

## «ریزیالش» حوزه‌ای نوظهور در مهندسی شیمی

اردلان گنجی‌زاده<sup>۱</sup> و نظام‌الدین اشرفی‌زاده<sup>۲</sup>

**چکیده:** طی سالهای گذشته در نتیجه هم‌افزایی پیشرفتهای دانش و فناوری، هرروزه جنبه‌های جدیدی از دانش و فناوری، که تا دهه‌های اخیر مطرح نبوده‌اند، ظهور کرده‌اند. ریزیالش که دانش و فناوری کنترل و حرکت جسمهای بسیار اندک سیالات است، نمونه‌ای از این حوزه‌های نوظهور است. پیش‌بینی شده است که با گسترش این حوزه، انقلابی در مهندسی شیمی به وجود آید که نمونه آن با ظهور ریزتراشه‌ها در صنعت محاسبات و رایانه مشاهده شد. در این پژوهش به معرفی ریزیالش، کاربردها و چالشهای پیش‌روی آن و همچنین به ارتباط تنگاتنگ این دانش و فناوری میان‌رشته‌ای با مهندسی شیمی پرداخته شده است. علاوه‌براین، گزارشی در مورد فعالیتهای دانشکده‌ها و مراکز تحقیقاتی در رابطه با این حوزه ارائه شده است. حجم اندک فعالیتهای علمی و پژوهشی انجام‌شده در ایران در مقایسه با کشورهای پیشرفته صنعتی نشان می‌دهد که جامعه مهندسی شیمی ایران، تقریباً با این حوزه جدید بیگانه است. در جامعه علمی - پژوهشی مهندسی شیمی ایران به‌جز گروه فرایندهای جداسازی دانشگاه علم‌و‌صنعت ایران، که به تحقیق و پژوهش در این زمینه پرداخته است، فعالیت چندانی گزارش نشده است. این در حالی است که در دانشکده‌های معتبر مهندسی شیمی دنیا مراکز تحقیقاتی یا آزمایشگاههای متعدد ریزیالش تأسیس شده و حتی درسهای مرتبط با این حوزه در برنامه آموزشی دانشجویان گنجانده شده است. این پژوهش پیشنهاد می‌کند که به‌منظور حرکت هماهنگ با جریان علمی روز دنیا، دانشکده‌ها و مراکز تحقیقاتی مهندسی شیمی بخشی از فعالیتهای آموزشی و پژوهشی خود را به این حوزه آینده‌دار اختصاص دهند تا با تربیت مهندسان و پژوهشگرانی آگاه به مسائل مطرح علمی روز، شکاف صنعتی و علمی موجود بین ایران و کشورهای پیشرفته صنعتی از این حیث عمیق‌تر نشود.

**واژه‌های کلیدی:** آموزش مهندسی شیمی، ریزیالش، نانوفناوری، پدیده‌های سطحی، سامانه‌های ریزالکترومکانیکی

۱. دانشجوی دکتری، آزمایشگاه تحقیقاتی فرایندهای پیشرفته جداسازی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. [ardalan\\_ganjizade@chemeng.iust.ac.ir](mailto:ardalan_ganjizade@chemeng.iust.ac.ir)
۲. استاد گروه فرایندهای جداسازی، آزمایشگاه تحقیقاتی فرایندهای پیشرفته جداسازی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران ایران. (نویسنده مسئول) [ashrafi@iust.ac.ir](mailto:ashrafi@iust.ac.ir)

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۸/۲۶)

(پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۳)

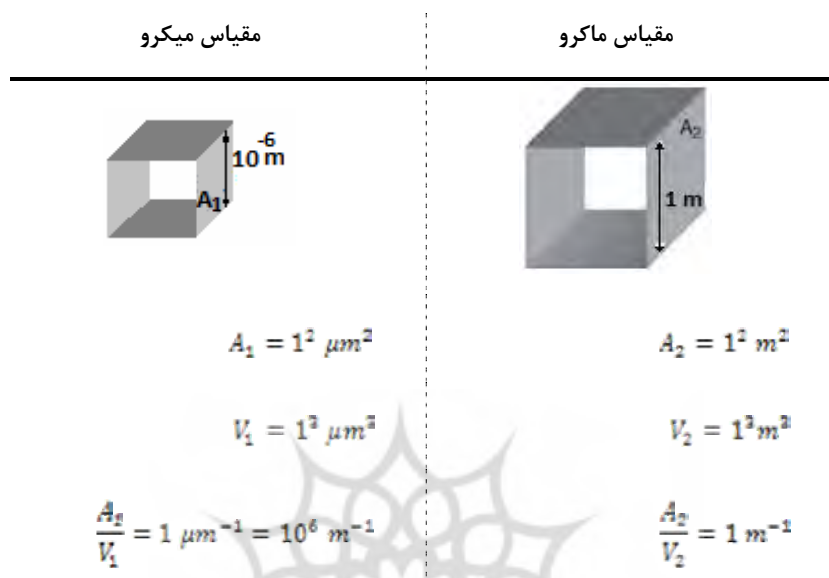
DOI: 10.22047/ijee. 2017.67731.1424

## ۱. مقدمه

به واسطه پیشرفت‌های صورت‌گرفته اخیر در زمینه دانش و فناوری نانو، امکان تولید ابزار و تجهیزات بسیار ریزی، که انسان را قادر به کنترل حرکت حجم‌های بسیار کوچک سیالات و یا ذرات معلق در آنها می‌کند، به وجود آمده است. با استفاده از این تجهیزات می‌توان بسیاری از فرایندهای سخت، پیچیده و موازی را در مدت‌زمان اندک، با صرف هزینه ناچیز و با سهولت بیشتر اجرا کرد. چنین سامانه‌هایی را، که امروزه در مرکز توجه دانشمندان قرار گرفته‌اند، سامانه‌های ریزیالشی<sup>۱</sup> و دانشی را، که به بررسی روش‌های طراحی و ساخت و همچنین پدیده‌های غالب در آنها می‌پردازد، ریزیالشی<sup>۲</sup> نامیده‌اند. در واقع، ریزیالشی طی قرن‌های اخیر جزئی از علوم غشایی محسوب می‌شده، اما ریزیالشی مدرن با پیشرفت و توسعه فناوری نانو، که امکان ساخت سامانه‌های ریزیالشی با ساختار از پیش طراحی‌شده را فراهم آورد، ظهور کرد (Duan, Wang, & Xie, 2013).

اندازه عرض ریزکانال‌های سامانه‌های رایج ریزیالشی کمتر از ۱۰۰ میکرون است (Whiteides, 2006; Squires & Quake, 2005)، درحالی‌که طول آنها ممکن است خیلی بزرگ‌تر باشد (تقریباً بیشتر از ۵۰۰ برابر عرض آنها) (Grigoriev, 2012). در ابتدا تصور می‌شد که سامانه‌های ریزیالشی صرفاً نمونه کوچک‌شده سامانه‌های کلان‌سیالشی<sup>۳</sup> هستند. پیشرفت ریزیالشی ثابت کرد که مسئله به‌مراتب پیچیده‌تر از کاهش مقیاس هندسه دستگاه بوده و درک بهتری از خواص ریزیالشی لازم است (Islam, 2007). به‌عنوان مثال، در سامانه‌های ریزیالشی، که ابعاد سامانه بسیار کوچک است، نسبت سطح به حجم بسیار زیاد بوده و لذا اثرات موینگی و الکتروستاتیکی، که ممکن است در فرایندهای کلان‌سیالشی ناچیز باشند، بسیار اهمیت پیدا می‌کنند. همین ویژگی متحصربه‌فرد به تمایل دانشمندان به استفاده از چنین سامانه‌هایی برای کنترل حرکت جریان سیالات منجر شده است (Stone et al, 2004). در شکل ۱ نسبت سطح به حجم دو سامانه خرد (ریز) و کلان مقایسه شده است. یکی دیگر از مزایای کوچک‌سازی کاهش چشمگیر در حجم نمونه سیال موردنیاز است. به بیان دیگر، کاهش خطی بعد مشخصه دستگاه به کاهش حجم می‌انجامد (Grigoriev, 2012). البته در کنار نسبت سطح به حجم زیاد، بالاتر بودن نرخ انتقال جرم و حرارت در این سامانه‌ها نسبت به سامانه‌های متداول مورد استفاده در صنعت (سامانه‌های کلان‌سیالشی) موجب شده است تا دانشمندان برای انجام فرایندهای جداسازی، واکنش و ردیابی نیز به استفاده از تجهیزات ریزیالشی روی آورند (Vasu & De, 2010).

- 
1. Micro/nanofluidic Systems
  2. Micro/nanofluidics
  3. Macrofluidic Systems



شکل ۱: نسبت سطح به حجم در دو مقیاس ماکرو و میکرو (Grigoriev, 2012)

سامانه‌های ریزسیالشی به دلایل متعددی از جمله اندازه کوچک، نسبت سطح به حجم زیاد، سرعت عمل بالا، سادگی طراحی و بازدهی زیاد در بسیاری از فرایندها مورد استفاده قرار گرفته و توجه پژوهشگرانی از زمینه‌های مختلف را به خود جلب کرده است. تا به حال از این سامانه‌ها برای تولید محلولهای سوسپانسیونی و امولسیونی (Roberts, et al., 2001; Thorsen; et al., 2003)، تجزیه و تحلیل ایمنی سنجی<sup>۱</sup> (Yang, 2001; Hatch et al., 2001)، دارورسانی<sup>۲</sup> و کشف دارو<sup>۳</sup> (Dittrich & Manz, 2006)، فلوسیتومتری<sup>۴</sup> (Sohn et al., 2000; Fu et al., 1999)، جداسازی دینامیکی سلول (Chiu et al., 2000; Li et al., 2000)، الگودهی سلول / پروتئین (Beebe, et al., 2002)، تجزیه و تحلیل تک سلولی (Zare & Kim, 2010)، دست کاری و تجزیه و تحلیل مولکولهای DNA (Tegenfeldt et al., 2004; Shaqfeh, 2005; Randall et al., 2006; Gulati et al., 2008)

1. Immunological Analysis
2. Drug Delivery
3. Drug Discovery
4. Flow Cytometry

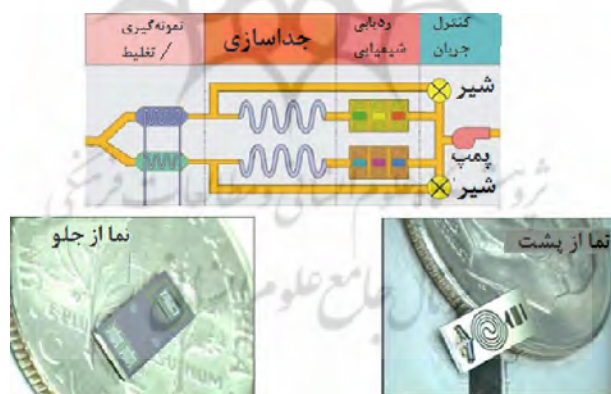
سوختی<sup>۱</sup> (Choban, et al., 2007)، تجزیه و تحلیل زیستی (Cheng et al., 2007; Chang et al., 2013) ساخت دستگاه‌های میکروالکترونیک (Nguyen & Wereley 2002)، توسعه حسگرهای زیستی (Yeo, et al., 2011) و سامانه‌های جداسازی مولکولهای زیستی<sup>۲</sup> (Žnidaršič & Plazl, 2007) یونها (Reschke, 2009) و حل‌شونده‌های خنثی (Kaufman, et al., 2012) استفاده شده است. مهم‌ترین محصول فناوری ریزیالش سامانه‌های «آز روتراشه<sup>۳</sup>» هستند. در این سامانه‌ها که یک آزمایشگاه کوچک بر روی یک تراشه قابل حمل قرار داده شده، تراشه مزبور قادر است به‌مثابه یک آزمایشگاه عمل کند (Tabeling, 2005). شکل ۲ نمایی از یک تراشه ریزیالشی را نمایش می‌دهد. اخیراً، از ریزیالش برای ساخت سامانه‌های «عضو روتراشه<sup>۴</sup>»، که در زمینه کشف دارو بسیار تأثیرگذار است، نیز استفاده شده است. سامانه‌های ریزیالشی حتی به زندگی روزمره نیز راه یافته‌اند. دستگاه‌های تزریق جوهر در چاپگرها نخستین نمونه از این سامانه‌ها هستند. امروزه میلیونها چاپگر از سامانه‌های ریز الکترومکانیکی<sup>۵</sup> در چاپ صفحات استفاده می‌کنند (همان). اکثر تجهیزات تشخیص سریع پزشکی<sup>۶</sup> مانند تستهای بارداری و سامانه‌های اندازه‌گیری قند خون نیز جزء سامانه‌های ریزیالشی هستند. در جدول ۱ فهرستی از چند دستگاه تشخیص پزشکی ریزیالشی، که مورد تأیید سازمان غذا و داروی ایالات متحده قرار گرفته و به‌صورت تجاری تولید می‌شوند، ارائه شده است. با توجه به این جدول می‌توان گفت ریزیالش امکان انجام بسیاری از آزمونهای پزشکی را در مدت زمان بسیار کوتاه و بدون نیاز به حضور متخصص امکان‌پذیر کرده است. لذا، برای انجام آزمایش خون دیگر نیازی به مراجعه به آزمایشگاه تشخیص طبی و صرف چند روز زمان نیست. در پژوهشی که شرکت تحقیقاتی BCC<sup>۷</sup> در سال ۲۰۱۰ انجام داد، بازار جهانی محصولات ریزیالشی در سال ۲۰۰۹ بالغ بر ۲/۶ میلیارد دلار ارزیابی شده است (Qian & Ai, 2012). در پژوهشهای صورت‌گرفته در سال ۲۰۱۳ همان مؤسسه اعلام کرد که بازار جهانی این سامانه‌ها در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ به ترتیب ۵/۱ و ۵/۶ میلیارد دلار است و همچنین پیش‌بینی شده که تا سال ۲۰۱۷ بازار جهانی این محصولات به ۱۰/۳ میلیارد دلار برسد.

- 
1. Fuel Cells
  2. Biomolecules
  3. Lab on a Chip
  4. Organ on a Chip
  5. Micro Electromechanical Systems (MEMs)
  6. Point of Care Diagnostics
  7. Business Communications Company

جدول ۱: چهار نمونه از سامانه‌های ریزسیالشی تشخیص سریع پزشکی مورد تأیید سازمان غذا و دارو ایالات متحده

(Sharma, Rodriguez, Estrela & Kennedy 2015)

توضیحات	نام دستگاه	مدت زمان لازم برای انجام آزمون	مقدار نمونه لازم	آزمون
نیازی به کاربر ماهر برای انجام آزمون نیست	Alere Triage MeterPro	۱۵ تا ۲۰ دقیقه	۲۲۵ میکرولیتر خون یا ادرار	بررسی ترکیب شیمیایی خون / عوامل کبدی
توسط پزشک انجام شود	Simplexa	کمتر از ۶۰ دقیقه	نمونه خلط	بررسی آلودگی به ویروس آنفلوآنزای نوع A و B
برای استفاده از تجهیزات لازم است به فرد بیمار آموزش لازم داده شود	i-STAT Analyzer	کمتر از ۱۵ دقیقه	۱۷ تا ۹۵ میکرولیتر خون (بسته به نوع آزمون)	بررسی ترکیب شیمیایی خون / نشانگرهای قلبی عروقی / لخته‌ها
آزمون باید در شرایط و محیط آزمایشگاهی انجام شود	TearLab Osmolarity System	چند ثانیه	۵۰ نانو لیتر اشک چشم	بررسی شدت خشکی چشم



شکل ۲: نوعی تراشه با فناوری ریزسیالشی (Islam, 2007)

باتوجه به کاربردهای سامانه‌های ریزسیالشی در گستره بزرگی از فرایندها می‌توان گفت که دانش ریزسیالشی یک دانش بین‌رشته‌ای است که با علوم مکانیک، زیست‌شناسی، مهندسی شیمی، نانوفناوری، برق، داروشناسی، داروسازی و پزشکی سروکار دارد. نقش مهندسی شیمی در فرایندهای ریزسیالشی، که در آنها

واکنش شیمیایی صورت می‌پذیرد، پدیده‌های انتقال جرم و انتقال حرارت رخ می‌دهد یا از پدیده‌های الکتروسینتیکی برای کنترل حرکت سیال، ردیابی مواد شیمیایی، ذخیره انرژی، جداسازی و مشخصه‌یابی استفاده می‌شود، بسیار پررنگ است. لذا می‌توان گفت که پژوهشگران عرصه مهندسی شیمی می‌توانند نقش مؤثری در گسترش و پیشرفت فناوری ریزسیالش ایفا کنند. همچنین سامانه‌های ریزسیالشی کنونی هم قادر به انجام برخی فرایندهای رایج در مهندسی شیمی هستند و هم پیش‌بینی می‌شود که ردیابی این سامانه‌ها در آینده نه‌چندان دور در بیشتر فرایندهای مهندسی شیمی مشاهده شود. از همین رو پیشگامان ریزسیالش پیش‌بینی می‌کنند که با گسترش این دانش و فناوری انقلاب عظیمی در عرصه مهندسی شیمی به وجود خواهد آمد که نمونه مشابه آن پیش‌تر با ورود ریزتراشه‌ها به صنعت رایانه مشاهده شد (Qian & Ai, 2012). این امر ضرورت آشنایی دانشجویان مهندسی شیمی با این دانش نوپا و روبه‌رشد را نشان می‌دهد. در این پژوهش تلاش می‌شود به بررسی نقش مهندسی شیمی در فناوری ریزسیالش و ارتباط نزدیک بین آنها پرداخته شود و همچنین گزارشی از فعالیتهای پژوهشگران فعال این رشته در داخل و خارج از کشور در ارتباط با ریزسیالش و جایگاه فعلی این حوزه در برنامه‌های آموزشی و پژوهشی دانشکده‌های مهندسی شیمی ارائه شود.

## ۲. مهندسی شیمی و ریزسیالش

همانطور که پیش‌تر گفته شد، در فرایندهایی که بحث انتقال حرارت، انتقال جرم، جداسازی، اجرای واکنش شیمیایی، سنتز یا شناسایی مواد و پدیده‌های الکتروسینتیکی مطرح است، مهندسی شیمی و ریزسیالش با یکدیگر پیوند می‌خورند؛ بنابراین، لازم است در طراحی این فرایندها از تخصص مهندسان شیمی استفاده شود. در ادامه به بررسی این فرایندها پرداخته شده است.

### ۱.۲. ریزسیالش و الکتروسینتیک

الکتروسینتیک شاخه‌ای از مهندسی شیمی است که به بررسی حرکت نسبی سیالات الکترولیتی و سطوح باردار نسبت به یکدیگر می‌پردازد. اگر یک سیال الکترولیتی در مجاورت یک سطح باردار قرار گیرد، توزیع یونهای محلول تحت تأثیر بار سطح دچار تغییر می‌شود. توضیح آنکه در داخل محلول یونهای همانام سطح از آن دفع شده و یونهای ناهمانام جذب می‌شوند. در نتیجه، در مجاورت سطح باردار ناحیه‌ای بسیار نازک و غیرالکتروخشی به نام دولایه الکتریکی<sup>۱</sup> ایجاد می‌شود که بار اکثر یونهای موجود در آن مخالف بار سطح است. ناحیه مذکور از دو لایه به نامهای لایه استرن<sup>۲</sup> و لایه نفوذ<sup>۳</sup> تشکیل می‌شود. در لایه استرن یونهای

1. Electric double layer (EDL)

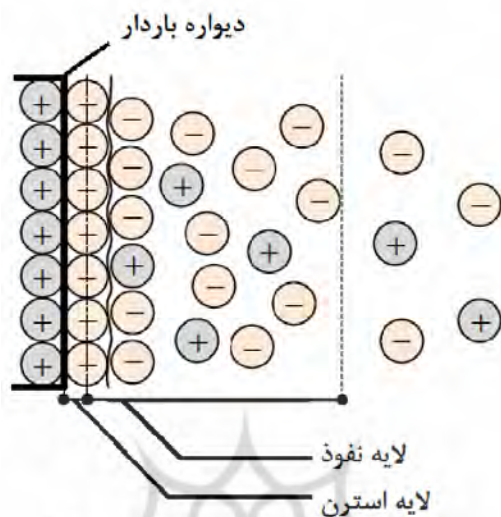
2. Stern layer

3. Diffuse layer

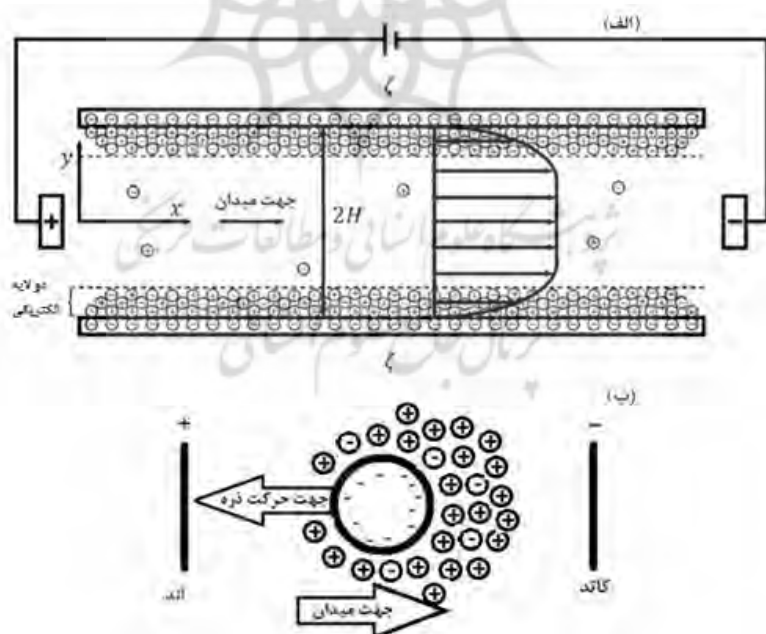
محلول به دلیل شدت برهمکنش الکترواستاتیکی ثابت‌اند و جابه‌جا نمی‌شوند. اما یونهای تجمع‌یافته در لایه نفوذی ساکن نیستند و می‌توانند تغییر مکان دهند (Qian, 2012). شکل ۳ طرح‌واره‌ای از دولایه الکتریکی را نمایش می‌دهد. اگر یک میدان الکتریکی خارجی به موازات سطح باردار بر سامانه مورد بحث اعمال شود، یونهای تجمع‌یافته در لایه نفوذ، تمایل به حرکت پیدا کرده و به سیال نیروی پسا اعمال می‌کنند. در اثر حرکت سیال پدیده الکتروسینتیکی الکترواسمز<sup>۱</sup> به وقوع می‌پیوندد. حرکت سیال الکترولیتی در ریزکانالهای باردار تحت تأثیر گرادیان فشاری پدیده الکتروسینتیکی دیگری به نام پتانسیل جریانی<sup>۲</sup> را به دنبال دارد. در واقع بر اثر حرکت سیال و به تبع آن حرکت یونهای موجود در لایه نفوذ، تجمع یونهای ناهمنام دیواره‌ها در یک سمت کانال نسبت به سمت دیگر آن افزایش می‌یابد و در نتیجه بین دو سمت کانال اختلاف پتانسیلی به وجود می‌آید که به عنوان پتانسیل جریانی شناخته می‌شود (Chen & Das, 2015). چنانچه ذرات کلئیدی باردار معلق در یک محلول الکترولیتی تحت تأثیر میدان الکتریکی خارجی نسبت به سیال دچار حرکت شوند، پدیده الکتروسینتیکی الکتروفورز<sup>۳</sup> ایجاد می‌شود. حرکت ذرات کلئیدی باردار معلق در محلولهای الکترولیتی در اثر میدان گرانشی به تولید اختلاف پتانسیلی منجر می‌شود که به نام پتانسیل ته‌نشینی<sup>۴</sup> معرفی شده است. در واقع، بیشتر پدیده‌های الکتروسینتیکی متأثر از دولایه الکتریکی و میدان خارجی‌اند و عوامل متعددی شامل الکترواستاتیک سطوح باردار، نوع و شدت میدان خارجی، اندازه ذرات معلق باردار، خواص سیال و ... در کیفیت آنها تأثیرگذار است. در شکل ۴ طرح‌واره فرایندهای الکترواسمز و الکتروفورز نمایش داده شده است و در ادامه به کاربردهای پدیده‌های الکتروسینتیک در سامانه‌های ریزسیالشی پرداخته خواهد شد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی

- 
1. Electroosmosis
  2. Streaming potential
  3. Electrophoresis
  4. Sedimentation potential



شکل ۳: طرح‌واره‌ای از دولایه الکتریکی (Sadeghi, 2013)



شکل ۴: طرح‌واره‌ای از الف) جریان الکترواسمزی در یک لوله موئینه (Sadeghi, 2013). ب) پدیده الکتروفورز

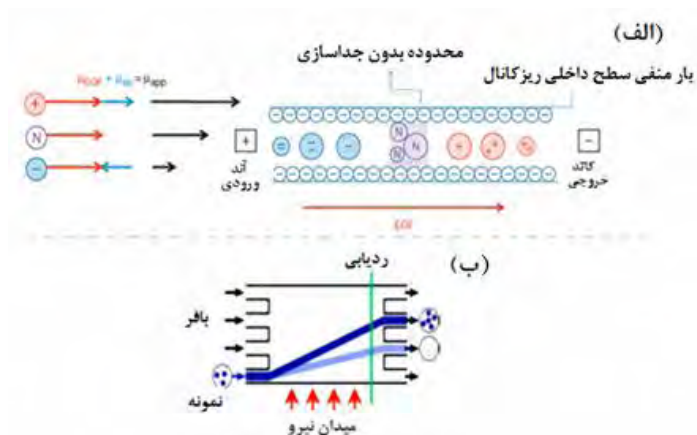


برای آنکه سیال با رژیم جریان آرام در داخل یک کانال حرکت کند، لازم است که گرادیان فشاری مطابق با معادله (۱) در دو سمت ریزکانال اعمال گردد.

$$\Delta P = \frac{8\mu L Q}{\pi a^4} \quad \text{معادله (۱)}$$

در رابطه بالا،  $\mu$  ویسکوزیته سیال و  $a$  شعاع کانال است. چنانچه مشاهده می‌شود با نصف کردن شعاع کانال به گرادیان فشاری معادل ۱۶ برابر مقدار اولیه برای ثابت نگه داشتن همان دبی جریان نیاز است. بنابراین، در مقیاسهای میکرو و نانو استفاده از گرادیان فشاری برای حرکت دادن سیال امری دشوار است. از طرف دیگر، به دلیل نسبت سطح به حجم بسیار زیاد در این سامانه‌ها حرکت دادن سیال با استفاده از نیروهای سطحی (الکترواسمز) گزینه‌ای معقول است (Islam, 2007). یکی دیگر از دلایل تمایل دانشمندان به استفاده از پدیده الکترواسمز، برای به حرکت درآوردن سیالات، تخت بودن پروفیل سرعت الکترواسمزی است (شکل ۴ الف). بدیهی است تخت بودن پروفیل سرعت موجب کاهش پخش ذرات محلول در الکتروولیت می‌شود. در واقع، سازوکار حرکت توده سیال در تمام سامانه‌های آز روتراشه الکترواسمز است. بهره‌گیری از این پدیده الکترواسمزی برای حرکت دادن سیالات نیاز به استفاده از پمپ مکانیکی را برطرف می‌سازد و به کوچک‌تر شدن دستگاه‌ها و مصرف کمتر انرژی منجر می‌شود.

در بسیاری از سامانه‌های ریزسیالشی از پدیده الکتروفورز برای جداسازی، شناسایی و تفکیک ذرات باردار یا توده‌های زیستی معلق در سیالات استفاده می‌شود. در واقع، الکتروفورز یکی از متداول‌ترین فرایندهایی است که در دستگاه‌های تشخیص سریع پزشکی صورت می‌گیرد. در شکل ۵ طرح‌واره‌ای از فرایندهای شناسایی، جداسازی و تفکیک، که با استفاده از پدیده الکتروفورز انجام می‌شوند، نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، در چنین فرایندهایی ذرات معلق به دلیل اختلاف پویایی الکتروفورزی ناشی از تفاوت اندازه یا بار سطحی از یکدیگر تفکیک می‌شوند.



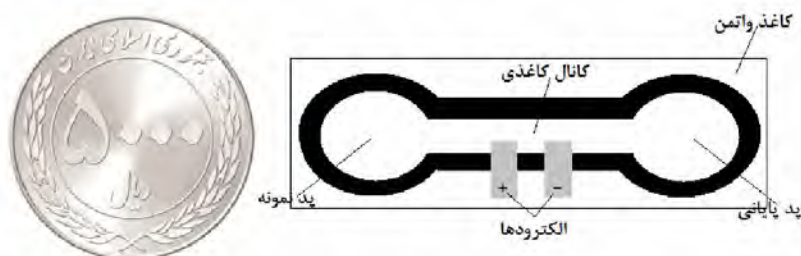
شکل ۵: طرح وارهای از الف) فرایند الکتروفورزی که در آن شناسایی انجام می‌شود (Shallan, Guijt, & Breadmore, 2013)، ب) فرایند الکتروفورزی که در آن جداسازی، ترتیب‌دهی یا شناسایی رخ می‌دهد (Tarn & Pamme, 2014)

از دیگر فرایندهای الکتروسینتیکی، که بیشترین کاربرد را در زمینه جداسازی ریزیالشی دارد، می‌توان به دی‌الکتروفورز<sup>۱</sup>، که در آن حتی ذرات معلق بدون بار نیز تحت تأثیر میدان الکتریکی اعمال شده قرار می‌گیرند و از یکدیگر جدا می‌شوند، اشاره کرد.

اساس کار برخی دستگاههای تشخیص سریع پزشکی مبتنی بر پدیده پتانسیل جریانی است. یکی از ساده‌ترین انواع آن روتراشه‌های موجود، که با استفاده از پدیده پتانسیل جریانی کار می‌کند، در شکل ۶ نمایش داده شده است. ابتدا لایه<sup>۲</sup> نمونه به محلول سدیم کلرید آغشته می‌شود؛ سپس پتانسیل جریانی تولیدشده بر اثر حرکت موینه محلول به سمت لایه پایانی اندازه‌گیری می‌شود (Leung, et al., 2010). پس از آغشته کردن کانال کاغذی سامانه مورد بحث به نمونه ادرار و خشک کردن آن، آزمایش فوق تکرار می‌شود. در شرایطی که ماده آلوده‌کننده‌ای مانند آلبومین در نمونه ادرار وجود داشته باشد، به‌واسطه پوشیده شدن سطح کانالهای سامانه کاغذی با ماده مورد اشاره و تغییر الکترواستاتیک سطح، شدت پتانسیل جریانی نسبت به آزمایش اول دچار تغییر شده و عفونت نمونه تشخیص داده می‌شود.

1. Dielectrophoresis

2. Pad



شکل ۶: نمایی از یک سامانه ریزسیالشی پایه کاغذی مورد استفاده برای اندازه‌گیری جذب سطحی پروتئینها بر روی گیرنده‌های سلولزی (شکل از مقاله لیونگ<sup>۱</sup> و همکاران الهام گرفته شده است)

حسگرهای خازنی ریزسیالشی<sup>۲</sup> نیز از خواص دولایه الکتریکی برای ردیابی مواد شیمیایی استفاده می‌کنند. در واقع، مجموعه الکترودها و دولایه‌های الکتریکی تشکیل شده در مجاورت آنها مانند یک خازن عمل می‌کنند. حال اگر در داخل الکترولیت موجود در فاصله میان دو الکترودها، آنتی‌بادی خاصی وجود داشته باشد که جذب الکترودها شود، ظرفیت خازنی دچار تغییر می‌شود. براساس شدت تغییر ظرفیت خازنی می‌توان برآورد کرد که چه مقدار آنتی‌بادی در نمونه مورد بررسی وجود داشته است. از چنین سامانه‌هایی برای انجام آزمایش الیزا<sup>۳</sup> (آزمایش ایدز) می‌توان استفاده کرد. دانشمندان اخیراً فرایند فوق را با فرایند دی‌الکتروفورز همراه کرده و موفق شده‌اند که سرعت عمل چنین آزمونی را تا حدود ۱۶ برابر افزایش دهند (Li, et al., 2014).

سلولهای موجودات زنده ریزکانالهای دروازه یونی<sup>۴</sup> دارند که از طریق آنها با محیط خارج از خود تبادل جرم انجام می‌دهند. در واقع، این پدیده‌های الکتروسینتیکی هستند که انتقال جرم از طریق این ریزکانالها را برای سلولها امکان‌پذیر می‌کنند. دانشمندان از ریزسیالش، الکتروسینتیک، و مهندسی شیمی برای شبیه‌سازی رفتار این ریزکانالها استفاده می‌کنند. طی دهه‌های اخیر، گروه‌های مختلفی از دانشمندان چنین کانالهایی را شبیه‌سازی کرده و با اعمال میدان خارجی، رفتار این سامانه‌های ریزسیالشی طبیعی را نسبت به شرایط محیطی بررسی کرده‌اند (Yameen et al., 2009; Hou et al., 2010). شرح بررسی‌های مزبور اگرچه بسیار عبرت آموز و حیرت انگیز، اما از حوصله مقاله حاضر خارج است.

1. Leung
2. Microfluidic Capacitance Sensors
3. Elisa
4. Ion Gated Nanochannels

## ۲.۲. ریزیالش و الکتروشیمی

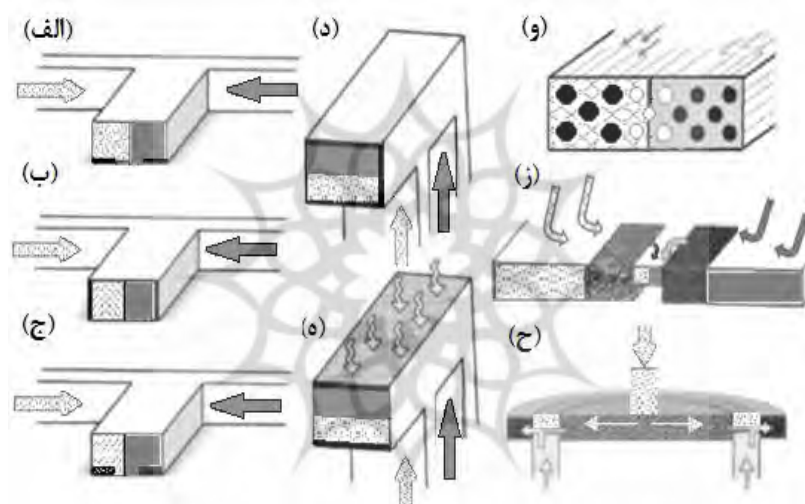
الکتروشیمی شاخه‌ای از شیمی است که اثرات متقابل پدیده‌های الکتریکی و شیمیایی را بررسی می‌کند. بخش عمده‌ای از این دانش به بررسی تغییرات شیمیایی ناشی از عبور جریان الکتریکی و همچنین انرژی الکتریکی تولیدشده ناشی از واکنشهای شیمیایی می‌پردازد. مهندسی الکتروشیمی که زیرمجموعه‌ای از مهندسی شیمی است، با طراحی و ساخت تجهیزاتی، که فرایندهای الکتروشیمیایی در آنها رخ می‌دهد، سروکار دارد.

یکی از تجهیزات الکتروشیمیایی، که از آنها برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود، پیل‌های سوختی هستند. در برخی منابع از این سامانه‌ها به‌عنوان باتریهایی، که جریان الکترولیت به‌صورت پیوسته در میان دو الکتروود آنها جریان دارد، یاد کرده‌اند. در پیل‌های سوختی یک جریان حاوی مواد اکسیدکننده و یک جریان حاوی سوخت به دو سل مجزا، که به‌وسیله یک غشا تبادل یونی از هم جدا شده‌اند، پمپ می‌شود. سوخت در مجاورت الکتروود آندی اکسیدشده (به این الکتروود الکترون می‌دهد و به تولید بار منفی در آن منجر می‌شود) و اکسیدکننده در مجاورت کاتد دچار کاهش (از آن الکترون می‌گیرد و در آن بار مثبت تولید می‌کند) می‌شود. در این حین، برخی از یونهای تولیدشده بر اثر هر کدام از واکنشهای نام‌برده، که جزء واکنش‌دهنده‌های واکنش دیگری هستند، از طریق غشا تبادل یونی میان دو سل تبادل می‌شوند. اختلاف پتانسیلی، که در نتیجه واکنشهای اکسایش و کاهش در دو الکتروود به وجود می‌آید، محصول فعالیت پیل سوختی است. کار با پیل‌های سوختی معمولاً با چالشهای خاصی همراه است. بزرگ‌ترین این چالشها ساخت و نگهداری غشاهای تبادل یونی است. به‌علاوه، ساخت یا تهیه غشا معمولاً زمان‌بر و هزینه‌بر است. همچنین، برای آنکه بتوان به‌درستی فرایند تولید انرژی الکتریکی در پیل سوختی را اجرا کرد، باید از برخی شرایط عملیاتی، که ممکن است به غشا آسیب وارد کند، اجتناب کرد. مشکلات مربوط به گرفتگی غشا، فرسودگی آن، عبور بدون مانع<sup>۱</sup> و ... را نیز باید به چالشهای نام‌برده افزود.

با پیشرفت ریزیالش و ظهور پیل‌های سوختی ریزیالشی<sup>۲</sup> که به نام پیل‌های سوختی بدون غشا<sup>۳</sup> یا پیل‌های سوختی جریان آرام<sup>۴</sup> نیز شناخته می‌شوند، چنین چالشهایی برطرف شده است. در واقع، پیل‌های سوختی ریزیالشی ممکن است ساختاری مشابه با یکی از ساختارهای نمایش داده شده در شکل ۷ داشته باشند. به دلیل اندازه کوچک سطح مقطع ریزکانالهای موجود در این سامانه‌ها، رژیم جریانهای سوخت و اکسیدکننده همواره آرام است؛ لذا، چنانچه از دو ورودی سامانه، سوخت و اکسیدکننده به داخل ریزکانالها

- 
1. Crossover
  2. Microfluidic Fuel Cells
  3. Membraneless Fuel Cells
  4. Laminar Flow Fuel Cells

پمپ شوند، هر دو سیال به‌صورت پهلوه‌پهلوی در داخل کانالها حرکت می‌کنند و اختلاطی میان آنها رخ نمی‌دهد. از آنجایی که در چنین سامانه‌هایی تبادل یونها بین دو جریان سیال فقط و فقط از طریق فصل مشترک آنها و براساس نفوذ صورت می‌گیرد، دیگر ضرورتی برای استفاده از غشا وجود ندارد. در چنین سامانه‌هایی چالش‌های مربوط به استفاده از غشا برطرف می‌شود و حجم، قیمت و هزینه‌های نگهداری نیز بسیار اندک است. امتیاز دیگری که پیل‌های سوختی ریزسیالشی نسبت به پیل‌های سوختی معمولی دارند، نسبت سطح به حجم بالای این سامانه‌ها است که باعث می‌شود سطح نسبتاً بزرگ‌تری در اختیار مواد واکنش‌دهنده قرار داده شده و در نهایت بازدهی سامانه بیشتر شود.

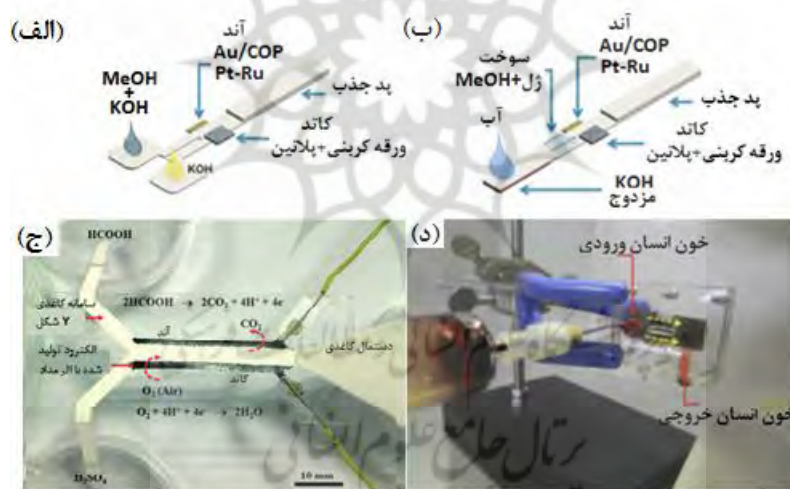


شکل ۷: طرح‌واره‌ای از طراحی‌های رایج پیل‌های سوختی ریزسیالشی. الف) کانال T شکل بوده و الکترودها در کف کانال جای گرفته‌اند، ب) کانال T شکل است و الکترودها در دیواره‌های کانال قرار گرفته‌اند، ج) کانال T شکل است و الکترودهایی متخلخل در کف کانال قرار داده شده‌اند، د) کانال F شکل است، ه) کانال F شکل است و سامانه تنفس هوایی است و از الکترودها و فضا‌سازهای میله‌ای برای ساخت پیل استفاده شده است، ز) سوخت و اکسیدکننده پس از عبور از داخل الکترودهای متخلخل وارد کانال می‌شوند، ح) یکی از جریانها پس از عبور از الکترودهای متخلخل با دیگری دچار تماس می‌شود (Kjeang, Djilali, & Sinton, 2009).

در برخی پیل‌های سوختی ریزسیالشی، که نمونه‌هایی از آنها در قسمتهای الف)، ب) و ج) شکل ۸ نمایش داده شده است، حتی نیازی به استفاده از پمپ مکانیکی نیست. توضیح آنکه در چنین سامانه‌هایی جریان سیالات به‌واسطه خواص موئینه حفرات ریز موجود در پایه کاغذی صورت می‌پذیرد. حذف پمپ از پیل‌های سوختی ریزسیالشی، که افزایش بازدهی و کمینه شدن اندازه این سامانه‌ها را در پی دارد، باعث شده

است بسیاری از متخصصان از این سامانه‌ها به‌عنوان گزینه‌هایی بسیار جدی برای جایگزینی باتریهای کنونی یاد کنند.

در پیل‌های سوختی ریزیالشی می‌توان از خون، گلوکز، متانول، اسید فرمیک و .. به‌عنوان سوخت استفاده کرد. از پیل‌های سوختی ریزیالشی حتی به‌عنوان حسگر نیز می‌توان بهره برد. شدت انرژی تولیدی چنین سامانه‌هایی تابع مقدار و غلظت واکنش‌دهنده موجود در جریان سوخت یا اکسیدکننده است. حال چنانچه در پساب یک کارخانه، که سوخت یک پیل ریزیالشی محسوب می‌شود، اگر مقدار آلاینده‌ای از حد مجاز بیشتر باشد، با اندازه‌گیری جریان یا ولتاژ خروجی پیل می‌توان متوجه شد (Ye, et al., 2015). اخیراً، تلاش‌هایی در راستای ساخت پیل‌های سوختی سازگار با بدن انسان انجام شده است. چنین سامانه‌هایی ممکن است در بدن انسان کاشته شوند تا ترکیب شیمیایی خون فرد میزبان به‌شکل مستمر بررسی شود. ممکن است در آینده‌ای، نه‌چندان دور، از پیل‌های سوختی ریزیالشی به‌جای باتری قلب، که از خون انسان تغذیه می‌کند، استفاده شود. در شکل ۸ نمونه‌هایی از پیل‌های سوختی ریزیالشی نمایش داده شده است.



شکل ۸: (الف و ب) نمایی از دو طراحی مختلف پیل سوختی پایه‌کاغذی مورد استفاده در سامانه‌های تشخیص سریع پزشکی (Campo, De la Fuente, Rojasc, & Sabat'e, 2014 Esquivel, Del) نوع دیگری از طراحیهای پیل‌های سوختی پایه‌کاغذی (Chacraborty, & Chanda, 2014Arun). (د) نمایی از یک پیل سوختی ریزیالشی تنفس هوایی که در آن از گلوکز خون برای تولید انرژی استفاده می‌شود (Dector, Escalona-villalpando, Dector, & Vallejo-becerra, 2015)

پیل‌های سوختی ریزسیالشی سامانه‌های نوظهوری هستند که به‌جز در موارد بسیار محدود، تاکنون به تولید انبوه نرسیده و فقط برای مصارف خاص مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه هنوز هم جای کار فراوان و انجام اصلاحات بر روی این سامانه‌ها وجود دارد و همچنین به‌دلیل مزایایی، که نسبت به سامانه‌های معمول دارند، می‌توان پیش‌بینی کرد که در آینده استفاده‌های فراوانی از آنها در زمینه‌های مختلف خواهد شد. در سال ۲۰۰۵ قراردادی میان دفتر تحقیقات ارتش آمریکا و شرکت INI به مبلغ ۷۵۰۰۰۰ دلار با هدف توسعه تجهیزات قابل حمل تولید انرژی منعقد شد. طی این قرارداد مقرر شد که پیل‌های سوختی ریزسیالشی تنفس هوایی متانول مستقیم<sup>۱</sup> جایگزین تمام سامانه‌های دارای غشای تبادل پروتون شده و بدین ترتیب با حذف پدیده عبور بدون مانع از هدر رفتن انرژی معادل ۵۰۰ وات‌ساعت در کیلوگرم جلوگیری شود. فناوری شرکت نام‌برده تحت نظارت دانشگاه ایلی‌نویز<sup>۲</sup> بوده و طراحیها و مواد مورد استفاده برای ساخت این ریزسامانه‌ها مشابه سایر سامانه‌های ریزسیالشی بوده است (Army contract for INI Power, 2005).

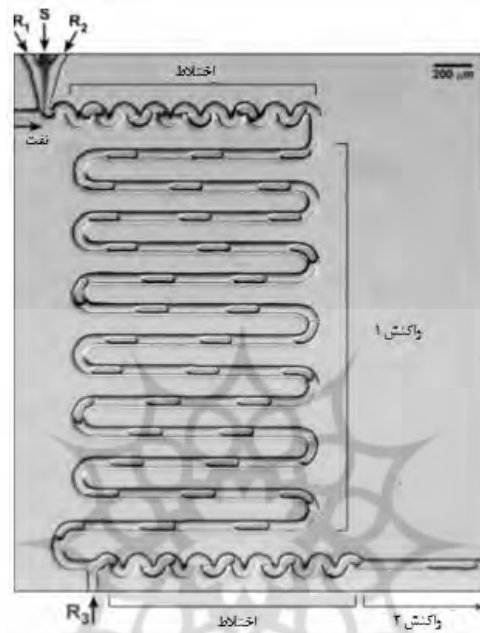
### ۳.۲. ریزسیالش و مهندسی واکنشهای شیمیایی

کوچک کردن ابعاد راکتورهای شیمیایی اثر مطلوبی بر فرایندهای شیمیایی دارد. در واقع، با افزایش نسبت سطح به حجم، سرعت انتقال جرم و انرژی افزایش یافته و همین امر موجب می‌شود که در راکتورهای ریزسیالشی، که در آنها واکنشهای شدید گرمازا رخ می‌دهد، نقاط داغ تشکیل نشود. همچنین در چنین سامانه‌هایی امکان ایجاد شدن فضاهای مرده یا کور بسیار ضعیف است (Assmann, et al., 2013).

از راکتورهای ریزسیالشی در شرایطی، که نیاز به تولید مقدار اندکی از محصولات خاص وجود دارد، استفاده می‌شود. در شرایطی که لازم است واکنش در دما یا فشار بسیار بالا انجام شود و یا در شرایطی که محیط واکنش سمی و خطرناک است، استفاده از راکتورهای ریزسیالشی بسیار ایمن‌تر از راکتورهای معمول است (همان). کنترل جریان و غلظت سیالات در راکتورهای ریزسیالشی بسیار آسان است؛ و لذا، با استفاده از این تجهیزات می‌توان محصولاتی با ویژگیهای از پیش تعیین شده را با بازدهی بالایی تولید کرد. به همین دلیل از راکتورهای ریزسیالشی در سنتز مواد نانو ساختاری، که اندازه، توزیع اندازه، شکل و ساختار آنها بسیار مهم است، استفاده فراوان می‌شود. در سامانه‌های ریزسیالشی با الگوی جریان قطره‌ای (حالتی که در قسمتهای (ب) و (ج) شکل ۱۰ نمایش داده شده است) معمولاً قطرات نقش قالب<sup>۳</sup> را ایفا کرده و بدین ترتیب فرایند رشد نانوذرات کنترل شده و محصولی با توزیع اندازه اندک و به شکل پیوسته تولید می‌شود (Fontana et al. 2016; Song et

- 
1. Air breathing Direct Methanol Microfluidic Fuel Cells
  2. University of Illinois
  3. Template

(al., 2008) در شکل ۹ نمایی از یک راکتور ریزیالشی، که در آن یک واکنش دو مرحله‌ای صورت می‌پذیرد، نمایش داده شده است.



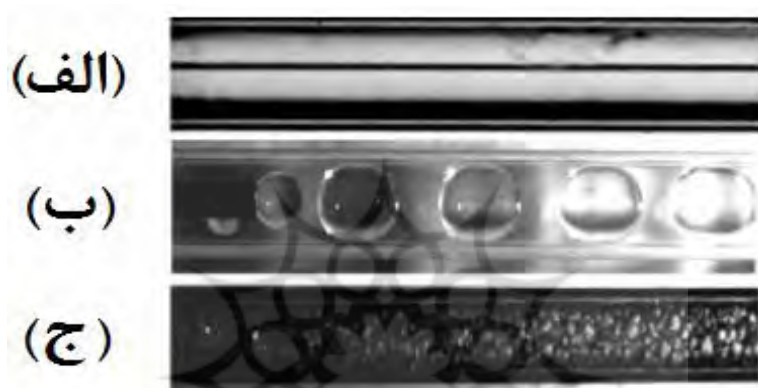
شکل ۹: نمایی از یک راکتور ریزیالشی (Song, Hormes, & Kumar, 2008)

#### ۴.۲. ریزیالاش و استخراج

استخراج مایع - مایع فرایندی است که در آن از طریق همجوار کردن دو سیال امتزاج‌ناپذیر، حل‌شونده‌های موجود در یک سیال (فاز) را از آن خارج کرده و به سیال (فاز) دیگری منتقل می‌کنند. عاملی که باعث انتقال حل‌شونده از فازی به فاز دیگر می‌شود، حلالیت بیشتر آن در فاز مقصد است. از این فرایند برای استخراج فلزات، انجام پیش‌تصفیه، کشف دارو و ... استفاده می‌شود. فرایندهای استخراج مایع - مایع مرسوم معمولاً، در ستونها یا تانکهای بزرگی با گنجایش صدها لیتر انجام شده و تماس فازها و سرعت انتقال جرم با استفاده از پُرکنها، توزیع‌کننده‌های جریان یا همزنهای خاص کنترل می‌شود. در مواقعی که حجم نمونه‌های ورودی اندک است یا لازم است که استخراج مواد کمیاب یا بسیار باارزش صورت پذیرد، استفاده از سامانه‌های استخراجی مرسوم کاری غیرعملی است. در چنین شرایطی می‌توان از سامانه‌های استخراجی ریزیالشی استفاده کرد (Kriel et al., 2015).



در سامانه‌های استخراج ریزسیالشی به‌دلیل ابعاد کوچک ریزکانالها نسبت سطح تماس سیالات به حجم آنها بسیار بزرگ است؛ بنابراین، انتقال جرم با سرعت بالایی انجام می‌پذیرد. لازم به ذکر است که با استفاده از چنین سامانه‌هایی فرایند استخراج را به‌صورت پیوسته می‌توان اجرا کرد. تا به حال استخراج آهن II، مس II، پالادیم II، اورانیوم IV و پلاتینیم IV با استفاده از چنین سامانه‌هایی گزارش شده است (همان). در شکل ۱۰ الگوهای مختلف جریان سیالات در فرایندهای استخراج و سنتز مواد شیمیایی نمایش داده شده است.



شکل ۱۰: الف) الگوی جریانی موازی، ب و ج) حالات مختلف الگوی جریانی قطره‌ای (Assmann, Ladosz, & Rudolf von Rhor, 2013)

### ۳. چالش‌های پیش‌روی حوزه ریزسیالشی

یکی از مهم‌ترین عواملی که به ظهور حوزه ریزسیالشی انجامید، پیشرفت نانوفناوری و به‌تبع آن پیدایش روش‌های مشخصه‌یابی، ساخت، و مونتاژ تجهیزات ریز<sup>۱</sup> بوده است. در حال حاضر، سخت‌ترین، هزینه‌برترین، زمان‌برترین و اصلی‌ترین چالش موجود در برابر گسترش این سامانه‌ها، ساخت و مونتاژ آنها است. شاید یکی از دلایل بی‌توجهی نسبی پژوهشگران در کشورهای در حال توسعه به حوزه ریزسیالشی نبودن بودجه، امکانات یا دانش و تخصص کافی برای ساخت و مونتاژ چنین سامانه‌هایی است.

در کنار امتیازات چشمگیری، که پیش‌تر به آنها اشاره شد، سامانه‌های ریزسیالشی در زمینه انجام آزمایش، شناسایی و مشخصه‌یابی مشکلاتی هم دارند. در حال حاضر، از سامانه‌های ریزسیالشی برای انجام آزمایش‌های درون‌تنی<sup>۲</sup> کمتر استفاده می‌شود. از دلایل این امر می‌توان به محدود بودن روش‌های تعمیم اطلاعات

1. Nanofabrication

2. In-vivo

به دست آمده از ارگانیزمهای کوچک به سایر نمونه‌ها یا نامشخص بودن سینتیک دارویی<sup>۱</sup> و توزیع زیستی<sup>۲</sup> اشاره کرد. از طرفی، انجام آزمایشهای برون‌تنی<sup>۳</sup> با استفاده از سامانه‌های ریزیالشی فرایندی پیچیده و هزینه‌بر است. بسیاری از سامانه‌های ریزیالشی مورد استفاده در انجام چنین آزمایشهایی یا یک‌بار مصرف‌اند یا استریل نگه داشتن آنها برای استفاده مجدد فرایندی دشوار است (Valencia et al. 2012). از میان چالشهایی، که برخی سامانه‌های ریزیالشی مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل مواد با آن مواجه هستند، می‌توان به دشوار بودن فرایند آماده‌سازی نمونه و دم‌ش<sup>۴</sup> آن، پیچیدگی ذخیره‌سازی مواد واکنش‌دهنده در سامانه و نیاز به استفاده از تجهیزات جانبی بزرگ و پیچیده (مثل میکروسکوپ/ریزبین) برای مشاهده، خوانش و تفسیر نتایج آزمایش اشاره کرد (Whiteside, 2006). سامانه‌های پایه کاغذی نیز با مشکلات خاص خود روبه‌رو هستند. ماندگی سیال نمونه در حفره‌های کاغذ، تبخیر آن و در نتیجه نرسیدن مواد مؤثر به مقصد تعیین‌شده بزرگ‌ترین چالش پیش‌روی این سامانه‌ها است (Li, et al., 2012).

در تحقیقات آزمایشگاهی معمولاً از ماده پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان برای ساخت سامانه‌های ریزیالشی استفاده می‌شود. از دلایل اقبال دانشمندان به این ماده می‌توان به شفافیت، قیمت ارزان و سهولت ساخت و مونتاژ سامانه‌های ریزیالشی با استفاده از این ماده اشاره کرد (Zhou, et al., 2010; Hu et al., 2002). باین حال، استفاده از سامانه‌هایی که ریزکانالهای آنها از جنس بسیار اشاره شده باشد، در عمل با چالشهایی روبه‌رو است. دیواره‌های ریزکانالهای پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسانی ممکن است با برخی از حلالها و همچنین با دماهای عملیاتی بالا سازگار نباشند (Fontana et al. 2016). تراوایی دیواره ریزکانالهای مورد بحث نسبت به بخار آب ممکن است به تبخیر آب موجود در سامانه و در نتیجه ایجاد اختلال در برخی فرایندها، مانند فرایندهای کشت سلولی بینجامد (Halldorsson et al. 2015). همچنین در برخی منابع از حل شدن یا تورم دیواره‌های پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسانی در اثر تماس با سیالهای الکترولیتی آلی به‌عنوان یکی از چالشهای اصلی پیش‌روی سامانه‌های ریزیالشی مورد استفاده در سنتز یاد شده است (Whiteside, 2006). در فرایند الکتروفورز که با هدف جداسازی یا شناسایی مواد صورت می‌پذیرد، خواص سطحی پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به تولید جریان ناپایدار و غیر قابل کنترل الکترو اسمزی منجر می‌شود، که این امر بر بازدهی یا دقت فرایند اثرات نامطلوبی دارد (Zhou, et al., 2010; Hu et al. 2002). علاوه بر این، خاصیت آب‌گریزی شدید این بسیار ممکن است موجب جذب مولکولهای آب‌گریز بر روی سطح ریزکانالها شود و در روند فرایند اختلال ایجاد کند. البته با دستکاری سطوح ریزکانالها با استفاده

1. Pharmacokinetics
2. Biodistribution
3. In-vitro

۴. معادل مصوب فرهنگستان زبان و ادب فارسی برای واژه پمپاژ (Pumping)

از پرتوهای الکترومغناطیسی و واکنشهای شیمیایی یا پوشش‌دهی آنها می‌توان مشکلات را تا حدی برطرف کرد (Halldorsson et al. 2015; Zhou, et al., 2010; Hu et al. 2002).

مقیاس تولید محصولات نانو ساختار با استفاده از این سامانه‌ها مقداری در محدوده میکروگرم تا میلی‌گرم است. البته با استفاده از انباشته‌های متشکل از سامانه‌های ریزسیالی می‌توان مقیاس تولید را به گرم تا کیلوگرم افزایش داد. اما همچنان عدم امکان تولید محصول با ظرفیت بالا یکی از چالشهای پیش‌روی سامانه‌های مورد بررسی است (Valencia et al. 2012). لذا می‌توان چنین پنداشت که در صنایعی که محصولات خود را به‌طور ناپیوسته و در مقدار محدود تولید می‌کنند (مثل صنایع تولید مواد اولیه غذایی و دارویی یا صنایع داروسازی) استفاده از سامانه‌های ریزسیالی بتواند سودآور و مفید باشد. پیش‌بینی می‌شود که در آینده با پیشرفت ریزسیالی تراشه‌های تجاری تولید نانو مواد به بازار ارائه شود (همان).

از آنجایی که چالشها و مشکلات نام‌برده و روشهای مواجهه و مقابله با آنها موضوع بسیاری از پژوهشها و تحقیقات محققان فعال در حوزه مورد بحث را تشکیل می‌دهد و باتوجه به روند تحقیقات مراکز علمی و پژوهشی و همچنین پیشرفتهای علمی حاصل‌شده در سالهای اخیر انتظار می‌رود که برخی از چنین چالشها و مشکلاتی در آینده نه‌چندان دور برطرف شود.

#### ۴. جایگاه ریزسیالی در برنامه آموزشی و پژوهشی دانشکده‌های مهندسی شیمی

پیش‌تر درباره ارتباط ریزسیالی و مهندسی شیمی به شکل بسیار مختصر اطلاعاتی ارائه شد. به دلیل ارتباط تنگاتنگ میان این دو حوزه دانش و فناوری، گسترش و توسعه ریزسیالی بدون بهره‌گیری از دانش و تخصص مهندسان شیمی غیرممکن به نظر می‌رسد. لذا طی سالهای اخیر مراکز دانشگاهی معتبر جهان؛ آموزش، تحقیق و پژوهش در زمینه ریزسیالی را در برنامه دانشکده‌های مهندسی شیمی خود گنجانده‌اند. در برخی دانشگاهها، آزمایشگاهها یا مراکز تحقیقاتی ریزسیالی تأسیس شده است. باتوجه به بین‌رشته‌ای بودن ریزسیالی ممکن است در دانشگاههای مزبور، آزمایشگاهها یا مراکز مورد بحث در زیرمجموعه دانشکده‌های متفاوتی قرار داشته باشند. به‌عنوان مثال، در دانشگاه نوتردام<sup>۱</sup> آزمایشگاه ریزسیالی در زیرمجموعه دانشکده مهندسی شیمی قرار دارد اما در دانشگاههای استنفورد<sup>۲</sup> و پرینستون<sup>۳</sup> به ترتیب زیرمجموعه دانشکده‌های مهندسی مکانیک و فیزیک هستند. در جدول ۲ تعدادی از مراکز تحقیقاتی ریزسیالی، که زیرمجموعه دانشکده‌های مهندسی شیمی هستند، معرفی شده‌اند. در برخی دانشکده‌های مهندسی شیمی گروههایی

- 
1. University of Notre Dame
  2. Stanford University
  3. Princeton University

تشکیل شده است که بخشی از فعالیتهای خود را به تحقیق در مورد ریزیالاش اختصاص داده‌اند. در جدول ۳ برخی از این گروههای تحقیقاتی معرفی شده‌اند.

جدول ۲: فهرست آزمایشگاهها/ مراکز تحقیقاتی ریزیالاش زیرمجموعه دانشگاه مهندسی شیمی چند دانشگاه معتبر

نام دانشگاه	کشور	نام آزمایشگاه/ مرکز تحقیقاتی	فعالیت‌های کنونی
University of Notre Dame	ایالات متحده، ایندیانا	Center of Microfluidics and Medical Diagnostics	<ul style="list-style-type: none"> <li>• دارورسانی</li> <li>• تشخیص سریع طبی</li> <li>• حسگرهای محیطی</li> </ul>
Northeastern University	ایالات متحده، بوستون	Biological Surface Engineering and Microfluidics Laboratory	<ul style="list-style-type: none"> <li>• نسل جدید پوششهای مورد استفاده در سامانه‌های ریزیالاشی</li> <li>• ساخت خودکار سلولهای دندریتری برای انجام واکنش‌های بیولوژیکی و سلول‌درمانی</li> <li>• شبیه‌سازی سلولهای T شکل با استفاده از راکتورها برای سلول‌درمانی</li> </ul>
Virginia Polytechnic Institute and State University	ایالات متحده، ویرجینیا	Microfluidics Lab	<ul style="list-style-type: none"> <li>• تجزیه و تحلیل تک‌سلولی</li> <li>• مهندسی بافت و ژن‌رسانی</li> <li>• حسگرهای زیستی</li> </ul>
Bogazicy University	ترکیه، استانبول	Microfluidics Laboratory	<ul style="list-style-type: none"> <li>• مدل‌سازی جریان سیالات غیرنیوتنی و ویسکوز در سامانه‌های ریزیالاشی</li> <li>• پژوهش درباره مشکلات ناپایداری در ریزکانالها</li> <li>• تبخیر، پدیده‌های ریلی و مارانگونی</li> </ul>

جدول ۳: چند گروه تحقیقاتی مهندسی شیمی که در زمینه ریزسیالشن فعالیت می‌کنند

نام دانشگاه	سرپرست گروه تحقیقاتی	فعالیت کنونی
University of Pennsylvania	Prof. Daeyeon Lee	• سنتز ریزسیالشی مواد نانو
University of California Berkeley	Prof. Susan J. Muller	• دینامیک مولکولی محلولهای معلق • جریان سیالات بیولوژیکی در ریزکانالها • بررسی نقطه ایستایی در فرایند تعیین ساختار ژنتیکی تک‌مولکولها
MIT	Prof. Martin Bazant	• پدیده‌های الکتروسینتیکی در سامانه‌های ریزسیالشی • مدل‌سازی ریاضی فرایندهای ریزسیالشی • پیلهای سوختی ریزسیالشی
MIT	Prof. Klavs Jensen	• کریستالیزاسیون پیوسته در سامانه‌های میکرو • سنتز نانومواد با استفاده از راکتورهای ریزسیالشی
Johns Hopkins	Dr. Zachary Gagnon	• غشاهای بسیاری مورداستفاده در آژ روتراشه‌ها • تجزیه ریزسیالشی تک‌مولکولها
University of Michigan	Prof. Mark A. Burns	• بررسی واکنشهای بیولوژیکی با استفاده از میکروویسکومترها • ساخت حسگرها • استفاده از پردازشگرهای نیوماتیکی در سامانه‌های ریزسیالشی

در برخی دانشگاهها نیز درسهای مرتبط با حوزه ریزسیالشن در برنامه تحصیلی دانشجویان مهندسی شیمی قرار داده شده است. البته قابل توجه است که بیشتر این درسها در دوره‌های تحصیلات تکمیلی ارائه شده و معمولاً اختیاری هستند. تعدادی از درسهای مرتبط با ریزسیالشن در جدول ۴ گزارش شده‌اند. لازم به ذکر است که تمام درسهایی، که در جدول مزبور گزارش شده‌اند، سه‌واحدی هستند.

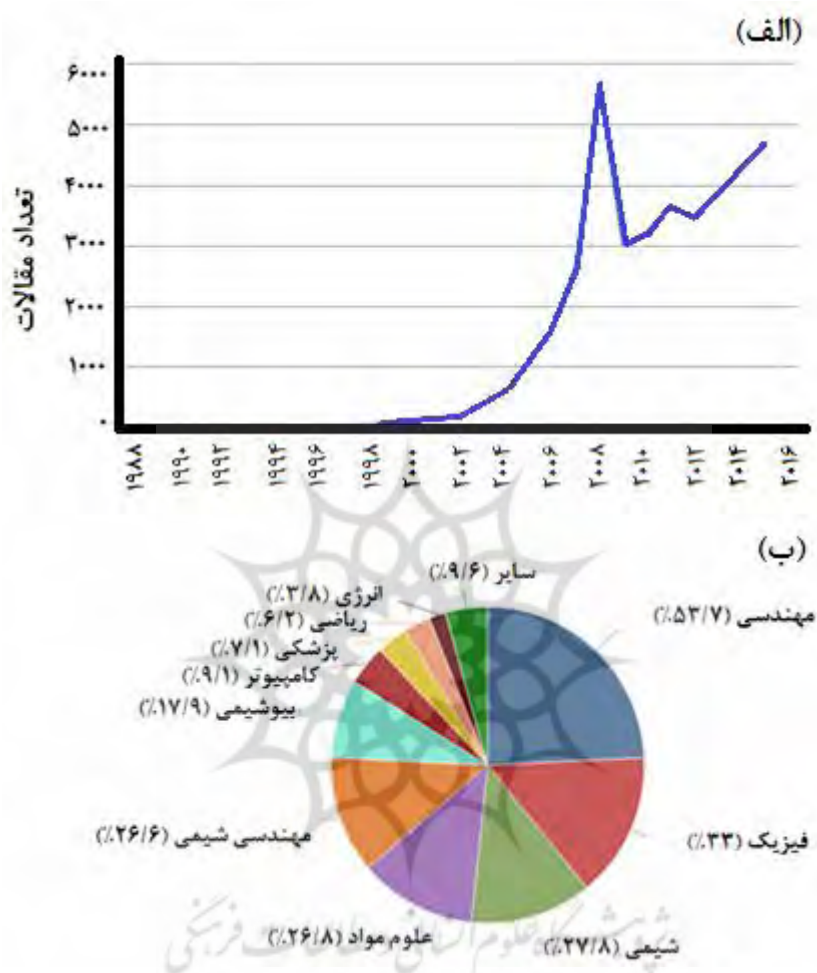
اطلاعات آماری نمایش داده‌شده در شکل ۱۱، که از پایگاه اینترنتی اسکوپوس<sup>۱</sup> استخراج شده است، نشان می‌دهد که طی سالهای اخیر تعداد مقالات مربوط به ریزسیالشن روند صعودی داشته و همچنین حدود ۲۶٪ مقالات منتشرشده در این زمینه مرتبط با مهندسی شیمی بوده است. این واقعیت به‌خوبی نشان می‌دهد که

1. Scopus

دانشکده‌های مهندسی شیمی در زمینه ریزیبالش بسیار فعال بوده‌اند. همچنین با تأمل در شکل مذکور می‌توان به سرعت بالای تولید علم در این حوزه پی برد.

جدول ۴: فهرستی از درسهای مرتبط با ریزیبال که در دانشکده‌های مهندسی شیمی ارائه می‌شوند

نام درس	دانشگاه	رشته و مقطع تحصیلی	مرجع
Introduction to MEMs	University of Georgia	مهندسی شیمی و بیولوژی/ تحصیلات تکمیلی	<a href="http://www.chbe.gatech.edu/graduate/classes">http://www.chbe.gatech.edu/graduate/classes</a>
Microfluidics and applications	University of Georgia	مهندسی شیمی و بیولوژی/ تحصیلات تکمیلی	<a href="http://www.chbe.gatech.edu/graduate/classes">http://www.chbe.gatech.edu/graduate/classes</a>
MEMs devices	University of Georgia	مهندسی شیمی و بیولوژی/ تحصیلات تکمیلی	<a href="http://www.chbe.gatech.edu/graduate/classes">http://www.chbe.gatech.edu/graduate/classes</a>
Topics in applied microfluidics	MIT	مهندسی شیمی/ تحصیلات تکمیلی	<a href="http://student.mit.edu/catalog/m10a.html">http://student.mit.edu/catalog/m10a.html</a>
Microfabrication and microfluidic technology	California State University Long Beach	مهندسی شیمی/ تحصیلات تکمیلی	<a href="http://web.csulb.edu/divisions/aa/catalog/current/coe/chemical_engineering/che_grad.html">http://web.csulb.edu/divisions/aa/catalog/current/coe/chemical_engineering/che_grad.html</a>
	Texas A & M University	مهندسی شیمی/ کارشناسی	<a href="https://engineering.tamu.edu/chemical/academics/courses/descriptions">https://engineering.tamu.edu/chemical/academics/courses/descriptions</a>
Microfluidics & Microscale Analysis in Materials and Biology	University of Massachusetts Amherst	مهندسی بیوشیمی/ کارشناسی	<a href="https://cesd3.oit.umass.edu/undergradguide/2017-2016/Page11039.html">https://cesd3.oit.umass.edu/undergradguide/2017-2016/Page11039.html</a>
Microfluidic science and engineering	University of Michigan	مهندسی شیمی/ تحصیلات تکمیلی	<a href="http://www.engin.umich.edu/college/academic/bulletin/courses/che">http://www.engin.umich.edu/college/academic/bulletin/courses/che</a>



شکل ۱: (الف) روند تغییرات تعداد مقالات چاپ شده در ارتباط با ریزسیال‌شناسی طی سال‌های اخیر، (ب) سهم حوزه‌های مختلف علوم از مقالات چاپ شده در مورد ریزسیال‌شناسی

درواقع، با توسعه یافتن بحث ریزسیال‌شناسی و افزایش تعداد مقالات منتشر شده در این زمینه تعداد نشریاتی، که چنین حوزه‌هایی را پوشش می‌دهند، نیز افزایش پیدا کرده است. برخی نشریات صرفاً به چاپ مقالات مربوط به این موضوع می‌پردازند؛ درحالی‌که، برخی دیگر علاوه بر پوشش دادن حوزه ریزسیال‌شناسی در سایر زمینه‌های مهندسی شیمی نیز فعال هستند. در جدول ۵ به تعدادی از نشریات فعال در زمینه ریزسیال‌شناسی و مهندسی شیمی اشاره شده است.

جدول ۵: فهرستی از نشریاتی که در زمینه ریزسیالش نیز فعال هستند

ردیف	نام نشریه	ناشر	ضریب تأثیر <sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۵
۱	Microfluidics and Nanofluidics	Springer	۲/۵۳۷
۲	Bio microfluidics	AIP Publishing	۳/۳۵۷
۳	Lab on a Chip	RSC Publishing	۵/۵۸۶
۴	Langmuir	ACS Publications	۳/۹۹۳
۵	Colloid and surface science	Elsevier	۳/۷۸۲
۶	Soft Matter	RSC Publishing	۳/۷۹۸
۷	Electrophoresis	Wiley-VCH	۲/۴۸۲
۸	Journal of Chemical Physics	AIP Publishing	۲/۸۹۴
۹	Sensors and Actuators, B: Chemical	Elsevier	۴/۷۵۸
۱۰	Journal of Power Sources	Elsevier	۶/۳۳۳
۱۱	Physical Chemistry Chemical Physics	RSC Publishing	۴/۴۴۹
۱۲	RSC Advances	RSC Publishing	۳/۲۸۹

همانطور که پیش‌تر گفته شد، حوزه‌های نوظهوری مانند ریزسیالش در اثر هم‌افزایی دانش و فناوری پدید آمده‌اند. ناگفته نماند که نیازهای صنعتی اصلی‌ترین انگیزه ایجاد این حوزه‌ها بوده‌اند. در کشورهایی مانند ایران که در آن سرعت رشد دانش و صنعت با یکدیگر متناسب نیست و هدف‌گذاریها و جهت‌گیریهای صنعت و دانشگاه مستقل از یکدیگرند؛ برنامه‌ریزی، سرمایه‌گذاری، تأمین بودجه و فراهم آوردن تجهیزات و امکانات لازم برای تحقیق و پژوهش در زمینه حوزه‌های نوظهور با دشواری و مقاومت مواجه می‌شود؛ بنابراین، علی‌رغم اینکه در سایر دانشکده‌ها به صورت جسته‌وگریخته تحقیقات و پژوهشهایی در زمینه ریزسیالش صورت گرفته است، حضور پژوهشگران مهندسی شیمی در این عرصه بسیار کم‌رنگ بوده است. در حال حاضر درس



ریزیالیاش تنها در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف تدریس می‌شود (در این دانشگاه این درس را با نام «جریانهای میکرو و نانو» می‌شناسند).

طبق اطلاعات موجود، از جمله اطلاعات قابل دسترسی در پایگاه علمی اسکوپوس، در جامعه علمی مهندسی شیمی کشور اگرچه پژوهشگرانی به شکل پراکنده تحقیقاتی را در زمینه ریزیالیاش انجام داده‌اند، اما تنها واحدی که به شکل سازمان‌یافته بخشی از فعالیت خود را در حوزه مذکور متمرکز کرده است، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه علم و صنعت ایران است. در این دانشکده پدیده‌های سطحی و فرایندهای الکتروسینتیکی رایج در سامانه‌های ریزیالیسی در قالب درس پدیده‌های سطحی به دانشجویان گرایش فرایندهای جداسازی تدریس می‌شود. همچنین طی چند سال اخیر، گروه فرایندهای پیشرفته جداسازی دانشکده مورد بحث بخشی از فعالیتهای پژوهشی خود را بر مدل‌سازی فرایندهای الکتروسینتیکی در سامانه‌های ریزیالیسی متمرکز کرده است. نتیجه این تحقیقات و پژوهشها انتشار چندین مقاله در مجلات معتبر بین‌المللی بوده است (Hoshyargar et al., 2015, 2016a, 2016b). آقای دکتر وحید هوشیارگر، که در چند سال گذشته به تحقیق و پژوهش درباره پدیده سیلافوذ در سامانه‌های ریزیالیسی پرداخته بود، اولین دانش‌آموخته مقطع دکتری مهندسی شیمی دانشگاه علم و صنعت ایران است که در حوزه ریزیالیسی از رساله خود دفاع کرده است (Hoshyargar, 2016). آزمایشگاه فرایندهای پیشرفته جداسازی در دانشکده مذکور اخیراً اجرای پژوهشهای آزمایشگاهی و تجربی را نیز در این زمینه آغاز کرده و به‌عنوان پیشگام عرصه ریزیالیسی در جامعه مهندسی شیمی ایران به فعالیت خود ادامه می‌دهد.

پیش‌بینی می‌شود با گسترش و پیشرفت ریزیالیسی تحول زیادی در حوزه مهندسی شیمی به وجود آید و تعدادی از حوزه‌های کلاسیک آن به تاریخ علم بپیوندند. واقعیت مذکور ضرورت وارد کردن درسهای مرتبط با ریزیالیسی به برنامه تحصیلی دانشجویان مهندسی شیمی را، حداقل در مقاطع تحصیلات تکمیلی، نشان می‌دهد. البته موضوع اخیر را دانشگاههای معتبر دنیا به خوبی دریافته‌اند و مشاهده می‌شود که در چنین دانشگاههایی گروهها، مراکز یا آزمایشگاههایی تأسیس شده و به شکل نظری و عملی دانشجویان و محققان را با این حوزه نوپا و رو به فراگیر شدن درگیر می‌کنند. این در حالی است که حوزه ریزیالیسی در ایران به‌تازگی و صرفاً به‌طور محدود مورد توجه قرار گرفته است.

یکی از عواملی که ممکن است در رشد سریع حوزه ریزیالیسی در کشورهای پیشرفته مؤثر بوده باشد، همکاریهای بین‌رشته‌ای است؛ با توجه به بین‌رشته‌ای بودن ریزیالیسی گسترش آن بدون همکاری محققان عرصه‌های علوم پایه، علوم پزشکی و علوم مهندسی غیرممکن است. این نکته که اکثر مقالات چاپ‌شده در این حوزه حاصل کار گروهی پژوهشگرانی از حوزه‌های مختلف و متعدد است این ادعا را تأیید می‌کند. لذا برای سرعت بخشیدن به رشد و توسعه حوزه ریزیالیسی در کشور پیشنهاد می‌شود که زمینه‌های همکاری

بین دانشکده‌های علوم پایه، علوم پزشکی و علوم مهندسی (امری که تاکنون بسیار کم‌رنگ بوده است) گسترش داده شود.

### ۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در سالهای اخیر پیشرفت دانش و پیشرفت فناوری هم‌افزایی پیدا کرده و همین امر به پیدایش زمینه‌های جدیدی در مهندسی شیمی منجر شده که تا دهه‌های اخیر حتی فکر کردن به آن هم غیرممکن می‌نمود. یکی از زمینه‌های جدید ایجادشده در مهندسی شیمی حوزه ریزیالشی است. با استفاده از سامانه‌های ریزیالشی می‌توان فرایندهای سنتز، شناسایی، جداسازی، ردیابی و تولید یا تبدیل انرژی را بسیار آسان و ارزان و در کوتاه‌ترین زمان ممکن اجرا کرد. چنین ویژگیهایی باعث شده است که سرمایه‌گذاریهایی کلانی در زمینه ریزیالشی انجام شده و محصولات ریزیالشی تجاری متنوعی وارد بازار شود. از آنجایی که در بسیاری از سامانه‌های ریزیالشی فرایندهای شیمیایی رخ می‌دهد، دانش مهندسان شیمی در طراحی و ساخت چنین سامانه‌هایی بسیار مؤثر و کارآمد است. همچنین نظر به اینکه در بسیاری از فرایندهای رایج در مهندسی شیمی می‌توان از سامانه‌های ریزیالشی استفاده کرد، آشنایی هرچه بیشتر دانشجویان مهندسی شیمی حوزه ریزیالشی امری مفید و ضروری به‌نظر می‌رسد. در این پژوهش تلاش شد که به بیان اهمیت توجه دانشکده‌های مهندسی شیمی به حوزه ریزیالشی پرداخته شود. همچنین گزارشی از فعالیتهای مراکز آموزش و تحقیقاتی خارج از کشور در زمینه ریزیالشی ارائه شد. مشاهده می‌شود که در کشورهای پیشرفته صنعتی به اهمیت پژوهش و تحقیق درباره ریزیالشی پی برده‌اند و حتی درسهایی مرتبط با این حوزه را در برنامه درسی دانشجویان گنجانده‌اند. در ایران، اولین دانشکده مهندسی شیمی، که به تحقیق و پژوهش در این زمینه پرداخته است، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه علم و صنعت ایران است؛ در این نوشتار اطلاعات مختصری پیرامون فعالیتهای ریزیالشی این دانشکده ارائه شد. در نهایت، عنوان شد که دانشگاه‌های کشور باید همگام با پیشرفت علم و فناوری، برنامه آموزشی و پژوهشی خود را به‌روزرسانی کرده و متخصصانی آگاه به مسائل این حوزه نوظهور تربیت کنند. چراکه با توجه به سرعت تصاعدی پیشرفت دانش به نظر می‌رسد که بی‌توجهی به چنین امری موجب عمیق‌تر شدن شکاف علمی موجود میان کشورمان و کشورهای صنعتی خواهد شد. لذا پیشنهاد می‌شود که دانشکده‌های مهندسی شیمی بخشی از برنامه آموزشی و پژوهشی خود را به امر توسعه سامانه‌های ریزیالشی اختصاص دهند.

## مراجع

- Anna, S.; Bontoux, N. and Stone, H. (2003). Formation of dispersions using flow focusing in microchannels. *Applied Physics Letters*, 82(3).
- Army contract for INI Power (2005). Fuel cells bulletin, (January), 8868. [http://doi.org/10.1016/S1464-2859\(05\)00461-X](http://doi.org/10.1016/S1464-2859(05)00461-X).
- Arun, R. K.; Chacraborty, S. and Chanda, N. (2014). A paper based self-pumping and self-breathing fuel cell using pencil stroked graphite electrodes lab on a chip. *Lab on a Chip*, 14(MARCH), 1661–1664. <http://doi.org/10.1039/c4lc00029c>.
- Assmann, N.; Ładosz, A.; Rudolf von Rohr, P. (2013). Continuous micro liquid-liquid extraction. *Chemical Engineering and Technology*, 36(6), 921–936. <http://doi.org/10.1002/ceat.201200557>.
- Beebe, D. J.; Mensing, G. A. and Walker, G. M. (2002). Physics and applications of microfluidics in biology. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 72(3), 599–609.
- Chen, G. and Das, S. (2015). Streaming potential and electroviscous effects in soft nanochannels beyond Debye–Hückel linearization. *Journal of Colloid and Interface Science*, 445, 357–363.
- Chang, C.; Chang, W.; Wang, C.; Wang, J.; Mai, J. D. and Lee., G.-B. (2013). Nucleic acid amplification using microfluidic systems. *Lab on a Chip*, 13(7), 1225–1242.
- Cheng, F.; Chang, C.; Hou, D. and Chang, C. (2007). An integrated dielectrophoretic chip for continuous bioparticle filtering, focusing, Sorting, Trapping, and Detecting. *Biomicrofluidics*, 1(2), 021503.
- Chiu, D. T.; Jeon, N. L.; Huang, S.; Kane, R. S.; Wargo, C. J.; Choi, I. S. and Ingber, E. (2000). Patterned deposition of cells and proteins onto surfaces by using three-dimensional microfluidic systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97.6, 2408–2413.
- Chohan, E. R.; Markoski, L. J.; Wieckowski, A. and Kenis, P. J. (2007). Microfluidic fuel cell based on laminar flow. *Journal of Power Sources*, 128(1), 54–60.
- Dector, A., Escalona-villalpando, R. A.; Dector, D. and Vallejo-becerra, V. (2015). Perspective use of direct human blood as an energy source in air-breathing hybrid micro fluidic fuel cells. *Journal of Power Sources*, 288, 70–75. <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.04.089>.
- Dittrich, P. S. and Manz, A. (2006). Lab-on-a-chip: microfluidics in drug discovery. *Nature Reviews Drug Discovery*, 5(3).
- Duan, C.; Wang, W. and Xie, Q. (2013). Fabrication of nanofluidic devices. *biomicrofluidics*, 7(2), 026501. <http://doi.org/10.1063/1.4794973>.
- Esquivel, J. P.; Del campo, F. J.; De la Fuente, J. L.; Rojasc, S. and Sabat'e, N. (2014). Microfluidic fuel cells on paper: Meeting the power needs of next generation lateral flow devices. *Energy & Environmental Science*, 7, 1744–1749. <http://doi.org/10.1039/c3ee44044c>.
- Fontana, F.; Ferreira, M. P.; Correia, A.; Hirvonen, J. and Santos, H. A. (2016). Microfluidics as a cutting-edge technique for drug delivery applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 34, 76–87.
- Fu, A. Y.; Spence, C.; Scherer, A.; Arnold, F. H. and Quake, S. (1999). A microfabricated fluorescence-activated cell sorter. *Nature*, 17(11), 1109–1111.

- Grigoriev, R. O. (2012). Mixing in laminar fluid flows: from microfluidics to oceanic currents. *Transport and Mixing in Laminar Flows: From Microfluidics to Oceanic Currents*, 1–4.
- Gulati, S.; Muller, S. J.; Liepmann, D. (2008). Direct measurements of viscoelastic flows of DNA in a 2: 1 abrupt planar micro-contraction. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 155(1), 51–66.
- Halldorsson, S.; Lucumi, E.; Gómez-Sjöberg, R. and Fleming, R. M. (2015). Advantages and challenges of microfluidic cell culture in polydimethylsiloxane devices. *Biosensors and Bioelectronics*, 63, 218-231.
- Hatch, A.; Kamholz, A. E.; Hawkins, K. R.; Munson, M. S.; Schilling, E.A.; Weigl, B. H. and Yager, P. (2001). Rapid diffusion immunoassay in a t-sensor. *Nature Biotechnology*, 19(5).
- Hoshyargar, V.; Ashrafizadeh, S. N. and Sadeghi, A. (2015). Drastic alteration of diffusioosmosis due to steric effects. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(43), 29193–29200.
- Hoshyargar, V.; Ashrafizadeh, S. N. and Sadeghi, A. (2016a). Bounded amplification of Diffusioosmosis utilizing hydrophobicity. *RSC Advances*, 6, 49517–49526.
- Hoshyargar, V.; Ashrafizadeh, S. N. and Sadeghi, A. (2016b). Diffusioosmotic flow in rectangular microchannels. *Electrophoresis*, 37, 809–817.
- Hoshyargar, V. (2016). Numerical analysis of hydrodynamics and mass transport characteristics of diffusioosmotic flow in microchannels. PhD Dissertation, Iran University of Science and Technology.
- Hou, B.X.; Liu, Y.; Dong, H.; Yang, F.; Li, L. and Jiang, L. (2010). A pH-Gating ionic transport nanodevice: asymmetric chemical modification of single nanochannels. *Advanced Materials*, 1, 2440–2443. <http://doi.org/10.1002/adma.200904268>.
- Hu, S.; Ren, X.; Bachman, M.; Sims, C. E.; Li, G. P. and Allbritton, N. (2002). Surface modification of poly (dimethylsiloxane) microfluidic devices by ultraviolet polymer grafting. *Analytical Chemistry*, 74(16), 4117-4123.
- Islam, N. (2007). *AC electroosmosis for lab-on-a-chip applications*. Springer Netherlands.
- Kaufman, Y.; Kasher, R.; Lammertink, R. G. and Freger, V. (2012). Microfluidic NF/RO separation: cell design, performance and application. *Journal of Membrane Science*, 396, 67–73.
- Kjeang, E.; Djilali, N. and Sinton, D. (2009). Microfluidic fuel cells: a review. *Journal of Power Sources*, 186, 353–369. <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.10.011>.
- Kriel, F. H.; Holzner, G.; Grant, R. A.; Woollam, S.; Ralston, J. and Priest, C. (2015). Microfluidic solvent extraction, stripping, and phase disengagement for high-value platinum chloride solutions. *Chemical Engineering Science*, 138, 827–833. <http://doi.org/10.1016/j.ces.2015.08.055>.
- LaVan, D. A.; McGuire, T. and Langer, R. (2003). Small-scale systems for in vivo drug delivery. *Nature Biotechnology*, 21(10).
- Leung, V.; Shehata, A. M.; Filipe, C. D. M. and Pelton, R. (2010). Physicochemical and engineering aspects streaming potential sensing in paper-based microfluidic channels. *Colloids and Surfaces a: Physicochemical and Engineering Aspects*, 364(1-3), 16–18. <http://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.04.008>.

- Li, J.; Kelly, J. F.; Chernushevich, I.; Harrison, D. J. and Thibault, P. (2000). Separation and identification of peptides from gel-isolated membrane proteins using a microfabricated device for combined capillary electrophoresis/nanoelectrospray mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 72(3), 599–609.
- Li, S.; Cui, H.; Yuan, Q.; Wu, J. and Wadhwa, A. (2014). AC electrokinetics-enhanced capacitive immunosensor for point-of-care serodiagnosis of infectious diseases. *Biosensors and Bioelectronics*, 51, 437–443. <http://doi.org/10.1016/j.bios.2013.08.016>.
- Li, X.; Ballerini, D. R. and Shen, W. (2012). A perspective on paper-based microfluidics: current status and future trends. *Biomicrofluidics*, 6(1), 011301.
- Masliyah, J. H. (2006). *Electrokinetic and colloid transport phenomena*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Nguyen, N.T. and Wereley, S. T. (2002). *Fundamentals and applications of microfluidics*. Artech House.
- Qian, S.; Ai, Y. (2012). Electrokinetic particle transport in micro-/nanofluidics, 153, Taylor & Francis Group. Retrieved from <http://www.crcpress.com>.
- Randall, G. C.; Schultz, K. M. and Doyle, P. S. (2006). Methods to electrophoretically stretch DNA: microcontractions, *Gels, and Hybrid Gel-Microcontraction Devices*. *Lab on a Chip*, 6(4), 516–525.
- Reschke, B. R.; Luo, H.; Schiffbauer, J.; Edwards, B. F. and Timperman, A. (2009). A theoretical and experimental study of the electrophoretic extraction of ions from a pressure driven flow in a microfluidic device. *Lab on a Chip*, 9(15), 2203–2211.
- Sadeghi, A. (2013). Transport phenomena in electrokinetically generated microflows. PhD Dissertation, Sharif University of Technology.
- Shallan, A.; Guijt, R. and Breadmore, M. (2013). *Capillary electrophoresis: basic principles*. Encyclopedia of Forensic Sciences (2nd ed.). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-382165-2.00241-5>.
- Shaqfeh, E. (2005). The dynamics of single-molecule DNA in flow. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 130(1), 1–28.
- Sharma, S.; Zapatero-Rodriguez, J.; Estrela, P.; Kennedy, R. O. (2015). Point-of-care diagnostics in low resource settings: present status and future role of microfluidics. *Biosensors*, 5, 577–601. <http://doi.org/10.3390/bios5030577>.
- Sohn, L. L.; Saleh, O. A.; Facer, G. R.; Beavis, A. J.; Allan, R. S. and Notterman, D. A. (2000). Capacitance cytometry: measuring biological cells one by one. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97,2(20), 10687–10690.
- Song, Y.; Hormes, J. and Kumar, C. (2008). Microfluidic synthesis of nanomaterials. *Small*, 4, 698–711. <http://doi.org/10.1002/sml.200701029>.
- Squires, T. M. and Quake, S. (2005). Microfluidics: fluid physics at the nanoliter scale. *Reviews of Modern Physics*, 77(3), 977.
- Stone, H. A.; Stroock, A. D.; Ajdari, A. (2004). Engineering flows in small devices: microfluidics toward a lab-on-a-chip. *Annu. Rev. Fluid Mech*, 36, 381–411.
- Tabeling, P. (2005). *Introduction to microfluidics*. Oxford University Press on Demand.
- Tarn, M. and Pamme, N. (2014). Microfluidics. in reference module in chemistry, molecular sciences and engineering, 0–7). Elsevier Inc. <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.05351-8>.

- Tegenfeldt, J. O.; Prinz, C.; Cao, H.; Huang, L.; Austin, R. H.; Chou, S.Y. and Sturm, J. C. (2004). Micro-and nanofluidics for DNA analysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 378(7), 1678–92.
- Thorsen, T.; Roberts, R.; Arnold, F. and Quake, S. (2001). Dynamic pattern formation in a vesicle-generating microfluidic device. *Physical Review Letters*, 86(18), 4163.
- Valencia, P. M.; Farokhzad, O. C.; Karnik, R. and Langer, R. (2012). Microfluidic technologies for accelerating the clinical translation of nanoparticles. *Nature Nanotechnology*, 7(10), 623–629.
- Vasu, N. and De, S. (2010). Electroosmotic flow of power-law fluids at high zeta potentials. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 368(1), 44–52.
- Whitesides, G. M. (2006). The origins and the future of microfluidics. *Nature*, 442(3), 368–373.
- Yameen, B.; Ali, M., Neumann, R.; Ensinger, W.; Knoll, W. and Azzaroni, O. (2009). Synthetic proton-gated ion channels via single solid-state nanochannels modified with responsive polymer brushes. *Nano Letters*, 9(7), 2788–2793.
- Yang, T.; Jung, S.; Mao, H.; Cremer, P. (2001). Fabrication of phospholipid bilayer-coated microchannels for On-Chip immunoassays. *Analytical Chemistry*, 73(2).
- Ye, D.; Yang, Y.; Li, J.; Zhu, X. and Liao, Q. (2015). A laminar flow microfluidic fuel cell for detection of hexavalent chromium. *Biomicrofluidics*, 064110. <http://doi.org/10.1063/1.4936642>.
- Yeo, L.Y.; Chang, H.C.; Chan, P. P. and Friend, J. R. (2011). Microfluidic devices for bioapplications. *Small*, 7(1), 12–48.
- Zare, R. N. and Kim, S. (2010). Microfluidic platforms for single-cell analysis. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 12, 287–201.
- Zhou, J.; Ellis, A. V. and Voelcker, N. H. (2010). Recent developments in PDMS surface modification for Microfluidic devices. *Electrophoresis*, 31(1), 2-16.
- Žnidaršič-Plazl, P. and Plazl, I. (2007). Steroid extraction in a microchannel system—mathematical modelling and experiments. *Lab on a Chip*, 7(7), 883–889.