

## بررسی انواع روش‌های مختلف ساخت ریزراکتور و شبیه‌سازی آن‌ها

بهزاد انتظاری<sup>۱</sup>، محمد کاظمینی<sup>۲\*</sup>، محمد کرمی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۳/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۸/۰۸

پیام‌نگار: kazemeini@sharif.edu

### چکیده

ساخت تجهیزات در مقیاس ریز (میکرو) یکی از پیشرفت‌های اخیر در علوم مهندسی به‌شمار می‌آید. در این زمینه، ساخت ریزراکتورها از مواردی است که به پیشرفت چشمگیر در علوم شیمی و مهندسی شیمی منجر شده است. استفاده از ریزراکتور به جای راکتورهای متداول آزمایشگاهی باعث کاهش چشمگیر هزینه تحقیقات خواهد شد. این در حالی است که انجام برخی واکنش‌ها در راکتورهای متداول امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل، در صنعت نیز در مواردی که نمی‌توان واکنش را در راکتورهای متداول انجام داد از ریزراکتورها بهره می‌گیرند. در این تحقیق مراحل ساخت ریزراکتور به طور کامل شرح داده شده است. انتخاب طرح، بررسی طرح، انتخاب جنس و ساخت، چهار مرحله اصلی در تولید هر ریزراکتور به‌شمار می‌آیند. با توجه به این‌که رفتار پدیده‌های انتقال حرارت، انتقال جرم، توزیع سیال و رژیم جریان با کاهش مقیاس تجهیز تغییر می‌کند، شبیه‌سازی ریزراکتور قبل از مرحله ساخت در انتخاب طرح مناسب برای راکتور از اهمیتی خاص برخوردار است.

کلیدواژه‌ها: ساخت، ریزراکتور، بررسی طرح، مقیاس میکرو، شبیه‌سازی، CFD

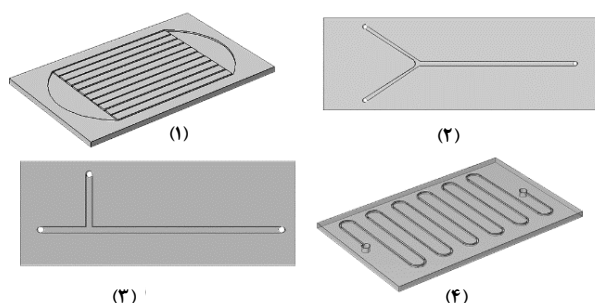
### ۱. مقدمه

بهبود باید. کاربرد این نوع راکتورها در واکنش‌های دو فازی، سبب تماس بیشتر واکنش‌دهنده‌ها و در نتیجه افزایش سرعت واکنش نیز خواهد شد؛ بنابراین، واکنش‌های دارای محدودیت انتقال جرم در ریزراکتورها مدت زمان اقامت کوتاهتری نسبت به سامانه‌های مرسوم خواهند داشت. از معایب سامانه‌های ریز، محدود بودن رژیم جریان (فقط جریان آرام در آن‌ها برقرار می‌شود) است که به دلیل قطر کم کانال‌ها اتفاق می‌افتد. از سوی دیگر، چون رژیم جریان در کانال‌ها آرام است، اختلاط توده سیال در چنین سامانه‌هایی با مشکل مواجه می‌شود.

به راکتوری که واکنش شیمیایی در آن درون کانال‌هایی در ابعاد کوچکتر از ۱mm انجام شود ریزراکتور (راکتور ریزساختار یا راکتور ریزکانال) گفته می‌شود. مهم‌ترین دلیل برای جایگزینی راکتورهای ریز به جای راکتورهای مرسوم، رسیدن به شرایط عملیاتی خاص است که در راکتورهای متداول نمی‌توان به آن دست یافت. نسبت مساحت به حجم بالا در ریزراکتورها سبب می‌شود توزیع ماده (انتقال جرم) و انرژی (انتقال حرارت) در واکنش‌های شیمیایی

\* تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

حضور کاتالیست، نیاز به اختلاط، تولید (صرف) شدید حرارت و دیگر ویژگی‌ها انتخاب می‌شود. در انتخاب طرح باید به روش ساخت و جنس راکتور نیز توجه کرد، به طوری که انتخاب طرح‌های پیچیده باعث افزایش هزینه‌های ساخت راکتور خواهد شد [۳]. باید در نظر داشت که طراحی‌های خاص فقط با ابزار مخصوص ساخته می‌شوند. در شکل (۱) برخی از طرح‌های متداول در ریزراکتورها نمایش داده شده است.



شکل ۱. طرح‌های مختلف راکتورهای ریز.

غالباً از راکتورهای چند کاناله (۱) برای واکنش‌های تک فاز استفاده می‌شود. برای سیستم‌های دو فازی مایع-مایع می‌توان از یک کانال مستقیم و یک ریزهمزن (۲) برای ایجاد یک فصل مشترک در طول کانال (دو فاز پیوسته) بهره گرفت. علاوه بر آن، برای تشکیل قطره در سیستم‌های دو فازی مایع-مایع (یک فاز پیوسته و یک فاز پخش شده) از جریان متقاطع (۳) می‌توان سود جست. برای راکتور با بستر پر شده کاتالیستی از ریزراکتورهای تک کانال (۴) بهره می‌گیرند. از سوی دیگر، انتخاب روش ورود و خروج جریان به راکتور نیز از مواردی است که در انتخاب طرح باید به آن توجه کرد.

### ۳. بررسی و شبیه‌سازی طرح

توزیع جریان داخل تجهیزات از مواردی است که قبل از ساخت، در مرحله طراحی بررسی می‌شود. ساخت تجهیزات ریز نیز از این قاعده مستثنی نیست و قبل از ساخت لازم است نحوه‌ی توزیع جریان داخل تجهیزات بررسی شود. شبیه‌سازی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup>، ابزاری است که اغلب در این زمینه به کار گرفته می‌شود [۳]. از مهم‌ترین مواردی که در شبیه‌سازی جریان به کمک

کاربرد ریزراکتورها در تحقیقات هزینه‌ها را به شدت کاهش می‌دهد، زیرا واکنش در حجم کمتر انجام می‌شود و به واکنش‌دهنده کمتری برای پیش بردن واکنش و پر کردن راکتور نیاز است. از سوی دیگر، حجم کم ریزراکتورها برای واکنش‌های به شدت گرمازا و با انفجاری مناسب است، چون کاهش حجم خطر انفجار را کاهش خواهد داد. علاوه بر آن، به دلیل تولید محصول در حجم کم، می‌توان در این راکتورها واکنش‌هایی را با ایمنی بیشتر پیش برد که محصولات سمی و خطرناک تولید می‌کنند [۱].

امروزه، برای کاهش هزینه‌های تحقیقات تلاش می‌شود به جای راکتوری تحقیقاتی با مقیاس بزرگ، ریزراکتورها را بنشانند. از سوی دیگر، در صنعت نیز در مواردی که نمی‌توان واکنش‌ها را در راکتورهای مرسوم انجام داد، از ریزراکتورها بهره می‌برند؛ مثلاً، امروزه تولید داروها، تولید نیتروگلیسرین و حذف اکسیدهای نیتروژن از گازهای حاصل از احتراق در ریزراکتورها انجام می‌گیرد [۲]. با این احوال، طراحی و تولید راکتورهایی در ابعاد میکرو بسیار پیچیده و زمان بر است و از تمام قواعد متداول طراحی نمی‌توان در طراحی تجهیزات ریز سود جست. بنابراین، در این تحقیق روش‌های مناسب طراحی ریزراکتورها مطالعه شده است. انتخاب طرح، بررسی طرح، انتخاب جنس و ساخت راکتور، چهار مرحله‌ی اصلی در تولید ریزراکتورها به‌شمار می‌آیند. برای ساخت هر ریزراکتور در اولین مرحله، طرح مورد نظر بر اساس مشخصات سیال و سیستم واکنشی انتخاب می‌شود. قطر، طول و مقطع کانال از مواردی است که در این مرحله باید تعیین شود. سپس، در مرحله بررسی طرح، مشکلات احتمالی طرح انتخاب شده با بهره‌گیری از شبیه‌سازی مطالعه می‌شود. اگر نتوان مشکلات طرح را در این مرحله رفع کرد، لازم است طرح تغییر کند و یا بهبود یابد. پس از انتخاب طرح مناسب و بررسی آن، جنس راکتور با توجه به خواص سامانه واکنشی (خورندگی سیال، دما، فشار و دیگر خواص) تعیین می‌شود. در آخرین مرحله، یکی از روش‌های ساخت برای تولید راکتور انتخاب و راکتور تولید می‌شود. در ادامه هر یک از مراحل تولید ریزراکتور تشریح می‌شود.

### ۲. انتخاب طرح

طرح راکتور بر مبنای ویژگی‌های سامانه، مانند دو فازی بودن،

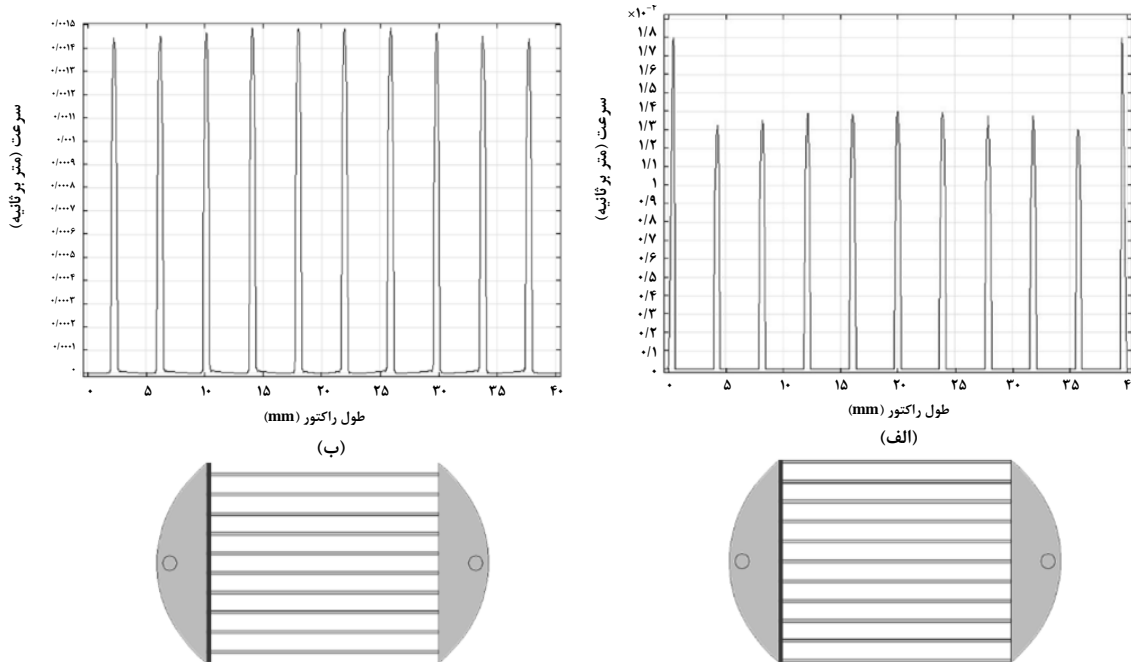
1. Computational Fluid Dynamic (CFD)

جریان در داخل کانال‌ها بررسی شود. از سوی دیگر، علاوه بر توزیع جریان، توزیع دما نیز باید برای واکنش‌های به شدت گرمازا و به شدت گرماگیر (به خصوص واکنش‌های کاتالیستی) بررسی شود. باید گفت که با توجه به انتقال حرارت بالای ریزراکتورها، بررسی توزیع دما در واکنش‌هایی با تولید (مصرف) حرارت پایین لزومی ندارد. برای بررسی توزیع دما در راکتور، باید معادله توزیع دما با استفاده از روش‌ها عددی حل شود.

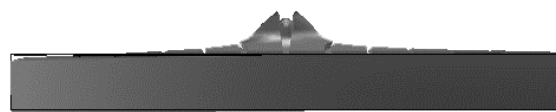
علاوه بر بررسی توزیع جریان و دما در طرح انتخاب شده برای رفع مشکلات طرح، در مواردی بررسی مشکلات ایجاد شده در مرحله ساخت نیز ضروری است. مثلاً، در بهره‌گیری از لیزر برای حکاکی، حرارت نقطه‌ای بالای ایجاد شده توسط لیزر باعث تغییر شکل (برای مواد فلزی) یا تخریب (برای مواد شکننده مثل شیشه) قطعه‌ی نهایی خواهد شد. در زیر، نمونه‌ای از شبیه‌سازی انبساط حرارتی ناشی از عملکرد لیزر بر روی سطح فولاد نمایش داده شده است [۱۲].

دینامیک سیالات محاسباتی باید بررسی شود، نحوه ورود و خروجی سیال (شاره)، توزیع جریان بین کانال‌ها (در ریزراکتورهای چند کانال)، افت فشار کانال و الگوی جریان داخل کانال است. مثلاً، توزیع جریان آب در دمای محیط و فشار یک اتمسفر در دو نوع ریزراکتور با کانال کناری (طرح الف) و بدون کانال کناری (طرح ب) در تصاویر زیر مشاهده می‌شود.

اگر سرعت در مقطع ورودی به کانال‌ها (خط قرمز نشان داده شده بر روی شکل) را ترسیم کنیم، به نمودار (الف) و (ب) خواهیم رسید. همان طور که در نمودار (الف) دیده می‌شود، سرعت جریان در کانال‌های کناری بیش از کانال‌های مرکزی است. در نتیجه، می‌توان گفت استفاده از چنین طرحی باعث ایجاد خطای شدید در نتایج حاصل خواهد شد، زیرا زمان اقامت در کانال‌های مختلف یکسان نیست. با حذف کانال‌های کناری و بررسی دوباره جریان در مقطع ورودی به کانال‌ها، می‌بینیم توزیع سرعت به نحو چشمگیری بهبود یافته است. بنابراین، لازم است پیش از ساخت ریزراکتور توزیع



شکل ۲. بررسی توزیع سرعت در یک ریزراکتور.



شکل ۳. نمایش توزیع دمای و انبساط حرارتی در اثر حکاکی با لیزر بر روی فولاد.

راکتور نیز از مواردی است که باید در انتخاب جنس مورد توجه قرار گیرد. ریزراکتورها را می‌توان از موادی مانند سرامیک، بسپار، اپوکسی، فولاد ضد زنگ، شیشه، تفلن و سیلیکون ساخت. ریزراکتور ساخته شده از هر یک از این مواد، فناوری ساخت و ویژگی‌های خاص خود را دارد. در ادامه به بررسی و مقایسه متداول‌ترین مواد برای ساخت ریزراکتور پرداخته شده است [۳ و ۴].

جدول ۱. معایب و مزایای جنس‌های مختلف ساخت ریزراکتور.

جنس ماده	روش ساخت	مزایا	معایب
فلزات، آلومینیم، فولاد، نیکل، مس	ماشینکاری دقیق، حکاکی تر، لیزر، شکل‌دهی، ذوب‌گزینشی با لیزر	استقامت در برابر دما و فشار بالا، ظرفیت گرمایی پایین، رسانایی حرارتی بالا، وجود تجهیزات استاندارد ورودی و خروجی	خوردگی شیمیایی، ساخت با روش لیزر برای فلزات سخت هزینه‌بر است، تخلخل پایین، ناشفافیت، وزن زیاد
سرامیک، مواد سیلیکونی	استرلیتوگرافی، قالب‌گیری، پرتاب پودر، لیزر	مقاومت در دماهای بالا، پایداری شیمیایی، تخلخل بالا	دقت پایین در مرحله ساخت، هزینه زیاد ساخت، ظرفیت گرمایی بالا، رسانایی حرارتی پایین
شیشه، فیوزد سیلیس	فوتولیتوگرافی، پرتاب پودر، حکاکی، لیزر، ماشینکاری دقیق	مقاومت شیمیایی بالا، شفافیت	ناپایداری در برابر ضربه حرارتی، استقامت پایین در برابر دما و فشار بالا، مشکل اتصال ورودی و خروجی
بسپارها، پلی‌متیل متاکریلات، تفلن	لیزر، تزریق، ماشینکاری دقیق، ذوب‌گزینشی با لیزر	ساخت سریع، هزینه کم مواد و ساخت، شفافیت، مقاومت شیمیایی مناسب	استقامت پایین در دما و فشار بالا، ناسازگاری با حلال‌ها آلی

به دلیل هزینه کم ساخت و شفافیت، اغلب اولین پیشنهاد برای ساخت ریزراکتور شیشه و بسپار است. راکتورهای ساخته شده از

تمرکز لیزر روی سطح باعث ایجاد یک نقطه داغ روی سطح می‌شود که در آن داغ‌ترین نقطه‌ی سطح  $25\mu\text{m}$  انبساط (انبساط حرارتی روی تصویر بزرگ‌نمایی شده است) یافته است. علاوه بر آن، انبساط نقطه‌ای سطح باعث ایجاد تنش حرارتی و در نهایت اعوجاج محصول نهایی خواهد شد. بنابراین، در مرحله بررسی طرح می‌توان با شبیه‌سازی، ضخامت مناسب برای جلوگیری از اعوجاج محصول نهایی را به دست آورد.

#### ۴. ساخت

به طور کلی، روش‌های ساخت تجهیزات ریز به سه دسته‌ی سازنده<sup>۱</sup>، خورنده<sup>۲</sup> و تغییر شکل تقسیم‌بندی می‌شود. در ساخت راکتورهای ریز می‌توان از روش‌های مختلفی از جمله حکاکی، ماشینکاری، ذوب‌گزینشی با لیزر<sup>۳</sup>، قالب‌گیری و شکل‌دهی سود جست. ذکر این نکته لازم است که برخی روش‌ها منحصراً برای ساخت جنس خاصی به کار می‌روند؛ علاوه بر آن، در انتخاب روش ساخت، باید به مواردی مانند کیفیت سطح، عمق کانال‌ها، جنس انتخاب شده برای ساخت و دیگر عوامل نیز توجه کرد. در مواردی، مرحله‌ی ساخت خود باعث ایجاد مشکل در محصول نهایی (راکتور ساخته شده) خواهد شد [۳]. در برخی روش‌های ساخت، لازم است که طرح راکتور به کمک نرم‌افزارهای طراحی مانند سالیدورکز<sup>۴</sup>، کتیا<sup>۵</sup> و اتوکد<sup>۶</sup> به دقت ایجاد شود. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به ماشینکاری دقیق، حکاکی با لیزر و ذوب‌گزینشی اشاره کرد، که دستگاه‌های مربوطه برای تولید طرح نیاز به فایل کامپیوتری طرح دارند. ایجاد طرح کامپیوتری با نرم‌افزارهای یاد شده به دلیل قابلیت‌های زیاد چون طراحی دقیق، ترسیم آسان، بصری‌سازی و موارد دیگر باعث بهبود طراحی و ساخت با دقت بالا می‌شود. در ادامه، روش‌های مختلف ساخت ریزراکتورهایی با جنس متفاوت شرح داده خواهد شد.

#### ۵. انتخاب جنس راکتور

انتخاب جنس راکتور از مواردی است که بنابر شرایط عملیاتی سیستم و روش ساخت انجام می‌شود. در دسترس بودن مواد ساخت

1. Generative
2. Erosive
3. Selective Laser Melting (SLM)
4. SolidWorks
5. Catia
6. AutoCAD

محلول مناسب، حکاکی کرد. برای ایجاد آستر حکاکی روی فلز، روش‌های دیگری مانند چاپ مستقیم طرح روی سطح و استفاده از لیزر نیز در دسترس‌اند [۳ و ۴].

دو عامل اصلی در بهره‌گیری از تکنیک حکاکی، مساحت مقطع کانال و نسبت عرض به عمق آن است. نسبت عرض به عمق کانال برای حکاکی شیمیایی تر در حالت بهینه همواره کمتر از ۰/۵ است. به دلیل حکاکی یکنواخت در همه جهات<sup>۲</sup>، حداقل عرض ساختار دو برابر مجموع عمق به علاوه‌ی عرض فضاهای باز آستر است. باید گفت که در حکاکی خشک (مثلاً حکاکی با لیزر) این محدودیت وجود ندارد و به نسبت‌های بزرگ‌تر از یک نیز می‌توان رسید، اما باید در نظر داشت که سطح مقطع کانال در این روش حکاکی همواره مستطیلی خواهد بود. علاوه بر آن، غالباً هزینه‌ی روش‌های حکاکی خشک نسبت به روش‌های حکاکی تر بیشتر است. دومین عاملی که در روش حکاکی تر باید در نظر گرفت، سطح مقطع کانال ایجاد شده است. حکاکی تر، به دلیل حکاکی یکنواخت در همه‌ی جهات همیشه ساختاری نیم بیضی یا نیم دایره (شکل (۴)) با لبه‌هایی بسیار ناهموار ایجاد می‌کند. ریزکانالی را از جنس فولاد ضدزنگ که با استفاده از روش حکاکی تر ساخته شده، در شکل (۱-۲) مشاهده می‌کنید [۳ و ۵].

#### ۲-۱-۶ ماشینکاری

همه‌ی فلزات را با روش‌های ارزان و ساده نمی‌توان حکاکی کرد. به طور خاص، فلزات نجیب و تانتالیم در برابر محلول‌های خورنده مقاوم‌اند؛ علاوه بر آن، حکاکی آلیاژهای سخت مانند فولاد ضد زنگ نیز با دشواری‌هایی همراه است. بنابراین، می‌توان از ماشینکاری دقیق برای ساخت ریزساختارهایی با جنس‌های متفاوت بهره گرفت. به طور کلی، می‌توان گفت از ماشینکاری می‌توان برای ساخت ریزراکتور با هر جنسی سود جست. با این وجود، به دلیل برخی محدودیت‌ها مانند دقت ماشینکاری، کیفیت سطح ایجاد شده و سازگاری ماشینکاری با جنس راکتور، اغلب از ماشینکاری برای فلزات استفاده می‌شود. از سوی دیگر با توجه به نوع فلز، ماشینکاری دقیق با استفاده از روش‌های فرسایش الکتریکی، ماشینکاری با استفاده از لیزر، یا ماشینکاری دقیق مکانیکی انجام می‌شود. اگرچه فرسایش الکتریکی و ماشینکاری با استفاده از لیزر برای هر نوع

جنس بسپارهای شفاف و شیشه‌ی شفاف‌اند و می‌توان از داخل کانال‌های آن تصویر گرفت. ریزراکتورهای بسپاری و شیشه‌ای به طور گسترده‌ای در سیستم‌های بایو به‌کار گرفته می‌شوند [۴]. باید به این نکته توجه کرد که در ریزراکتورهای کاتالیستی که کاتالیست با ضخامت بیش از ۲۰۰ nm روی دیواره‌های کانال لایه‌نشانی می‌شود، شفافیت کانال از بین می‌رود و استفاده از مواد شفاف در این موارد مزیتی به بار نمی‌آورد. اگرچه به طور کلی نمی‌توان از ریزراکتورهای شیشه‌ای در دما و فشار بالاتر از ۲۰۰°C و ۳ bar بهره گرفت، اما مواردی از ساخت ریزراکتور شیشه‌ای تحت فشار نیز گزارش شده است که فشار را تا ۴۰۰ bar تحمل می‌کند [۵]. از سوی دیگر، ریزراکتورهای فلزی تنها در دما و فشارهای زیاد به کار برده می‌شوند. استقامت بالا و وجود تجهیزات استاندارد در فلزات موجب شده تا اغلب ریزراکتورهایی که در شرایط عملیاتی سخت به کار می‌روند، از این جنس ساخته شوند. باید گفت که اگر دما از محدوده‌ی عملیاتی فلز نیز بالاتر باشد، راکتورهای سرامیکی به کار می‌گیرند. علاوه بر استقامت بالا در برابر حرارت، مقاومت سرامیک‌ها در برابر خوردگی مواد شیمیایی نیز از فلزات بالاتر است.

### ۶. انتخاب روش ساخت

#### ۶-۱ روش‌های ساخت ریزراکتور فلزی

##### ۶-۱-۱ حکاکی

یکی از روش‌های خورنده، حکاکی شیمیایی تر<sup>۱</sup> است که در ساخت قطعات نیم‌رسانا کاربرد دارد. از این روش می‌توان در ساخت ریزراکتورها فلزی بهره گرفت، زیرا این فناوری برای بسیاری از فلزات، ارزان و قابل استفاده است. اغلب از این فناوری برای ساخت ساختارهایی با ابعاد کوچکتر از میلی‌متر استفاده می‌شود، اما ساختارهایی با ابعاد بزرگتر را نیز می‌توان به از این روش ساخت. در این روش، سطح فلز را با یک لایه بسپار حساس به نور می‌پوشانند و پس از قرار دادن طرح سیاه و سفید حکاکی روی فیلم بسپاری، آن را در معرض نور قرار می‌دهند. درنهایت، نور باعث تغییر خواص بسپار می‌شود به طوری که قسمت‌هایی را که نور به آن نرسیده حلال حل می‌کند. بنابراین، یک پوشش و آستر، مطابق طرح حکاکی، بر روی سطح تشکیل می‌شود که می‌توان قسمت‌های پوشیده نشده‌ی سطح فلز (همان کانال‌های ریزراکتور) را با استفاده از

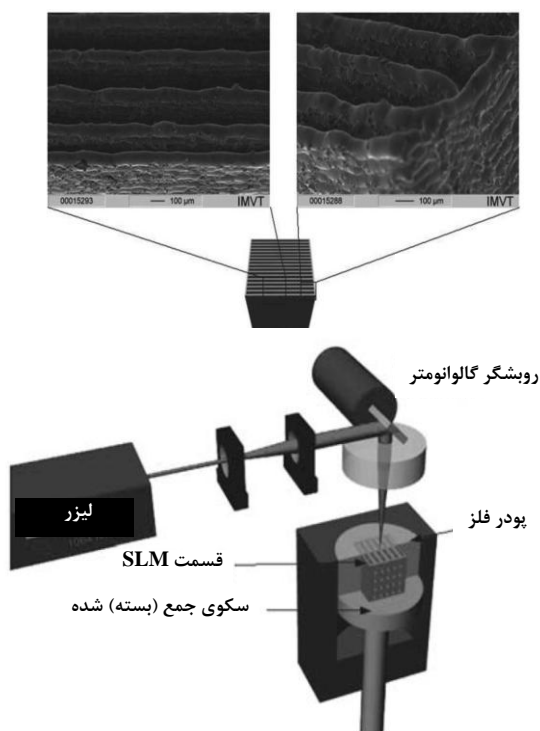
2. Isotropic Etching

1. Wet Chemical Etching

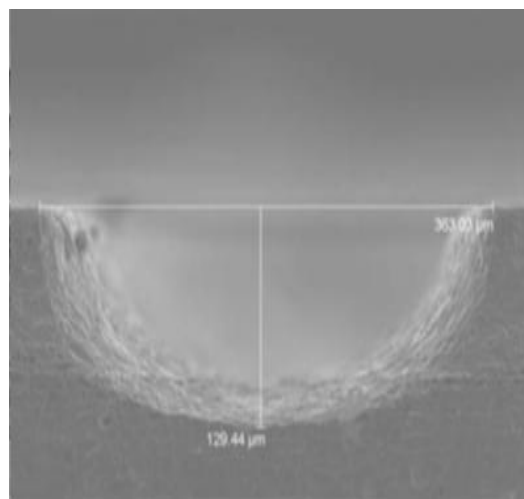
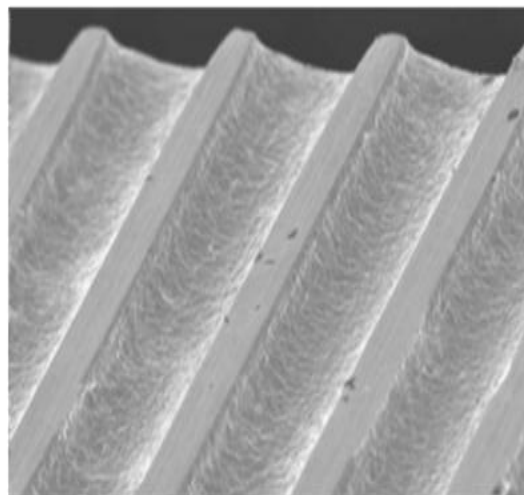
مواردی است که به روش انتخاب شده بستگی دارد. در این زمینه، بالاترین دقت در میان روش‌های ماشینکاری مربوط به ماشینکاری‌های مکانیکی با بهره‌گیری از کامپیوتر می‌شود.

#### ۳-۱-۶ ذوب گزینشی با لیزر

یکی از روش‌های خاص برای تولید ریزساختارهای فلزی ذوب گزینشی با لیزر است. این روش، یکی از روش‌های سازنده برای فلزات است که معمولاً در فهرست فناوری‌های ساخت سریع نمونه‌ی اولیه<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد. در این جا، لایه‌ای نازکی از پودر فلز روی پایه پخش می‌شود و لیزری که کامپیوتر آن را کنترل می‌کند با ذوب کردن نقاطی از پودر، یک لایه از طرح مورد نظر را ایجاد می‌کند. بعد از این مرحله، لایه بعدی پودر پخش و فرایند تا تکمیل شدن کل قطعه تکرار می‌شود. بنابراین، ریزراکتور مورد نظر لایه به لایه تشکیل می‌شود [۵۶]. در شکل (۵)، طرح کلی دستگاه ذوب گزینشی با لیزر را مشاهده می‌کنید و نمونه‌ای را مشاهده می‌کنید که با این روش ساخته شده است.



شکل ۵. فرایند جذب لیزری گزینشی و نمونه ساخته شده با این روش [۵].



شکل ۴. نمایی از ریزکانال ساخته شده به روش حکاکی [۳].

فلزی مناسب است، اما پایداری فلز استفاده شده در این روش‌ها باید در نظر گرفته شود. برای برنج و مس، کاربرد ابزارهایی از جنس الماس طبیعی پر دامنه است، در حالی که برای فولاد ضدزنگ و آلیاژهایی با پایه نیکل، ابزارهایی از جنس فلزات سخت به کار می‌رود [۶۷].

محدوده کیفیت سطوح ساخته شده با روش‌های مختلف به پارامترهای زیادی وابسته است. سطوحی که با استفاده از فرسایش الکتریکی تهیه می‌شوند، دارای ناهمواری چشمگیری اند. هنگام کاربرد لیزر کیفیت نهایی به جنس فلز و نیز انتخاب صحیح پارامترهای لیزر وابسته است. اگر فلز به کار رفته برنج و یا مس باشد، بهترین کیفیت سطح از روش ماشینکاری مکانیکی دقیق به دست می‌آید [۷]. علاوه بر کیفیت سطح، دقت طرح ایجاد شده نیز از

## ۶-۱-۴ تکنیک‌های شکل‌دهی فلزات

است. به دلیل ماهیت این فرایند (اتصال، وارد آمدن فشار مکانیکی به قطعات، گرمایش در خلا یا جوی خنثی تا حدود ۸۰٪ دمای ذوب، سرد کردن در حالی که فشار مکانیکی وارد می‌آید) سبب می‌شود که یک ریزساختاری که قابلیت تحمل فشار زیاد را دارد ایجاد شود. به دلیل نفوذ ماده از یک صفحه به صفحه دیگر، هیچ مرزی بین دو صفحه تشکیل نمی‌شود، از این‌رو برای انتقال حرارت مرزی مشکلی پیش نمی‌آید. بنابراین، رفتار حرارتی تجهیزاتی که به این روش تهیه می‌شوند نسبت به تجهیزات تهیه شده از سایر روش‌ها برتری دارند [۶].

## ۸. ساخت ریزراکتور بسپاری

کاربرد مواد بسپاری به دلیل ارزان‌ی و سادگی ساخت در تولید ریزراکتورها پر دامنه است. به طور کلی، کاربرد بسپار برای ساخت راکتور به کاهش هزینه‌ها و سهولت در ساخت می‌انجامد. از مزایای بسپارها می‌توان به تنوع مواد بسپاری، سبکی و ارزان‌ی آنها اشاره کرد. به دلیل انعطاف پذیری زیاد و نرم بودن ذاتی بسپارها، از اغلب روش‌های ساخت می‌توان برای ساخت ریزراکتور بسپاری استفاده کرد. برجسته‌کاری گرم، چاپ، تزریق در قالب، حکاکی با لیزر، لیتوگرافی نرم و فوتولیتوگرافی با پرتو ایکس روش‌هایی‌اند که برای ساخت ریزراکتورهای بسپاری به کار می‌روند که در بین آنها روش برجسته‌کاری گرم از مهم‌ترین روش‌های ساخت ریزراکتورهای بسپاری است. در این روش، ابتدا طرح معکوس راکتور بر روی یک مَهر<sup>۳</sup> ایجاد می‌شود و سپس با فشار دادن مَهر داغ روی بسپار طرح راکتور را روی بسپار ایجاد می‌کنند [۷].

کاربرد اصلی بسپارها در حوزه ساخت ریزراکتور در فرایندهای زیست فن‌آوری و تحقیقات پزشکی است که در دما و فشار پایین انجام می‌گیرد. دما و فشار سیستم پارامترهای اصلی در انتخاب بسپار برای ساخت راکتور است. معمولاً، دمای بالا مانع اصلی در بهره‌گیری از بسپارها به عنوان ماده سازنده ریزراکتور است. البته برخی از بسپارها می‌توانند دمای ۴۰۰°C و بالاتر را نیز تحمل کنند، اما هزینه استفاده از این مواد در ساخت راکتور گزاف است و گاهی از فناوری خاصی برای ساخت آنها بهره می‌گیرند. فشار بالا نیز ممکن است عاملی باز دارنده در بهره‌گیری از مواد بسپاری در

تقریباً تمام روش‌هایی که تاکنون تشریح شده‌اند برای ساخت نمونه‌ها و به تعداد اندک مناسب‌اند. زمان و هزینه لازم برای تولید ریزساختارها با روش‌های یاد شده در تعداد زیاد، طولانی و گزاف است. البته، این تفسیر در مورد روش حکاکی صحیح صدق نمی‌کند. با این روش می‌توان تعداد زیادی ریزساختار را با هزینه اندک ساخت. از دیگر روش‌هایی که می‌توان تعداد زیادی از ریزساختارها را با هزینه کم ایجاد کرد، کنار هم قرار دادن اجزای ریزراکتور (منبت‌کاری) است. با استفاده از این تکنیک می‌توان ریزساختارهایی با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر را نیز ساخت.

## ۷. به هم بستن و اتصال ریزساختارهای فلزی

به هم بستن و اتصال قطعات در بزرگ مقیاس، معمولاً با مشکل خاصی همراه نیست، اما در ریزساختارها پیچیده است. نکته عمده و مهم دقت تنظیم و هم‌ترازی اجزای مختلف است. با این احوال، مشکلات آب‌بندی، تثبیت و مسائل مربوط به اتصال ممکن است در حین ساخت رخ دهد. ناهم‌ترازی مناسب، سبب ایجاد کانال‌های نامنظم و در نتیجه اتصال نامناسب خواهد شد، و در بدترین حالت ممکن است به تخریب کامل ریزساختار منجر شود. برای هم‌ترازی می‌توان از تکنیک‌های ساده مکانیکی سود جست [۵ و ۴].

یکی دیگر از پیچیدگی‌ها در ساخت ریزساختارها، کیفیت سطح تجهیزات است. اگرچه زبری متوسط مساله اصلی در ساخت ریزراکتور نیست، اما برآمدگی‌های ایجاد شد در زمان ماشین‌کاری و یا استفاده از لیزر سبب بروز مشکلاتی در هنگام اتصال اجزای قبیل صیقل‌دهی الکتریکی یا مسطح کردن برای از بین بردن برآمدگی‌ها بهره گرفته شود.

اتصال فلزات به یکدیگر را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های مختلفی انجام داد. یکی از روش‌های معمول که برای ریزساختارها استفاده می‌شود جوش (لیزر، پرتو الکترونی و دیگر انواع جوش)، لحیم‌کاری، اتصال نفوذی<sup>۱</sup>، لحیم‌کاری دمای بالا و دمای پایین است. از چسب و یا در حالت‌های بسیار خاص از گیره نیز می‌توان استفاده کرد [۵].

برای کاربردهای فشار بالا و یا برای واکنشی شیمیایی که مستلزم ایمنی بسیار پر دامنه‌ای است، روش بهینه بهره‌گیری از اتصال نفوذی

2. Hot Embossing  
3. Stamp

1. Diffusion Bonding

به کار می‌رود، باید چندان کوچک باشند که بتوان جزئیات ریزراکتور را در مرحله قالب‌ریزی دوغاب ایجاد کرد. حتی بعد از فرایند پخته‌شدن که به طور طبیعی دانه‌ها به هم متصل و درشت‌تر می‌شوند، اندازه ذرات باید از کوچک‌ترین اندازه تجهیز کمتر باشد. در ساخت قطعات سرامیکی، از افزودنی‌های زیادی برای بهبود خواص چسبندگی ذرات استفاده می‌شود، که هر کدام خواص مختلفی برای سطح پدید می‌آورند. بنابراین، با توجه به آن که در ابعاد ریز خواص سطحی بر رفتار سیستم به شدت تأثیر می‌گذارد، نوع سطح ایجاد شده باید به دقت بررسی شود. از سوی دیگر، حذف نامناسب مواد افزودنی ممکن است به اعوجاج، ترک خوردن و یا جدا شدن اجزای قطعه منجر شود [۸ و ۹].

به علت وجود خواص ویژه سرامیک‌ها، نمی‌توان از طراحی فلزات و بسپارها برای ساخت ریزراکتورهای سرامیکی سود جست. از سوی دیگر، در تجهیزات ریز که از جنس سرامیک ساخته می‌شوند، آب‌بندی، اتصالات بین تجهیزات و نیز ارتباط بین تجهیزات فلزی و سرامیکی نیاز به دقت زیادی دارد. در حال حاضر، دستورالعمل‌های مناسبی برای ساخت تجهیزات ریز از جنس سرامیک منتشر نشده است، و تجارب ساخت تجهیزات بزرگ مقیاس به تجهیزات ریز قابل تعمیم نیست [۹].

اخیراً روش‌های قالب‌گیری تزریقی<sup>۱</sup> برجسته‌سازی همراه با ریخته‌گری نوار نوار دوغابی و خوردگی از طریق جرقه‌های ریز، از جمله تکنیک‌هایی‌اند که در کمپانی آی ام ام<sup>۲</sup> برای ساخت ریزراکتور سرامیکی به کار می‌روند. در جدول (۲) نوع ساخت ریزراکتور سرامیکی را مشاهده می‌کنید [۱۱ و ۱۰]:

ساخت ریزراکتور باشد. علاوه بر دما و فشار، حضور برخی حلال‌ها در محیط واکنش ممکن است به ایجاد خوردگی و حل شدن بسپارها انجامد. بنابراین، قبل از انتخاب بسپارها به عنوان جنس راکتور باید اجزای حاضر در محیط واکنش را بررسی کرد [۷ و ۸].

## ۹. ساخت ریزراکتورهای سرامیکی

ریزراکتور سرامیکی در مواردی به کار می‌رود که دمای واکنش چندان بالا باشد که نتوان از فلزات استفاده کرد. دمای عملیاتی °C ۱۰۰۰ و بالاتر، و سهولت یکپارچه کردن کاتالیست در حفره‌های سرامیک از مزایای این جنس ریزساختار است. روش‌های متداول برای تولید ریزساختارهای سرامیکی قالب‌گیری، تزریق و ماشینکاری است. باید گفت که ابعاد اکثر مواد سرامیکی در طول فرایند پختن تغییر می‌کنند و ابعاد قطعه‌ی نهایی با کمی خطا همراه است. بنابراین، در طراحی ریزراکتورهای سرامیکی مقداری خطای ساخت در نظر گرفته می‌شود. از روش‌های دیگری چون چاپ سه‌بعدی، لایه‌نشانی مذاب و حکاکی نیز برای ساخت راکتورهای سرامیکی بهره می‌گیرند، اما به دلیل هزینه‌ی گزاف، متداول نیست. به طور کلی، تولید ریزراکتور از جنس سرامیک، به دلیل این که فناوری‌های ساخت آن گران تمام می‌شود، متداول نیست [۸].

روش رایج برای ساخت ریزراکتورهای سرامیکی شامل مراحل آماده‌سازی خوراک یا دوغاب، قالب‌ریزی، از قالب بیرون آوردن، از هم باز کردن و فرایند پختن است. ابعاد اکثر مواد سرامیکی در طول فرایند پختن تغییر می‌کنند، بنابراین این تغییر اندازه باید در مرحله ساخت در نظر گرفته شود. مستقل از روش تهیه ریزساختارهای سرامیکی، اندازه اولیه دانه‌های پودر سرامیکی که برای محلول اولیه

جدول ۲. انواع روش‌های ساخت ریزراکتور سرامیکی<sup>۱</sup>

پودر	پودر	پودر	پودر	ماده
۱- اختلاط با آسیاب ۲- ریخته‌گری نوار ۳- خشک کردن	ایجاد محلول سوسپانسیون	۱- مخلوط خوراک ۲- ریخته‌گری نوار ۳- خشک کردن	ترکیب خوراک	مراحل پیش فرایندی
فرسایش با جرقه‌های میکرو	ریخته‌گری	برجسته‌سازی	تزریق قالب‌گیری	ایجاد ساختار میکرو
حذف پیوندهای اضافی و عملیات پختن	عملیات پختن	حذف پیوندهای اضافی و عملیات پختن	حذف پیوندهای اضافی و عملیات پختن	عملیات حرارتی و تبدیل به چگالش

1. Injection Molding

2. IMM



## ۱۰. ریزراکتورهای شیشه‌ای

شیشه در برابر اغلب ترکیبات شیمیایی مقاوم است و دماهای نسبتاً بالا را نیز تحمل می‌کند. علاوه بر آن، شفافیت شیشه مزیت چشمگیری به آن می‌دهد که از آن جمله می‌توان از مشاهده داخل کانال و انجام واکنش‌های نورشیمیایی<sup>۱</sup> یاد کرد. متداول‌ترین روش ایجاد کانال روی شیشه، بهره‌گیری از لیزر (حکاکی خشک) است. در حکاکی تر نیز از محلول‌های بازی مانند سدیم هیدروکسید و محلول‌های اسیدی مثل ترکیب هیدروفلئوریدریک اسید، نیتریک اسید، استیک اسید و آب استفاده می‌شود [۱۲].

یکی دیگر از روش‌های متداول در ایجاد ریزکانال بر روی شیشه، روش لیتوگرافی نرم است. این روش به دلیل استفاده از یک قالب بسپاری که ماهیتی نرم دارد، لیتوگرافی نرم خوانده می‌شود. برای طرح با لیتوگرافی نرم، ابتدا باید قالب یا مهر طرح مورد نظر ساخته شود. متداول‌ترین روش برای این کار لیتوگرافی نوری روی یک سطح سیلیکونی است. در این فرایند، الگوی اولیه‌ای با طرح‌های برجسته حساس به نور ایجاد می‌شود که از سطح سیلیکونی بیرون زده‌اند. سپس، مایع بسپاری روی این سطح برجسته ریخته و به یک جامد نرم لاستیکی تبدیل می‌شود. در نتیجه، مهری از جنس بسپاری ساخته می‌شود که با الگوی اولیه در حد چند نانومتر اختلاف دارد. هرچند ایجاد یک الگوی اولیه با نقشه‌های ظریف برجسته پرهزینه است، با این حال تکثیر الگو روی مهرهای بسپاری کم‌هزینه و آسان است. در ادامه، مهر بسپاری برای ساخت طرح ریزراکتور به کار گرفته می‌شود [۱۴ و ۱۲].

یکی از روش‌های لیتوگرافی نرم، روش چاپ با تماس میکرومتری است. در این روش مهر بسپاری، که در مرحله قبل ساخته شده، به یک محلول شامل مولکول‌های آلی به نام تیول (در نقش جوهر) آغشته و سپس مهر به روی یک فیلم نازک طلا (در نقش کاغذ) که روی شیشه، سیلیکون یا صفحه بسپاری قرار گرفته، زده می‌شود. تیول با سطح طلا واکنش برقرار و فیلم کاملاً منظمی را ایجاد می‌کند که طرح مهر را دارد. به خاطر پخش شدن تیول بعد از تماس با سطح، دقت تک لایه به اندازه مهر بسپاری نیست. در بهره‌گیری مستقیم از این روش می‌توان شکل‌هایی به کوچکی ۵۰ نانومتر را نیز ایجاد کرد [۱۳ و ۱۵].

## ۱۱. اتصال و آب‌بندی

### ۱-۱ اتصال ورودی و خروجی به راکتور

دو روش عمده در اتصال ورودی به ریزراکتورها در دسترس است. روش اول، متداول‌ترین روش، اتصال ورودی و خروجی از بالای کانال‌هاست. روش دوم، کم‌کاربردتر، اتصال ورودی و خروجی از کنار<sup>۲</sup> و به صورت موازی با کانال‌هاست. بهره‌گیری از روش دوم در ساخت راکتور، اگر چه با دشواری‌هایی در ساخت و آب‌بندی تجهیزات همراه است، دارای مزایایی چون راحتی در استفاده از راکتور و سادگی در اتصال دیگر تجهیزات به راکتور است [۱۶ و ۱۴].



شکل ۶. انواع اتصال ورودی به ریزراکتورها.

### ۲-۱۱ اتصال و آب‌بندی

غالباً از وسایل آب‌بندی موجود مانند واشر، اورینگ، درزگیر و دیگر وسایل برای آب‌بندی تجهیزات ریز استفاده می‌شود. در این راستا، استفاده از جنس متناسب با دمای راکتور از مواردی است که باید به آن توجه شود. به طور کلی، استفاده از الاستومرهایی چون وایتون<sup>۳</sup> و لاستیک سیلیکونی در آب‌بندی تجهیزات میکرو متداول است، با این وجود استفاده از تفلون (نوار تفلن) نیز در محدوده‌ی دمای مجاز خود جایگاه ویژه‌ای در این زمینه دارد. در انتخاب جنس اتصالات ورودی و خروجی باید به تفاوت ضریب انبساط حرارتی توجه خاصی مبذول شود. مطلوبترین حالت اتصال ورودی و خروجی حالتی است که در آن جنس اتصالات و جنس راکتور یکسان باشد. استفاده از گیره و یا چسب نیز در فشار و دماهای پایین کاربرد دارد [۱۷ و ۱۴].

بر خلاف ریزراکتورهای فلزی، به طور کلی آب‌بندی کردن تجهیزات سرامیکی دشوار است. باید به این نکته توجه داشت که ریزراکتورهای سرامیکی اغلب در دماهای بالا به کار می‌روند؛ بنابراین، بهره‌گیری از اتصالاتی که ضریب انبساط آن‌ها تفاوت زیادی

2. Cartridge  
3. Viton

1. Photoreaction

- Organic process research & development. 21;8(3):455-60, (2004).
- [7] Tiggelaar, R. M., Benito-López, F., Hermes, D. C., Rathgen, H., Egberink, R. J., Mugele, F. G., Reinhoudt, D. N., van den Berg, A., Verboom, W., Gardeniers, H. J., "Fabrication, mechanical testing and application of high-pressure glass microreactor chips", *Chemical Engineering Journal*. 1;131(1-3):163-70, (2007).
- [8] Brandner, J. J., "Fabrication of microreactors made from metals and ceramics", *Microreactors in Organic Synthesis and Catalysis*. 26:38, (2008).
- [9] Chan, E. M., Alivisatos, A. P., Mathies, R. A., "High-temperature microfluidic synthesis of CdSe nanocrystals in nanoliter droplets", *Journal of the American Chemical Society*. 12;127(40):13854-61, (2005).
- [10] Wilms, D., Klos, J., Frey, H., "Microstructured Reactors for Polymer Synthesis: A Renaissance of Continuous Flow Processes for Tailor-Made Macromolecules?", *Macromolecular chemistry and physics*. 20;209(4):343-56, (2008).
- [11] Mae, K., "Advanced chemical processing using microspace", *Chemical Engineering Science*. 1;62(18-20):4842-51, (2007).
- [12] Nagasawa, H., Mae, K., "Development of a new microreactor based on annular microsegments for fine particle production", *Industrial & engineering chemistry research*. 29; 45(7): 2179-86, (2006).
- [13] Wagner, J., Kirner, T., Mayer, G., Albert, J., Köhler, J. M., "Generation of metal nanoparticles in a microchannel reactor", *Chemical Engineering Journal*. 1; 101(1-3): 251-60, (2004).
- [14] Vankayala, B. K., Löb, P., Hessel, V., Menges, G., Hofmann, C., Metzke, D., Krtschil, U., Kost, H. J., "Scale-up of process intensifying falling film microreactors to pilot production scale", *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. 31; 5(1), (2007).
- [15] Ying, X., Zhang, L., Xu, H., Ren, Y.L., Luo, Q., Zhu, H. W., Qu, H., Xuan, J., "Efficient Fischer-Tropsch microreactor with innovative aluminizing pretreatment on stainless steel substrate for Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst coating", *Fuel Processing Technology*. 1; 143:51-9, (2016).
- [16] Ratchananusorn, W., Gudarzi, D., Turunen, I., "Catalytic direct synthesis of hydrogen peroxide in a novel microstructured reactor", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 1; 84:24-30, (2014).
- [17] Kim, D. H., Kim, S.H., Byun, J. Y., "A microreactor with metallic catalyst support for hydrogen production by partial oxidation of dimethyl ether", *Chemical Engineering Journal*. 15; 280: 468-74, (2015).
- [18] Ramírez, A., Sebastián, V., Mallada, R., Santamaría, J., Monzón, A., "In-situ preparation of a highly accessible Pt/CNF catalytic layer on metallic microchannel reactors", *Application to the SELOX reaction. Applied Catalysis A: General*. 25; 505: 193-9, (2015).

با سرامیک‌ها (مثل فلزات) دارد، توصیه نمی‌شود. از سوی دیگر، ممکن است افزایش دما خود باعث تغییر در ابعاد ورودی و خروجی شود و به ایجاد نشتی در سیستم در دماهای بالا انجامد. می‌توان گفت فلزات، به دلیل وجود اتصالات استاندارد آببندی، از ساده‌ترین روش آببندی را در میان جنس‌های مختلف ریزراکتور برخوردارند [۱۷ و ۱۸].

## ۱۲. نتیجه‌گیری کلی

با مروری بر روش‌های مختلف تولید راکتورهای ریز می‌توان پی برد که طراحی ریزراکتور مهم‌ترین مرحله در تولید ریزراکتورهاست. به عبارت دیگر، به دلیل تفاوت عمده‌ای که در طراحی و ساخت راکتورهای ریز و راکتورهایی با مقیاس متداول برقرار است، انتخاب یک طرح نامناسب به بروز خطا در نتایج حاصل از راکتور طراحی شده منجر خواهد شد. در این میان، ریزراکتورهای ساخته شده از جنس شیشه با توجه به بهای اندک و انعطاف‌پذیری زیاد، در شرایط عملیاتی مختلف در بسیاری از واکنش‌ها به‌کار گرفته می‌شوند. از سوی دیگر، در شرایط عملیاتی خاص مثل دمای بالا تنها گزینه‌ی موجود برای ساخت ریزراکتور فلز و سرامیک است.

## مراجع

- [1] Lee, C. C., Sui, G., Elizarov, A., Shu, C. J., Shin, Y. S., Dooley, A. N., Huang, J., Daridon, A., Wyatt, P., Stout, D., Kolb, H. C., "Multistep synthesis of a radiolabeled imaging probe using integrated microfluidics", *Science* 310, no. 5755, 1793-1796, (2005).
- [2] Russo, V., Kilpiö, T., Carucci, J. H., Di Serio, M., Salmi, T. O., "Modeling of microreactors for ethylene epoxidation and total oxidation. *Chemical Engineering Science*", 29; 134:563-71, (2015).
- [3] Yi, S. J., Park, J. M., Chang, S. C., Kim, K. C., "Design and validation of a uniform flow microreactor", *Journal of Mechanical Science and Technology*. 1;28(1): 157-66, (2014).
- [4] Inoue, T., Kikutani, Y., Hamakawa, S., Mawatari, K., Mizukami, F., Kitamori, T., "Reactor design optimization for direct synthesis of hydrogen peroxide", *Chemical Engineering Journal*. 15;160(3):909-14, (2010)
- [5] Jiang, B., Santis-Alvarez, A. J., Muralt, P., Poulikakos, D., Borhani, N., Thome, J. R., Maeder, T., "Design and packaging of a highly integrated microreactor system for high-temperature on-board hydrogen production", *Chemical Engineering Journal*. 1;275:206-19, (2015).
- [6] Zhang, X., Stefanick, S., Villani, F. J., "Application of microreactor technology in process development",