فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی - ترویجی
سال چهارم، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۶، زمستان ۱۳۹۸
Vol. 4, No. 4, Issue No. 16
Winter 2020, Quarterly
صفحه ۱۸ - ۵

Iran Polymer Technology: Research and Development

# توسعه روش‌های جداسازی به‌وسیله‌ی ابزارهای پلیمری ساخته‌شده با چاپگر سه بعدی

حدیث وکیلی[1]، زهرا طالب‌پور[2]

۱ تهران، دانشگاه الزهرا(س)، دانشکده فیزیک وشیمی، گروه شیمی، دانشجوی کارشناسی ارشد شیمی تجزیه

۲ تهران، دانشگاه الزهرا(س)، دانشکده فیزیک وشیمی، گروه شیمی، دانشیار شیمی تجزیه

## چکیده ...

روش ساخت افزودنی یا چاپ سه‌بعدی، فرایندی است که طی آن اشیاء از روی مدلی سه‌بعدی ساخته می‌شوند. این روش در مقایسه با روش‌های ساخت کاهشی، دارای مزیت‌های بسیاری همانند تولید تک‌مرحله‌ای طرح‌های پیچیده و متشکل از چندین نوع ماده، کاهش زمان ساخت، قابلیت یکپارچه‌سازی اجزا و افزایش قابلیت ادغام مواد است. در حال حاضر، بیش از نیمی از قطعاتی که توسط روش ساخت افزودنی 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. به‌تازگی استفاده از روش ساخت افزودنی در تهیه ابزارهای مورد نیاز برای جداسازی مواد، گسترش پیدا کرده است. هدف این مقاله آشنایی با روش‌های مختلف چاپ سه‌بعدی برای ساخت قطعات متفاوت پلیمری مانند ستون‌ها و فازهای ساکن سوانگاری (کروماتوگرافی)، جاذب‌های استخراجی و تراشه‌ها است.

**واژه‌های کلیدی:**

**ساخت افزودنی**
**چاپ سه‌بعدی**
**پلیمر**
**روش‌های جداسازی**
**تراشه**

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
ztalebpour@alzahra.ac.ir

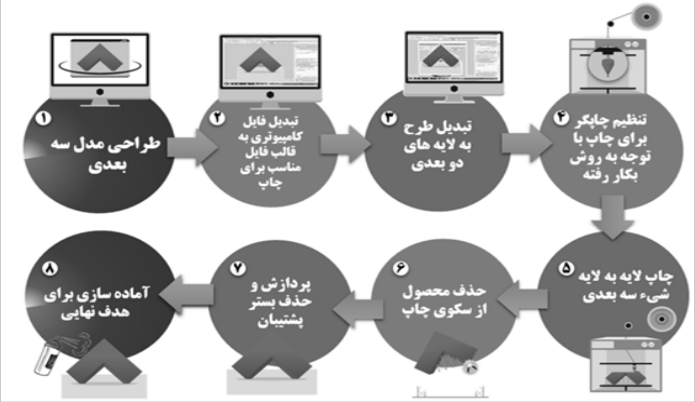
## ۱ مقدمه

ساخت اشیای سه‌بعدی به روش‌های مختلف صورت می‌گیرد. روش‌های سنتی و رایج، روش‌های کاهشی هستند (Subtractive Manufacturing) که در طی این روش‌ها، فرایند ساخت، از توده‌ی جامدی آغاز شده و با روش‌هایی همچون فرزکاری و تراش‌کاری، جسم سه‌بعدی ساخته می‌شود [۱]. قدیمی‌ترین تحقیقات برای ساخت اشیای سه‌بعدی با روش‌های پیشرفته، در دهه‌ی ۱۹۶۰ به استفاده از فوتوپلیمرها در اوهایو برمی‌گردد. هدف از انجام این آزمایش بررسی پلیمری‌شدن رزین‌ها توسط دو پرتو متقاطع لیزر با طول موج‌های مختلف بود [۲]. در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰، روش فوتوگرافی جامد توسط شرکت "Dynell Electronics" اختراع شد. در این روش برای بریدن سطح مقطع بر اساس مدل رایانه‌ای از لیزر استفاده می‌شد و پس از تجمع این لایه‌ها بر روی یکدیگر، شی سه‌بعدی به‌دست می‌آمد [۲]. در دهه‌ی ۱۹۸۰، برای اولین بار اصطلاح نمونه‌سازی سریع (Rapid Prototyping) به‌عنوان مجموعه‌ای از فنون برای ساخت مدل‌های جامد سه‌بعدی معرفی شد. پیشرفت این روش‌ها منجر به معرفی روش "ساخت افزودنی" (Additive Manufacturing) توسط محققانی در تگزاس در سال ۱۹۸۶ شد [۳]. در این روش ابتدا، مدلی سه‌بعدی در رایانه به کمک نرم‌افزار رایانه‌ای (Computer Aided Design (CAD)) طراحی می‌شود؛ سپس این مدل سه بعدی باعملیات برش نرم‌افزار Sliced CAD Model، به صدها یا هزاران لایه افقی تقسیم می‌شود. در پایان، شی فیزیکی بر اساس طرح رایانه‌ای با قرار گرفتن لایه‌لایه‌ی مواد، بدون کاهش از نمونه‌ی اولیه و هدررفت ماده ساخته می‌شود [٤]. از زمان ابداع این روش تاکنون، پیشرفت‌های عمده‌ای در روش‌های ساخت افزودنی رخ داده است. قطعه‌ی مورد چاپ می‌تواند از جنس فلز، سرامیک، مواد زیستی و نانومواد باشد. همچنین، هر ماده‌ی پلیمری یا بر پایه‌ی پلیمر که بتواند در دمای مناسب (بدون تخریب) ذوب شود، گزینه احتمالی برای استفاده در این روش است. از طرفی برای ایجاد یک یا چندین خاصیت ویژه در شی نهایی، می‌توان از ترکیب هر کدام از مواد استفاده کرد. با توجه به تنوع و طیف گسترده‌ی خواص مکانیکی و شیمیایی پلیمرها، این دسته از مواد بیشترین استفاده را در روش ساخت افزودنی دارند. پلیمرهایی که دراین روش استفاده می‌شوند، می‌توانند از نوع گرمانرم (Thermoplastic)، گرماسخت (Thermoset)، الاستومر (Elastomer)، پلیمر ترکیب‌شده با پرکننده‌ها و پلیمر مخلوط با مواد زیستی باشد. طراحی و انتخاب پلیمر مناسب می‌تواند منجر به ساخت موادی با قابلیت‌های خاص و بهبودیافته، خواص مکانیکی مناسب و تخلخل و پایداری بالا شود. پلی‌کربنات (Polycarbonates (PC))، آکریلونیتریل بوتادی‌ان‌استایرن (Acrylonitrile Butadiene Styrene(ABS))، پلی‌اتر (Polyethers) و پلی‌اتراترکتون (Polyether ether ketone (PEEK)) از پلیمرهای پرکاربرد در این زمینه هستند [۵].

به‌دلیل استفاده‌ی گسترده از مواد پلیمری در کاربردهای مختلف، چاپگر سه‌بعدی به‌عنوان ابزار ساخت سریع و محبوب، در حال ورود به زمینه‌های مختلف علوم و صنعت است. تنوع کاربردهای اخیر چاپگر سه‌بعدی در علوم مختلف، از جمله پزشکی، مهندسی، فیزیک و شیمی، نشان‌دهنده‌ی محبوبیت این روش در بین محققان و صنعتگران است. همچنین این روش در زمینه‌های زیستی، مهندسی بافت، مطالعات زیست‌محیطی، ساخت وسایل و شیشه‌آلات آزمایشگاهی و آزمایشگاه بر روی تراشه (Lab-on-a-chip) نیزکاربرد دارد [٦].

## ۲ مراحل ساخت جسم سه‌بعدی با چاپگر سه‌بعدی

در شکل ۱ مراحل ضروری چاپ جسم سه‌بعدی با استفاده از چاپگر سه‌بعدی نمایش داده شده است. همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد، در مرحله‌ی اول، مدل سه بعدی توسط نرم‌افزار رایانه‌ای یا پویش‌گر سه‌بعدی طراحی می‌شود. در مرحله‌ی دوم، فایل رایانه‌ای به قالب فایل مناسب برای چاپ تبدیل می‌شود. سپس طرح رایانه‌ای توسط نرم‌افزار، برش داده شده و به لایه‌های دوبعدی تفکیک می‌شود (مرحله‌ی سوم). هر یک از این لایه‌ها به‌عنوان مقطع افقی نازکی برش داده شده از سطح مقطع شی نهایی هستند. در مرحله‌ی چهارم، شرایط بهینه برای چاپ در دستگاه تنظیم می‌شود و در مرحله‌ی پنجم، چاپگر، هر لایه را مطابق طرح بر روی لایه‌ی قبلی ساخته‌شده، چاپ می‌کند (دلیل انتخاب واژه‌ی ساخت افزودنی هم به این دلیل است). در مرحله‌ی ششم، شی از سکوی چاپ، جدا شده، عملیات پردازش بر روی آن (مرحله‌ی هفتم) صورت می‌گیرد. یکی از کارهای انجام‌شده در مرحله‌ی پردازش، حذف بستر پشتیبان (Support) است. اجسام




شکل ۱ مراحل ساخت یک جسم سه‌بعدی.

سه‌بعدی ساخته‌شده با روش ساخت افزودنی، می‌توانند بدون استفاده از بستر پشتیبان یا به‌همراه آن تهیه شوند. در طول فرایند چاپ، بستر پشتیبان با پرکردن حفرات شی در حال ساخت، از سقوط شی جلوگیری می‌کند [٦]. پس از اتمام ساخت، این بستر توسط روش مناسبی حذف می‌شود. در مرحله‌ی هشتم، ساختار چاپ‌شده برای کاربرد از پیش‌تعیین‌شده‌ی آن، آماده می‌شود.

از جمله عوامل مهم در چاپ سه‌بعدی، قدرت تفکیک است. این مولفه در سه بعد بررسی می‌شود. X-Y دو بعد در صفحه هستند که مربوط به حرکت افقی لیزر یا افشانک بوده (بسته به روش) که می‌تواند در تک‌لایه حرکت کند و Z، بعد سوم را به‌وجود می‌آورد که ضخامت لایه‌ها را تعیین می‌کند.

به‌طور معمول، قدرت تفکیک در جهت محور Z که به عوامل مختلفی بستگی دارد در برگه‌ی مشخصات دستگاه ذکر می‌شود. این مولفه و مولفه‌های مرتبط با منبع انرژی دستگاه (مانند دما و شدت لیزر) از جمله عوامل قابل تنظیم در حین فرایند ساخت هستند. اما، هیچ فاکتوری به‌اندازه‌ی قدرت تفکیک X-Y، کیفیت محصول چاپی را تعیین نخواهدکرد [۵].

همانند هر دستاورد جدید و تازه‌ای که به‌سرعت در روند توسعه قرار دارد، مزیت‌ها و محدودیت‌هایی برای این‌گونه از روش‌ها وجود دارد که در جدول ۱، بیان شده است.

## ۳ روش‌های ساخت افزودنی با چاپگر سه‌بعدی

دسته‌بندی روش‌های ساخت افزودنی از دیدگاه‌های مختلف صورت می‌گیرد. یکی از شیوه‌های تقسیم‌بندی این روش‌ها، بر اساس نوع فرایند افزایش است که بیان‌کننده‌ی روش ساخت هرلایه و همچنین ماده‌ی مورد استفاده برای ساخت است. این دیدگاه منجر

جدول ۱ مزایا و معایب روش چاپ سه‌بعدی [۷].

| مزیت‌ها | محدودیت‌ها |
|---|---|
| ایجاد طراحی‌های پیچیده در یک مرحله برای ساخت محصولات مختلف | هزینه‌های بیشتر برای تولید اشیاء بزرگ |
| شخصی‌سازی ساخت با تغییر در مدل طراحی شده‌ی کامپیوتری بر اساس نظر مشتری، بدون نیاز به هیچ سیستم ابزاری و فرآیند جدید | محدودیت برای انتخاب مواد، رنگ و پرداخت محصولات بعد از چاپ |
| هدررفت کمتر در مقایسه با روش‌های کاهشی و معمول وهمچنین قابلیت استفاده‌ی مجدد بیشتر مواد برای چاپ دوباره | قدرت تحمل محدود اشیاء ساخته شده با برخی از فرآیندهای چاپ سه بعدی |
| کاهش زمان چرخه‌ی طراحی و تولید | |
| توانایی ادغام مواد با جنس‌های مختلف | |

به تقسیم روش‌های ساخت افزودنی به هفت دسته‌ی مختلف می‌شود که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ بیان شده است [۳]. در ادامه از میان این روش‌ها تنها به فرایندهایی اشاره می‌شود که استفاده از مواد پلیمری در آن‌ها، بیشترین کاربرد را دارد.

### ۳-۱ پلیمری‌شدن مخزنی (Vat Photopolymerization)

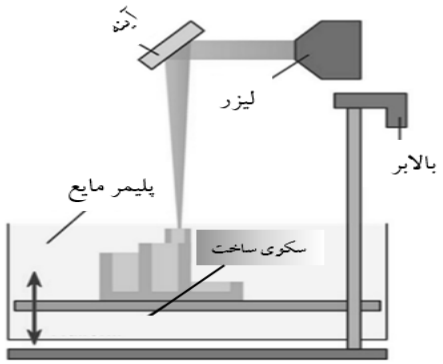
پلیمری‌شدن مخزنی، یکی از فرایندهای ساخت افزودنی است که در آن ازفوتوپلیمرهای مایع برای ساخت اشیای سه‌بعدی استفاده می‌شود [۷]. اگر این پلیمرها در معرض نور قرار گیرند، با شروع واکنشی شیمیایی، خواص شیمیایی و مکانیکی آن‌ها تغییر یافته، اصلاح می‌شوند. از پلیمرهای معروف استفاده‌شده در این فرایند می‌توان به پلی‌آمید، پلی‌ایزوپرن، رزین‌های اپوکسی و آکریلات اشاره کرد [۸]. رزین‌های اپوکسی به‌عنوان مونومرهای پلیمری‌شدن کاتیونی، خواص مکانیکی بهتری نسبت به آکریلات‌ها دارند (در پلیمری‌شدن رادیکال آزاد) و همچنین در مقابل رزین‌های آکریلات، تغییر حجم کمتر و ثبات ابعاد بیشتری از خود نشان می‌دهند [۵].

از معروف‌ترین روش‌های این فرایند، استرئولیتوگرافی (Stereolithography) است که از دو نور لیزر همدوس (Coherent) استفاده می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در این روش، سکویی برای ساخت شی سه‌بعدی درون مخزن نیمه‌شفاف حاوی رزین فوتوپلیمر مایع، غوطه‌ور می‌شود. با برخورد نور لیزر تک‌نقطه‌ای به داخل مخزن که مسیر حرکت آن توسط مدل رایانه‌ای برش‌خورده مشخص می‌شود، پلیمر، جامد می‌شود. بعد از ساخت هرلایه‌ی دو بعدی، سکو بسته به مدل دستگاه، یا به سمت بالا و یا به سمت پایین حرکت می‌کند تا لایه‌ی جدیدی از رزین روی لایه‌ی ساخته شده‌ی قبلی را بپوشاند. در نهایت، این امر تا ساخت کامل شی سه‌بعدی ادامه می‌یابد. در پایان نیز از نور فرابنفش برای بهبود خواص مکانیکی نهایی شی ساخته‌شده، استفاده می‌شود.

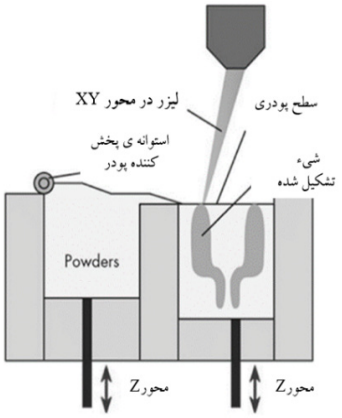
یکی از مزایای اصلی روش استرئولیتوگرافی نسبت به روش‌های دیگر چاپ سه‌بعدی موجود، قدرت تفکیک بالا است که توسط باریکه‌ی فوتون‌های اعمال‌شده تعیین می‌شود [۱]. محصول این روش، مقاومت بیشتری

جدول ۲ دسته‌بندی فرایندهای ساخت افزودنی با چاپگر سه‌بعدی [۳، ۵ و ٦]

| ردیف | نام روش فرآیند افزایش | توضیحات | ضخامت لایه (میکرومتر) | بزرگ‌ترین ابعاد ساخته شده (میلی‌متر مکعب) |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | پلیمریزاسیون مخزنی (VatPhotopolymerization) | استفاده از رزین فوتوپلیمر مایع و انجام پلیمریزاسیون توسط نور UV | ۱۵۰-۱۰۰ | ۲۱۰۰ * ۷۰۰ *۸۰۰ |
| ۲ | ذوب بستر پودری (Powder bed fusion) | استفاده ازپلیمر پودری و حرارت دادن آن توسط نور لیزر تا نزدیک به دمای ذوب | ۲۰۰-۱۰۰ | ۷۵۰ *۵۵۰*۵۵۰ |
| ۳ | افشاندن مواد (Material jetting) | استفاده از قطرات پلیمری و سخت شدن آن‌ها پس از افشانده شدن توسط نور UV | ۲۳-۱۶ | ۳۸۰*۲۵۰*۲۰۰ |
| ٤ | روزن رانی مواد (Material extrusion) | استفاده از مواد پلیمری به شکل سیم و یا فیلامنت و سپس خروج آن‌ها از یک منفذ داغ | ۲۵۰-۱۸۰ | ۹۱۴*۶۱۰*۹۱۴ |
| ۵ | افشاندن حامل (Binder jetting) | استفاده از پلیمر پودری و افشاندن ماده‌ی اتصال دهنده | ۹۰ | ۴۰۰۰*۲۰۰۰*۱۰۰۰ میلی‌متر مکعب |
| ٦ | لایه نشانی با انرژی مستقیم (Direct energy deposition) | استفاده از مواد پلیمری پودری و یا به شکل سیم و ذوب آن‌ها با لیزر ویا بیم الکترونی | ۲۰۳-۸۹ | گزارش نشده است. |
| ۷ | لایه گذاری (Sheet lamination) | اتصال صفحاتسرامیکی و یا کامپوزیتی با اولتراسونیک یا لیزر | ۱۹۰-۱۰۰ | گزارش نشده است. |




شکل ۲ ساختار دستگاه چاپگر سه‌بعدی با روش استرئولیتوگرافی [۱].




شکل ۳ ساختار دستگاه چاپگر سه‌بعدی با روش ذوب انتخابی با لیزر [۱].

نسبت به محصولاتی دارد که از پلیمری‌شدن مونومرها به روش عادی تولید می‌شوند. همچنین سطح نرم‌تر نسبت به محصولات روش ٤ و ٥ ذکر شده در جدول ۲، از مزایای دیگر این روش است. با این حال، راه‌اندازی سامانه‌های تولید افزودنی مبتنی بر استرئولیتوگرافی به‌دلیل هزینه‌های بالا در صنایع تولیدی بزرگ، رواج پیدا نکرده است.

## ۳-۲ ذوب بستر پودری (Powder Bed Fusion)

یکی دیگر از فرایندهای روش ساخت افزودنی، ذوب بستر پودری است که به نام روش ذوب انتخابی لیزر (Selective Laser Sintering) نیز معروف است [٦]. ساختار چاپگر سه‌بعدی با این روش در شکل ۳ نشان داده شده است [۱]. در این روش از مواد پلیمری پودری و لیزرهایی در ناحیه‌ی فروسرخ با طول موج‌های ۹ تا ۱۲ میکرومتر مانند لیزر دی‌اکسیدکربن برای ذوب کردن و جوش دادن مواد به یکدیگر، استفاده می‌شود [۹]. نور لیزری که توسط نرم افزار کنترل می‌شود، مواد پلاستیکی پودری را تا دمای نزدیک به نقطه‌ی ذوب آن‌ها حرارت می‌دهد [۸]. بستری که شیء سه‌بعدی بر روی آن در حال تشکیل است هم تا حدود نقطه‌ی ذوب مواد پلیمری، گرم می‌شود. بعد از تشکیل لایه‌ی اول، سکو به‌اندازه‌ی ارتفاع یک لایه پائین آمده و بعد لایه‌ی جدیدی از مواد پودری از منبع حاوی آن بر روی لایه‌ی ساخته شده‌ی قبلی توسط غلتک قرار می‌گیرد. این عمل تا پایان ساخت شیء مورد نظر تکرار می‌شود. برای حذف مواد پودری باقی‌مانده و ذوب‌نشده در ساختار شیء، از هوای فشرده استفاده می‌شود [٦]. محفظه ساخت دستگاه لیزر در بیشتر موارد با گاز بی‌اثر آرگون پر شده است تا از اکسایش در حین ذوب و سخت‌شدن پلیمر جلوگیری کند. موادی که در این روش استفاده می‌شوند، مواد گرمانرمی هستند که می‌توانند هم بی‌شکل و هم نیمه‌بلوری باشند [٥]. همچنین مواد سرامیکی سیلیکون کاربید و آلومینا با اتصال‌دهنده‌های مختلف همچون آلومینیوم، پلی‌متاکریل آمید (PMMA) و کوپلیمرها از دیگر مواد مورد استفاده در این روش هستند [۱۰].

از مزایای این روش عدم نیاز به بستر پشتیبان است، زیرا لایه‌های پودری در زیر جسم در حال ساخت، به‌عنوان بستر پشتیبان عمل می‌کنند. از طرف دیگر راه‌اندازی دستگاه ذوب انتخابی لیزر، به‌علت استفاده از منابع حرارت بالا از قبیل لیزر یا پرتو الکترونی برای مواد با دمای ذوب بالا، هزینه بالایی دارد و به‌عنوان محدودیت روش مطرح می‌شود [۱].

## ۳-۳ افشاندن مواد (Material Jetting)

افشاندن مواد یکی دیگر از فرایندهای ساخت افزودنی است. ساختار چاپگر سه‌بعدی با این فرایند در شکل ٤ نشان داده شده است. درصورتی‌که از مواد پلیمری و چند افشاننده‌ی مواد در این روش استفاده شود، نام روش Polyjet Photopolymer است. این فرایند بر اساس چاپگرهای دو بعدی ابداع شده است. در این روش، به‌جای افشاندن جوهر و چاپ عکس دوبعدی، قطره‌هایی از مواد فوتوپلیمر و گرمانرم و ماده‌ی نگه‌دارنده‌ی شی سه‌بعدی، طبق الگویی از پیش تعیین‌شده، افشانده می‌شوند [٥].

فوتوپلیمر مایع به‌طورمستقیم، در هر مرحله از ساخت تک لایه، توسط منبع داخل چاپگر، تحت تابش UV قرار گرفته و جامد می‌شود [۸]. سرعت قرارگیری قطرات پلیمری بر روی صفحه‌ی ساخت که با گرانروی مایع پلیمری در ارتباط است استفاده از مواد مختلف در این روش را محدود می‌کند [۵].

از مزایای مهم این روش، استفاده از چندین ماده با خصلت‌های مختلف است. به‌عنوان‌مثال طیف وسیعی از شفافیت، انعطاف‌پذیری، سختی و رنگ را می‌توان در جسم چاپ شده با این روش مشاهده کرد [۱۲]. بااین‌حال در این فناوری فقط از مواد مومماننند استفاده می‌شود [۱۳].

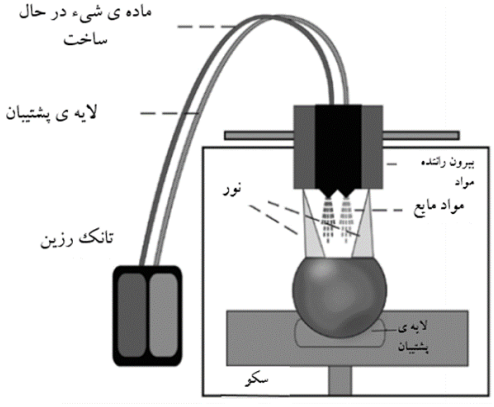
## ۳-۴ روزن رانی مواد (Material Extrusion)

فرایند روزن رانی مواد که به نام لایه ذوبی (Fused Deposition Modeling) نیز معروف است، یکی از پرطرفدارترین و به‌صرفه‌ترین فناوری‌های چاپی است که به‌طور گسترده در صنایع استفاده می‌شود. ساختار چاپگر سه‌بعدی با این فرایند در شکل ۵ نشان داده شده است [۱]. مواد در این روش به شکل سیم یا فیلامنت‌های گرمانرمی هستند که از لحاظ جنس، طیف بسیار گسترده‌ای دارند. آکریلونیتریل بوتادین-استایرن، پلی اتیلن ترفتالات، پلی کربنات، نایلون، پلی وینیل الکل و شیشه، از مواردی هستند که در این زمینه استفاده می‌شوند [۶].

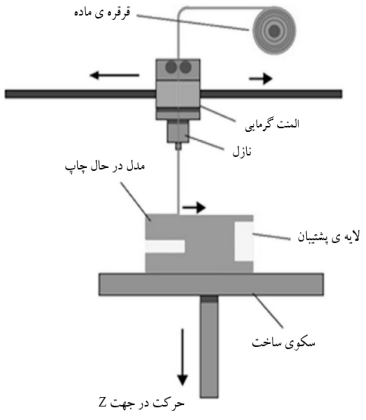
الیاف گرمانرم، از طریق منفذی داغ، نیمه جامد می‌شوند. منفذ، طبق طراحی رایانه‌ای در دو جهت X و Y حرکت می‌کند و طبق طرح، مواد بر روی سکوی متحرکی که در جهت Z حرکت می‌کند قرار می‌گیرند. سپس مواد بر روی بستر، سخت شده و لایه را تشکیل می‌دهند [۳]. با تکمیل چاپ هر لایه، سکو پایین می‌آید و این روند تا زمانی که شی در حال ساخت تکمیل شود، تکرار می‌شود [۶].

گاهی اوقات ممکن است همجوشی بین لایه‌ها ضعیف باشد که می‌تواند مقاومت ساختاری کمی را در محصولات نهایی ایجاد کند. برای مقابله با این مسئله راهکارهایی از قبیل بالا بردن درجه حرارت داخلی(جایی که سکو در آن قرار دارد) و تابش گاما به محصول نهایی پیشنهاد می‌شود [۶]. طراحی این مدل آن‌قدر ساده است که می‌توان با فرایند مشابه آن از مواد با گرانروی بالا مثل بتن، رس، بافت ارگانیک یا حتی مواد غذایی برای ساخت اشیای پیچیده‌تر، حجیم‌تر و خوراکی‌ها بهره برد [۳]. فرایند لایه ذوبی به‌دلیل ارزان بودن وسرعت بالای آن در چاپ شی سه‌بعدی، نسبت به سایر روش‌ها شناخته‌شده‌تر است.

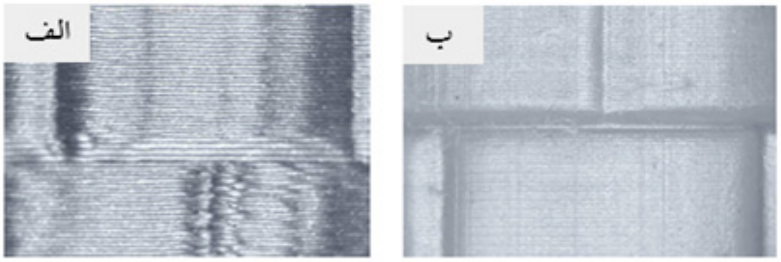
در مقایسه‌ی این چهار فرایند ساخت افزودنی، با توجه به جدول ۲ می‌توان بیان کرد که دو روش روزن رانی مواد و ذوب انتخابی لیزر، لایه‌های با ضخامت کمتری تولید می‌کنند و قدرت تفکیک بالاتری نسبت به دو روش دیگر دارند. روش روزن رانی مواد، توانایی ساخت ابعاد بزرگ‌تری را دارد و همچنین صاف بودن سطح چاپ در روش استرئولیتوگرافی بهتر از ذوب انتخابی لیزر است [۱]. شکل ۶ مقایسه‌ی قدرت تفکیک




شکل ٤ ساختار دستگاه چاپگر سه‌بعدی با فرایند افشاندن مواد [۱۱].




شکل ۵ ساختار چاپگر سه‌بعدی با فرایند روزن رانی مواد [۱].



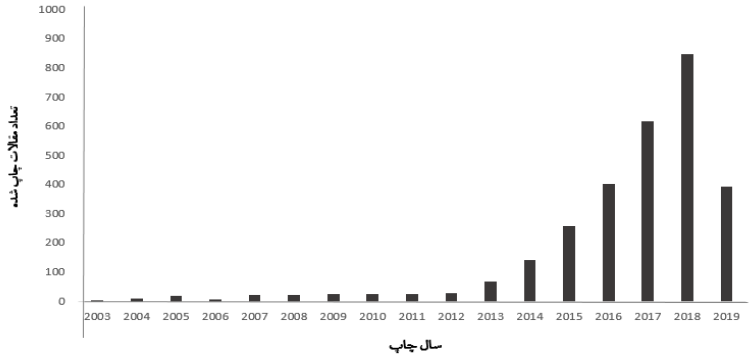

شکل ٦ مقایسه‌ی قدرت تفکیک روش الف) لایه‌ی ذوبی و ب)استرئولیتوگرافی، هردو به ضخامت ۱/۰ میلی‌متر [١٤].

برای دو روش استرئولیتوگرافی و روزن رانی مواد را نشان می‌دهد. باوجود یکسان بودن ضخامت لایه‌ها، روش استرئولیتوگرافی، سطح هموارتری را چاپ کرده است [١٤].

## ۴ روند توسعه کاربرد چاپگرهای سه‌بعدی

شکل ۷ روند افزایش مقالات چاپ شده در زمینه‌ی کاربرد پلیمرها در چاپگرهای سه‌بعدی را از سال ۲۰۰۳ تاکنون نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد تعداد مقالات چاپ‌شده در این زمینه به سرعت رو به افزایش است. بیشتر مقالات منتشر شده مربوط به معرفی روش‌های پردازش و چاپ مواد پلیمری است. همچنین در چند سال اخیر، دستاوردهای قابل توجهی در توسعه کامپوزیت‌های پلیمری قابل چاپ با عملکرد بهبود یافته وجود دارد [۷].

یکی از زمینه‌های مهم در شیمی، علم جداسازی است. این علم را می‌توان به سه بخش پیش از جداسازی (Pre-Separation)، جداسازی (Separation) و پس از جداسازی (Post-Separation) تقسیم کرد. به تازگی فناوری چاپ سه‌بعدی با ساخت ابزار پلیمری در هر سه بخش از این علم ورود پیدا کرده است. روند افزایش تعداد مقالات منتشر شده پیرامون تجهیزات و مواد تولید شده به‌وسیله‌ی چاپ سه‌بعدی که در یک یا چند نوع از روش‌های جداسازی به کار گرفته شده‌اند گواه این مطلب است [۱۵]. در بیشتر موارد کاربرد مهم فن چاپ سه‌بعدی درعلم جداسازی مربوط به ساخت تجهیزات پلیمری برای روش‌های آماده‌سازی نمونه از جمله سامانه‌های استخراجی در مرحله‌ی پیش از جداسازی، ستون‌ها و فازهای ساکن سوانگاری در بخش جداسازی و آشکارسازها و محفظه‌های تشخیصی در مرحله‌ی پس از جداسازی است که در ادامه به مثال‌هایی در هر یک از قسمت‌ها اشاره می‌شود.




شکل ۷ روند رو به رشد تعداد مقالات منتشرشده با جستجوی کلید واژه‌های چاپگرهای سه بعدی و پلیمر در موتور جستجوی اسکوپوس در بازه زمانی سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۹.

## ۵ پیش از جداسازی

آماده‌سازی نمونه در مراحل پیش از جداسازی در بسیاری از روش‌های شیمی تجزیه، گام بسیار مهمی است؛ زیرا اغلب روش‌ها در برابر نمونه‌ها پاسخ نمی‌دهند یا نتایج به‌دست آمده به‌دلیل وجود مزاحمت‌ها دچار انحراف از واقعیت می‌شود. آماده‌سازی، جزء مراحلی است که با پیچیدگی‌های زیادی همراه است و به ابزار مختلف برای استخراج نیاز دارد. با وجود چاپگرهای سه‌بعدی، تهیه‌ی این ابزار یا جاذب‌ها به مراتب ساده‌تر شده‌اند.

در بررسی‌های اخیر از روش‌های ساخت افزودنی برای تهیه‌ی جاذب‌های مورد استفاده در روش‌های پیش تغلیظ استفاده شده است؛ زیرا این روش‌ها کم‌هزینه، سریع و ساده هستند و خطاهای بالقوه‌ای که به‌علت تکرارناپذیری در تولید مجدد برخی از جاذب‌ها وجود دارد را کاهش می‌دهند. اگرچه ممکن است استفاده از این جاذب‌ها در همه‌ی موارد دقت و صحت کافی را به همراه نداشته باشد، اما از روش‌هایی که در آن‌ها از کارتریج، الیاف یا تیغه پوشیده شده از جاذب استفاده می‌شود، کم‌هزینه‌تر هستند. در اولین گزارشی که در این زمینه به چاپ رسیده است، جاذب‌های تهیه‌شده با چاپگرهای سه‌بعدی برای استخراج ترکیبات با غلظت کم و جرم مولکولی پایین مانند استروئیدها در نمونه‌های زیستی با روش ریز استخراج فاز جامد- سوانگاری مایع با کارایی بالا- طیف‌سنج جرمی (SPME-LC-MS) استفاده شده است. به‌منظور ساخت جاذب در این مطالعه از روش روزن رانی مواد استفاده شده و جاذب بدون استفاده از لایه‌ی پشتیبان چاپ شده است [۱۶]. جنس ماده‌ی سازنده‌ی جاذب، نوعی الیاف گرمانرم به نام Lay FOMM است که ساختار متخلخل دارد و در درجه حرارات بالای دمایی مشخص، قابل انعطاف و شکل‌پذیر است. این ماده از پلیمر پلاستیکی الاستومریک و پلی‌وینیل آکریلات ساخته شده است. اگر این ماده در آب قرار بگیرد قسمت پلیمری آن به‌عنوان قسمت متخلخل و انعطاف‌پذیر عمل خواهد کرد [۱۷]. شکل نهایی چاپ شده‌ی این جاذب در شکل ۸ نشان داده شده است.

## ۶ جداسازی

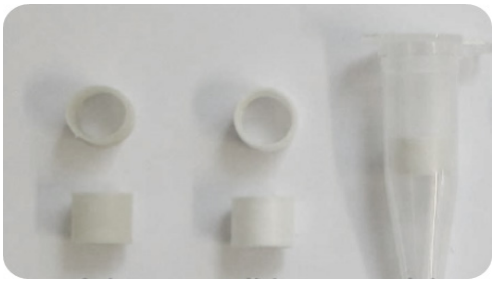
ستون‌ها و بسترهای فاز ساکن از مهم‌ترین اجزا در سامانه‌های جداسازی هستند. امکان تولید این تجهیزات به‌وسیله‌ی چاپگرهای سه‌بعدی و توسعه‌ی مداوم مواد جدید قابل چاپ، می‌تواند سامانه‌های جداسازی مانند روش‌های مختلف سوانگاری و الکتروفورز مویینه را بنابر نیاز، شخصی‌سازی کرده، دو مولفه حساسیت و انتخاب‌پذیری را افزایش دهد.

تا به حال چندین مقاله در زمینه‌ی ساخت ستون، تراشه، فاز ساکن روش‌های سوانگاری و الکتروفورز مویینه با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی، منتشر و عوامل موثر بر کیفیت کار بررسی شده است.

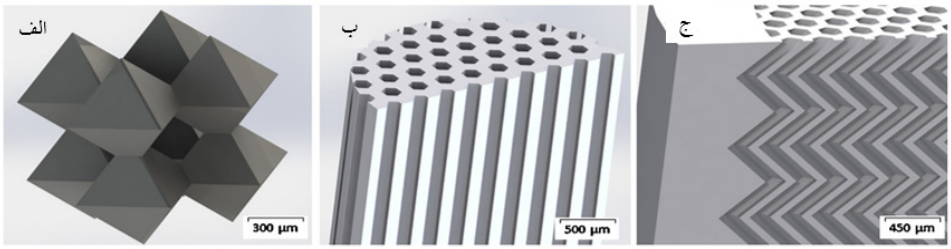
### ۶-۱ ساخت تراشه‌ی یکپارچه‌ی سوانگاری

در مقاله‌ای که توسط Conan Fee و همکاران در سال ۲۰۱٤ به چاپ رسیده است، از روش پلیمری‌شدن مخزنی(در بخش ۱-۳ توضیح داده شد) برای ساخت فاز ساکن از نوع پلیمرهای یکپارچه به‌همراه اجزای کمکی دستگاه همچون دیواره‌ی ستون، توزیع‌کننده‌ها و جمع‌کننده‌های جریان و اتصالات به دیگر اجزای دستگاه سوانگاری استفاده شده است [۱۸]. در این مطالعه بستر متخلخل با سه هندسه‌ی مختلف ساخته شده است؛ به‌طوری‌که ذرات اکتاهدرال (ارتفاع ۱۱۵ میکرومتر) در آرایش ساختمان مکعبی ساده‌ی یکپارچه، با کانال‌های موازی یا کانال‌هایی به شکل تیغ‌ماهی (Heribonge) قرار می‌گیرند. شکل ۹ این سه هندسه‌ی متفاوت را نمایش می‌دهد.

اجزای چاپ شده از الیگومرهای اورتان‌آکریلات غیر متخلخل یا ABS ساخته شده‌اند. پس از ساخت، لایه‌های پودری ABS با نور UV بهبود پیدا کرده، سخت می‌شوند. در این کار از موم پارافین به‌عنوان لایه‌ی پشتیبان استفاده شده است. پس از اتمام چاپ



شکل ۸ جاذب چاپ شده توسط چاپگر سه‌بعدی با روش روزن رانی مواد [۱۷].




شکل۹ سه طراحی مختلف هندسی برای بستر: الف) دانه‌های مکعبی ساده ب) کانال‌های موازی ج) کانال‌های استخوان ماهی [۱۸].

ستون، لایه‌ی پشتیبان با شستشوی متناوب توسط آب در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سیکلوهگزان صددرصد تا سه ساعت حذف می‌شود. قدرت تفکیک چاپگر سه‌بعدی مورد استفاده در این روش ۲۸ میکرومترگزارش شده است.

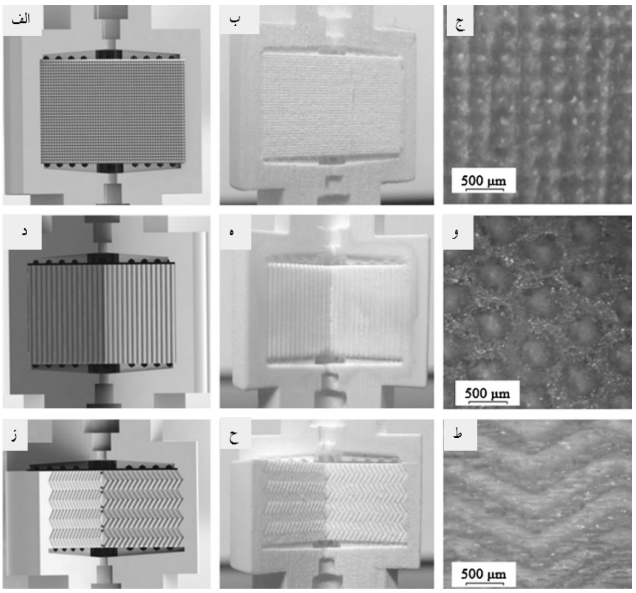
ستون‌هایی که در این مقاله به روش چاپ سه‌بعدی ساخته شده‌اند در حجم‌های ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌لیتری هستند. قطر داخلی آن‌ها ۱۶ میلی‌متر و ضخامت دیواره‌ی آن‌ها ۲ میلی‌متراست. به علاوه در این روش تراشه‌ای با تمام اجزای ذکر شده در یک مرحله ساخته می‌شوند و نیازی به سرهم‌بندی اجزا نیست.

چنین دستاوردی، این امکان را فراهم می‌کند تا ذرات بستر در جای مشخص و با جهت‌گیری ازپیش‌تعیین‌شده، قرارگرفته، همچنین در بسترهای یکپارچه، هندسه‌های دقیقی از منافذ داخلی ساخته شوند. شکل ۱۰ کنترل دقیق اندازه‌ها را در بستر ریزساختار و همبستگی بین مدل رایانه‌ای و ستون چاپ شده را در آرایش‌های هندسی مختلف نشان می‌دهد. در پایان، آزمون توزیع زمان اقامت (Residence Time Distribution)، برای مقایسه‌ی هندسه‌ی بسترها و کارایی طرح‌های مختلف توزیع‌کننده بر روی ستون‌های تهیه شده به‌کار گرفته شد.

## ۶-۲ ساخت ستون‌های سوانگاری

در مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۶ توسط Vipul Gupta و همکارانش به چاپ رسیده است، از روش ذوب انتخابی لیزر برای ساخت ستون سوانگاری از جنس آلیاژ تیتانیوم استفاده شده است. برای این منظور، محفظه‌ی مکعبی‌شکل به ابعاد ۳۰×۳۰×۵ میلی‌متر، توسط پودر آلیاژ تیتانیوم طبق روش توضیح داده شده در بخش ۳-۲، به‌صورت لایه‌لایه ساخته شده که در میان محفظه کانال دورانی محصور است. همچنین لایه‌ی پشتیبان شبکه‌ای (همانند شبکه‌ی تیتانیوم) برای اطمینان از اتصال اجزا به سکوی ساخت و صحت ابعاد مورد نظر در شی نهایی، در روند ساخت به‌کار گرفته شده است. در شکل ۱۱ کانال طراحی‌شده به همراه دو دسته با طول مساوی در سمت چپ و راست نشان داده شده است، باید به این نکته توجه کرد که اندازه‌ی کانال محصورشده در محفظه‌ی فلزی که می‌تواند توسط چاپگر چاپ شود به عوامل مختلفی همچون قدرت تفکیک چاپگر، ماده‌ی اولیه برای چاپ و پیچیدگی کانال بستگی دارد. قدرت تفکیک چاپگر با پودر تیتانیوم در این مقاله، ۰/۷۵ نانومتر در جهت X-Y و ۰/۰۲۵ میلی‌متر در جهت Z گزارش شده است. نویسندگان این مقاله ادعا دارند که روش ذوب انتخابی لیزر در صنعت چاپ سه‌بعدی، باعث تولید دقیق پیچیده‌ترین ستون با آلیاژ تیتانیوم شده است که با روش‌های دیگر غیرقابل ساخت است [۱۹].

به‌منظور کاربرد این کانال، فاز ساکن پلیمری یکپارچه بر پایه‌ی پلی(بوتیل متاکریلات-اتیلن گلیکودی متاکریلات) به روش پلیمری‌شدن حرارتی و به‌صورت درجا (In situ)، در این ستون ساخته شد. تصاویر SEM مربوط به کانال‌های ستون و فاز ساکن متصل به آن در شکل ۱۲ آورده شده است. در مقایسه‌ی کار قبلی همین تیم تحقیقاتی که از جنس استیل برای دیواره‌ی ستون استفاده شده است [۲۰]. ستون تیتانیومی به‌دلیل تفاوت در جنس دیواره‌ی ستون‌ها و پیوندهای بین دیواره و بستر فاز ساکن، پایداری هیدرولیتیکی بالاتری دارد، بنابراین سطوح، فعال‌تر و پیوندها محکم‌تر شده، سیلانی شدن راحت‌تر صورت می‌گیرد. در نهایت کارایی ستون ساخته‌شده برای جداسازی پروتئین‌ها و پپتیدها مورد

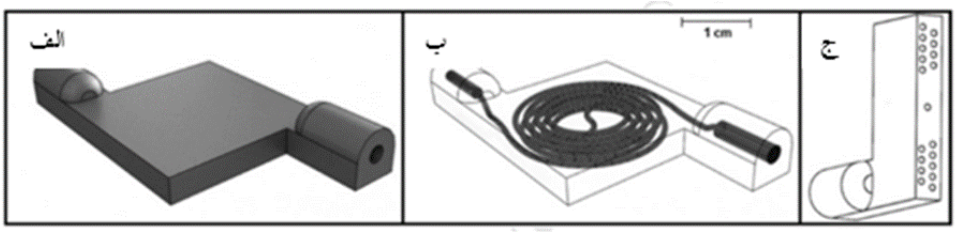



شکل ۱۰ مقایسه‌ی فایل رایانه‌ای CAD با برش ستون‌های چاپ شده. الف) مدل رایانه‌ای مکعبی ساده. ب) مدل مکعبی چاپ شده. ج) دانه‌های مکعبی ساده با ۲۰ برابر بزرگ‌نمایی. د) مدل رایانه‌ای آرایش موازی. (ه) مدل چاپ شده آرایش موازی. (و) آرایش موازی با ۲۰ برابر بزرگ نمایی. ز) مدل رایانه‌ای آرایش استخوان ماهی (ح) مدل چاپ شده‌ی آرایش استخوان ماهی(ط) آرایش استخوان ماهی با ۲۰ برابر بزرگ نمایی [۱۸].

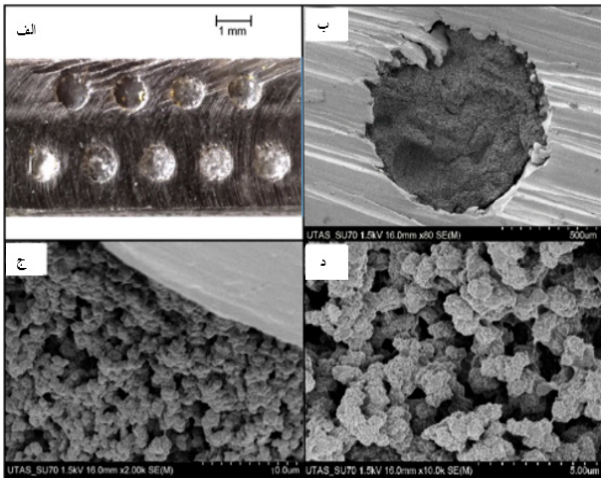
بررسی قرار گرفت و در مقایسه با فاز ساکن مشابه، نتایج قابل قبولی به‌دست آمد [۲۱].

## ۳-۶ ساخت ریزساختارها با فناوری چاپ سه‌بعدی برای سوانگاری مسطح

سوانگاری لایه نازک یا مسطح، روشی برای جداسازی مخلوط‌های غیرفرار است. در این روش به‌طور معمول جاذبی متشکل از موادمعدنی (سیلیکا یاآلومینا) یا مواد آلی (سلولز یا پلی‌آمید) استفاده می‌شود که بر روی صفحه نگه‌دارنده ثابت شده‌است. نمونه بعد از قرارگیری بر روی صفحه، توسط حلال یا مخلوطی از حلال‌های مناسب بر اساس پدیده‌ی موئینگی به حرکت در می‌آید. پیشرفت‌های اخیر در این زمینه، استفاده از بسترهای جدید و مینیاتورسازی برای جداسازی مخلوط‌های غیرفرار است. در مطالعه‌ای که به تازگی در این زمینه به چاپ رسیده است، بستر پلیمری برای سوانگاری صفحه‌ای با استفاده از روش ساخت افزودنی به‌طور مستقیم چاپ شد که از لحاظ اندازه و ضخامت صفحه، از آن با عنوان ریزساختار یاد شده است. روش ساخت این وسیله افشاندن مواد است که در بخش ۳-۳ توضیح داده شد.




شکل ۱۱ طراحی ستون‌های آلیاژ تیتانیوم: الف) تصویر ستون چاپ‌شده با چاپگر سه‌بعدی، ب) نمای دورانی ستون به همراه دو دسته و ج) سطع مقطع عرضی [۱۹].




شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از بستر پلیمری یکپارچه BuMA-co-EDMA که به‌صورت In situ درون ستون آلیاژ تیتانیوم، چاپ شده با چاپگر سه‌بعدی، قرار گرفته است. تصویر الف) برش عرضی و نمایش حضور پلیمر در کانال‌ها، ب) تصویر SEM نمایش کانال منفرد و پوشش بستر یکپارچه در سطح دارای پستی و بلندی کانال، ج) تصویر SEM بستر فاز ساکن و دیواره‌ی ستون، د) تصویر SEM از ساختارهای کروی کوچک و منافذ بین آن‌ها [۱۹].

شکل ۱۳ طراحی این صفحه را نشان می‌دهد. کانال‌ها در هر دو طرف بشقابک تولید می‌شوند و طراحی آن‌ها به‌گونه‌ای است که هیچ‌گونه راه ارتباطی بین کانال‌های دو سمت بشقابک وجود نداشته باشد. طول و ضخامت این ریزساختار بر صفحه‌ی X-Y و عرض آن در جهت حرکت سکو تولید شده است. ضخامت لایه‌های پلیمری بستر فاز ساکن، ۱۶میکرومتر است و این همان قدرت تفکیک چاپگر سه‌بعدی است.

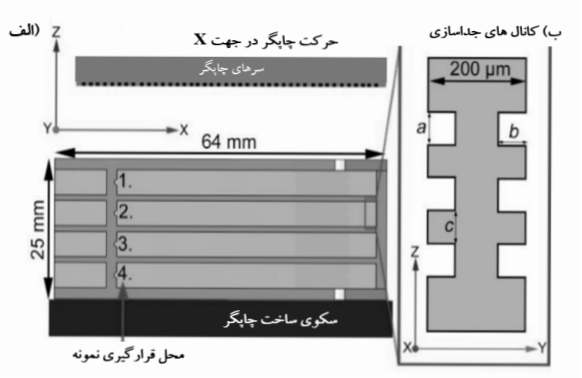
در این بررسی ضخامت لایه‌هایی که کانال‌های جداسازی را به وجود می‌آورند و جهت‌گیری کانال‌های جداسازی درون تراشه، تغییر داده شده است. جهت جریان برای انجام عمل جداسازی وابسته به جهت چاپ است. موازی بودن سرهای چاپگر با تراشه‌ی در حال چاپ (جهت X) یا عمود بودن این دو نسبت به هم (جهت Z)، دو امکان متفاوت برای چاپ است [۲۲].

جنس ماده‌ی چاپ، فوتوپلیمری است که از مخلوط مونومر آکریلیک/ الیگومرآکریلیک، آغازگر نوری و استرآکریلیک اسید ساخته شده و به نام "Veroclear" معروف است. این ماده رزینی شفاف است. نتایج ویژه‌شناسی نشان دادند بستری که از پلیمری شدن این ماده تشکیل می‌شود دارای بار منفی بوده، غنی از گروه‌های کربونیلی، استری، آمیدی و گروه‌های زنجیره‌ای آلیفاتیک و آروماتیک است. لایه‌ی پشتیبان در ساخت این صفحه، ماده‌ای ژل مانند به نام SUP707 است که در آب حل می‌شود.

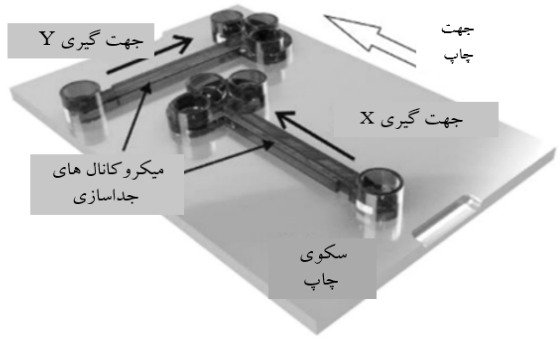
حجم تزریق به این سامانه ۰/۵میکرولیتراست. از دیگر مزایای این سامانه، ساخت تک‌مرحله‌ای و قابلیت استفاده‌ی مجدد آن است. به‌منظور ارزیابی کارایی جداسازی بستر ساخته شده به روش چاپ سه‌بعدی، آزمایشی بر روی رنگدانه‌های محلول در آب انجام شد و نتایج این آزمایش با نتایج حاصل از بستری از جنس سلولز مورد مقایسه قرار گرفت.

## ۶-۴ ساخت تراشه‌ی ژل الکتروفورز لوله‌ی مویین با چاپگرهای سه‌بعدی

در این مقاله برای اولین بار، کاربرد موفقیت‌آمیز چاپگرهای سه‌بعدی به روش افشاندن مواد برای ساخت تراشه ریزسیال ژل الکتروفورز موئینه ارائه شده است. شکل ۱۴ طرح‌واره این تراشه را نشان می‌دهد [۲۳]. با توجه به روش انتخاب‌شده در چاپ سه‌بعدی، همان‌طور که در بخش ۳-۳ توضیح داده شد، این تراشه‌ها می‌توانند از مواد پلیمری همچون شیشه، سیلیکون، پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) و مخلوطی از دیگر پلیمرها با شیشه ساخته شوند. در این مطالعه




شکل۱۳ سوانگاری مسطح چاپ‌شده با استفاده از چاپ سه‌بعدی. الف) تراشه‌ی سوانگاری صفحه‌ای به همراه ٤ صفحه‌ی جداسازی. ب) طراحی سامانه از جهت محور X [۲۲].




شکل ١٤ طرح جهت گیری تراشه (میکروکانال جداسازی) در رابطه با جهت چاپ [۲۳].

پلاستیک بادوام و نیمه‌شفافی به نام VisiJet M3 Crystal برای ساخت این تراشه استفاده شده است که خاصیت فلوئورسانسی ندارد و امکان استفاده از آشکارساز فلوئورسانس را فراهم می‌کند. لایه‌ی پشتیبان، ماده‌ای موم مانند از جنس پلاستیک به نام VisiJet S300 است. این ماده، در آب نامحلول بوده، توسط حرارت و ذوب شدن، از ساختار نهایی حذف می‌شود. کاهش طول ستون جداسازی از چند ده دسی‌متر به چند سانتی‌متر یا کمتر در این طراحی باعث شده تا زمان هر آزمون به‌طور قابل توجهی کاهش یابد.

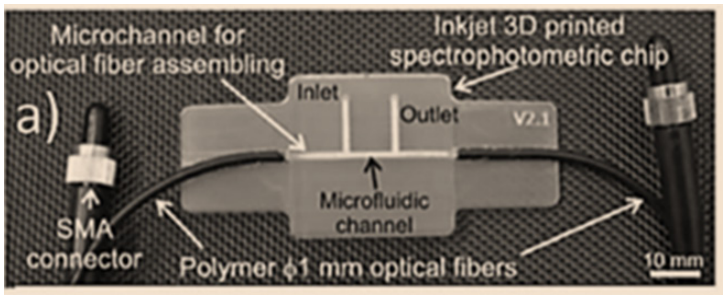
به علاوه در این طراحی ولتاژهای بسیار پایین‌تر می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند و محل تزریق و تشخیص نمونه را می‌توان یکپارچه کرد. قدرت تفکیک در جهت Z در کمترین مقدار خود، ١٦ میکرومتر گزارش شده است. زمان و هزینه‌ی ساخت، مولفه‌های دیگری هستند که می‌توانند برتری روش ساخت افزودنی را به‌وضوح نشان دهد. روش‌های عادی ساخت این وسیله بین ۲ الی ۳ روز زمان برده، به‌طور تقریبی حدود ٤٠ یورو برای هر تراشه هزینه‌بر است. اما برای همان تراشه با روش ساخت افزودنی، این اعداد به ترتیب، به ۳ ساعت و ۰/٦ یورو کاهش می‌یابد.

## ۷ پس از جداسازی (Post-Separation)

در سال‌های اخیر تجهیزات مختلفی برای مراحل پس از جداسازی، از جمله معرفی نمونه یا حدفاصل‌های اتصال سامانه جداسازی به انواع سامانه‌های تشخیص و بدنه یا محفظه‌ی آشکارسازها، با استفاده از چاپ سه‌بعدی ساخته شده‌اند. دستیابی به اجزای پیچیده، باریک و توخالی در آشکارسازها با روش‌های معمولی بسیار سخت است. با وجود چاپگرهای سه‌بعدی این امر بسیار ساده شده است. امروزه در زمینه ساخت دستگاه‌های طیف‌سنجی با ویژگی‌های خاص، از فناوری چاپ سه‌بعدی استفاده می‌شود. در گزارش منتشر شده، تراشه‌ای با قطر کانال ۸۰۰ میلی‌متری و طول مسیر تشخیص نوری ۱۰ میلی‌متری به‌عنوان قسمتی از سامانه اسپکتروفوتومتر، با استفاده از روش افشاندن مواد ساخته‌شده که توسط الیاف‌های نوری پلی‌متاکریل‌آمید (PMMA) به منبع نور و آشکارساز متصل شده است. سازندگان این سامانه این تراشه را جایگزین مناسبی برای ظروف محتوی نمونه (کووت پلاستیکی (Cuvett)) می‌دانند [٢٤]. شکل ۱۵ طرح‌واره این تراشه را به همراه الیاف‌های نوری پلیمری نشان می‌دهد.

## ۸ نتیجه‌گیری

تمرکز این مقاله‌ی مروری بر بررسی نقش روش چاپ سه‌بعدی در ساخت محصول‌های پلیمری است که به‌سرعت در حال جایگزینی با روش‌های معمولی است. در این روش طرح‌های پیچیده، با نرم‌افزارهای رایانه‌ای در یک مرحله قابل طراحی هستند و در ادامه اشیایی با ابعاد دقیق و صحیح ساخته می‌شوند. تمام




شکل ۱۵ تراشه‌ای برای مشخصه‌یابی اسپکتروفوتومتری سیالات به همراه فیبرهای نوری پلیمری [۲٤].

فرایندهای به‌کارگرفته شده در این فناوری باید با دقت و صحت کامل، همان شی طراحی شده را با جزئیات چاپ کنند؛ ویژگی‌های مکانیکی قابل انتظار را برآورده سازند؛ در مقایسه با روش‌های معمولی کم‌هزینه‌تر یا دست‌کم قابل مقایسه باشند، قدرت تفکیک را با توجه به هدف مورد نظر فراهم کنند، در کوتاه‌ترین زمان عمل کنند، با موادی که متناسب با نوع فناوری چاپگر موردنظر هستند، شی مورد نظر را ساخته و کم‌ترین هدررفت را در مصرف مواد داشته باشند. در نهایت این‌که اگرچه برای قطعات بزرگ و انتخاب برخی از مواد، محدودیت وجود دارد، اما با توجه به مزیت‌های ذکر شده، برطرف کردن این محدودیت‌ها نیز قابل پیش‌بینی است؛ به‌طوری که تاکنون بزرگ‌ترین شی سه‌بعدی در حال چاپ با چاپگرهای سه‌بعدی، هواپیماهایی با قطعات کامپوزیتی است.

## ۹ نگاهی به آینده

علاوه بر آن‌که فناوری و انواع فرایندهای چاپ سه‌بعدی در حال رشد و توسعه است و به‌سرعت در تمام زمینه‌ها ورود پیدا می‌کند، اما در کنار این موضوع، چاپ چهاربعدی هم نگرشی است که به‌زودی به فناوری بسیار مهمی تبدیل خواهد شد. چاپ چهاربعدی نوعی از چاپ سه‌بعدی است که در آن، شی سه‌بعدی پس از ساخت، به‌دلیل ویژگی ذاتی، به خودی‌خود تغییر شکل می‌دهد و شکل نهایی را ایجاد می‌کند. این تغییر شکل ذاتی در اثر پاسخ به عوامل محیطی بسیاری همچون فشار، دما، نور، آب، باد و ... است.

## تقدیر و تشکر

از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه الزهرا (س) بابت حمایت‌های صورت گرفته قدردانی می‌شود.

# مراجع


1. Dizon J. R. C., Espera A. H., Chen Q., Advincula R. C., Mechanical Characterization of 3D-printed Polymers, *Additive Manufacturing* , 20, 44–67, **2018**.

2. Su A., & Al'Aref S. J., History of 3D Printing. 3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine, Academic, USA, **2018**.

3. Zhang Y., Jarosinski W., Jung Y.-G., Zhang J., Additive Manufacturing processes and equipment, *Additive Manufacturing*, Butterworth-Heinemann, UK, **2018**.

4. Perry C., What is 3D Printing? The Definitive Guide | 3D Hubs. https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/. htm available in 25, **2019**.

5. González-Henríquez C. M., Sarabia-Vallejos M. A., Rodriguez-Hernandez J., Polymers for Additive Manufacturing and 4D-printing: Materials, Methodologies, and Biomedical Applications, *Progress in Polymer Science* , 94, 57–116, **2019**.

6. Gross B., Lockwood S. Y., Spence D. M., Recent Advances in Analytical Chemistry by 3D printing, *Analytical Chemistry*, 89, 57–70, **2017**.

7.Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J., Hui D., 3D Printing of Polymer Matrix Composites: A Review and Prospective, *Composites Part B: Engineering* , 110, 442–458, **2017**.

8.Pandey, R., Photopolymers in 3D Printing Applications MSc Thesis, Arcada, 2014.

9. Ko D.-H., Gyak K.-W., Kim D.-P., Emerging Microreaction Systems Based on 3D Printing Techniques and Separation Technologies, *Flow Chemistry*, 7, 72–81, **2017**.

10.Hon K., Gill T., Selective Laser Sintering of SiC/Polyamide Composites, CIRP Annals, 52, 173–176, **2003**.

11.Groth C., Kravitz N. D., Jones P. E., Graham J. W., Redmond W. R., Three-dimensional Printing Technology, *Journal of Clinical Orthodontics*, 48, 475–485, **2014**.

12. Molitch-Hou M., Overview of Additive Manufacturing Process, Additive Manufacturing, Butterworth-Heinemann, UK, **2018**.

13. Material Jetting - Additively. https://www.additively.com/en/learn-about/material-jetting. htm available in 27, **2019**.

14. Grieser, F.,What Resolution Can 3D Printers Print? | All3DP. https://all3dp.com/3d-printer-resolution/. htm available in 26, **2019**.

15. Kalsoom U., Nesterenko P. N., Paull B., Current and Future Impact of 3D Printing on the Separation Sciences, *Trends in Analytical Chemistry*, 105, 492–502, **2018**.

16. Konieczna L., Belka M., Okońska M., Pyszka M., Bączek T., New 3D-printed Sorbent for Extraction of Steroids from Human Plasma Preceding LC–MS Analysis, *Journal of Chromatography A*, 1545, 1–11, **2018**.

17. Belka M., Ulenberg S., & Bączek T., Fused Deposition Modeling Enables the Low-Cost Fabrication of Porous, Customized-Shape Sorbents for Small-Molecule Extraction, *Analytical Chemistry*, 89, 4373–4376, **2017**.

18. Fee C., Nawada S., Dimartino S., 3D printed Porous Media Columns with Fine Control of Column Packing Morphology, *Journal of Chromatography A*, 1333, 18–24, **2014**.

19. Gupta V., Talebi M., Deverell J., Sandron S., Nesterenko P. N., Heery B., Paull B., 3D Printed Titanium Micro-Bore Columns Containing Polymer Monoliths for Reversed-Phase Liquid Chromatography, *Analytica Chimica Act,* 910, 84–94, **2016**.

20. Sandron S., Heery B., Gupta V., Collins D. A., Nesterenko E. P., Nesterenko P. N., Paull B., 3D printed Metal Columns for Capillary Liquid Chromatography, *Analyst*, 139, 6343–6347, **2014**.

21. Vonk R. J., Vaast, A., Eeltink S., Schoenmakers P. J., Titanium-scaffolded Organic-Monolithic Stationary Phases for Ultra-High-Pressure Liquid Chromatography, *Journal of Chromatography A*, 1359, 162–169, **2014**.

22. Macdonald N. P., Currivan S. A., Tedone L., Paull B., Direct Production of Microstructured Surfaces for Planar Chromatography Using 3D Printing, Analytical Chemistry, 89, 2457–2463, **2017**.

23. Walczak R., Adamski K., Kubicki W., Inkjet 3D Printed Chip for Capillary Gel Electrophoresis, Sensors and Actuators, *B: Chemica*l, 261, 474–480, **2018**.

24. Adamski K., Kubicki W., & Walczak R., Inkjet 3D Printed Microfluidic Devices, MIXDES - 23rd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, Poland, **2016**.