



ISAV2024

چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران



جداسازی و جابه‌جایی همزمان و نوین ذرات توسط دستگاه صوتی ترکیبی مبتنی بر عملگرهای امواج صوتی سطحی ایستا

احسان رادمان فرد^{۱*}، ناصر ناصری فر^۲

^۱ ایران، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک، دانشجوی کارشناسی ارشد

^۲ ایران، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک، استادیار

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: EhsanRadmanfard@gmail.com

چکیده

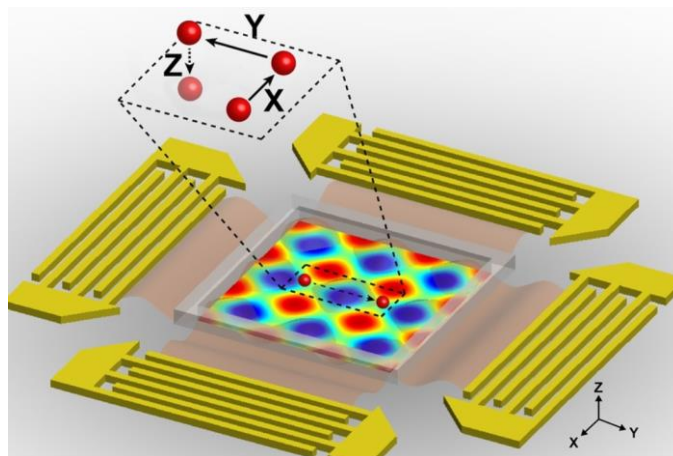
جداسازی و دستکاری سلول‌ها از مراحل کلیدی در مطالعه واکنش‌های زیستی و شیمیایی به شمار می‌آید. دستیابی به خلوص بالا در جا به جایی و دستکاری همزمان ذرات و سلول‌ها در توان عملیاتی بالا، یک چالش اساسی برای دستگاه‌های صوتی محسوب می‌شود. با این وجود، نیروی صوتی تولید شده توسط عملگرهای صوتی، امکان جداسازی و جا به جایی سریع و تک مرحله‌ای را فراهم می‌آورد. در این تحقیق به شبیه‌سازی تأثیر میدان صوتی بر جداسازی و دستکاری همزمان ذرات پرداخته و دستگاهی ترکیبی مبتنی بر امواج صوتی سطحی ایستا برای بهبود کیفیت این فرآیندها پیشنهاد داده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که امواج صوتی سطحی ایستا با ایجاد نواحی فشار بالا، جداسازی و جا به جایی مؤثرتر ذرات را ممکن می‌سازد. در نهایت، دستگاه مبدل امواج صوتی سطحی ایستا طراحی و ساخته شد که نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نیز صحت این تحقیق را تایید کرده و کارایی بالاتری نسبت به طرح‌های پیشین نشان داده است.

کلمات کلیدی: امواج صوتی سطحی ایستا؛ امواج فراصوتی؛ جابجایی صوتی؛ جداسازی صوتی.

۱- مقدمه

استفاده از دستکاری صوتی به‌عنوان یک فناوری پیشرفته، به‌ویژه در حوزه‌های مهندسی و علوم مواد، به دلیل دقت بالا و ویژگی‌های منحصر به فرد آن، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. این تکنیک، به‌جای استفاده از روش‌های مکانیکی سنتی، از امواج صوتی برای ایجاد نیروهای دقیق و متمرکز بهره می‌گیرد که می‌تواند به‌طور مؤثری در جابه‌جایی و کنترل ذرات میکروسکوپی و نانوذرات استفاده شود. پیشرفت‌های اخیر در این زمینه می‌تواند انقلابی در طراحی سیستم‌های جدید و بهبود فرآیندهای صنعتی و تحقیقاتی ایجاد کند. با توجه به اهمیت و پتانسیل‌های گسترده این تکنیک، این تحقیق تلاش می‌کند به بررسی عمیق و کاربردی این

فناوری بپردازد و راهکارهای نوین و عملی را برای بهبود و توسعه آن ارائه دهد. امواج صوتی که منتشر یا تعامل دارند، شیب فشار در محیط درون یک دستگاه فشرده ایجاد می‌کنند تا میکرو-اشیاء معلق را جابه‌جا کنند. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که ادغام میکروفون‌های کوچک با گیره‌های صوتی، روشی نوین و مؤثر برای کنترل مایعات یا دستکاری میکرو-اشیاء درون مایعات فراهم می‌آورد [۱]. شماتیک نمونه این دستگاه پیشرفته در شکل (۱)، ترکیبی منحصر به فرد و غیرقابل تقلید از ویژگی‌ها را نشان می‌دهد. شدت و فرکانس عملکرد گیره‌های صوتی در دامنه‌ای مشابه با آنچه در تصویربرداری فراصوتی استفاده می‌شود، قرار دارد که به‌طور گسترده‌ای برای نظارت غیرتهاجمی بر سلامت بارداری استفاده می‌شود. بنابراین، انتظار می‌رود که فناوری گیره صوتی برای سایر نمونه‌های زیستی مانند سلول‌ها و زیست‌مولکول‌ها ایمن باشد. سازگاری زیستی این فناوری تا حدی از طریق آزمایش‌های زنده‌مانی و تکثیر سلول‌ها اثبات شده است. فناوری‌های گیره صوتی امکان کنترل مایعات، مانند مخلوط کردن، جابه‌جایی، پاشش و پراکنش را فراهم می‌کنند [۲]. برای دستیابی به یک دستکاری مؤثر، لازم است که ذرات یا سلول‌های وارد شده به محدوده عملکرد دستگاه، به‌طور کامل در این محدوده قرار گرفته و تا حد امکان فاقد ناخالصی باشند. از این رو، خالص‌سازی نمونه‌های مورد استفاده در این دستگاه امری ضروری به نظر می‌رسد. انجام همزمان جداسازی و جابه‌جایی به سهولت کار کمک کرده و با کاهش زمان عملکرد دستگاه، موجب می‌شود تا سلول‌ها نیازی به گذراندن دو مرحله جداگانه و قرار گرفتن در شرایط آزمایش بیشتر نداشته باشند، و در نتیجه شانس زنده ماندن سلول‌ها افزایش می‌یابد. این پژوهش به بررسی و تحلیل قابلیت‌های نوین امواج صوتی در جداسازی و تغییر موقعیت همزمان ذرات و سلول‌ها می‌پردازد.



شکل ۱. یک نمونه گیره صوتی استفاده شده در پژوهش مشابه [۲]

۲- شبیه سازی دستگاه جداساز و جابجا کننده

۱-۲ معادلات حاکم بر جداسازی و جابه‌جایی فراصوتی با موج ایستای سطحی

اساس ایجاد امواج سطحی بر روی یک بستر پیزوالکتریک، پدیده پیزوالکتریک معکوس است. اعمال ولتاژ متناوب به الکترودهای فلزی قرار گرفته بر روی سطح بستر، منجر به ایجاد میدان الکتریکی متناوب در داخل ماده می‌شود. این میدان الکتریکی به واسطه خاصیت پیزوالکتریک معکوس، موجب ایجاد کرنش‌های مکانیکی متناوب در سطح بستر می‌گردد و در نتیجه امواج صوتی سطحی با فرکانس بالا (فراصوت) تولید می‌شوند. تداخل سازنده امواج سطحی در نواحی خاصی از سطح بستر، به تشکیل نقاطی با بیشترین دامنه کرنش (ضدگره‌های فشاری) و نقاطی با کمترین دامنه کرنش (گره‌های فشاری) منجر می‌شود. هنگامی که ذرات معلق در یک سیال تحت تأثیر امواج سطحی ایستا قرار می‌گیرند، جهت حرکت آن‌ها به سمت گره یا ضدگره فشاری به ضریب فراصوتی ذره وابسته است. ضریب فراصوتی که تابعی از خواص ذره و سیال حامل (مانند چگالی و مدول حجمی) است، با استفاده از معادله (۱) قابل محاسبه است.

$$\varphi(\rho, \beta) = \frac{5\rho_p - 2\rho_f}{2\rho_p - \rho_f} - \frac{\beta_p}{\beta_f} \quad (1)$$

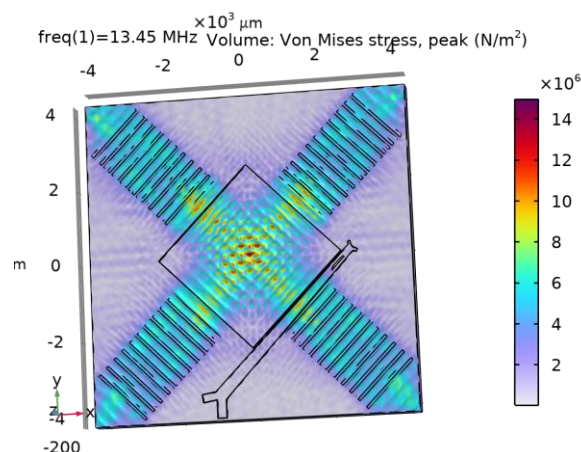
در این معادله، β_p و β_f به ترتیب فشردگی ذرات معلق و فشردگی آب هستند و پارامترهای ρ_p و ρ_f به ترتیب نمایانگر چگالی ذرات معلق و چگالی سیال (در اینجا آب) می‌باشند [۲]. جهت حرکت ذرات معلق تحت تأثیر امواج فراصوتی به علامت ضریب فراصوتی وابسته است. ذراتی با ضریب فراصوتی مثبت (مانند اکثر سلول‌های خونی) تمایل به حرکت به سمت گره‌های فشاری دارند [۳]، در حالی که ذراتی با ضریب فراصوتی منفی به سمت ضدگره‌های فشاری رانده می‌شوند. نیروی محرک این حرکت، نیروی تابشی فراصوتی نامیده می‌شود که از معادله (۲) محاسبه می‌گردد.

$$F_R = - \left(\frac{\pi P_0^2 V_c \beta_f}{2\lambda} \right) \varphi(\rho, \beta) \sin(2kx) \quad (2)$$

در معادله (۲)، پارامتر V_c نشان‌دهنده حجم ذره، P_0 نمایانگر فشار فراصوتی اعمال شده در حوضچه، λ طول موج، k عدد موج و X فاصله ذره از گره است. لازم به ذکر است که به دلیل تفاوت در سرعت انتشار موج در سیال و بستر پیزوالکتریک، هنگام عبور موج از مرز بین این دو محیط، زاویه‌ای به نام زاویه ریلی ایجاد می‌شود [۴]. این زاویه نشان‌دهنده انحراف مسیر موج بر اثر این تفاوت سرعت است.

۲-۲ شبیه‌سازی میدان آکوستیک فراصوتی با روش اجزا محدود

برای شبیه‌سازی دقیق انتشار موج سطحی در بستر پیزوالکتریک و بررسی اثرات تداخل این موج با حوضچه مایع در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics^۱، از یک مدل سه‌بعدی استفاده شده است. این مدل بر اساس مطالعات فنگ و همکارانش تنظیم شده. در این شبیه‌سازی، انتشار موج سطحی صوتی روی بستر پیزوالکتریک (ویفر لیتیوم نایوبایت^۲ ۱۲۸) از طریق معادلات تنش- کرنش و معادلات ماکسول در محیط الکترواستاتیک مدل‌سازی شده است. (شکل ۲) برای ایجاد موج سطحی، نیاز به فرکانس خاصی است که در محدوده فرکانس تشدید بستر پیزوالکتریک قرار داشته باشد. با استفاده از تحلیل فرکانسی در نرم‌افزار COMSOL، فرکانس ۱۳.۴۵ مگاهرتز به عنوان فرکانس طبیعی مناسب جهت ایجاد موج سطحی محاسبه شده است و از ولتاژ ۲۰ ولت و برای حوضچه شرط جریان آرام در نظر گرفته شده است. این فرکانس با فرکانس محاسبه‌شده توسط فنگ و همکاران مطابقت دارد.

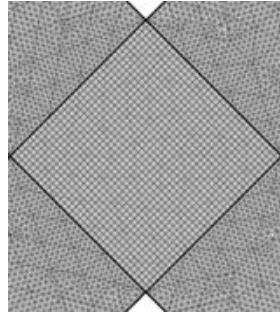


شکل ۲. تنش سطحی صحت سنجی شده

^۱ www.comsol.com

^۲ LiNbO₃ saw grade wafer, ۱۲۸ deg. Y-X cut,

در نهایت، برای طراحی عملگر نهایی، از یک مدل بازطراحی شده با طول موج ۳۰۰ میکرون و ۴۰ الکترون استفاده شده است. به منظور اطمینان از صحت شبیه‌سازی‌ها، تحلیل مش به‌طور دقیق انجام شده است. (شکل ۳)

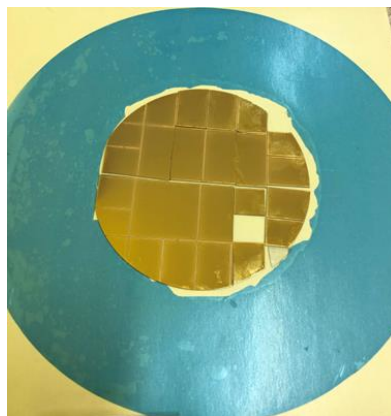


شکل ۳. مش متغییر استفاده شده یا سایز ۶۰ میکرون برای شبیه‌سازی عددی

۳- تست تجربی

۱-۳ ساخت دستگاه فراصوتی

در مرحله آماده‌سازی بستر آزمایشگاهی، محیط باید با دقت کنترل شود تا از تأثیرات ناخواسته نور و حرارت بر مواد حساس مانند فوتورزیست جلوگیری شود. تمامی مراحل ساخت در اتاق زرد و در دمایی نزدیک به دمای اتاق انجام می‌شود تا از تغییر خواص مواد جلوگیری شود. پس از شست‌وشو و خشک‌کردن ویفر سیلیکونی، لایه‌ای از فوتورزیست منفی لایه‌نشانی شده و الگوی حوضچه با استفاده از ماسک رادیولوژی ایجاد می‌شود. سپس قالب نهایی میکرو کانال با حوضچه بر روی ویفر سیلیکونی ساخته می‌شود. در شکل (۴) یک نمونه بستر پیزوالکتریک لیتیوم نایوبایت اسپاتر شده و برش خورده نشان داده شده است. در مرحله بعد، حوضچه‌ای با ضخامت ۱۰۰ میکرون با استفاده از فوتورزیست SU-۸ و مراحل پخت و نوردهی ساخته می‌شود. فرآیند ساخت مبدل اینتردیجیتال شامل لایه‌نشانی طلا بر روی بستر پیزوالکتریک، لایه‌نشانی فوتورزیست مثبت و سپس حذف طلاهای اضافی برای ایجاد لایه محافظ است.

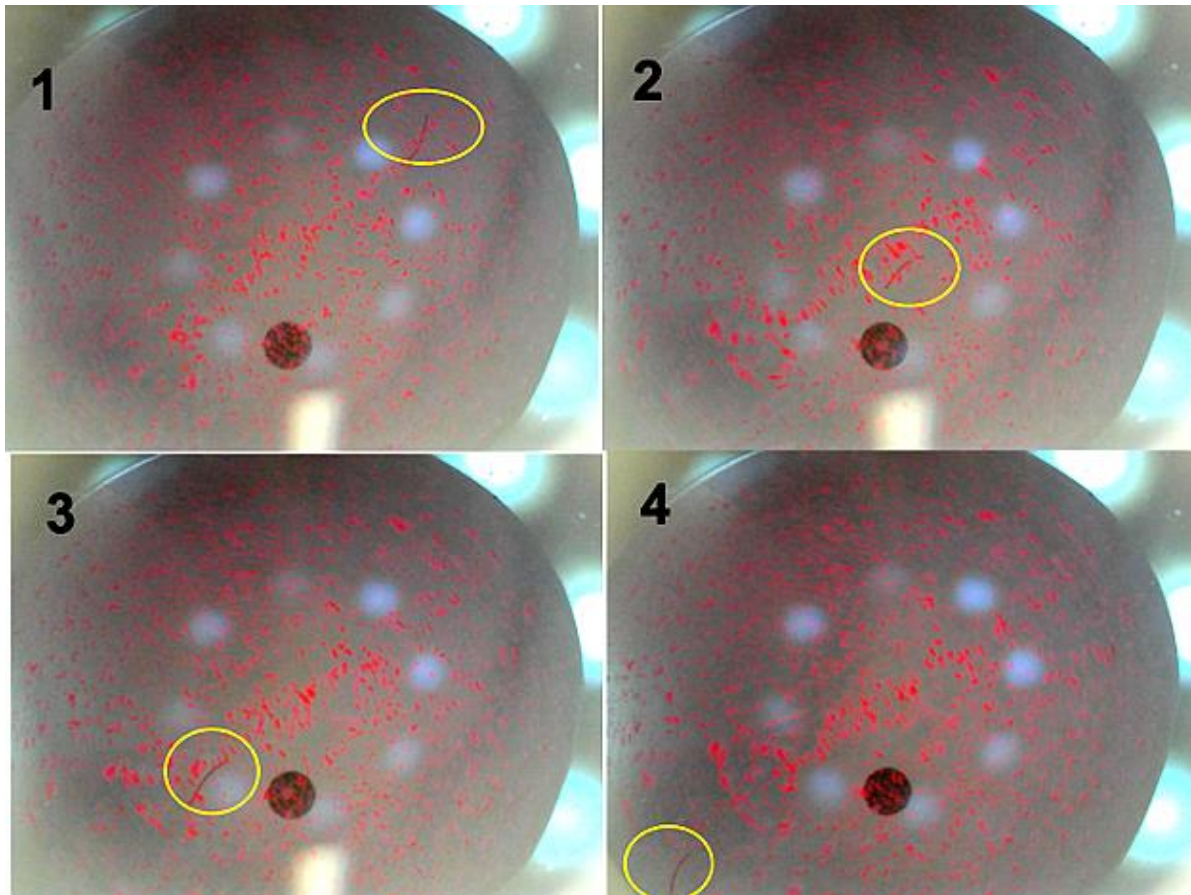


شکل ۴. بستر پیزوالکتریک لیتیوم نایوبایت لایه‌نشانی شده با طلا و برش خورده

این فرآیندهای دقیق و چندمرحله‌ای در نهایت به تولید دستگاهی با قابلیت‌های پیشرفته برای جداسازی و جابه‌جایی همزمان منجر می‌شوند.

۲-۳ آزمون جابه‌جایی

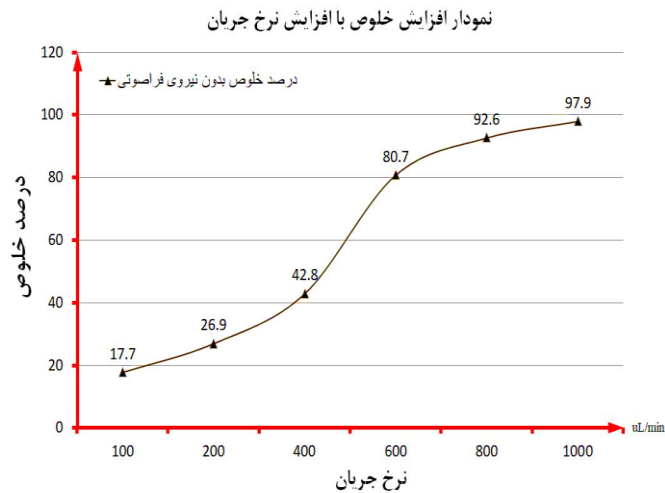
در شکل (۵)، یک تار مو که به خاطر ساختار انعطاف پذیر و اندازه یک میلیمتری آن به جای نماتد، با موفقیت در راستای تشکیل گره‌های صوتی در فرکانس کاری ۱۳.۴۵ مگاهرتز و ولتاژ ۳۰ ولت با حالت یک جفت مبدل (قطری) روشن، در قطر جابه‌جا شده است، نشان داده شده است.



شکل ۵. حرکت قطری یک تار مو در راستای تشکیل گره‌های صوتی را مشاهده می‌شود (۱ و ۲ و ۳ و ۴)

۳-۳ آزمون جداسازی

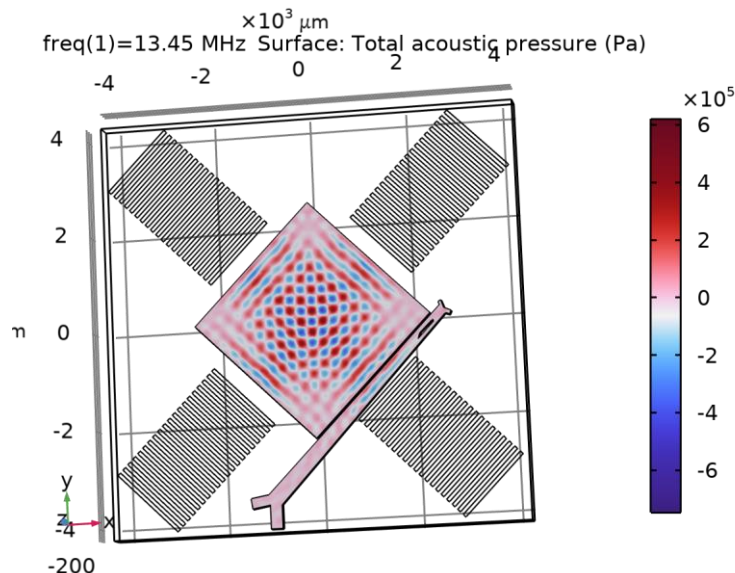
برای ارزیابی کیفیت جداسازی، شکل (۶) جهت نمایش خلوص جداسازی در جریان‌های مختلف ارائه شده است. پس از وارد کردن جریان حاوی ذرات نمونه، ذرات تصفیه‌شده در خروجی کانال‌ها جمع‌آوری شده و با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر ایمیج جی‌آی، میزان ذرات موجود در خروجی سلول‌های سرطانی به ازای ۱۰ میکرولیتر نمونه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد با افزایش نرخ جریان، خلوص جداسازی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. با افزایش جریان تا ۱۰۰۰ میکرولیتر بر دقیقه، خلوص جداسازی به بیش از ۸۰ درصد رسید. پیش‌بینی می‌شود با افزودن مبدل فراصوتی، خلوص جداسازی در جریان ۳۰۰ میکرولیتر بر دقیقه به ۴۰ تا ۵۰ درصد افزایش یابد. همچنین، با افزایش نرخ جریان، اثر نیروی فراصوتی کاهش یافته و نمودار خلوص جداسازی به سمت نمودار بدون نیروی فراصوتی میل می‌کند، اما این تغییر در جریان‌های بالا تأثیر قابل‌توجهی بر توانایی جداسازی کانال نخواهد داشت.



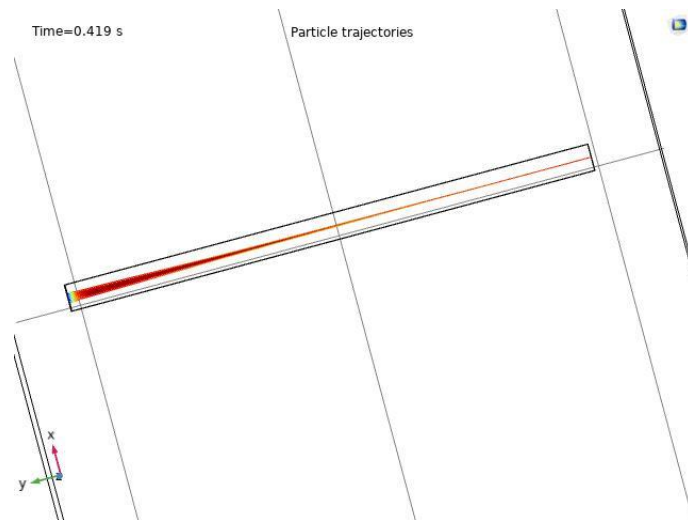
شکل ۶. نمودار خلوص جداسازی در جریان‌های مختلف

۴- نتایج

در این بخش، مدل‌سازی سه‌بعدی یک حوضچه برای ایجاد موج و جابه‌جایی ذرات، همراه با یک کانال جهت جداسازی سلول‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل تأثیر نصب کانال در کنار مبدل‌ها بر فشار فراصوتی نشان داد که اضافه کردن یک کانال نامتقارن به حوضچه، منجر به کاهش فضای کاری شده و امکان جابه‌جایی و جداسازی ذرات را با سرعت‌های پایین‌تر فراهم می‌کند. در نهایت، یک دستگاه با حوضچه و کانال قابل جابه‌جایی برای اجرای فرآیند ساخت طراحی و ارزیابی شده است. (شکل ۷)

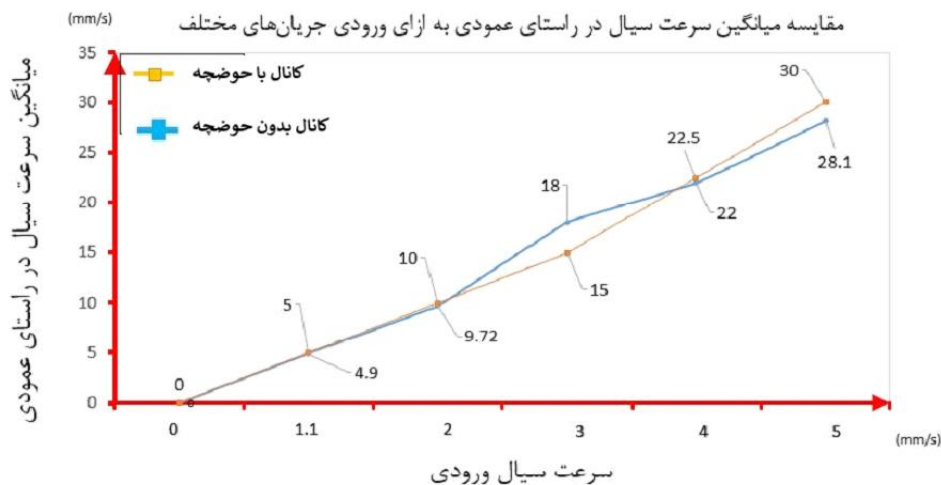


شکل ۷. شبیه‌سازی نهایی دستگاه فراصوتی همراه جداساز و جابه‌جا کننده



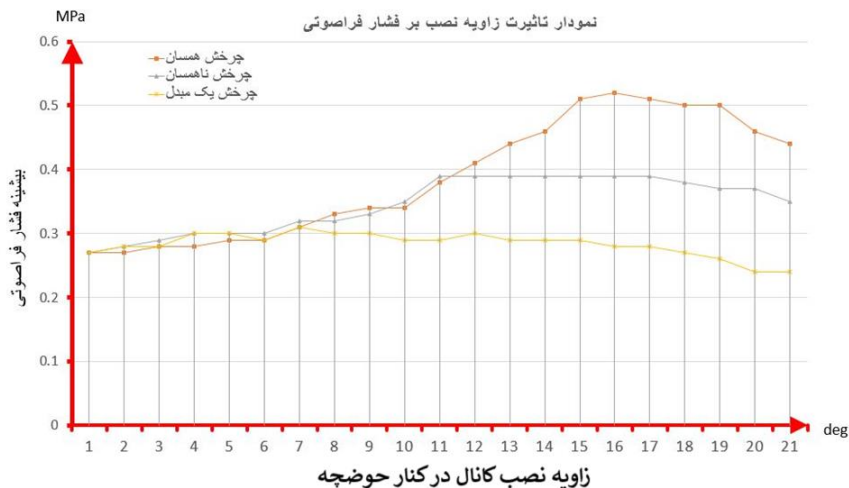
شکل ۸. متمرکز سازی ذرات در مدل صحت سنجی در فرکانس ۹.۶۲۵۷ مگاهرتز و ولتاژ دامنه ۲۰ ولت

همانطور که از شکل (۸) پیداست در مدل شبیه سازی شده مطابق مقاله مرجع و مدل اصلی در طول تقریبی میلی متر، ذراتی با قطر ۱۰ و ۴ میکرون در مرکز کانال توسط موج صوتی ایستا متمرکز شده اند.



شکل ۹. مقایسه میانگین سرعت سیال در راستای عمودی به ازای ورودی جریان های مختلف

همانطور که در شکل (۹) مشاهده می شود پیشینه اختلاف میان مدل سازی برای اضافه کردن حوضچه ۲۰٪ است که با توجه به بازه کاری دستگاه در بیشتر موارد شبیه سازی از تطبیق قابل ملاحظه ای برخوردار است. آخرین مقایسه جهت صحت سنجی عرض جریان در آرایه ها صورت پذیرفته است. در این مقایسه با بررسی عرض جریان به ازای ورودی ۱.۱ متر بر ثانیه برای ذرات ۹.۹ میکرون نتایج زیر حاصل شده است که از مطابقت قابل ملاحظه ای با دستگاه بدون حوضچه برخوردار است.



شکل ۱۰. نمودار تأثیر تغییر زاویه نصب و چرخش مبدل و کانال در حالات مختلف

همانطور که از نتایج حاصل از شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت، افزایش زاویه نصب تا ۱۵ درجه فشار فراصوتی با چرخش هسمان بهبود می‌یابد. از طرفی چرخش ناهمسان تا زاویه نصب ۱۰ درجه فشار فراصوتی بیشتری نسبت به سایر حالت‌های نصب ایجاد می‌سازد. همچنین ایجاد تنها یک چرخش در مبدل اگر در زوایای بالای ۸ درجه باعث کاهش فشار فراصوتی می‌شود. اما امکان ایجاد انحنای در بخش‌های معینی از گره فشاری مسیر را فراهم می‌سازد.

۵- نتیجه‌گیری

برای بررسی ارتباط بین مدل محاسباتی و نمونه عملی، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری و نتایج تجربی مقایسه شدند. مدل محاسباتی، رفتار پیش‌بینی‌شده امواج صوتی و نحوه تأثیر آن‌ها بر ذرات معلق را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده است. این پیش‌بینی‌ها در نمونه عملی نیز تأیید شد، به‌گونه‌ای که شکل‌گیری الگوهای گره و ضدگره صوتی در محل‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل محاسباتی مشاهده شد. همچنین، مقادیر فشار صوتی و نرخ جداسازی ذرات در شرایط عملی با مقادیر محاسبه‌شده همخوانی قابل‌توجهی داشتند، که صحت مدل‌سازی را نشان می‌دهد. این تطابق تأکیدی بر دقت مدل در پیش‌بینی عملکرد دستگاه و طراحی بهینه آن است.

مراجع

- Guo, F., *manipulating micro-objects with the power of sound*, in *Engineering Science and Mechanics*. ۲۰۱۵, PennState: PennState.
- Guo, F., et al., *Three-dimensional manipulation of single cells using surface acoustic waves*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ۲۰۱۶. ۱۱۳(۶): p. ۱۵۲۲-۱۵۲۷.
- Ding, X., et al., *On-chip manipulation of single microparticles, cells, and organisms using surface acoustic waves*. *Proc Natl Acad Sci U S A*, ۲۰۱۲. ۱۰۹(۲۸): p. ۱۱۱۰۵-۹.
- Collins, D.J., et al., *Two-dimensional single-cell patterning with one cell per well driven by surface acoustic waves*. *Nature Communications*, ۲۰۱۵. ۶(۱): p. ۸۶۸۶.