای جداسازی و پیش‌تغلیظ آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها و ترکیبات آلی از آب، خاک و رسوبات استفاده می‌شود. در کاربردهای دارویی نیز این روش برای غنی‌سازی و جداسازی متابولیت‌های دارویی از بافت‌های زیستی به کار می‌رود و نقش مهمی در مطالعات سرنوشت دارو در بدن، با حساسیت و انتخاب‌پذیری بالا، دارد. جاذب‌های مورد استفاده در SPE معمولاً به سه دسته‌ی فاز معمول، فاز معکوس و تبادل یونی تقسیم می‌شوند که هرکدام برای گروه خاصی از ویژگی‌های گونه طراحی شده‌اند. در مجموع، گستردگی کاربرد SPE باعث شده است که این روش به‌عنوان یکی از ابزارهای اساسی در رویکردهای نوین شیمی تجزیه شناخته شود و در حوزه‌های مختلف صنعتی و پژوهشی مورد استفاده قرار گیرد [۱۰، ۱۱]. در پاسخ به نگرانی‌های روزافزون زیست‌محیطی، نیاز به روش‌های جداسازی مقرون‌به‌صرفه، پایدار و کارآمد، به‌ویژه برای شناسایی و حذف آلاینده‌های موجود در مقادیر ناچیز، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. اگرچه سامانه‌های غشایی و سایر روش‌های

تقویتی به ماهیچه‌ها کمک می‌کنند تا ارتعاشات با فرکانس پایین را به‌صورت خودکار کاهش دهند. نتایج نشان داده است که این روش، در مقایسه با سامانه‌های متداول، می‌تواند میزان ارتعاش را حدود ۳۳ درصد و مصرف انرژی را حدود ۴۱ درصد کاهش دهد. این مفصل‌های برنامه‌پذیر، در شرایط جدید و غیرقابل پیش‌بینی نیز انعطاف‌پذیری بالایی از خود نشان می‌دهند و قابلیت استفاده در رباتیک نرم و سامانه‌های فعال میرایی ارتعاش را دارند [۷].

این دو حوزه، یعنی برداشت انرژی تریبوالکتریک و ماهیچه‌های مصنوعی مبتنی بر تغییر فاز، به‌خوبی نشان می‌دهند که ترکیب مواد هوشمند با ساختارهای سفارشی چاپ‌شده به روش سه‌بعدی و چهاربعدی تا چه اندازه مؤثر است. در نانوذرات‌های تریبوالکتریک، فناوری ساخت افزایشی تنظیم ویژگی‌هایی مانند تمایل سطح به ذخیره‌ی بار الکتریکی، شکل سطح تماس و ساختار چندلایه را فراهم می‌کند؛ ویژگی‌هایی که برای افزایش تولید بار و بهبود دوام مکانیکی اهمیت اساسی دارند. در ماهیچه‌های مصنوعی نیز ساخت افزایشی ترکیب انواع مختلف الیاف، محفظه‌های حاوی سیال و لایه‌های گوناگون مواد را فراهم می‌سازد. در نتیجه، عملگرها می‌توانند میزان سختی خود را تغییر دهند و در مدت زمان کوتاهی به ارتعاشات پاسخ دهند. افزون بر این، هر دو فناوری بر مفهوم خودمختاری تأکید دارند. نانوذرات‌های تریبوالکتریک تولیدشده با روش ساخت افزایشی می‌توانند بدون نیاز به سیم‌کشی خارجی، انرژی موردنیاز حسگرهای پراکنده یا تجهیزات زیست‌پزشکی را تأمین کنند. همچنین، زمانی که ماهیچه‌های مبتنی بر تغییر فاز با الگوریتم‌های یادگیری تقویتی ترکیب شوند، به سامانه‌های هوشمند کنترل ارتعاش تبدیل می‌شوند که بدون نیاز به تنظیم انسانی، مصرف انرژی را کاهش داده، قابلیت اطمینان سامانه را افزایش می‌دهند. در مجموع، این پیشرفت‌ها نشان می‌دهند که فناوری چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی، بستری تحول‌آفرین برای طراحی هم‌زمان ساختار، عملکرد و هوشمندی در سامانه‌های سازگارپذیر نسل آینده فراهم کرده است. با این حال، برای تسریع روند توسعه، باید چالش‌های مهمی از جمله کنترل دقیق فرایندهای چاپ چندماده‌ای، افزایش دوام مواد و طول عمر فصل مشترک آن‌ها، بهینه‌سازی مدارهای مدیریت توان در نانوذرات‌های تریبوالکتریک و گسترش روش‌های کنترلی مبتنی بر یادگیری ماشین برای مواد فعال برطرف شوند. حل این چالش‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در تبدیل نانوذرات‌های تریبوالکتریک و ماهیچه‌های مبتنی بر تغییر فاز چاپ‌شده به روش سه‌بعدی و چهاربعدی، از نمونه‌های آزمایشگاهی به

چهاربعدی به عنوان بسترهایی امیدبخش برای SPE و حذف آلاینده‌ها مطرح شده‌اند؛ زیرا این مواد، از قابلیت بالای تنظیم ساختار و دقت زیاد در طراحی فضایی برخوردار هستند. برخلاف روش‌های متداول ساخت، فرایند چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی امکان تولید ساختارهای پیچیده‌ای را فراهم می‌کند که در آن‌ها تخلخل، توزیع گروه‌های عاملی و سطح ویژه، به صورت هدفمند قابل تنظیم هستند. این ویژگی‌ها به گونه‌ای در طراحی ساختار چاپ برنامه‌ریزی می‌شوند که برهم‌کنش با گونه‌های هدف، افزایش یابد و در نتیجه، انتخاب‌پذیری، کارایی جذب و انعطاف‌پذیری عملیاتی بهبود پیدا کند [۱۴]. این رویکرد به جای تمرکز صرف بر ترکیب مواد، بر مزیت‌های عملکردی ناشی از خود فرایند چاپ تأکید می‌کند و با نیازهای پیشرفته‌ی سامانه‌های نسل جدید SPE همخوانی دارد. ویژگی‌های منحصربه‌فرد پلیمرهای چاپ‌شده سه‌بعدی و چهاربعدی، مانند سطح‌های قابل تنظیم و اصلاح‌پذیر و همچنین تخلخل بالا، سبب شده‌اند که این مواد برای SPE بسیار مناسب باشند. به کمک این ویژگی‌ها، امکان استخراج و پیش‌تغلیظ انتخابی گونه‌ها از بافت‌های گوناگون، از جمله نمونه‌های زیستی، مواد غذایی و نمونه‌های محیط‌زیستی فراهم می‌شود [۱۵].

چاپ چهاربعدی با استفاده از مواد پاسخ‌گو به محرک، مانند پلیمرهای حافظه‌دار، سطح جدیدی از نوآوری را ایجاد کرده است. این مواد به صورت پویا به تغییرات محیطی واکنش نشان می‌دهند و خود را با شرایط جدید سازگار می‌کنند. چنین ویژگی‌هایی موجب افزایش کارایی جذب و واجذب، کاهش تداخل‌های ناشی از مواد مزاحم و بهبود انتخاب‌پذیری می‌شوند. برای نمونه، برخی مواد چاپ‌شده به روش چهاربعدی به گونه‌ای طراحی می‌شوند که توانایی بازتولید یا خوداحیاشوندگی دارند؛ قابلیت‌هایی که استفاده‌ی مجدد از آن‌ها را آسان‌تر می‌کند و در کاربردهای گسترده، هزینه‌ها را کاهش می‌دهد [۱۵، ۱۶].

این مقاله مروری قابلیت‌های نوین پلیمرهای چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی را به عنوان مواد پیشرفته برای کاربردهای SPE و پاک‌سازی آلودگی بررسی می‌کند. این پلیمرها، به دلیل ساختارهای قابل تنظیم، پایداری شیمیایی و واکنش‌پذیری پویا نسبت به محرک‌های محیطی، توانایی آن را دارند که بسیاری از چالش‌های مهم مرتبط با مواد متداول در SPE را برطرف کنند؛ چالش‌هایی مانند انتخاب‌پذیری پایین و برخورداری از برخورداری از سطح ویژه محدود هدف این مرور، ارائه دیدگاه جامع از ویژگی‌ها، روش‌های سنتز و کاربردهای بالقوه پلیمرهای چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی است. همچنین این مقاله، تلاش می‌کند مشکلات موجود و چشم‌اندازهای آینده

سنتی جداسازی در فرایندهای تصفیه و پالایش در مقیاس بزرگ کاربرد داشته‌اند، اما این روش‌ها در کاربردهای تجزیه‌ای اغلب با محدودیت‌هایی روبه‌رو می‌شوند، از جمله این که انتخاب‌پذیری کافی نسبت به گونه‌های خاص ندارند یا در شرایط شیمیایی سخت، عملکرد مطلوب خود را از دست می‌دهند [۱۲]. این محدودیت‌ها سبب شده‌اند که مواد جدیدی برای SPE توسعه یابند تا انتخاب‌پذیری، حساسیت و پایداری بیشتری را در فرایندهای پیچیده‌ی تجزیه‌ای فراهم کنند. در نسل‌های اولیه‌ی سامانه‌های SPE، از ژل‌های سیلیکایی اصلاح‌شده و پلیمرهای مصنوعی برای بهبود عملکرد استفاده می‌شد. با این حال، بسیاری از مواد متداول، مانند پلی‌وینیل کلرید (Polyvinyl chloride: PVC) که حاوی افزودنی‌هایی نظیر فتالات‌ها یا پایدارکننده‌های مبتنی بر فلزات سنگین است، به دلیل ماندگاری در محیط‌زیست و احتمال سمیت، نگرانی‌های زیست‌محیطی و بهداشتی ایجاد کرده‌اند. در نتیجه، توجه پژوهشگران به سوی مواد جایگزینی جلب شده است که بتوانند میان عملکرد مناسب تجزیه‌ای و کاهش اثرات زیست‌محیطی تعادل برقرار کنند. در این راستا، مواد هیبریدی مانند چارچوب‌های فلزی-آلی (Metal-Organic Frameworks: MOFs) و پلیمرهای قالب‌مولکولی‌شده (Mo-Imprinted Polymers: MIPs) به دلیل انتخاب‌پذیری بالا و قابلیت تنظیم ساختار، مورد توجه قرار گرفته‌اند. هرچند MIPs فناوری جدیدی محسوب نمی‌شوند و لزوماً مزیت زیست‌محیطی ذاتی ندارند، اما توسعه و بهینه‌سازی مداوم آن‌ها امکان شناسایی هدفمند گونه‌های خاص را فراهم کرده است. به طور مشابه، چارچوب‌های فلزی-آلی نیز به دلیل سطح ویژه‌ی بالا و تنوع عملکردی، کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند؛ هرچند میزان پایداری زیست‌محیطی آن‌ها به نوع فلز مرکزی و لیگاند‌های آلی مورد استفاده بستگی دارد. پژوهش‌های کنونی علاوه بر افزایش کارایی این مواد، بر توسعه‌ی روش‌های سنتز سبزتر، قابلیت استفاده‌ی مجدد و دفع ایمن‌تر آن‌ها نیز تمرکز دارند [۱۳]. جاذب‌ها موادی جامد هستند که برای اتصال انتخابی گونه‌های مشخص بر اساس ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی آن‌ها طراحی می‌شوند. این مواد به طور کلی در سه گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند که شامل مواد آلی، مواد معدنی و کامپوزیت‌های هیبریدی هستند. مواد آلی شامل لیاف طبیعی، کربن فعال، گرافن و پلیمرهای مصنوعی می‌شوند. مواد معدنی شامل ترکیبات مبتنی بر سیلیکا و آلومینا هستند. همچنین کامپوزیت‌های هیبریدی نیز به عنوان گروه سوم در این طبقه‌بندی قرار می‌گیرند [۱۳].

در سال‌های اخیر، پلیمرهای چاپ‌شده به روش سه‌بعدی و

tering: SLS) هستند. هر یک از این روش‌ها عواملی مانند وضوح ساخت، سرعت تولید، سازگاری با مواد و نیازهای پس‌پردازش را در نظر می‌گیرند. در میان این روش‌ها، FDM از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است، اما به دلیل محدودیت در چسبندگی بین لایه‌ها با چالش‌هایی مواجه می‌شود، در حالی که SLS امکان ایجاد هندسه‌های پیچیده بدون نیاز به نگه‌دارنده را فراهم می‌کند، اما به پردازش گسترده پودر نیاز دارد. اصول حاکم بر چاپ سه‌بعدی به ویژگی‌های مواد، پیوند بین لایه‌ها و پارامترهای عملیاتی وابسته است [۱۹]. انتخاب مواد تأثیر مستقیمی بر ویژگی‌هایی مانند استحکام مکانیکی و پایداری حرارتی دارد. در این میان، گرمانرم‌هایی مانند پلی (لاکتیک اسید) (Poly(lactic acid): PLA) و پلی (اکریلونیتریل-کو-بوتادین-کو-استایرن) (Poly(acrylonitrile-co-butadiene-co-styrene): ABS) معمولاً برای نمونه‌سازی استفاده می‌شوند، در حالی که فلزاتی مانند تیتانیوم و آلومینیوم در کاربردهای با تنش بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساخت لایه لایه، موجب ایجاد ویژگی‌های ناهمسانگرد در قطعات می‌شود، زیرا استحکام در راستاهای مختلف به کیفیت پیوند بین لایه‌ها وابسته است. در مجموع، این روش‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری و دقت بالا، در کاربردهای پایدار و ثابت در حوزه‌هایی مانند پزشکی، هوافضا و تولید صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه، این روش‌ها به صورت جزئی‌تر بررسی می‌شوند.

#### FDM

FDM که با عنوان ساخت با رشته مذاب (Fused Filament Fabrication) نیز شناخته می‌شود، یکی از در دسترس‌ترین و پرکاربردترین روش‌های چاپ سه‌بعدی به شمار می‌رود. این فرایند، بر اساس بیرون‌رانی رشته پیوسته‌ای از پلیمر گرمانرم از طریق افشانک گرم‌شده عمل می‌کند، به طوری که افشانک مسیرهای مقطع عرضی طراحی را دنبال می‌کند و با سرد شدن و انجماد تدریجی ماده، قطعه به صورت لایه‌لایه شکل می‌گیرد. در این روش معمولاً از موادی مانند پلی (اسید لاکتیک)، پلی (اکریلونیتریل-کو-بوتادین-کو-استایرن) و پلی استرها استفاده می‌شود. این مواد از نظر هزینه مقرون‌به‌صرفه هستند و دستگاه‌های چاپگر نیز نسبتاً کم‌هزینه محسوب می‌شوند. وضوح چاپ در FDM معمولاً در بازه‌ای حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ میکرومتر قرار دارد که برای بسیاری از ساختارهای در مقیاس متوسط کافی است. مزیت اصلی این روش، سادگی فرایند و هزینه پایین تولید قطعات با استحکام مکانیکی مناسب است. با این حال، قطعات تولیدشده به روش FDM معمولاً سطح ویژه پایینی دارند و

برای ادغام این مواد در فناوری‌های پایش و پاک‌سازی پایدار محیط‌زیست را مشخص کند. شایان ذکر است که این حوزه، هنوز در حال توسعه قرار دارد و ورود این پلیمرها به کاربردهای عملی با چالش‌هایی مانند هزینه بالا، دشواری در مقیاس‌پذیری و نیاز به توسعه‌های میان‌رشته‌ای مواجه است. با تحلیل پژوهش‌های موجود، این مرور نشان می‌دهد که پلیمرهای چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی چگونه می‌توانند به حل مسائل زیست‌محیطی ریشه‌دار مانند آلودگی فلزات سنگین و حذف آلاینده‌های آلی کمک کنند و فرایندهای کنترل آلودگی و آماده‌سازی نمونه را بهبود دهند. این مقاله، موضوعات اساسی از جمله مروری بر مشکلات زیست‌محیطی که نیازمند این مواد هستند، اصول فناوری‌های چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی و طراحی و فرمول‌بندی پلیمرهای چاپ‌شده برای کاربردهای SPE و حذف آلاینده‌ها را پوشش می‌دهد. همچنین این مرور، اثرات زیست‌محیطی این مواد را بررسی می‌کند و نقش آن‌ها را در کاهش تولید پسماند و ترویج رویکردهای پایدار برجسته می‌سازد. در نهایت، این مقاله اهمیت پلیمرهای چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی را در ارتقای شیمی تجزیه و پاک‌سازی محیط‌زیست نشان می‌دهد و با شناسایی چالش‌های کلیدی و مسیرهای پژوهشی آینده، به بهبود این حوزه کمک می‌کند.

## ۲ مروری بر فناوری‌های چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی

### ۲-۱ فناوری‌های چاپ سه‌بعدی

از زمان ثبت نخستین دستگاه استریولیتوگرافی (Stereolithography Apparatus: SLA) در سال ۱۹۸۴ توسط چارلز هال، چاپ سه‌بعدی به عنوان روش ساخت چندمنظوره برای پلیمرها و کامپوزیت‌ها مطرح شده است [۱۷]. فرایند چاپ سه‌بعدی با طراحی رقومی آغاز می‌شود که معمولاً از طریق طراحی به کمک رایانه (Computer-Aided Design: CAD) یا پویش سه‌بعدی، ایجاد می‌شود. سپس، نرم‌افزارهای برش‌دهنده (Slicing Software) مدل سه‌بعدی را به لایه‌های افقی نازک تقسیم می‌کنند و در نتیجه، داده‌های هندسی به دستورهای قابل اجرا برای دستگاه تبدیل می‌شوند. این دستورها فرایند رسوب‌گذاری مواد مانند پلیمرها، فلزات، سرامیک‌ها یا کامپوزیت‌ها را به صورت دقیق کنترل می‌کنند [۱۸]. پلیمرهای چاپ سه‌بعدی با استفاده از روش‌های مختلف تولید می‌شوند که هر کدام متناسب با نوع ماده و کاربرد مورد نظر انتخاب می‌شوند. سه روش اصلی در این حوزه شامل مدل‌سازی رسوب مذاب

(Fused Deposition Modelling: FDM)، استریولیتوگرافی (SLA) و تف‌جوشی لیزری انتخابی (Selective Laser Sin-

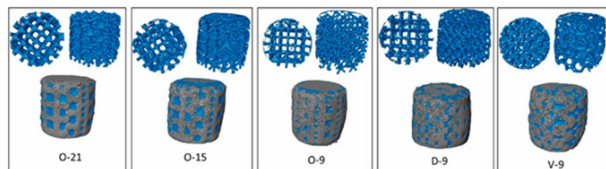
هزینه دسترس پذیرتر شده‌اند و در ساخت سامانه‌های پیچیده SPE مانند سامانه‌های ریزشارش با جاذب‌های یکپارچه داخلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، پژوهش‌های جدید امکان به‌دام‌اندازی زیست‌مولکول‌های فعال، مانند آنزیم‌ها، را درون بافت‌های هیدروژلی و تحت شرایط ملایم فراهم کرده‌اند و به این ترتیب، دامنه مواد قابل استفاده در این فناوری گسترش یافته است [۲۱].

### SLS

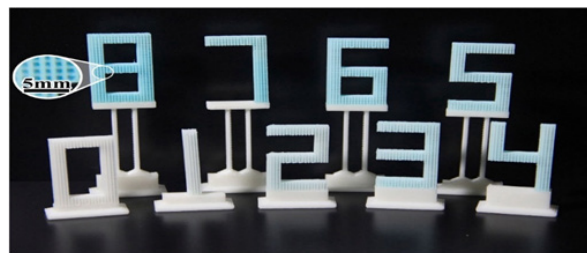
در روش SLS، از لیزر برای ذوب کردن ذرات پودر پلیمری به‌صورت لایه‌لایه استفاده می‌شود تا در نهایت ساختار جامد سه‌بعدی ایجاد شود. این روش امکان تولید پلیمرهای مهندسی مقاوم، مانند پلی‌آمیدها، با ساختارهای داخلی پیچیده و بدون نیاز به سازه‌های نگه‌دارنده فراهم می‌کند. وضوح ساخت در این روش به اندازه نقطه تابش لیزر وابسته است و معمولاً در حدود ۱۰۰ میکرومتر قرار دارد. روش SLS در صنایع مختلف برای تولید نمونه‌های کاربردی و مهندسی‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما کاربرد آن در پژوهش‌های مربوط به SPE و حذف آلاینده‌ها هنوز محدود است که این موضوع، احتمالاً به هزینه بالای تجهیزات مربوط می‌شود. یکی از کاربردهای قابل توجه این روش در حوزه مورد بحث، ساخت ریزهیدروسیکلون‌ها به کمک SLS فلزی برای جداسازی ریزپلاستیک‌ها است. در این کاربرد، قطعاتی از جنس فولاد زنگ‌نزن چاپ شده‌اند تا سامانه‌هایی با جریان چرخشی برای حذف فیزیکی آلاینده‌ها ایجاد شوند [۲۲].

### پلی‌جت (PolyJet) و پاشی چسب‌بند (Binder Jetting)

روش پلی‌جت بر پایه پاشش قطره‌های بسیار کوچک از رزین فوتوپلیمری و مواد نگه‌دارنده عمل می‌کند که بلافاصله به کمک نور فرابنفش سخت می‌شوند. این ویژگی، امکان چاپ چندماده‌ای را، با ترکیب‌های متفاوت رزینی در یک قطعه واحد



شکل ۲. شبکه کانال‌های ماکرو حاصل از تصویربرداری توموگرافی رایانه‌ای میکرو (Micro-CT) برای ساختارهای یکپارچه ساخته‌شده با شبکه‌های هشت ضلعی (O)، ویتیل (V) و لوزی (D)، با تخلخل‌های بین‌ذره‌ای طراحی‌شده به ترتیب ۲۱٪، ۱۵٪ و ۹٪ که با استفاده از چاپگر استریولیتوگرافی تولید شده‌اند.



شکل ۳. کامپوزیت‌های چاپ سه‌بعدی Cu-ABS بنزن تری‌کربوکسیلیک اسید (ABS) تولیدشده به روش FDM. عدد درج‌شده نشان‌دهنده تعداد چرخه‌ها است (برای مثال، ۱ بیانگر Cu-بنزن تری‌کربوکسیلیک اسید و ۱-ABS است).

برای کاربرد به‌عنوان جاذب در SPE اغلب به اصلاح سطحی یا استفاده از راهبردهای کامپوزیتی نیاز پیدا می‌کنند. با وجود این محدودیت‌ها، این روش در ساخت اجزای مختلف مانند بدنه کارتریج‌های SPE و پایه‌های صافی با موفقیت به کار گرفته شده است [۲۰]. شکل ۳، کامپوزیت‌های چاپ سه‌بعدی Cu-بنزن تری‌کربوکسیلیک اسید/پلی(اکریلونیتریل-کو-بوتادین-کو-استایرن) تولیدشده به روش FDM را نشان می‌دهد. عدد درج‌شده، نشان‌دهنده تعداد چرخه‌ها است (برای مثال، ۱ بیانگر Cu-بنزن تری‌کربوکسیلیک اسید ۱/پلی(اکریلونیتریل-کو-بوتادین-کو-استایرن) است).

### SLA و DLP

روش‌های استریولیتوگرافی و پردازش نوری رقومی (Digital Light Processing: DLP) از جمله فناوری‌های پلیمری‌شدن در مخزن هستند که در آن‌ها، رزین مایع با استفاده از نور به لایه‌های جامد تبدیل می‌شود. در روش استریولیتوگرافی، لیزر فرابنفش سطح رزین را به‌صورت نقطه‌ای پویش کرده و هر لایه را پلیمری می‌کند، در حالی که در روش پردازش نوری رقومی کل لایه به‌صورت هم‌زمان و با استفاده از پروژکتور نوری سخت می‌شود. این روش‌ها امکان تولید قطعات با وضوح بسیار بالا و سطح بسیار صاف را فراهم می‌کنند که این ویژگی برای ساخت ریزسیال‌ها و ساختارهای متخلخل دقیق اهمیت زیادی دارد. رزین‌های فوتوپلیمری (معمولاً بر پایه آکریلات یا اپوکسی) قابلیت اصلاح دارند و می‌توان آن‌ها را با گروه‌های عاملی یا ذرات مختلف ترکیب کرد. همچنین در برخی فرمول‌بندی‌ها، این رزین‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که فازهای جاذب مستقیماً چاپ شوند، برای مثال، رزین‌های دارای گروه‌های عاملی تیولی برای کاربردهای جذبی توسعه یافته‌اند. در سال‌های اخیر، چاپگرهای استریولیتوگرافی از نظر

به صورت لایه‌ای یا الگودار سازمان‌دهی می‌شوند و ساختارهای سه بعدی ایجاد می‌کنند. همچنین چاپ حجمی می‌تواند ساختارهای یکپارچه‌ای را با مجاری داخلی برای عبور جریان، با سرعت بالا تولید کند.

در حال حاضر، بیشتر پژوهش‌های مرتبط با جاذب‌های چاپ شده سه بعدی از روش‌های اصلی ذکر شده استفاده می‌کنند و انتخاب روش چاپ نیز معمولاً بر اساس میزان وضوح مورد نیاز و ویژگی‌های تخلخل انجام می‌شود [۲۴].

## ۲.۲ فناوری‌های چاپ چهاربعدی

چاپ چهاربعدی، شکل پیشرفته‌تری از چاپ سه بعدی است که در آن، قابلیت‌های پویا و وابسته به زمان به ساختارهای چاپ شده افزوده می‌شوند. در این فناوری، «بعد چهارم» به تغییرات برنامه‌ریزی شده‌ای اشاره دارد که در پاسخ به محرک‌های خارجی، مانند دما، رطوبت، نور یا میدان‌های مغناطیسی، رخ می‌دهند. این روش چاپ، دانش مواد و طراحی رایانه‌ای را با یکدیگر ترکیب می‌کند و در آن، چاپگرهای چندماده‌ای، مواد سازه‌ای غیرفعال را با اجزای فعال تلفیق می‌کنند. در نتیجه، ساختارهای پیچیده‌ای تولید می‌شوند که می‌توانند خم شوند، پیچ بخورند یا به صورت خودآرا، شکل بگیرند. طراحی برای پیش‌بینی سینتیک تغییر شکل، از روش‌های شبیه‌سازی استفاده می‌کنند تا اطمینان حاصل شود که تغییرات ایجاد شده در طول زمان با عملکردهای از پیش تعیین شده همخوانی دارند. پلیمرهای حافظه‌دار و هیدروژل‌ها از مهم‌ترین مواد مورد استفاده در این حوزه هستند، زیرا نسبت به محرک‌هایی مانند دما، نور یا pH واکنش نشان می‌دهند. پلیمرهای حافظه‌دار، می‌توانند شکل اولیه از پیش تعریف شده را در حافظه خود نگه دارند و هنگام گرم شدن دوباره به همان شکل بازگردند، در حالی که هیدروژل‌ها در پاسخ به رطوبت متورم یا منقبض می‌شوند [۴].

نگارش مستقیم جوهر یکی از روش‌های مهم در چاپ چهاربعدی به شمار می‌رود. در این روش، جوهر مخصوص، بیرون رانده می‌شوند تا ساختارهای پاسخ‌گو برای زیست‌چاپ و رباتیک نرم تولید شوند. همچنین پلیمری شدن دوفوتونی امکان ساخت فوتوپلیمرها را در مقیاس نانو فراهم می‌کند و در نتیجه، تولید اجزای دقیق و پاسخ‌گو امکان‌پذیر می‌شود [۲۵]. چاپ چهاربعدی بر پایه برهم‌کنش میان ترکیب مواد، طراحی ریزساختار و انرژی فعال‌سازی عمل می‌کند و در آن، از موادی استفاده می‌شود که به طور ویژه برای پاسخ‌گویی به تغییرات محیطی طراحی شده‌اند. در این فناوری، عوامل زمانی مانند واکنش‌های تأخیری و فعال‌سازی مرحله‌ای نیز باید در نظر

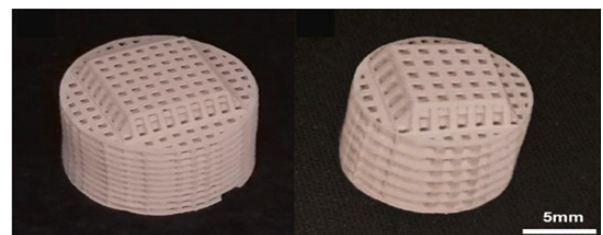
فراهم می‌سازد. چاپگرهای پلی‌جت، می‌توانند وضوح بسیار بالایی ایجاد کنند و برای ساخت کارتریج‌های SPE دارای صافی‌های متخلخل یکپارچه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به این صورت که بخش متخلخل مستقیماً درون ساختار چاپ می‌شود تا ذرات جاذب را در جای خود نگه دارد. روش پاشش چسباننده نیز رویکرد دیگری است که در آن چسب مایع روی بستر پودری شامل پودرهای پلیمری یا کامپوزیتی پاشیده می‌شود تا ذرات به صورت لایه‌لایه به یکدیگر متصل شوند. استفاده از این روش برای تولید جاذب‌های پلیمری چندان رایج نیست، اما می‌تواند با اتصال نسبی پودرهای پلیمری، مانند پلی‌آمیدها، ساختارهای متخلخل ایجاد کند [۲۳].

## نگارش مستقیم جوهر (Direct Ink Writing: DIW) یا چاپ توزیعی سه بعدی

نگارش مستقیم جوهر نوعی روش چاپ مبتنی بر بیرون‌رانی است که در آن ماده ژل از طریق افشانک مانند سرنگ بیرون رانده می‌شود تا ساختار مورد نظر به صورت لایه‌لایه شکل بگیرد. روش نگارش مستقیم جوهر انعطاف‌پذیری بسیار بالایی دارد، زیرا جوهر مورد استفاده را می‌توان با مواد عاملی گوناگون، مانند نانوذرات و پلیمرها، ترکیب کرد. همچنین این جوهرها را می‌توان به گونه‌ای فرمول‌بندی کرد که از طریق تبخیر حلال یا جدایش فازی، ساختارهای متخلخل ایجاد کنند. در حوزه جاذب‌ها، روش نگارش مستقیم جوهر امکان ساخت جاذب‌های دارای تخلخل سلسله‌مراتبی را با استفاده از جوهرهای حاوی ذرات یا محلول‌های پلیمری فراهم کرده است [۲۳].

## سایر روش‌ها

برخی دیگر از فناوری‌های چاپ سه بعدی، مانند نگارش الکتروریسی، ساخت لایه‌ای اجسام و چاپ حجمی سه بعدی، در این حوزه کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما ممکن است در کاربردهای ویژه اهمیت پیدا کنند. برای نمونه، الکتروریسی می‌تواند الیاف نانومتری تولید کند که با استفاده از کنترل رباتیک



شکل ۳. مونولیت‌های چاپ سه بعدی تهیه شده به روش نگارش مستقیم جوهر.

این حال، چنین طراحی‌هایی باید از نظر عملکردی توجیه‌پذیر و از نظر مکانیکی مقاوم باشند تا از پیچیدگی غیرضروری جلوگیری شود. مونولیت متخلخل که در پاسخ به محرک منبسط شده و اندازه حفره‌های خود را کاهش می‌دهد، می‌تواند به عنوان محرک واجذب در خواستی عمل کند [۲۳].

### ۳- آماده‌سازی و طراحی پلیمرهای چاپ سه‌بعدی/ چهاربعدی برای کاربردهای SPE و حذف آلاینده‌ها

طراحی پلیمرهای چاپ سه‌بعدی/چهاربعدی برای کاربردهای SPE یا حذف آلاینده‌ها به رویکردی یکپارچه نیاز دارد. این فرایند شامل انتخاب پلیمرهای مناسب برای گونه‌ها یا آلاینده‌های هدف، توسعه فرمول‌بندی‌های قابل چاپ و بهینه‌سازی عملکرد نهایی است. در این بخش، روش‌های آماده‌سازی و ساخت جاذب‌های پلیمری چاپ‌شده بررسی می‌شوند. این بررسی، شامل انتخاب و عامل‌دار کردن مواد، طراحی ساختاری (مانند تخلخل و شکل) و همچنین چاپ چندماده‌ای برای ایجاد عملکردهای چهاربعدی است.

#### ۳-۱ انتخاب مواد و فرمول‌بندی

پلیمر یا رزین پایه باید با فرایند چاپ و شرایط کاربردی سازگار باشد. در SPE، پلیمرها باید توان تحمل حلال‌های مورد استفاده در جذب یا واجذب نمونه، مانند آب، متانول و استونیتریل را داشته باشند و در عین حال مواد مزاحم آزاد نکنند. در تصفیه آب نیز، ماده مورد استفاده باید در محدوده‌های مختلف pH پایدار بماند و در طی چرخه‌های متعدد، دچار تخریب نشود یا خود، موجب ورود آلاینده به محیط نشود. مواد رایج مورد استفاده در رشته‌های چاپ، مانند پلی(لاکتیک اسید)، به دلیل منشأ تجدیدپذیر و زیست‌تخریب‌پذیر بودن، گزینه‌های جذابی محسوب می‌شوند. در واقع، پلی(لاکتیک اسید) به‌طور گسترده به عنوان داربست در صافی‌های چاپ سه‌بعدی به کار رفته است. با این حال، پلی(لاکتیک اسید) تا حدی شکننده است و در تماس طولانی‌مدت با آب ممکن است دچار آب‌کافت شود. در مقابل، پلی(اکریلونیتریل-کو-بوتادین-کو-استایرن) استحکام و مقاومت شیمیایی بیشتری در برابر حلال‌های آلی دارد، اما منشأ نفتی دارد و در دمای بالاتری چاپ می‌شود، موضوعی که می‌تواند افزودن ترکیبات حساس به گرما را دشوار کند.

#### ۳-۲ طراحی هندسی و تخلخل

هندسه جاذب چاپ‌شده می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آن داشته باشد. برخلاف بسترهای متراکم متشکل از ذرات

گرفته شوند. با این حال، چالش‌هایی همچنان وجود دارند که از جمله آن‌ها، می‌توان به حفظ تکرارپذیری در شرایط پویا، خستگی در پلیمرهای حافظه‌دار و تخریب هیدروژل‌ها اشاره کرد. پژوهشگران، برای افزایش کارایی و دوام این مواد، بر توسعه موادی تمرکز کرده‌اند که به چند محرک مختلف پاسخ می‌دهند و همچنین قابلیت خودترمیمی دارند. افزون بر این، روش‌های محاسباتی مانند تحلیل اجزای محدود و یادگیری ماشین به‌طور فزاینده‌ای برای بهینه‌سازی رفتار مواد و توالی فعال‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پیشرفت‌ها، امکان تولید ساختارهای پویا را فراهم کرده‌اند و زمینه‌ساز توسعه‌های جدید در حوزه‌هایی مانند تجهیزات زیست‌پزشکی، مواد هوشمند و الکترونیک انعطاف‌پذیر شده‌اند [۲۳]. عناصر کلیدی در چاپ چهاربعدی شامل: الف) ماده پاسخ‌گو، ب) محرکی که پاسخ را فعال می‌کند، ج) طراحی حالت اولیه و نهایی است. پلیمرهای حافظه‌دار (Shape-Memory Polymers: SMPs) می‌توانند شکلی دائمی را به خاطر بسپارند، اما به‌طور موقت تغییر شکل دهند و در حالت دیگری تثبیت شوند و سپس در زمان تحریک (معمولاً با گرما) به حالت اولیه بازگردند [۱۵]. محرک‌های رایج در چاپ چهاربعدی شامل دما، رطوبت (تورم هیدروژل‌ها با آب)، pH (انبساط یا انقباض پلیمرهای دارای گروه‌های یون‌پذیر در اثر تغییر pH)، نور (تغییر مدول یا شکل در مواد نوری پاسخ‌گو)، و میدان‌های مغناطیسی یا الکتریکی (کامپوزیت‌های مغناطیسی یا الکتروفعال) هستند.

طراحی چاپ چهاربعدی، شامل در نظر گرفتن رفتار لایه‌ها یا نواحی چاپ‌شده در هنگام اعمال محرک است. اغلب چاپگرهای چهاربعدی از چاپ چندماده‌ای یا چاپ جهت‌دار برای ایجاد ناهمسانگردی استفاده می‌کنند. چاپ ماده منبسط‌شونده در کنار ماده‌ای سخت و غیرمنبسط در ساختار دولایه می‌تواند باعث خم‌شدن ساختار شود، به‌طوری که این رفتار مشابه عملکرد نوار دوفلزی در پاسخ به گرما است. همچنین هندسه داخلی چاپ می‌تواند تغییر شکل را هدایت کند، برای مثال، ورق تخت با الگوهای خاص درون‌صفحه‌ای، می‌تواند هنگام قرار گرفتن در آب و به دلیل تورم تفاضلی، به ساختار سه‌بعدی تا شود. در زمینه SPE یا پاک‌سازی محیط‌زیست، هدف از تغییر شکل، حرکت‌های شدید نیست، بلکه تغییرات ظریف و هدفمند است که عملکرد سامانه را بهبود می‌دهد، مانند تنظیم اندازه حفره‌ها، کنترل مسیرهای جریان یا فعال‌سازی آزادسازی گونه. برای نمونه، هندسه مارپیچی یا پیچ‌خورده، می‌تواند سطح تماس را افزایش دهد، بسته‌بندی فشرده‌تری در ستون‌های محدود فراهم کند یا بر جریان جهت‌دار در محیط‌های ریزسیالی اثر بگذارد. با

### ۳-۴ تلفیق عملکرد شیمیایی با طراحی ساختاری در پلیمرهای چاپ سه بعدی/چهاربعدی

شیمی پلیمر و روش‌های ساخت افزایشی در کنار یکدیگر، می‌توانند عملکرد پلیمرهای چاپ سه بعدی/چهاربعدی را در SPE بهبود دهند. اصلاح شیمیایی پلیمرها از طریق وارد کردن گروه‌های عاملی قطبی یا ناقطبی می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها، از جمله تمایل جذب، انتخاب‌پذیری و پایداری شیمیایی را به‌طور چشمگیری تغییر دهد. این اصلاحات، امکان طراحی سطوح پلیمری را به‌گونه‌ای فراهم می‌کند که برهم‌کنش مؤثرتری با گونه‌های هدف داشته باشند. در همین حال، ساخت افزایشی امکان تولید ساختارهایی با هندسه کنترل‌شده، سطح ویژه بالا و تراکم بیشتر جایگاه‌های فعال را فراهم می‌کند که همگی موجب افزایش بازده جذب می‌شوند. در بسیاری از موارد، پلیمرهای خالص، از استحکام مکانیکی و دقت ساختاری لازم برای چاپ سه بعدی پایدار برخوردار نیستند. با این حال، عامل‌داری یا هم‌پیش‌پاش با مونومرهای دیگر می‌تواند چاپ‌پذیری و عملکرد کلی این مواد را به میزان قابل‌توجهی بهبود دهد. بنابراین، ترکیب شیمی پلیمری هدفمند با ساخت افزایشی کارآمد، بستری مناسب برای توسعه جاذب‌های پیشرفته با عملکرد و استحکام ساختاری بالا فراهم می‌کند [۲۸].

### ۴ ویژگی‌های پلیمرهای چاپ سه بعدی/چهاربعدی در کاربردهای SPE و حذف آلاینده‌ها

پلیمرهای چاپ سه بعدی/چهاربعدی به‌دلیل انعطاف‌پذیری در طراحی و قابلیت تنظیم ساختار، مزیت‌های قابل‌توجهی در SPE و پاک‌سازی محیط‌زیست ارائه می‌کنند. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های چاپ سه بعدی، توانایی تولید هندسه‌های سفارشی مانند داربست‌های مونولیتی یا چارچوب‌های شبکه‌ای با درشت‌تخلخل کنترل‌شده و معماری سطحی دقیق است. این ویژگی‌ها می‌توانند انتقال جرم را بهبود دهند، محدودیت‌های نفوذ را کاهش دهند و در نهایت، سینتیک جذب را ارتقا بخشند. این خصوصیات به‌ویژه در کاربردهای SPE اهمیت دارند، زیرا در این سامانه‌ها، لازم است میان ماده جاذب و گونه‌های هدف، مانند فلزات سنگین یا آلاینده‌های آلی پایدار، تماس مؤثر برقرار شود. افزون بر این، امکان طراحی دقیق مسیرهای جریان داخلی باعث بهینه‌سازی دینامیک سیال می‌شود که این موضوع در سامانه‌های استخراج کوچک‌مقیاس یا قابل استفاده مجدد اهمیت فراوانی دارد. با وجود این، همچنان به پژوهش‌های بیشتری نیاز است تا این مزیت‌های ساختاری با مواد فعال دارای انتخاب‌پذیری بالا و سازگاری زیست‌محیطی مناسب

که دارای آرایش تصادفی و فضاهای خالی بین‌ذره‌ای هستند، مونولیت‌ها یا شبکه‌های چاپ سه بعدی دارای ساختار شیاردار مشخص و کنترل‌شده‌اند. عوامل طراحی شامل تخلخل، توزیع اندازه حفره‌ها (از مجاری درشت تا ریزحفره‌ها)، سطح ویژه و طول مسیر انتقال جرم هستند. در سامانه‌های SPE، معمولاً سطح تماس بالا برای اتصال گونه‌ها و در عین حال افت فشار کم برای عبور مناسب جریان مطلوب است. یکی از روش‌ها، ساخت شبکه‌های متخلخل یا ساختارهای هیزم‌چینی است که در آن رشته‌ها به‌صورت متقاطع به هم متصل می‌شوند و شبکه‌ای از مجاری را تشکیل می‌دهند.

### ۳-۳ عامل‌داری و اصلاح پس از چاپ

بسیاری از پلیمرهای چاپ‌شده، مانند پلی(لاکتیک اسید) یا رزین‌های خالص، برای آن‌که بتوانند به‌عنوان جاذب‌های مؤثر عمل کنند، به وارد کردن گروه‌های عاملی نیاز دارند. برای این منظور، چندین روش وجود دارد: (الف) چاپ با استفاده از مونومرهای عاملی، مانند رزین‌های دارای گروه تیول یا پلیمرهای قالب‌گیری‌شده مولکولی؛ (ب) اصلاح شیمیایی پس از چاپ؛ (ج) بارگذاری مواد کامپوزیتی. اصلاحات پس از چاپ معمولاً به‌صورت تیمار ساختار چاپ‌شده با محلول‌های واکنشگر انجام می‌شود [۲۶]. ساختارهای پلی(لاکتیک اسید) چاپ‌شده سه بعدی نیز با استفاده از فرایندهای قلیایی یا آمونیاکی آمینه‌دار شده‌اند تا گروه‌های آمینی به سطح آن‌ها افزوده شود. این اصلاحات، می‌توانند جذب رنگینه‌ها و فلزات سنگین را افزایش دهند. پوشش‌دهی سطح نیز یکی از روش‌های رایج محسوب می‌شود. عامل‌داری موفق، نیازمند کنترل دقیق شیمی سطح است تا پایداری و کارایی جاذب در چرخه‌های متعدد استخراج حفظ شود. میزان موفقیت در پیونددهی و پایداری گروه‌های عاملی، مانند گروه‌های آمینی یا کربوکسیلات، نقش مهمی در تضمین عملکرد بلندمدت ایفا می‌کند. همچنین، پایداری در شرایط کاری، از جمله pH، قدرت یونی و ترکیب شیمیایی محیط، اهمیت اساسی دارد. در مجموع، پژوهشگرانی که روی جاذب‌های پلیمری چاپ سه بعدی/چهاربعدی کار می‌کنند، باید با دقت انتخاب کنند که چه ماده‌ای را چاپ کنند و چگونه آن را چاپ کنند تا ویژگی‌های جاذب یا استخراج مورد نظر حاصل شود. توانایی ایجاد تخلخل و وارد کردن شیمی عاملی در همان مرحله طراحی، یکی از مهم‌ترین مزیت‌های چاپ سه بعدی به شمار می‌رود. افزون بر این، چاپ سه بعدی امکان تولید ساختارهایی را فراهم می‌کند که به‌راحتی با فناوری‌ها و تجهیزات موجود سازگار می‌شوند [۲۷].

می‌دهد. این پلیمرها، می‌توانند در پاسخ به محرک‌های خارجی، مانند pH، دما، رطوبت یا نور، تغییرات کنترل‌شده‌ای در شکل، ساختار یا ویژگی‌های شیمیایی خود ایجاد کنند. چنین موادی امکان ساخت سامانه‌های تطبیق‌پذیر را فراهم می‌کنند، به گونه‌ای که ساختارهای چاپ‌شده می‌توانند در طول زمان و بر اساس نیاز عملکردی تغییر شکل دهند یا بازآرایی شوند. این قابلیت قابلیت بالایی برای استفاده در بسترهای هوشمند جداسازی، از جمله SPE، ایجاد می‌کنند. ادغام این مواد در جاذب‌های چاپ‌شده می‌تواند پاسخ‌دهی به شرایط محیطی را بهبود دهد و امکان اتصال، آزادسازی یا احیای کنترل‌شده را در فرایندهای استخراج و پاک‌سازی فراهم کند. این پیشرفت‌ها برخی محدودیت‌های جاذب‌های سنتی SPE، مانند قابلیت استفاده مجدد محدود و سینتیک کند، را کاهش می‌دهند و در عین حال امکان طراحی سامانه‌های مقیاس‌پذیر را برای بافت‌های نمونه پیچیده فراهم می‌کنند. کاربرد پلیمرهای چاپ چهاربعدی در حذف آلاینده‌ها و پاک‌سازی محیط‌زیست، به ویژه برای حذف فلزات سنگین، رنگینه‌های آلی و ریزپلاستیک‌ها، نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری بالای این سامانه‌های پلیمری است. افزون بر این، استفاده از پلیمرهای زیست‌پایه یا قابل بازیافت با اصول شیمی سبز هم‌خوانی دارد و می‌تواند مصرف انرژی و تولید پسماند را در فرایندهای استخراج کاهش دهد.

## ۶ ملاحظات زیست‌محیطی در کاربردهای SPE چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی

تولید اجزای سامانه SPE با استفاده از چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی پیامدهای زیست‌محیطی مهمی دارد، به ویژه در چارچوب روش‌های تجزیه‌ای پایدار. اگرچه ساخت افزایشی از نظر صرفه‌جویی در مواد و انعطاف‌پذیری طراحی مزیت‌هایی ارائه می‌دهد، اما اثرات زیست‌محیطی آن باید از نظر تولید پسماند، مصرف انرژی، تأمین مواد اولیه و مدیریت پایان عمر به دقت بررسی شود. یکی از چالش‌های اصلی، منشأ و ترکیب مواد چاپی است. بیشتر رشته‌های پلیمری و رزین‌های تجاری مورد استفاده در نمونه‌سازی SPE از منابع نفتی تولید می‌شوند که موجب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و وابستگی به منابع تجدیدناپذیر می‌شوند [۳۰]. پژوهشگران در سال‌های اخیر جایگزین‌های زیست‌پایه مانند پلی (اسید لاکتیک) و پلی(هیدروکسی آلکانوات) را بررسی کرده‌اند، زیرا این مواد، اثرات زیست‌محیطی کمتری دارند. این مواد از نظر زیست‌تخریب‌پذیری و کاهش ردپای کربنی مزیت دارند، اما کارایی آن‌ها در کاربردهای SPE قابل استفاده مجدد به دلیل

تلفیق شوند. پلیمرهای چاپ سه‌بعدی/چهاربعدی گروهی از مواد چندمنظوره هستند که می‌توان آن‌ها را به صورت هدفمند عامل‌دار کرد تا عملکردشان در SPE بهبود یابد. پلیمرهایی مانند پلی(اکریلونیتریل-کو-بوتادین-کو-استایرن)، پلی‌آمیدها و رزین‌های نوری را می‌توان با گروه‌های عاملی مختلف، مانند آمین، کربوکسیل و تیول، اصلاح کرد یا با موادی پیشرفته همچون نانولوله‌های کربنی، چارچوب‌های فلزی-آلی و مایعات یونی ترکیب کرد. این اصلاحات جایگاه‌های اتصال انتخاب‌پذیر ایجاد می‌کنند و از طریق برهم‌کنش‌های اختصاصی با گونه‌های هدف، ظرفیت جذب را افزایش می‌دهند. نکته مهم آن است که این سامانه‌های عامل‌دارشده، می‌توانند در بازه گسترده‌ای از pH و شرایط حلالی، پایداری شیمیایی خود را حفظ کنند و همین ویژگی کاربرد عملی آن‌ها را افزایش می‌دهد. افزون بر این، قالب‌گیری مولکولی، راهبرد مؤثری برای افزایش انتخاب‌پذیری در سامانه‌های SPE چاپ‌شده سه‌بعدی/چهاربعدی به شمار می‌رود. پلیمرهای قالب‌گیری‌شده مولکولی دارای حفره‌هایی اختصاصی هستند که از نظر شکل و ویژگی‌های عاملی، مکمل مولکول هدف طراحی می‌شوند. پلیمرهای چاپ سه‌بعدی/چهاربعدی همچنین با استفاده از مواد سازگار با محیط‌زیست و کاهش مصرف انرژی در فرایند ساخت و بهره‌برداری، به پایداری و صرفه‌جویی انرژی کمک می‌کنند. پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر، مانند پلی(هیدروکسی آلکانوات)، و رزین‌های قابل بازیافت می‌توانند میزان پسماند را کاهش دهند. مواد چهاربعدی پاسخ‌گو به نور خورشید نیز قادر هستند با استفاده از انرژی نور فعال شوند و نیاز به انرژی خارجی را کاهش دهند. افزون بر این، پلیمرهای خودتجزیه‌شونده پس از پایان مصرف می‌توانند تخریب شوند و با اصول شیمی سبز سازگار باشند [۲۹].

## ۵ پیشرفت‌های صورت‌گرفته در پلیمرهای چاپ سه‌بعدی / چهار بعدی

فناوری‌های چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی، طراحی و تولید مواد پلیمری نوین را دگرگون کرده‌اند. این فناوری‌ها امکان طراحی بسیار دقیق ساختارهای جدید را برای کاربردهای SPE و حذف آلاینده‌ها فراهم می‌کنند. پژوهشگران از قابلیت برنامه‌ریزی چاپ سه‌بعدی برای طراحی ساختارهای پلیمری با سطح ویژه، شکل حفره و توزیع گروه‌های عاملی کنترل‌شده استفاده می‌کنند و این ویژگی‌ها می‌توانند بازده و انتخاب‌پذیری جذب را افزایش دهند. چاپ چهاربعدی توانایی‌های چاپ سه‌بعدی سنتی را با وارد کردن پلیمرهای پاسخ‌گو به محرک گسترش

ویژگی‌های پیشرفته لازم برای جذب انتخابی برخی آلاینده‌ها هستند. اگرچه ترکیب گروه‌های عاملی و نانومواد در ساختارهای چاپ‌شده سه بعدی بررسی شده است، اما این رویکرد معمولاً به مراحل پردازشی اضافی نیاز دارد که پیچیدگی و هزینه را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، استحکام مکانیکی و پایداری شیمیایی پلیمرهای چاپ چهاربعدی در شرایط سخت محیطی، مانند شوری بالا یا pHهای بسیار اسیدی و بازی، هنوز به طور کامل مشخص نشده است و همین موضوع می‌تواند کاربرد آن‌ها را در مقیاس عملی محدود کند. یکی دیگر از چالش‌های مهم، محدودیت تفکیک پذیری برخی فناوری‌های چاپ سه بعدی است که می‌تواند مانع از ایجاد ساختارهای متخلخل پیچیده شود، ساختارهایی که برای دستیابی به بازده بالای جذب ضروری هستند. همچنین، اثرات زیست محیطی و پایداری مواد چاپ سه بعدی و چهاربعدی به موضوع مهمی تبدیل شده است. تولید پلیمرهای هوشمند پاسخ‌گو به محرک‌ها اغلب بر پایه مواد اولیه نفتی انجام می‌شود و این موضوع نگرانی‌هایی درباره پیامدهای زیست محیطی کاربرد آن‌ها در فناوری‌های سبز ایجاد می‌کند.

کاهش خواص مکانیکی یا شیمیایی در طی چرخه‌های متعدد جذب نیز، اغلب مانع بازایی و استفاده مجدد مؤثر این مواد می‌شود. در نهایت، ادغام این مواد در فرایندهای صنعتی در مقیاس بزرگ با هزینه‌های اولیه بالا و دسترسی محدود به فناوری‌های پیشرفته چاپ چهاربعدی با چالش روبه‌رو است. غلبه بر این مشکلات، نیازمند تلاش‌های میان‌رشته‌ای برای تولید مواد بادوام، مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست و همچنین توسعه فرایندهای چاپ پیشرفته مطابق با نیازهای صنعتی است. علاوه بر این، تولید تکرارپذیر تخلخل سلسله‌مراتبی، که یکی از عوامل کلیدی برای کنترل دقیق انتقال جرم است، همچنان دشوار باقی مانده است. اگرچه چاپ چهاربعدی جاذب‌های هوشمند امکان تنظیم پویا در فرایند SPE را فراهم می‌کند، اما کاربردهای عملی آن هنوز محدود است و بسیاری از عوامل عملکردی به طور کامل تعریف نشده‌اند. بیشتر پژوهش‌ها بر چارچوب‌های اثبات مفهوم تمرکز دارند و هنوز به توسعه سامانه‌های SPE کاملاً عملیاتی نرسیده‌اند.

مشکل دیگر، ناپایداری در سازوکارهای تحریک پذیری است؛ به طوری که تغییرات ناشی از محرک‌هایی مانند دما، pH یا رطوبت اغلب تکرارپذیری کافی ندارند، به ویژه در محیط‌های پیچیده‌ای که دارای نوسانات شدید دما، قدرت یونی و ترکیب آلی هستند. در نبود کنترل دقیق بر این سازوکارها، عملکردهای تطبیقی مانند باز و بسته شدن تخلخل یا جذب و رهایش

کاهش استحکام مکانیکی محدود است. عامل مهم دیگر در پایداری این فناوری، میزان انرژی مصرفی در فرایند چاپ است. روش‌هایی مانند تف‌جوشی لیزری انتخابی و مدل‌سازی رسوب ذوبی معمولاً به دماهای بالا نیاز دارند و همین موضوع مصرف انرژی را افزایش می‌دهد. در مقابل، روش‌هایی مانند پردازش نوری رقومی و نگارش مستقیم جوهر معمولاً انرژی کمتری مصرف می‌کنند و از این نظر برای ساخت ساختارهای جاذب سازگارتر با محیط زیست محسوب می‌شوند. بهینه‌سازی فرایند، شامل تنظیم ارتفاع لایه، سرعت چاپ و انتخاب ماده، می‌تواند مصرف انرژی را کاهش داده، بازده تولید را افزایش دهد [۲۳]. ساخت افزایشی اگرچه ذاتاً نسبت به روش‌های کاهشی پسماند کمتری تولید می‌کند، اما کاملاً بدون پسماند نیست. باقی‌مانده رزین، چاپ‌های ناموفق و ساختارهای نگه‌دارنده از منابع اصلی هدررفت مواد هستند. به کارگیری روش‌های بازیافت مواد، مانند صافش رزین یا بازفرآوری رشته‌های پلیمری، می‌تواند میزان پسماند را کاهش داده، به توسعه اقتصاد چرخه‌ای در حوزه SPE کمک کند. برخی مواد گرمانرم مانند پلی (اکریلونیتریل-کو-بوتادین-کو-استایرن) و پلی اتیلن ترفتالات-گلیکول قابلیت بازیافت دارند، اما در عمل این فرایند به دلیل محدودیت زیرساخت‌ها و آلودگی مواد، به طور کامل اجرا نمی‌شود. پلیمرهای زیست تخریب پذیر مزیت تجزیه طبیعی دارند، اما برای تجزیه کامل معمولاً به شرایط ویژه کمپوست نیاز دارند و این موضوع اثرات زیست محیطی آن‌ها را در دفع غیرکنترل شده کاهش می‌دهد. بنابراین استفاده از مواد زیست پایه، روش‌های چاپ کم مصرف و فناوری‌های بازیافت مؤثر برای افزایش پایداری زیست محیطی سامانه‌های SPE چاپ‌شده سه بعدی و چهاربعدی ضروری است [۲۳]. در نهایت، نبود ارزیابی‌های جامع چرخه عمر و مطالعات مقایسه‌ای کمی بین SPE چاپی و روش‌های سنتی، باعث شده است نتیجه‌گیری قطعی درباره برتری زیست محیطی این فناوری‌ها همچنان با عدم قطعیت همراه باشد.

## ۷ چالش‌ها و مسیرهای آینده

با وجود آن‌که مواد پلیمری چاپ‌شده سه بعدی و چهاربعدی ظرفیت بالایی برای تحول در کاربردهای SPE و حذف آلاینده‌ها دارند، همچنان چندین چالش اساسی در مسیر توسعه آن‌ها وجود دارد. یکی از مهم‌ترین مشکلات، محدود بودن طیف مواد قابل استفاده است. بیشتر پلیمرهای موجود در بازار چاپ سه بعدی، از جمله پلی (اسید لاکتیک)، پلی (اکریلونیتریل-کو-بوتادین-کو-استایرن) و پلی اتیلن ترفتالات-گلیکول، فاقد

کنترل شده در چرخه‌های متعدد به درستی قابل اطمینان نیستند و همین موضوع کاربرد عملی را محدود می‌کند. همچنین، عواملی مانند رسوب‌گذاری، رشد زیستی و تغییرات جریان می‌توانند عملکرد سامانه‌های تحریک‌پذیر را مختل کرده و آن‌ها را غیرقابل پیش‌بینی کنند. علاوه بر این، بسیاری از مطالعات موجود هنوز داده‌های کمی کافی مانند طول عمر چرخه‌ای، زمان پاسخ یا خستگی عملکردی در شرایط واقعی محیطی ارائه نمی‌دهند.

پژوهش‌های آینده در حوزه پلیمرهای چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی برای SPE و حذف آلاینده‌ها باید بر نوآوری در مواد و بهبود عملکرد متمرکز شوند. توسعه پلیمرهای زیست‌پایه و زیست‌تخریب‌پذیر می‌تواند دامنه مواد قابل استفاده را گسترش دهد و هم‌زمان به کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک کند. پیشرفت در فناوری‌های چاپ افزایشی مانند پردازش نوری رقومی، استریولیتوگرافی و نگارش مستقیم جوهر می‌تواند دقت ساخت را افزایش داده، امکان تولید ساختارهای متخلخل سلسله‌مراتبی مناسب برای انتقال جرم را فراهم کند. استفاده از یادگیری ماشین و هوش مصنوعی نیز می‌تواند به طراحی مواد پیشرفته SPE کمک کند، زیرا این روش‌ها امکان پیش‌بینی فرمول‌بندی‌های بهینه، هدایت مسیرهای عاملی‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای چاپ را فراهم می‌کنند تا تخلخل، شیمی سطح و خواص مکانیکی مطلوب حاصل شود. این ابزارها موجب کاهش آزمون و خطای تجربی شده و روند نوآوری در ساخت جاذب‌های پلیمری را تسریع می‌کنند.

برای عملیاتی‌سازی سامانه‌های SPE چاپ چهاربعدی، پژوهش‌های آینده باید بر طراحی مقاوم، استفاده از حسگرهای بازخوردی، تضمین پایداری ساختاری و دستیابی به پاسخ‌پذیری یکنواخت مواد تمرکز کنند. همچنین لازم است روش‌های آزمون استاندارد شامل ارزیابی تکرارپذیری تحریک در نمونه‌های شبیه‌سازی شده، اندازه‌گیری تغییر ظرفیت جذب در چرخه‌های متعدد و سنجش تخریب مکانیکی و شیمیایی تدوین شود. در کنار این موارد، توسعه مقیاس‌پذیری فناوری چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی، مانند ساخت چاپگرهای بزرگ‌مقیاس و سامانه‌های تولید پیوسته خودکار، برای کاربردهای صنعتی ضروری است. در نهایت، لازم است قابلیت تطبیق این مواد تنها به حذف آلاینده‌ها محدود نشود، بلکه برای کاربردهای دیگری مانند دارورسانی، کاتالیز و ذخیره‌سازی انرژی نیز توسعه یابد.

## ۸ نتیجه‌گیری

این مرور جامع، مواد نوین چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی را به عنوان

علوم محیطی ایجاد می‌کنند. توانایی آن‌ها در ترکیب ساختار مهندسی‌شده، عملکرد شیمیایی هدفمند و رفتار دینامیکی، آن‌ها را به گزینه‌ای پیشرو برای توسعه راهکارهای پایدار در حوزه استخراج و پالایش محیطی تبدیل می‌کند.

## مراجع

- Conti M, Dimartino S. Materials for 3D Printing of chromatographic Stationary Phases. *TrAC Trends Anal. Chem.*, 192, 118301, **2025**.
- Javaid M, Haleem A, Singh RP, Suman R. 3D Printing Applications for Healthcare Research and Development. *Glob. Heal. J.*, 6, 217–26, **2022**.
- Bodaghi M, Wang L, Zhang F, Liu Y, Leng J, Xing R, Dickey MD, Vanaei S, Elahinia M, Hoa S Van, others. 4D Printing Roadmap. *Smart Mater. Struct.*, 33, 113501, **2024**.
- Sajjad R, Chauhdary ST, Anwar MT, Zahid A, Khosa AA, Imran M, Sajjad MH. A Review of 4D Printing-Technologies, Shape Shifting, Smart Polymer Based Materials, and Biomedical Applications. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, 7, 20–36, **2024**.
- Chen J, Virrueta C, Zhang S, Mao C, Wang J. 4D Printing: the Spotlight for 3D Printed smart Materials. *Mater. Today*, 77, 66–91, **2024**.
- Khalid MY, Arif ZU, Noroozi R, Zolfagharian A, Bodaghi M. 4D Printing of Shape Memory Polymer Composites: A Review on Fabrication Techniques, Applications, and Future Perspectives. *J. Manuf. Process.*, 81, 759–97, **2022**.
- Mohammadi M, Kouzani AZ, Bodaghi M, Xiang Y, Zolfagharian A. 3D-Printed Phase-Change Artificial Muscles with Autonomous Vibration Control. *Adv. Mater. Technol.*, 8, 2300199, **2023**.
- Chiappone A, Roppolo I, Scavino E, Mogli G, Pirri CF, Stassi S. Three-dimensional Printing of Triboelectric Nanogenerators by Digital Light Processing Technique for Mechanical Energy Harvesting. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 15, 53974–83, **2023**.
- Hosseini SB, Ghani M, Raoof JB. Recent Progress in Solid-and Liquid-Phase Microextraction Methods for the Extraction and Quantification of Current-Use Pesticides. *Adv. Sample Prep.*, 100215, **2025**.
- Jin H-F, Shi Y, Cao J. Recent Advances and Applications of Novel Advanced Materials in Solid-Phase Microextraction for Natural Products. *TrAC Trends Anal. Chem.*, 178, 117858, **2024**.
- Hassan AM, Kelani KM, Hegazy MA, Nadim AH, Tantaawy MA. A Probe of New Molecularly Imprinted Solid-Phase Extraction Coupled with HPLC-DAD and Atomic Absorption Spectrophotometry for Quantification of Tetracycline HCl, Metronidazole and Bismuth Subcitrate in Combination with their Official Impurities: Application. *J. Chromatogr. B*, 1234, 124032, **2024**.
- Salamat Q, Tatardar F, Moradi R, Soylak M. Recent Advancement and Prospects of Novel Nanomaterial-Based Solid-Phase Extraction (SPE) Techniques. *Anal. Lett.*, 58, 943–83, **2025**.
- Sobiech M, Luliński P. Molecularly Imprinted Solid Phase Extraction-Recent Strategies, Future Prospects and Forthcoming Challenges in Complex Sample Pretreatment Process. *TrAC Trends Anal. Chem.*, 174, 117695, **2024**.
- Wang L, Pumera M. Recent Advances of 3D Printing in Analytical Chemistry: Focus on Microfluidic, Separation, and Extraction Devices. *TrAC Trends Anal. Chem.*, 135, 116151, **2021**.
- Ding A, Tang F, Alsberg E. 4D Printing: a Comprehensive Review of Technologies, Materials, Stimuli, Design, and Emerging Applications. *Chem. Rev.*, 125, 3663–771, **2025**.
- Rahmatabadi D, Khajepour M, Bayati A, Mirasadi K, Yousefi MA, Shegeft A, Ghasemi I, Baniassadi M, Abrinia K, Bodaghi M, Others. Advancing Sustainable Shape Memory Polymers Through 4D Printing of Polylactic Acid-Polybutylene Adipate Terephthalate Blends. *Eur. Polym. J.*, 216, 113289, **2024**.
- Hull CW. Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography. United States Patent, Appl., No. 638905, Filed, **1984**.
- Ahmed KS, Ibad H, Suchal ZA, Gosain AK. Implementation of 3D Printing and Computer-Aided Design And Manufacturing (CAD/CAM) in Craniofacial Reconstruction. *J. Craniofac. Surg.*, 33, 1714–9, **2022**.
- Prabhakar MM, Saravanan AK, Lenin AH, Mayandi K, Ramalingam PS, et. al. A short Review on 3D Printing Methods, Process Parameters and Materials. *Mater. Today Proc.*, 45, 6108–14, **2021**.
- Zhang J, Chen D-R, Chen S-C. A Review of Emission Characteristics and Control Strategies for Particles Emitted from 3D Fused Deposition Modeling (FDM) Printing. *Build. Environ.*, 221, 109348, **2022**.
- Anthony Dicks J, Woolard C. Thiol-X Chemistry: A Skeleton Key Unlocking Advanced Polymers in Additive Manufacturing. *Macromol. Mater. Eng.*, 310, 2400445, **2025**.
- Liu L, Sun Y, Kleinmeyer Z, Habil G, Yang Q, Zhao L, Rosso D. Microplastics Separation Using Stainless Steel Mini-Hydrocyclones Fabricated with Additive Manufacturing. *Sci. Total Environ.*, 840, 156697, **2022**.
- Ahmed HEH, Soylak M. 3D and 4D Printed Polymers for Solid Phase Extraction and Pollutant Removal Applications.

*TrAC Trends Anal. Chem.*, 118466, **2025**.

24. Abdullah KK, Molnár K. Current Trends and Future Prospects of Integrating Electrospinning with 3D Printing Techniques for Mimicking Bone Extracellular Matrix Scaffolds. *J. Polym. Sci.*, 63, 1481–504, **2025**.

25. Molavi H, Mirzaei K, Barjasteh M, Rahnamaee SY, Saeedi S, Hassanpouryouzband A, Rezakazemi M. 3D-Printed MOF Monoliths: Fabrication Strategies and Environmental Applications. *Nano-Micro Lett.*, 16, 272, **2024**.

26. Keitel B, Batista AD, Schimana S, Mizaikoff B, Dinc M. Emulsion-free 3D Printing of Inherently Porous Molecularly Imprinted Polymers with Tailored Macroscopic Geometries. *ACS Appl. Polym. Mater.*, 6, 3690–5, **2024**.

27. Mahmood A, Perveen F, Chen S, Akram T, Irfan A. Polymer Composites in 3D/4D Printing: Materials, Advances, and

Prospects. *Molecules*, 29, 319, **2024**.

28. Saleh Alghamdi S, John S, Roy Choudhury N, Dutta NK. Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges. *Polymers (Basel)*, 13, 753, **2021**.

29. Barzallo D, Palacio E, March J, Ferrer L. 3D Printed Device Coated with Solid-Phase Extraction Resin for the On-Site Extraction of Seven Sulfonamides from Environmental Water Samples Preceding HPLC-DAD Analysis. *Microchem. J.*, 190, 108609, **2023**.

30. Ameta KL, Solanki VS, Singh V, Devi AP, Chundawat RS, Haque S. Critical Appraisal and Systematic Review of 3D & 4D Printing in Sustainable and Environment-Friendly Smart Manufacturing Technologies. *Sustain. Mater. Technol.*, 34, e00481, **2022**.