

# رویکرد نوین مبتنی بر استفاده از پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان برای دستکاری میکروذرات با استفاده از امواج آکوستیک سطحی ایستا

احسان رادمان فرد<sup>۱</sup>

ناصر ناصری فر\*

کارشناس ارشد

استادیار

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مکانیک

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مکانیک

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

EhsanRadmanfard@gmail.com

Naserifar@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۲

## چکیده

فناوری امواج آکوستیک سطحی<sup>۱</sup> (SAW) ابزاری کارآمد برای کنترل دقیق میکروروبات و سلول در کاربردهای زیست‌پزشکی و میکروفلوئیدیک<sup>۲</sup> به شمار می‌آید. پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان<sup>۳</sup> (PDMS)، به دلیل سازگاری زیستی و انعطاف‌پذیری، با تنظیم نسبت‌های پایه به عامل پخت، قابلیت‌های جدیدی به سیستم‌های SAW اضافه کرده و گزینه‌های بیشتری برای جداسازی، دستکاری، به دام انداختن سلول‌ها و سایر کاربردها فراهم می‌آورد. در این مطالعه، ترکیبات مختلف با نسبت‌های ۱:۲۰، ۱:۱۰، ۱:۵ و ۱:۲ مورد بررسی قرار گرفته و اثرات آن‌ها بر امواج آکوستیک سطحی ایستا<sup>۴</sup> (SSAW) و توانایی کنترل میکروروبات‌ها ارزیابی شده است. نتایج تجربی و شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که برخی فرمولاسیون‌های PDMS قابلیت تغییر در امپدانس آکوستیک و میرایی را به سیستم افزوده و در نقاط خاص به طور مؤثری عمل می‌کنند. در پایان، تأثیر این یافته‌ها در زمینه‌هایی همچون تحویل دارو، مهندسی بافت و سیستم‌های میکروفلوئیدیک با نیاز به کنترل سریع و دقیق میکروروبات‌ها اهمیت دارند و می‌تواند تأثیر مناسبی در این حوزه داشته باشد.

**واژگان کلیدی:** امواج آکوستیک سطحی ایستا، امپدانس آکوستیک، میکروالکترومکانیک، میکروذرات

## ۱. مقدمه

در مقیاس میکرو را داشته و می‌توانند مستقیماً در محیط‌های زیستی فعالیت کنند [۱۰-۱۳]. این ویژگی‌ها میکروروبات‌ها را برای کاربردهایی نظیر تحویل هدفمند دارو [۱۴، ۱۵]، تشخیص بیماری‌ها، مهندسی بافت [۱۶] و مطالعات سلولی [۱۶] بسیار

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های گسترده در فناوری‌های میکرو و نانو [۱] به توسعه دستگاه‌ها و ابزارهای نوین، به‌ویژه در حوزه زیست‌پزشکی، منجر شده است [۲-۴]. یکی از این ابزارها، میکروروبات‌ها هستند [۵-۷] که توانایی انجام وظایف پیچیده [۸، ۹]

کارآمد ساخته است. با این حال، چالش مهم در استفاده از میکروروبات‌ها، کنترل دقیق و مؤثر آن‌ها در محیط‌های پیچیده زیستی است [۱۷].

روش‌های متنوعی برای کنترل میکروروبات‌ها ارائه شده است، اما اغلب این روش‌ها به تماس مستقیم یا میدان‌های خارجی قوی نیاز دارند که ممکن است به سلول‌ها و بافت‌های اطراف آسیب برسانند. از این‌رو، نیاز به روش‌های کنترل بدون تماس و سازگار با محیط زیستی بیشتر احساس می‌شود [۱۸، ۱۹].

امواج آکوستیک سطحی SAW به دلیل توانایی ایجاد نیروهای بدون تماس و محلی، به‌عنوان ابزاری مؤثر برای کنترل میکروروبات‌ها مطرح شده‌اند [۲۰-۲۲]. دستگاه‌های SAW با استفاده از زیرلایه‌های پیزوالکتریک و مبدل‌های اینتردیجیتال<sup>۵</sup>، امواج آکوستیک با فرکانس بالا تولید می‌کنند که قادرند میکروروبات‌ها را به حرکت درآورند [۲۳، ۲۴]. از آنجا که این امواج در سطح زیرلایه منتشر می‌شوند [۲۵]، کنترل دقیق میکروذرات از طریق امواج ایستا سطحی فراهم می‌آید [۲۶].

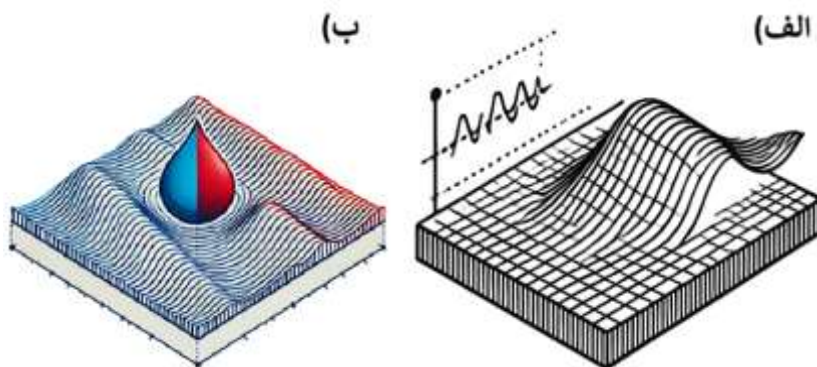
PDMS به‌عنوان یک پلیمر سیلیکونی با خواص انعطاف‌پذیری، شفافیت، سازگاری زیستی و قابلیت قالب‌گیری آسان، در دستگاه‌های میکروالکترومکانیک و SAW به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود [۲۷-۲۹]. با تنظیم نسبت‌های پایه به عامل پخت، PDMS (شکل ۱)، به‌گونه‌ای که گزینه‌های بیشتری برای دستکاری، به دام انداختن و جداسازی سلول‌ها فراهم آورد [۳۰، ۳۱]. می‌تواند خواص آکوستیک خود را تغییر داده و قابلیت‌های جدیدی به سیستم‌های SAW اضافه کند.

تغییر فرمولاسیون PDMS، به‌ویژه نسبت پایه به عامل پخت، تأثیر مهمی بر امپدانس آکوستیک و میرایی امواج دارد [۳۲-۳۴] و می‌تواند کنترل دقیق‌تری بر میکروروبات‌ها ایجاد کند [۱۱]. در این پژوهش، ترکیبات مختلف PDMS در نسبت‌های ۲۰:۱، ۱۰:۱، ۵:۱ و ۲:۱ بررسی شده‌اند و تأثیر ادغام این ترکیبات بر امواج آکوستیک سطحی ایستا (شکل ۲-ج) و کنترل میکروروبات‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های تجربی، تأثیر این تغییرات در کنترل سرعت [۳۵] و نمایش الگوهای خروجی میکروروبات‌ها را به طور عملی نشان می‌دهد.

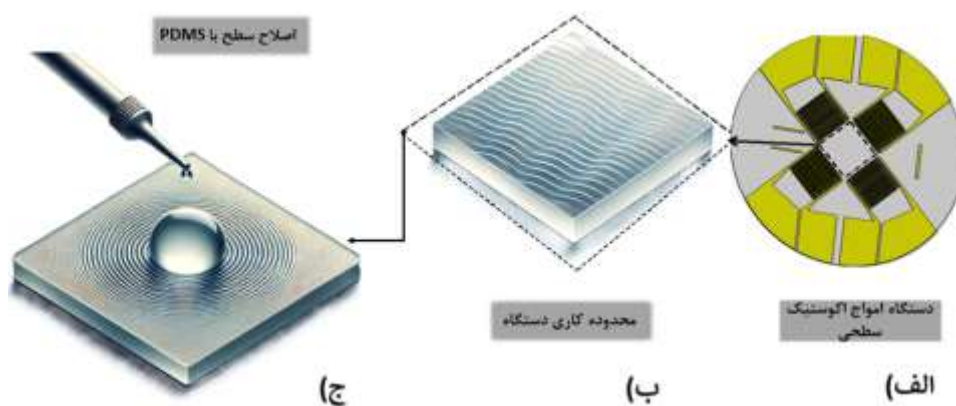
این پژوهش با هدف ارائه شرایط بهینه برای عملکرد دستگاه‌های SAW و کنترل دقیق‌تر میکروروبات‌ها از طریق تنظیم فرمولاسیون PDMS انجام شده است. در نهایت، یافته‌های این مطالعه می‌تواند به توسعه روش‌های کنترل بدون تماس در کاربردهای زیست‌پزشکی مانند تحویل دارو و مهندسی بافت کمک کند و مبنایی برای طراحی دستگاه‌های SAW با عملکرد بهینه فراهم سازد.

شکل ۳ شبیه‌سازی مدل بزرگی جابه‌جایی، شکل مود مدل کاهش یافته ویفر پیزوالکتریک ۱۲۸ درجه YX بر اثر اعمال ولتاژ ۳۵ ولت در فکانس ۱۳.۴۵ مگاهرتز بدون اضافه کردن قطرات PDMS، توسط نرم افزار کامسول<sup>۶</sup> نسخه ۶.۲ را نشان می‌دهد.

شکل ۴ نمایی شماتیک از یک سیستم انتقال موج فراصوتی در یک میکروکانال مربعی بر روی بستر پیزوالکتریک لیتیوم نایوبایت را نشان می‌دهد. در این



شکل ۱. الف) نمایش شماتیک انتشار امواج سطحی آکوستیک بر روی ویفر پیزوالکتریک لیتیوم نایوبایت<sup>۷</sup> و ب) نمایش شماتیک قرار گرفتن قطره ترکیب شده PDMS بر روی ویفر پیزوالکتریک و تغییر ایجاد شده بر امواج آکوستیک سطحی



شکل ۲. الف) شکل طراحی شده دستگاه تولید امواج آکوستیک سطحی و ب) محدوده کاری دستگاه امواج آکوستیک سطحی و ج) شماتیک قرار گیری یک قطره PDMS در نقطه میانی محدوده کاری دستگاه امواج سطحی آکوستیک

## ۲-۱. امیدانس آکوستیک PDMS

امیدانس آکوستیک (Z) نشان‌دهنده‌ی مقاومت ماده در برابر عبور امواج آکوستیک است [۳۸] و یک عامل کلیدی در عملکرد دستگاه‌های SAW است [۳۹] زیرا بر انتقال موج در مرزهای مواد تأثیر می‌گذارد، امیدانس آکوستیک به صورت زیر تعریف می‌شود [5]:

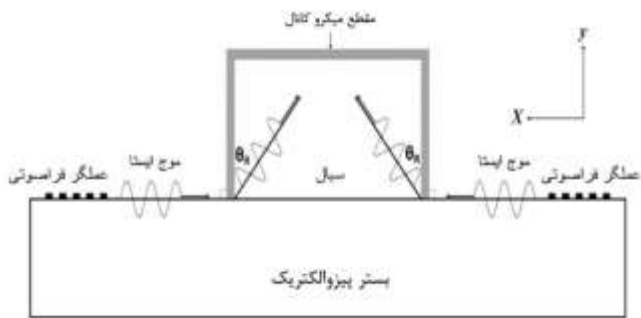
$$Z = \rho \times c \quad (1)$$

که در آن چگالی ماده و (c) سرعت صدا است. در دستگاه‌های SAW، انتقال بهینه‌ی امواج آکوستیک

سیستم از دو آرایه عملگرهای فراصوتی در دو سمت میکروکانال استفاده شده است که وظیفه تولید امواج SSAW را بر عهده دارند این امواج پس از انتشار (تحت زاویه ریلی از خط عمود بر جهت انتشار)، [۳۶، ۳۷] به سیال (آب) قرار گرفته در میکروکانال بالای ویفر باعث تشکیل گره‌های صوتی در سیال داخل میکروکانال می‌شوند.

## ۲. پیش‌زمینه نظری و تحلیل عددی

آکوستیک سطحی در نقاط مشخص (SAW) را به دنبال داشته باشد.



شکل ۴. نشانگر زاویه شکست امواج صوتی سطحی هنگام ورود به محیط دیگر (تحت زاویه ریلی)

### ۲-۳. نیروی تابش آکوستیک

نیروی تابش آکوستیک وارد بر میکروروبات‌ها در دستگاه‌های SSAW می‌تواند به صورت زیر مدل‌سازی شود [۲, ۲۴, ۳۳, ۴۴].

$$F_{\text{rad}} = \left( \frac{\pi p_0^2 V_p \beta_p}{2\lambda} \phi(\beta, \rho) \right) \sin(2kx) \quad (3)$$

که در آن  $(p_0)$  دامنه فشار آکوستیکی،  $(V_p)$  حجم میکروروبات،  $(\beta_p)$  تراکم‌پذیری،  $(\lambda)$  طول موج،  $(k)$  عدد موج و  $(\phi(\beta, \rho))$  فاکتور تضاد آکوستیک است. تغییر در خواص آکوستیک PDMS، به ویژه امپدانس و میرایی، می‌تواند بر دامنه‌ی فشار  $p_0$  و در نتیجه بر نیروی تابش آکوستیک تأثیر بگذارد.

### ۳. شبیه‌سازی‌های مرتبط با انتشار SAW بر روی زیرلایه پیزوالکتریک

معادلات میدان و شرایط مرزی در سیستم‌های آکوستوفلوئیدیک<sup>۸</sup>، با استفاده از راه‌حل‌های عددی در نرم‌افزار المان محدود ۶.۲ COMSOL Multiphysics

زمانی رخ می‌دهد که امپدانس آکوستیک لایه‌ی PDMS با امپدانس زیرلایه پیزوالکتریک تطابق داشته باشد [۲, ۴۰]. این تطابق منجر به کاهش انعکاس امواج در مرز بین دو ماده و افزایش انتقال انرژی می‌شود، که برای کنترل مؤثر میکروروبات‌ها حیاتی است [۴۱].



شکل ۳. خروجی شبیه‌سازی امواج سطحی ایستا بر روی ویفر پیزوالکتریک با ضخامت ۵۰۰ میکرون

### ۲-۲. میرایی موج در PDMS و تأثیر آن بر انتقال امواج

میرایی موج به کاهش دامنه‌ی امواج آکوستیک در هنگام عبور از ماده اشاره دارد و با ضریب میرایی  $(\alpha)$  مشخص می‌شود [۲۷, ۴۲]:

$$\alpha = 2\pi f \cdot \eta \quad (2)$$

که در آن  $(f)$  فرکانس موج و  $(\eta)$  عامل اتلاف آکوستیک است. با استفاده مقادیر اندازه‌گیری شده  $\eta$  [۴۳] و فرکانس کاری دستگاه آکوستیک، جدول ۲ ضرایب میرایی برای فرمولاسیون‌های مختلف PDMS در فرکانس ۱۳.۴۵ مگاهرتز را نشان می‌دهد و بیانگر رابطه افزایش میرایی موج با نسبت‌های بالاتر عامل پخت است. افزایش نسبت عامل پخت در PDMS منجر به افزایش لزجت و در نتیجه افزایش ضریب میرایی می‌شود این امر می‌تواند کاهش دامنه‌ی امواج و در نتیجه تأثیر تغییر یافته امواج

جدول ۱. خواص صوتی فرمولاسیون های PDMS مورد استفاده در مطالعه

| نسبت    | مدول الاستیسیته | چگالی        | سرعت صوت  | امپدانس صوتی           |
|---------|-----------------|--------------|-----------|------------------------|
| :       | $E$             | $\rho$       | $c$       | $Z$                    |
| $PDM S$ | (MPa)           | ( $kg/m^3$ ) | ( $m/s$ ) | ( $kg/(m^2 \cdot s)$ ) |
| 2:1     | 3.5             | 975          | 1230      | 1,199,250              |
| 5:1     | 1.8             | 970          | 1040      | 1,008,800              |
| 10:1    | 0.75            | 968          | 990       | 958,320                |
| 20:1    | 0.35            | 965          | 950       | 916,750                |

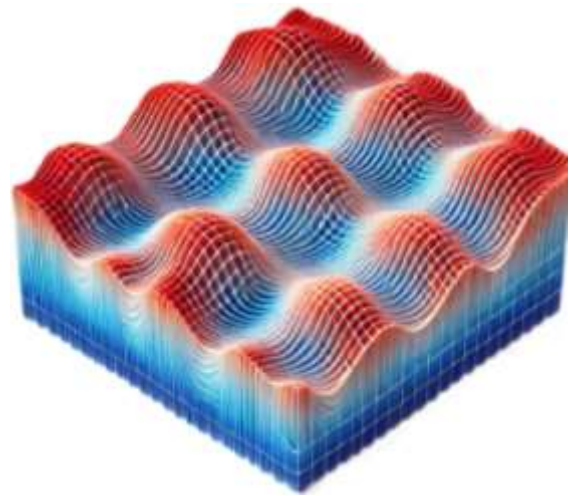
جدول ۲. ضرایب میرایی و اتلاف آکوستیک در فرمولاسیون های PDMS با فرکانس ۱۳.۴۵ مگاهرتز

| ضریب میرایی $\alpha$ (Np/m) | نسبت PDMS | عامل اتلاف آکوستیک $\eta$ (m/s) |
|-----------------------------|-----------|---------------------------------|
| 2.5                         | 2:1       | $2.96 \times 10^{-8}$           |
| 3.0                         | 5:1       | $3.55 \times 10^{-8}$           |
| 3.5                         | 10:1      | $4.14 \times 10^{-8}$           |
| 4.8                         | 20:1      | $5.68 \times 10^{-8}$           |

حل می‌شوند. پیشرفت‌های اخیر در ادغام مواد انعطاف‌پذیر با سطوح پیزوالکتریک، قابلیت‌های

دستگاه‌های SAW را ارتقاء داده است. این مطالعه به بررسی تعامل بین قطرات PDMS و امواج آکوستیک سطحی روی زیرلایه پیزوالکتریک می‌پردازد، به‌ویژه نحوه تاثیرگذاری ویژگی‌های قطرات PDMS مانند اندازه، توزیع و غلظت آن‌ها بر امپدانس و شدت امواج آکوستیک. هدف، توسعه فناوری آکوستیک و درک کاربردی از روابط پیچیده بین مواد نرم و میدان‌های آکوستیک دینامیک است. وجود قطرات PDMS بر روی زیرلایه پیزوالکتریک تأثیر چشمگیری بر شدت و میرایی امواج آکوستیک سطحی (SAW) دارد. نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهند که قطرات بزرگ‌تر PDMS، باعث میرایی بیشتر امواج SAW می‌شوند، در حالی که قطرات کوچک‌تر با نسبت‌های کمتر، تأثیر کمتری بر میرایی فشار آکوستیک دارند. الگوی توزیع قطرات PDMS نیز نقش مهمی در تضعیف و توزیع امواج SAW دارد؛ به‌گونه‌ای که توزیع تصادفی قطرات موجب تضعیف یکنواخت‌تر در سطح زیرلایه می‌شود و توزیع‌های الگودار، به تغییرات محلی در شدت امواج SAW منجر می‌گردند. این یافته‌ها پیامدهای مهمی برای طراحی و بهینه‌سازی دستگاه‌ها و حسگرهای SAW، به ویژه دستگاه‌هایی که از مواد نرم مانند PDMS استفاده می‌کنند، دارند. شکل ۵ امپدانس آکوستیک در حضور قطرات PDMS را در فرکانس کاری ۱۳/۴۵ مگاهرتز نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که با افزایش نسبت PDMS تا یک آستانه معین، اثرات میرایی شدت بیشتری پیدا می‌کند و محدوده‌ای بهینه برای کاربردهایی که به تنظیم دقیق امپدانس و شدت آکوستیک نیاز دارند، مشخص می‌شود. این موضوع پتانسیل قطرات PDMS را به عنوان

میرایی‌کننده‌های قابل تنظیم برای امواج آکوستیک



شکل ۶. شماتیک از تشکیل موج های سینوسی وار در حوضچه سیال قرار گرفته روی پیزوالکتریک

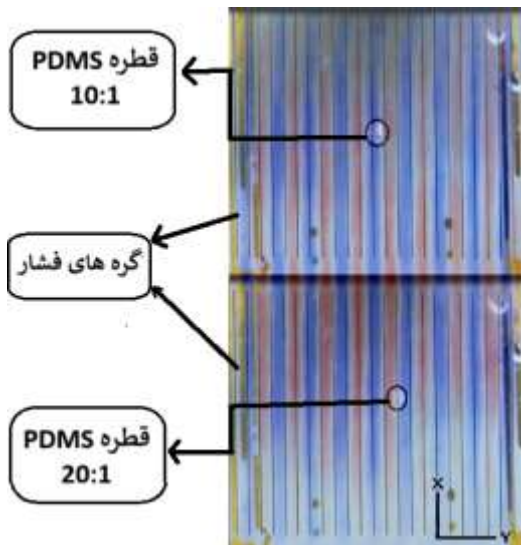
سطحی آشکار می‌سازد و امکانات جدیدی برای طراحی دستگاه‌ها و حسگرهای آکوستو فلوئیدیک تطبیقی فراهم می‌کند.



شکل ۵. نمودار امپدانس آکوستیکی و ضریب میرایی را برای چهار نسبت مختلف PDMS

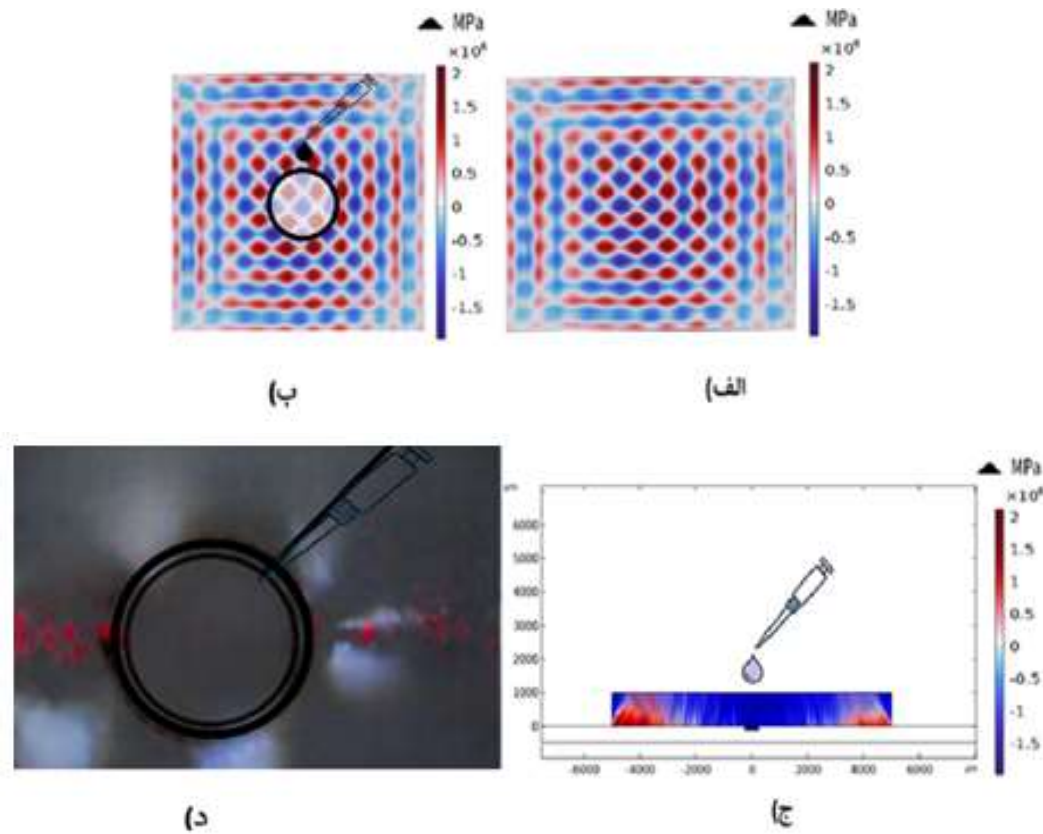
همچنین، با افزایش نسبت PDMS، تمرکز قطرات به کاهش قابل توجهی در فشار کلی منجر می‌شود. در مقابل، شکل ۶ توزیع فشار آکوستیک را بر روی زیرلایه پیزوالکتریک بدون حضور قطرات PDMS در

فرکانس ۱۳/۴۵ مگاهرتز نمایش می‌دهد و شکل ۷



شکل ۷. گره های فشاری مندرج بر روی دستگاه امواج سطحی منطبق با گره های فشاری (آبی رنگ) حاصل از نتایج شبیه‌سازی

قرارگیری قطرات PDMS بر روی خط‌های فشار موازی با محور x را نشان می‌دهد. این مقایسه به درک نحوه تغییر الگوهای فشار آکوستیک در حضور قطرات PDMS کمک می‌کند. داده‌ها نشان می‌دهند که در نبود قطرات PDMS، توزیع فشار از الگوی سینوسی استاندارد پیروی می‌کند. با این حال، افزودن قطرات PDMS این الگوها را به طرز چشمگیری تغییر داده و باعث تمرکز فشارهای محلی می‌شود که با اندازه و تعداد قطرات PDMS همبستگی دارند. این نتایج به‌طور کلی تعاملات پیچیده میان قطرات PDMS، امواج آکوستیک سطحی و زیرلایه پیزوالکتریک را نشان داده و زمینه‌های جدیدی برای تحقیقات در آکوستوفلوئیدیک و ارتباطات مواد نرم با پیزوالکتریک‌ها فراهم می‌آورد.



شکل ۸. همه تصاویر مربوط به محدوده کاری دستگاه امواج سطحی در تماس با قطره PDMS

قرار داده شده است (دایره مشکی) وارد نمی‌شوند و به دام نمی‌افتند این امر نشان‌دهنده تضعیف میدان آکوستیک (گره‌های فشار) در آن منطقه است.

#### ۴. چیدمان آزمایش

##### ۴-۱. مواد و تجهیزات مورد استفاده:

۴-۱-۱. زیرلایه پیزوالکتریک: کریستال لیتیم نیوبیت ( $YX 128^\circ LiNbO_3$ ) به دلیل خواص پیزوالکتریک برجسته و توانایی تولید امواج آکوستیک سطحی با کیفیت بالا انتخاب شد. [24]

۴-۱-۲. پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان<sup>۱</sup>: از کیت تجاری Sylgard 184 استفاده شده است که امکان تنظیم نسبت پایه به عامل پخت را فراهم می‌کند.

شکل ۸-الف شبیه‌سازی سه‌بعدی میدان فشار آکوستیک را در محدوده عملکرد دستگاه امواج آکوستیک سطحی بدون حضور ماده خارجی نشان می‌دهد و شکل ۸-ب شبیه‌سازی سه‌بعدی میدان فشار آکوستیک را با اضافه شدن قطره‌ای از PDMS با نسبت ۱:۱۰ در محدوده کاری دستگاه را به نمایش می‌گذارد و شکل ۸-ج شبیه‌سازی دوبعدی میدان فشار آکوستیک در دستگاه امواج آکوستیک سطحی را با قرارگیری قطره ۱:۱۰ PDMS در مرکز محدوده عملکرد دستگاه نشان می‌دهد. و شکل ۸-د تصویری از تست تجربی است که برای تایید نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی (تصاویر ۸-الف و ۸-ب) انجام گرفته است مشاهده می‌شود که ذرات پلی‌استایرن قرمز رنگ به ناحیه‌ای که پی‌دی‌ام‌اس (دایره مشکی رنگ) در آن

۳-۱-۴. میکروروبات‌ها: از میکروذرات همسان کروی ساخته‌شده از پلی‌استایرن با قطر ۱۰ میکرومتر بعنوان میکروروبات استفاده گردیده است (شکل ۹). که به دلیل خواص آکوستیکی مناسب، به امواج آکوستیک پاسخ می‌دهند. این ربات‌های میکرونی در محیط‌های محدود با امواج فراصوتی ایستا تعامل داشته و عملکردشان تحت تأثیر تغییرات ویژگی‌های آکوستیکی بستر ارزیابی می‌شود.



شکل ۹. میکرو ربات‌های پلی‌استایرنی مورد استفاده در تست‌های تجربی

۴-۱-۴. تجهیزات اندازه‌گیری: شامل مولد فانکشن، تقویت‌کننده  $RF^{10}$ ، میکروسکوپ معکوس

با بزرگنمایی ۴۰۰ برابری، دوربین با شفافیت بالا، و بیرومتر لیزری دوپلر و پیکنومتر و یک تصویر از ستاپ اندازه‌گیری سرعت میکروروبات‌ها در شکل ۱۰ آورده شده است.

#### ۲-۴. آماده‌سازی فرمولاسیون‌های PDMS

۱-۲-۴. نسبت‌های مورد بررسی: چهار نسبت پایه به عامل پخت ۲:۱، ۵:۱، ۱۰:۱ و ۲۰:۱ تهیه شدند. ۲-۲-۴. فرایند پخت: پس از مخلوط کردن اجزاء نمونه‌ها در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت پخت می‌شوند تا شبکه‌ی پلیمری تشکیل شود.

#### ۳-۲-۴. ضخامت لایه‌ی PDMS: لایه‌ی یکنواخت

با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر با استفاده از تکنیک لایه نشانی چرخشی بر روی زیرلایه‌ها اعمال شد.

#### ۳-۴. اندازه‌گیری خواص آکوستیک

چگالی ( $\rho$ ) با استفاده از پیکنومتر و اندازه‌گیری حجم و جرم نمونه‌ها تعیین شد.

سرعت صدا (c) با استفاده از تکنیک تست فراصوت به روش اکو-پالس<sup>۱۱</sup> در فرکانس ۱۹ مگاهرتز اندازه‌گیری شد.

محاسبه امپدانس آکوستیک (Z) و ضریب میرایی ( $\alpha$ ) با استفاده از معادلات (۱) و (۲).



شکل ۱۰. تجهیزات آزمایش تجربی

#### ۴-۴. ساخت و راه‌اندازی دستگاه‌های SAW

ترانسدیوسرهای بین‌دیجیتال (IDTs) با استفاده از تکنیک‌های لیتوگرافی در اتاق زرد ( شکل ۱۱ ) بر روی زیرلایه‌ها الگوگذاری شدند.

۴-۴-۱. اتصال الکتریکی: IDTs به مولد فانکشن و تقویت‌کننده RF متصل شدند تا امواج آکوستیک سطحی تولید شود.

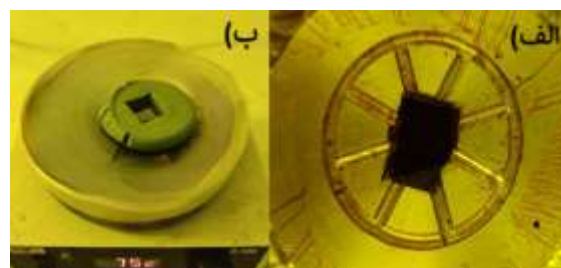
۴-۴-۲. قرار دادن میکروروبات‌ها: میکروروبات‌ها به طور یکنواخت بر روی سطح PDMS پخش شدند.

#### ۴-۵. روش‌های تجربی

۴-۵-۱. راه‌اندازی و کنترل امواج: فرکانس ۱۹ مگاهرتز و ولتاژ ۲۸ ولت برای تولید امواج آکوستیک در دستگاه SAW (شکل ۱۲) انتخاب شد.

۴-۵-۲. مشاهده حرکت میکروروبات‌ها: حرکت میکروروبات‌ها با دوربین وضوح<sup>۱۲</sup> بالا 4k ثبت گردید.

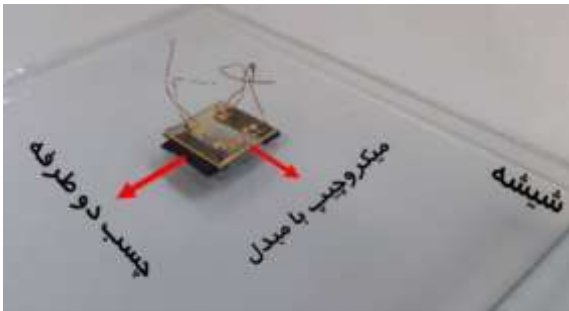
۴-۵-۳. اندازه‌گیری نیروهای آکوستیک: ویبرومتر لیزری دوپلر برای اندازه‌گیری دامنه‌ی ارتعاشات و نیروهای تابش آکوستیک استفاده شده است.



شکل ۱۱. تصاویر اتاق زرد از تصویر الف) اسپین کوت با چرخش ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و تصویر ب) پخت PDMS در دمای ۷۵ درجه

۴-۵-۴. کنترل شرایط محیطی: دما در ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی در ۵۰٪ ثابت نگه‌داشته

شد.



شکل ۱۲. دستگاه امواج آکوستیک سطحی بدون اتصالات

#### ۴-۶. شبیه‌سازی‌های عددی

مدل‌سازی دستگاه: دستگاه SAW و لایه‌ی PDMS با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک ۶.۲ مدل‌سازی شده‌اند.

۴-۶-۱. شرایط مرزی: شرایط مرزی مناسب برای زیرلایه پیزوالکتریک و لایه‌ی PDMS تعریف گردیده است.

۴-۶-۲. حل معادلات: معادلات موج آکوستیک و تعامل پیزوالکتریک با در نظر گرفتن خواص گران‌روی کشسانی حل شده‌اند.

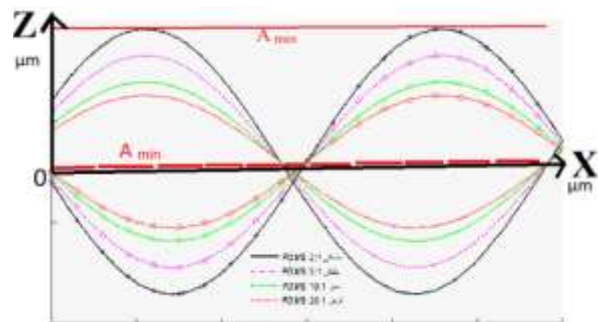
#### ۴-۶-۳. شبیه‌سازی انتشار موج آکوستیک:

مقایسه نسبی نتایج شبیه‌سازی‌های تغییرات ایجاد شده بر روی امواج تولیدی آکوستیک ایستای سطحی (SSAW)، بر اثر تغییرات اعمال شده ناشی از اضافه کردن سطوح PDMS با ۴ نسبت متفاوت اشاره شده که در شکل ۱۳ با رنگ‌های مشکی، بنفش، سبز و قرمز نشان داده شده است، و بیانگر نمودارهای جابه‌جایی ارتعاشی (در راستای محور z، عمود بر راستای انتشار موج) در طول (راستای محور x) زیرلایه لیتیوم نایوبایت تأیید می‌کنند که سطوح PDMS با نسبت‌های پایین‌تر دامنه‌های موج بالاتری

را حفظ می‌کنند که برای کنترل کارآمد ضروری است.

#### ۷-۴. تحلیل داده‌ها

۷-۴-۱. پردازش تصاویر: تصاویر ثبت شده توسط دوربین با استفاده از نرم‌افزار ImageJ تحلیل شده‌اند تا مسیر و سرعت میکروروبات‌ها تعیین شود.



شکل ۱۳. رنگ‌های (مشکی برای ۲۰:۱، بنفش برای ۵:۱، سبز برای ۱۰:۱ و قرمز برای ۲۰:۱) برای نمایش جابه‌جایی ارتعاشی نسبی در راستای محور Z برای نسبت‌های متفاوت PDMS

۷-۴-۲. تحلیل آماری: هر آزمایش پنج بار تکرار شد و میانگین و انحراف معیار داده‌ها محاسبه گردید. در مجموع برای ۴ نسبت متفاوت PDMS، ۹۳ بار آزمایش انجام شد.

۷-۴-۳. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی: داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با نتایج شبیه‌سازی‌ها مقایسه شده‌اند. (شکل ۱۴ بیانگر افت فشار آکوستیکی در نقاطی هست که PDMS با زیرلایه ادغام شده است، که با تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزار ImageJ از میکروروبات‌های به کار رفته در سیال استخراج شده است).

#### ۵. بحث

در این بخش، به بررسی تأثیر خواص آکوستیکی و

الاستیسیته فرمولاسیون‌های مختلف PDMS بر روی کنترل میکروروبات‌ها پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نسبت‌های پایین‌تر مانند ۵:۱ با کاهش میرایی و افزایش امپدانس آکوستیک، شرایط مناسبی برای حرکت و کنترل میکروروبات‌ها فراهم می‌کنند. این موضوع به‌ویژه در آزمایش‌هایی که سرعت و دقت بالای میکروروبات‌ها مدنظر است، اهمیت دارد.

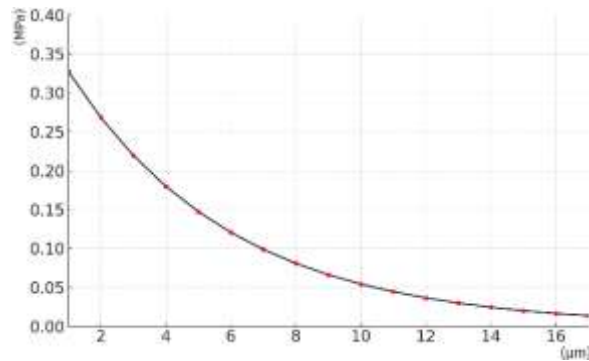
علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های عددی تأیید می‌کنند که توزیع یکنواخت میدان آکوستیک و الگوهای تنش در فرمولاسیون‌های با امپدانس بالاتر باعث بهبود انتقال انرژی و پایداری حرکتی میکروروبات‌ها می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود و نتایج تحلیل‌های به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، داده‌های شبیه‌سازی‌شده با تست‌های تجربی همخوانی دارند و بر اهمیت تنظیم نسبت پایه به عامل پخت برای بهبود عملکرد دستگاه‌های SAW تأکید می‌کنند.

در نهایت، تحلیل آماری نشان داد که سیستم به دلیل تکرارپذیری بالا و پایداری در شرایط محیطی مختلف، دقت بالایی دارد. انحراف معیار پایین و ضریب تعیین ( $R^2$ ) بیش از ۰.۹۴ همخوانی خوبی بین مدل‌های عددی و داده‌های تجربی ایجاد کرده و نشان‌دهنده قابلیت PDMS برای بهبود عملکرد دستگاه‌های آکوستیک در مقیاس میکرو است.

#### ۶. نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داده است که تغییر سطوح PDMS در دستگاه‌های SAW یک استراتژی مؤثر برای بهبود

کنترل میکروروبات‌ها است. با تغییر سیستماتیک نسبت پایه به عامل پخت PDMS، ما توانستیم امپدانس آکوستیک و خواص میرایی موج را تنظیم کنیم، که به نوبه خود بر دقت کنترل میکروروبات‌ها تأثیر گذاشت. نتایج تجربی ما نشان می‌دهد که فرمولاسیون‌هایی با نسبت‌های پایین‌تر، مانند ۵:۱،



شکل ۱۴. تغییرات فشار میدان آکوستیک اعمال شده بر میکروذره برحسب فاصله از مرکز قطره پی دی ام اس (محور X) و محور Y بیانگر بیشینه فشار آکوستیک می باشد.

انتشار موج بهتر و نیروهای تابش آکوستیک قوی‌تری را تسهیل می‌کنند و الگوهای کنترلی منحصربه‌فرد و کنترل کلی بهبود یافته را امکان‌پذیر می‌سازند. بینش‌های به دست آمده از این تحقیق پیامدهای قابل توجهی برای کاربردها در سیستم‌های زیست‌پزشکی [۹] و میکروفلوئیدیک دارند. دقت بهبود یافته در کنترل میکروروبات‌ها می‌تواند به ویژه در سناریوهایی مانند تحویل هدفمند دارو، که در آن دستکاری دقیق و محلی حیاتی است، مفید باشد. علاوه بر این، با بهینه‌سازی خواص آکوستیک

## ۸. منابع

- [۱] م. سپهری خامنه و ف. هنرور، "طراحی یک سیستم فراصوتی با استفاده از تکنیک حباب‌ساز جهت بازرسی اتصالات جسی،" مجله علمی صوت و ارتعاش، شماره ۳، دوره ۵، صفحه ۵۸-۵۶.

دستگاه‌های SAW، زمینه را برای نوآوری‌های بیشتر در فناوری‌های تحریک در مقیاس میکرو فراهم می‌کند.

مطالعات آینده باید پایداری طولانی مدت این سطوح تغییر یافته با PDMS را در محیط‌های زیستی مختلف بررسی کنند و عملکرد آن‌ها را تحت شرایط عملیاتی متفاوت ارزیابی کنند. علاوه بر این، کاوش در فرمولاسیون‌های مواد جدید یا سطوح هیبریدی می‌تواند انعطاف‌پذیری و کنترل بیشتری را فراهم کند و راه را برای پیشرفت در سیستم‌های میکروروباتیک مبتنی بر میکروالکترومکانیک هموار کند و کاربرد آن‌ها را در روش‌های پزشکی پیچیده گسترش دهد.

## ۷. پیشنهادات برای تحقیقات آینده

- کاوش در مواد جدید: استفاده از مواد هیبریدی یا نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند به بهبود خواص آکوستیک و مکانیکی کمک کند.
- توسعه دستگاه‌های یکپارچه: ترکیب دستگاه‌های SAW با فناوری‌های میکروفلوئیدیک و سنسورهای زیستی می‌تواند کاربردهای جدیدی را ایجاد کند.
- مطالعات در شرایط واقعی: آزمایش‌های درون‌بدنی و بررسی تعاملات با سلول‌ها و بافت‌های زنده می‌تواند به ارزیابی عملیاتی بودن این فناوری کمک کند.

- [2] X. Ding *et al.*, "On-chip manipulation of single microparticles, cells, and organisms using surface acoustic waves," (in eng), *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 109, no. 28, pp. 11105-9, Jul 10 2012, doi: 10.1073/pnas.1209288109.
- [3] D. J. Collins, B .Morahan, J. Garcia-Bustos, C. Doerig, M. Plebanski, and A. Neild, "Two-dimensional single-cell patterning with one cell per well driven by surface acoustic waves," *Nature Communications*, vol. 6, no. 1, p. 8686, 2015/11/02 2015, doi: 10.1038/ncomms9686.
- [4] H. Dong *et al.*, "Velocity and Direction Adjustment of Actuated Droplets Using the Standing Wave Ratio of Surface Acoustic Waves (SAW)," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 28, no. 4, pp. 2399-2404, 2023, doi: 10.1109/TMECH.2023.3237664.
- [5] A .Kouhkord and N. Naserifar, "Ultrasound-assisted microfluidic cell separation: A study on microparticles for enhanced cancer diagnosis," *Physics of Fluids*, vol. 37, no. 1, 2025, doi: 10.1063/5.0243667.
- [6] F. Hassani *et al.*, "Micro-electro-mechanical acoustofluidic mixing system: A response surface-metaheuristic machine learning fusion framework," *Expert Systems with Applications*, vol. 249, p. 123638, 2024/09/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123638>.
- [7] A. Kouhkord, M. Amirmahani, F. Hassani, and N. Naserifar, "Machine learning and metaheuristics in microfluidic transport characterization and optimization: CFD and experimental study integrated with predictive modelling," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. n/a, no. n/a, doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.25430>.
- [8] F. Hassani, A. Golshani, R. Mehrabi, A. Kouhkord, M. Guilani, and M. Sharbatdar, "Intelligent design of nerve guidance conduits: An artificial intelligence-driven fluid structure interaction study on modelling and optimization of nerve growth," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. n/a, no. n/a, doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.25490>.
- [9] F. Hassani *et al.*, "An efficient framework for controllable micromixer design through the fusion of data-driven modeling and machine learning insights: Numerical and experimental analysis," *Physics of Fluids*, vol. 36, no. 3, 2024, doi: 10.1063/5.0190888.
- [۱۰] J. Duan, M. Ji, and B. Zhang, "A Perturbed Asymmetrical Y-Type Sheathless Chip for Particle Control Based on Adjustable Tilted-Angle Traveling Surface Acoustic Waves (ataTSAWs)," *Biosensors*, vol. 12, no. 8, p. 611, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-6374/12/8/611>.
- [۱۱] A. Fakhfoury *et al.*, "Surface acoustic wave diffraction driven mechanisms in microfluidic systems," *Lab on a Chip*, 10.1039/C8LC00243F vol. 18, no. 15, pp. 2214-2224, 2018, doi: 10.1039/C8LC00243F.
- [۱۲] F. Guo, "manipulating micro-objects with the power of sound," Doctor of Philosophy Dissertation, Engineering Science and Mechanics, PennState, PennState, 2015 .
- [۱۳] F. Guo *et al.*, "Three-dimensional manipulation of single cells using surface acoustic waves," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113, no. 6, pp. 1522-1527, 2016, doi: doi:10.1073/pnas.1524813113.

- [۱۴] J. Soroush, F. Ramin, H. Faridoddin, H. Keyvan, K. Afshin, and R. Fatemeh, "Determining Thermal Conductivity Coefficient of Nanofluid by Beam Displacement Method," in *Current Research in Thermal Conductivity*, G. Dr. Roberto Palma Ed. Rijeka: IntechOpen, 2024, p. Ch. 0.
- [۱۵] A. Golshani, A. Kouhkord, A. Ghanbarzadeh, and E. Najafi, "Control Design for Safe Human-Robot Collaboration based on ISO/TS 15066 with Power and Force Limit," in *2023 11th RSJ International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, 19-21 Dec. 2023 2023, pp. 279-284, doi: 10.1109/ICRoM60803.2023.10412570 .
- [۱۶] A. Kouhkord *et al.*, "Controllable Microfluidic System through Intelligent Framework: Data-Driven Modeling, Machine Learning Energy Analysis, Comparative Multiobjective Optimization, and Experimental Study," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 63, no. 30, pp. 13326-13344, 2024/07/31 2024, doi: 10.1021/acs.iecr.4c00456.
- [۱۷] س. شفیی ثابت, "اثرات صوت بر رفتار ماهی زبرا و سیکلید دریاچه ویکتوریا در شرایط آزمایشگاهی," *مجله علمی صوت و ارتعاش*, ۱۳۹۸, شماره ۱۹, دوره ۱۰, صفحه ۹۶-۱۰۹.
- [۱۸] K. E. Johnson, D. S. Melchert, E. N. Armstrong, D. S. Gianola, C. L. Cobb, and M. R. Begley, "A simple, validated approach for design of two-dimensional periodic particle patterns via acoustophoresis," *Materials & Design*, vol. 232, p. 112165, 2023/08/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112165>.
- [۱۹] G. Mu, H. Dong, T. Sun, K. T. V. Grattan, Z. Wu, and J. Zhao, "A switching method for traveling/standing wave transportation modes in two-dimensional acoustic fields using a dual-transducer support structure," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 101, p. 106724, 2023/12/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106724>.
- [۲۰] T. D. Nguyen, Y. Q. Fu, V.-T. Tran, A. Gautam, S. Pudasaini, and H. Du, "Acoustofluidic closed-loop control of microparticles and cells using standing surface acoustic waves," *Sensors and Actuators B :Chemical*, vol. 318, p. 128143, 2020/09/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128143>.
- [۲۱] T. D. Nguyen, V. T. Tran, Y. Q. Fu, and H. Du, "Patterning and manipulating microparticles into a three-dimensional matrix using standing surface acoustic waves," *Applied Physics Letters*, vol. 112, no. 21, 2018, doi: 10.1063/1.5024888.
- [۲۲] H. Pan, D. Mei, C. Xu, S. Han, and Y. Wang, "Bisymmetric coherent acoustic tweezers based on modulation of surface acoustic waves for dynamic and reconfigurable cluster manipulation of particles and cells," *Lab on a Chip*, 10.1039/D2LC00812B vol. 23, no. 2, pp. 215-228, 2023, doi: 10.1039/D2LC00812B.
- [۲۳] T. Peng, X. Lin, L. Li, L. Huang, B. Jiang, and Y. Jia, "Investigation on submicron particle separation and deflection using tilted-angle standing surface acoustic wave microfluidics," *Heliyon*, vol. 10, no. 3, p. e25042, 2024/02/15/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25042>.
- [۲۴] M. Qi, D. Dang, X. Yang, J. Wang, H. Zhang, and W. Liang, "Surface acoustic wave manipulation of bioparticles," *Soft Matter*, 10.1039/D3SM00457K vol. 19, no. 23, pp. 4166-4187, 2023, doi: 10.1039/D3SM00457K.

[۲۵] ک. موقرنژاد و ا. ح. تقی پور, "ارائه یک روش فرکانس پایین و دستگاه مربوطه به منظور اندازه‌گیری سرعت صوت در مایعات," *مجله علمی صوت و ارتعاش*, ۱۳۹۶, شماره ۱۳, دوره ۷, صفحه ۳۳-۳۸.

[۲۶] C. Phiphattanaphip, K. Leksakul, R. Phatthanakun, and T. Khamlor, "A novel microfluidic chip-based sperm-sorting device constructed using design of experiment method," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 17143, 2020/10/13 2020, doi: 10.1038/s41598-020-73841-3.

[۲۷] S. J. Raymond, D. J. Collins, R. O'Rorke, M. Tayebi, Y. Ai, and J. Williams, "A deep learning approach for designed diffraction-based acoustic patterning in microchannels," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 8745, 2020/05/26 2020, doi: 10.1038/s41598-020-65453-8.

[۲۸] S. Sachs, H. Schmidt, C. Cierpka, and J. König, "On the behavior of prolate spheroids in a standing surface acoustic wave field," *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 27, 10/21 2023, doi: 10.1007/s10404-023-02690-z.

[۲۹] S. Science, "Multiplexed Single-Cell Rheology Probing Using Surface Acoustic Waves," *Small Science*, 2, ۰۲۴doi: <https://doi.org/10.1002/smsc.202300146>.

[۳۰] M. Sui *et al.*, "Droplet transportation by adjusting the temporal phase shift of surface acoustic waves in the exciter–exciter mode," *Lab on a Chip*, 10.1039/D2LC00402J vol. 22, no. 18, pp. 3402-3411, 2, ۰۲۲doi: 10.1039/D2LC00402J.

[۳۱] M. Tayebi *et al.*, "Massively Multiplexed Submicron Particle Patterning in Acoustically Driven Oscillating Nanocavities," (in eng), *Small*, vol. 16, no. 17, p. e2000462, Apr 2020, doi: 10.1002/sml.202000462.

[۳۲] P. Vachon *et al.*, "Microfabricated acoustofluidic membrane acoustic waveguide actuator for highly localized in-droplet dynamic particle manipulation," *Lab on a Chip*, 10.1039/D2LC01192A vol. 23, no. 7, pp. 1865-1878, 2023, doi: 10.1039/D2LC01192A.

[۳۳] P. Vachon *et al.*, "Cavity-agnostic acoustofluidic manipulations enabled by guided flexural waves on a membrane acoustic waveguide actuator," *Microsystems & Nanoengineering*, vol. 10, no. 1, p. 33, 2024/03/08 2024, doi: 10.1038/s41378-023-00643-8.

[۳۴] A. Vafaie, M. R. Raveshi, C. Devendran, R. Nosrati, and A. Neild, "Making immotile sperm motile using high-frequency ultrasound," *Science Advances*, vol. 10, no. 7, p. eadk2864, 2024, doi: doi:10.1126/sciadv.adk2864.

[۳۵] س. سلطانی, ک. موقرنژاد, و ا. ح. تقی پور, "اندازه‌گیری و مدل‌سازی سرعت صوت در الکل‌های خالص," *مجله علمی صوت و ارتعاش*, ۱۳۹۹, شماره ۱۴, دوره ۷, صفحه ۱۷-۲۳.

[۳۶] ر. عابدینی, و. فرتاش وند, و ر. ا. سالاری, "تعیین مشخصه‌های عملکردی و پایش سلامت پیزوالکتریک به روش تحلیل امپدانس," *مجله علمی صوت و ارتعاش*, ۱۴۰۰, شماره ۲۱, دوره ۱۱, صفحه ۱۴-۲۹.

[۳۷] م. ر. خلیل آبادی, "پیش‌بینی رفتار آکوستیکی انواع پوشش‌های جاذب," *مجله علمی صوت و ارتعاش*, ۱۳۹۴, شماره ۹, دوره ۵, صفحه ۱۰۱-۱۰۷.

[۳۸] ه. امیری, "تخمین میزان بُرد در سونارهای غیرفعال," *مجله علمی صوت و ارتعاش*, ۱۳۹۲, شماره ۳, دوره ۵, صفحه ۳-۱۳.

- [۳۹] Z. Wang, X. Chen, J. Tian, J. Wei, and Y. Hu, "Noncontact Manipulation of Intracellular Structure Based on Focused Surface Acoustic Waves," *Analytical Chemistry*, vol. 95, no. 2, pp. 827-835, 2023/01/17 2023, doi: 10.1021/acs.analchem.2c03007.
- [۴۰] S. Jacob *et al.*, "Surface Acoustic Waves Equip Materials with Active De-Icing Functionality: Unraveled Glaze Ice De-Icing Mechanisms and Application to Centimeter-Scale Transparent Surfaces," *Advanced Materials Technologies*, vol. 8, no. 16, p. 2300263, 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/admt.202300263>.
- [۴۱] S. Yang *et al.*, "Acoustic tweezers for high-throughput single-cell analysis ", *Nature Protocols*, vol. 18, no. 8, pp. 2441-2458, 2023/08/01 2023, doi: 10.1038/s41596-023-00844-5.
- [۴۲] N. Tan Dai, "Multidimensional patterning and manipulating of microparticles and cells using surface acoustic waves," Nanyang Technological University, 2020 .
- [۴۳] G. Xu *et al.*, "Acoustic Characterization of Polydimethylsiloxane for Microscale Acoustofluidics," *Physical Review Applied*, vol. 13, no. 5, p. 054069, 05/27/ 2020, doi: 10.1103/PhysRevApplied.13.054069.
- [۴۴] B. Ang *et al.*, "Glass-embedded PDMS microfluidic device for enhanced concentration of nanoparticles using an ultrasonic nanosieve," *Lab on a Chip*, 10.1039/D2LC00802E vol. 23, no. 3, pp. 525-533, 2023, doi: 10.1039/D2LC00802E.

پی نوشت

- 
- <sup>1</sup> Surface Acoustic wave (SAW)  
<sup>2</sup> Microfluidic  
<sup>3</sup> Polydimethylsiloxane (PDMS)  
<sup>4</sup> Standing Surface Acoustic wave (SSAW)  
<sup>5</sup> Interdigital transducer  
<sup>6</sup> COMSOL Muliphysics  
<sup>7</sup> Piezoelectric Lithium Niobate wafer  
<sup>8</sup> Acoustofluidic  
<sup>9</sup> Polydimethylsiloxane (PDMS)  
<sup>10</sup> Radio frequency  
<sup>11</sup> Pulse-Echo  
<sup>12</sup> Resolution