



تعلیق و به دام انداختن ذرات با ضریب کنتراست مثبت و بررسی تاثیر حجم در محیط مایع به وسیله پدیده آکوستوفرتیک

یوسف حجت^{۱*}، محسن قزوینی^۲، وحید فرتاشوند^۳، علیرضا خوزستانی^۴

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه طراحی صنعتی، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران

۴- دانشجوی دکتره، مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵، yhojjat@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۴ تیر ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۱۵ مرداد ۱۴۰۱

پذیرش: ۲۵ مرداد ۱۴۰۱

کلیدواژگان:

تعلیق فراصوت

آکوستوفرتیک

امواج ایستا

موقعیت دهی بدون تماس

تعلیق در آب، ذرات شناور

چکیده

تعلیق فراصوت به دلیل عدم وابستگی به جنس و خواص ماده، جهت امکان تعلیق، برای طیف گسترده‌ای از ذرات قابل استفاده است و پتانسیل بالایی در انتقال و جابجایی ذرات به صورت کنترل شده دارد. هدف اصلی در این مقاله، استفاده از روشی جدید بر پایه امواج مافوق صوت، برای تعلیق و جداسازی بدون تماس ذرات از محیط مورد نظر می‌باشد. با استفاده از این روش که آکوستوفرتیک نامیده می‌شود، ابتدا ذره هدف به محیط سیال تزریق شده و پس از آن به حالت تعلیق درآمده و جداسازی ذره صورت می‌پذیرد. محیطی که جهت این تعلیق و جداسازی انتخاب گردید، آب می‌باشد. علت این انتخاب، نو بودن انجام تعلیق و جداسازی در این محیط به دلیل ویسکوزیته بالاتر و سرعت صوت بالاتر آب نسبت به هوا و نزدیک بودن این محیط جهت کاربرد پاک‌سازی آب، جداسازی آب موجود در نفت خام و جداسازی پلاکت از خون در مقیاس میکروفلوئیدیک می‌باشد. نیروی آکوستوفرتیک باید از برآیند نیروی گرانش و شناوری بیشتر باشد که بتواند بر آن غلبه کند و ذره را به حالت تعلیق درآورد و برای افزایش این نیرو نیاز است فشار آکوستیک زیاد شود که در حالت عادی با توجه به فرکانس پایین (۲۰ kHz) مورد استفاده و مقیاس ماکرو قابل انجام نیست و افزایش توان مصرفی ترانسدیوسر باعث ایجاد کاویتاسیون شده که مانع تعلیق ذرات می‌شود، در این مقاله جهت افزایش فشار آکوستیک و تعلیق ذرات از محفظه بسته و با ایجاد جریان ایستای رزونانس استفاده شد که تعلیق ذرات را با همین فرکانس پایین امکان پذیر کرد. در این مرحله سرعت اولیه ذرات در حالت شبیه‌سازی و عملی ۰/۴ متر بر ثانیه داده شد و نتایج نشان داد که بیشترین اختلاف سرعت بین ذرات با حجم کم و زیاد ۱۲،۵ درصد در حالت شبیه‌سازی و ۱۰ درصد در حالت عملی بود؛ بنابراین ذره با حجم بیشتر نیروی بیشتری احساس کرده و سرعت بیشتری می‌گیرد. بیشترین اختلاف بین شبیه‌سازی و تست عملی نیز ۸ درصد بوده که در آزمایش‌های تجربی، صحت طراحی انجام شده و همچنین نتایج شبیه‌سازی تایید شد.

Suspension and trapping particles with a positive contrast factor and investigating the effect of particle volume in a liquid medium by the acoustophoretic phenomenon

Yousef Hojjat^{1*}, Mohsen Ghazvini¹, Vahid Fartashvand², Alireza Khozestani¹

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Industrial Design Group, Art Faculty, Alzahra University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, yhojjat@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 5 July 2022

First Decision: 6 August 2022

Accepted: 16 August 2022

Keywords:

Ultrasonic suspension

Acoustophoretic

Standing waves

Non-contact positioning

Suspension in water

particle levitation

Abstract

Ultrasonic suspension can be used for a wide range of particles due to its independence from the material and properties of the material, and has a high potential for the transfer and manipulation of particles in a controlled manner. The main purpose of this paper is to use a new method based on ultrasonic waves, for suspension and non-contact separation of particles from the desired environment. Using this method, called acoustophoretic, the target particle is first injected into the fluid medium and then it is suspended and separated. The environment chosen for suspension and separation is water. The reason for this choice is the novelty of the suspension and separation in this environment due to the higher viscosity and speed of sound of water than air and the proximity of this environment for water purification, separation of water in crude oil and microfluidic scale separation of platelets from blood. The acoustic force must be greater than the resultant of the gravitational and buoyancy force so that it can overcome it and suspend the particle. In order to increase this force it is necessary to increase the acoustic pressure, which is not feasible due to the low frequency in macro scale (20 kHz) and increasing the power consumption of the transducer causes cavitation that prevents the suspension of particles. At this stage, the initial velocity of the particles in the simulation and practical mode was given as 0.4 m / s and the results showed that the largest difference in velocity between the particles with low and high volume was 12.5% in the simulation and 10% in the experiment; Therefore, the larger the particle, the more force it feels and the faster it gets. The largest difference between simulation and experimental test was 8% therefore, experimental tests confirmed the design accuracy and also the simulation results.

Please cite this article using:

Y. Hojjat, M. Ghazvini, V. Fartashvand, A. Khozestani, Suspension and trapping particles with a positive contrast factor and investigating the effect of particle volume in a liquid medium by the acoustophoretic phenomenon, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 12- 23, 2022 (in Persian).
<https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.159958>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

جدیدی را برای چیدمان ترانسدیسورها به منظور تعلیق قطرات در هوا [۱۶] و چرخش و حرکت دورانی ذرات در هوا [۱۷] پیشنهاد دادند؛ اما برای تعلیق و جداسازی ذرات خون نیاز به محیطی شبیه‌تر به پلاسما از نظر چگالی و سایر ویژگی‌ها بود که فرنل و همکاران جداسازی ذرات در محیط آب با توجه به ضریب کنتراست را انجام دادند [۱۱]. جداسازی در فرکانس‌های در محدوده کیلوهرتز، به دلیل دامنه‌های فشار بالا می‌تواند منجر به شروع کایوتاسیون شود که ممکن است به ذرات معلق آسیب برساند و در بعضی از مقالات انجام آن را بسیار دشوار و دور از دسترس می‌دانند [۱۸]، اما در این پژوهش با غلبه بر کایوتاسیون و رسیدن به فشار آکوستیک مورد نیاز که در ادامه توضیح داده می‌شود، تعلیق صورت پذیرفت.

به‌طور کلی امواج صوتی از لحاظ ماهیت به دو نوع کلی امواج ایستا و امواج گذرا دسته‌بندی می‌شوند. هنگامی که موج در یک سیستم بی‌نهایت تولید می‌شود به صورتی که از دو انتها آزاد باشد، امواج گذرا ایجاد می‌شوند. امواج گذرا هنگامی تولید می‌شوند که امواج انعکاسی به‌وسیله امواج انتشاری از سیستم از بین بروند [۱۹]. در اثر انتشار امواج گذرا در دو جهت مخالف و به سمت یکدیگر، امواج ایستا ایجاد می‌شوند، در شکل ۱ امواج ایستا حاصل از یک ترانسدیسور و یک بازتابنده نشان داده شده است. در واقع هنگامی که امواج گذرا در دو جهت مخالف با اختلاف فاز 180° درجه انتشار یابند، این امواج تولید می‌شوند [۱۶].

همان‌طور که در شکل ۱، مشاهده می‌شود، در امواج ایستا نقاط گره و نقاط شکم ایجاد می‌شوند. در نقاط گره دو موج انتشاری به یکدیگر برخورد می‌کنند و در نقاط شکم دو موج بیشترین فاصله عمودی از یکدیگر را دارا هستند. به دلیل آنکه نیرو در امواج ایستا بیشتر از امواج گذرا می‌باشد، پس از این امواج در جداسازی و یا انتقال ذرات استفاده می‌شود.

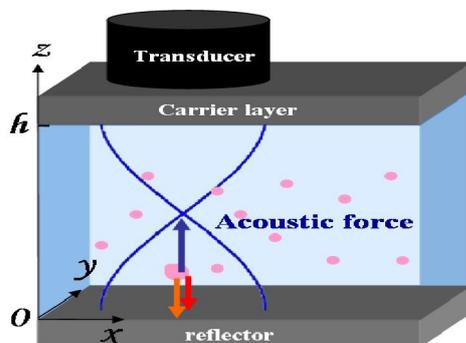


Fig. 1 Static wave

شکل ۱ ایجاد موج ایستا

کنترل دقیق حرکت و همچنین تعلیق ذرات در یک سیال (مایع یا گاز) کاربرد بسیاری دارد [۱]. برای این منظور تحقیقات زیادی در حال انجام است تا بتوان میزان دقت در انتقال یک‌ذره را برای مرتب‌سازی [۲، ۳]، به دام انداختن [۴، ۵] و جابجایی ذرات^۱ بالابرد و همچنین موقعیت ماده انتقالی را کنترل کرد. به‌عنوان مثال، در مهندسی، فرایند ترکیب ذرات با یکدیگر باهدف حصول خواص مکانیکی مدنظر بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در داروسازی برای دستیابی به ترکیب موردنظر می‌بایست مواد به مقدار دقیق ترکیب یا جداسازی شده تا دارو بهترین بازده را داشته باشد. در بسیاری از موارد نیز نیاز است تا یک‌ذره از ذرات دیگر جدا شده و عمل فیلتراسیون انجام گردد که این عمل به‌وسیله تعلیق ذره هدف صورت می‌گیرد. به‌تازگی چندین روش برای تعلیق و جداسازی ذرات از جمله آکوستوفرتیک [۶، ۷]، دی الکتروفورز [۸]، مگنتوفرتیک [۹، ۱۰] و الکترواستاتیک [۱۲] استفاده شده است. در تعلیق آکوستوفرتیک، الکتروفورز و مگنتوفورز به ترتیب تعلیق به‌واسطه نیروی میدان آکوستیکی، میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی است. در تعلیق مغناطیسی، تعلیق محدود به مواد مغناطیسی، در تعلیق الکتریکی محدود به ذرات باردار و رسانای الکتریکی می‌باشد. روش آکوستوفرتیک به مشخصه‌های الکتریکی ذرات بستگی ندارد و هر ذره‌ای می‌تواند با این روش به تعلیق درآید.

آکوستوفرتیک از تلفیق دو کلمه آکوستیک^۲ به معنای صوت و فرتیک^۳ به معنای انتقال ایجاد شده است. در واقع انتقال ذره به‌وسیله امواج صوتی را آکوستوفرتیک گویند. رابرت هوک در دانشگاه آکسفورد اولین کسی بوده که از صوت برای انتقال ذرات استفاده کرده است [۱۳]. در سال ۱۹۳۴ کینگ با استفاده از معادلات اوایلر، نیروی وارد به یک کره توسط امواج صوتی را محاسبه کرد. او در محاسبات خود از ویسکوزیته سیال صرف‌نظر کرد. به دلیل اینکه مقدار این نیرو در ذرات کوچک، در مقیاس کمتر از چند میکرون بسیار کم می‌باشد [۱۳]. گرکف در سال ۱۹۶۱ نیروی وارد بر یک‌ذره در میدان صوتی در سیال را محاسبه کرد. امروزه از این معادلات در پدیده آکوستوفرتیک استفاده می‌کنند [۱۴]. در سال ۲۰۰۰ دانیلوف در محاسبات خود ویسکوزیته سیال را نیز وارد کرد و نیروی وارد بر ذره را به مقدار دقیق‌تری محاسبه نمود [۱۵]. فارستی و همکاران آرایش

^۱ Manipulate particles^۲ Acoustic^۳ Phoretic

$$F_r = - \left(\frac{\pi P_0^2 V_p \beta_m}{2\lambda} \right) \cdot \varphi(\beta, \rho) \cdot \sin(2kx) \quad (1)$$

$$\varphi(\beta, \rho) = \frac{5\rho_p - 2\rho_m}{2\rho_p + \rho_m} - \frac{\beta_p}{\beta_m} \quad (2)$$

همان‌طور که مشخص است نیروی وارد بر یک‌ذره به پارامترهای بسیاری بستگی دارد. P_0 فشار آکوستیکی، V_p حجم ذره، λ طول موج، ρ_p دانسیته ذره، ρ_m دانسیته محیط، β_p ضریب فشردگی ذره، β_m ضریب فشردگی محیط، c سرعت صوت، x فاصله از گره، k عدد موج و φ ضریب کنتراست صوتی می‌باشد [۱۶].

مهم‌ترین نکته در رابطه (۱) ضریب کنتراست صوتی می‌باشد که جهت حرکت ذره به سمت نقاط گره و شکم ارتعاشی را تعیین می‌کند. این ضریب به مشخصات فیزیکی ذاتی ماده، چگالی، ضریب فشردگی ذرات و محیط اطراف آن بستگی دارد. به دلیل ضریب کنتراست صوتی حتی ذرات بسیار سبک نیز به دلیل آنکه ضریب فشردگی آن‌ها با محیط فرق می‌کند، نیرویی را احساس می‌کنند. نحوه محاسبه این ضریب در رابطه (۲) مشخص است.

در صورتی که ضریب کنتراست صوتی عددی مثبت باشد ذرات در گره و در صورتی که ضریب کنتراست عددی منفی باشد ذرات در نقاط شکم جمع خواهند شد. به‌طور عمومی ذرات صلب در محیط‌های آبی در نقاط گره جمع می‌شوند. در حالی که حباب‌های گازی در نقاط شکم جمع می‌شوند [۲۱]. در شکل ۳ جهت نیروی وارد شده به ذرات با توجه به ضریب کنتراست آورده شد.

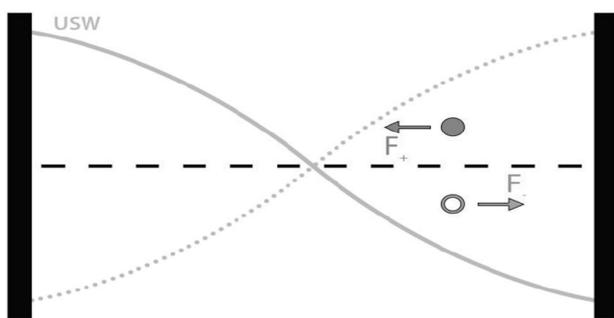


Fig. 3 Two particles with different contrast coefficients solid particles go to the node due to the positive contrast coefficient and empty particles go to the abdomen due to the negative contrast coefficient [22]
شکل ۳ دو ذره با ضریب کنتراست متفاوت ذره توپر به دلیل ضریب کنتراست مثبت به سمت گره و ذره توخالی به دلیل ضریب کنتراست منفی به سمت شکم می‌رود [۲۲]

نیروی صوتی ثانویه: وقتی ذرات در یک میدان از امواج ایستا قرار می‌گیرند، علاوه بر نیروی اولیه، نیروی ثانویه نیز بر ذرات وارد

در این روش، تولید و آشکارسازی امواج فراصوت توسط یک ترانسدویسر، متشکل از یک یا چند قطعه سرامیکی با خواص الکترومکانیکی انجام می‌شود. قطعه سرامیکی برای تولید امواج فراصوت، انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی و برای آشکارسازی، انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. در این مقاله اصول و روابط حاکم برای ایجاد نیروی آکوستیک تشریح شده و تاثیر پارامترهای مختلف و ضریب کنتراست در این نیرو بررسی شده و تعلیق ذرات پلی‌استایرن و ای بی اس در محیط مایع، آزمون عملی و تجربی نهایت با تحلیل و شبیه‌سازی ذرات در نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک^۱ ۵/۳ انجام شده، مقایسه شده است.

۱-۱- اصول و روابط حاکم

نیروی صوتی اولیه^۲: به دویرویی محوری و عرضی تقسیم می‌شود. نیروی محوری در راستای حرکت موج می‌باشد که این نیرو از نیروی عرضی قوی‌تر است. نیروی عرضی ذرات را در نقاط گره یا شکم جمع می‌کند و باعث می‌شود ذرات به یکدیگر نزدیک شده و موقعیت خود را حفظ کنند [۲۰]. در شکل ۲ مشخصات نیروی صوتی اولیه وارد بر ذرات در یک میدان صوتی از امواج ایستا نشان داده شده است که F_B نیروهای بین‌ذره‌ای هستند، F_{Ax} مؤلفه محوری نیروی صوتی اولیه و F_{Tr} مؤلفه عرضی نیروی صوتی اولیه است.

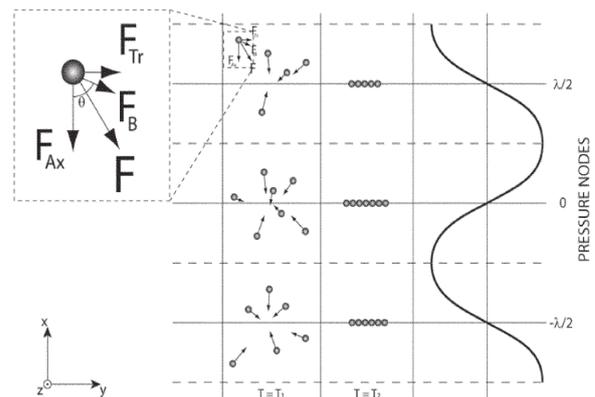


Fig. 2 Basic sound force components [20]

شکل ۲ مؤلفه‌های نیروی صوتی اولیه [۲۰]

در روش آکوستوفرتیک نیرویی که بیشترین تاثیر را دارد نیروی صوتی اولیه می‌باشد. روش محاسبه این نیرو در رابطه (۱) آمده است.

¹ COMSOL Multiphysics

² Primary Acoustic Force

معادله انتشار موج و جواب آن به صورت تابع فشار در روابط (۴) و (۵) آورده شده است.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (۴)$$

$$p = p_0 e^{j(\omega t - kx)} \quad (۵)$$

که ω فرکانس موج، z نماد اعداد مختلط، k عدد موج و p فشار می باشد. به دلیل آنکه پیزوالکتریک استفاده شده در ساخت ترانسدیوسرها سطح نسبتاً بزرگی دارد، موج به صورت مسطح منتشر می شود. اگر منبع تولید موج به صورت نقطه ای در نظر گرفته شود، انتشار آن به صورت کروی خواهد بود. در شکل ۵، تأثیر سطح چشمه تولید موج در نوع موج ایجاد شده نشان داده شد.

مکانیزم فرآیند تعلیق فراصوت مجموعه ای از پدیده های فیزیکی است که هرکدام فیزیک مختص به خود را دارند. در این مکانیزم ابتدا جریان متناوب با فرکانس بالا به حلقه های پیزوالکتریک اعمال می شود. حلقه های پیزوالکتریک جریان متناوب را به ارتعاشات مکانیکی با فرکانس بالا تبدیل می کنند. ارتعاشات مکانیکی در طول قطعه تطبیق انتشار یافته و وارد محیط سیال می شود [۲۳].

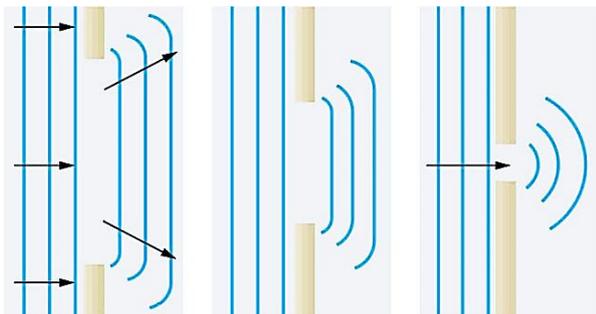


Fig. 5 The effect of wave generation source surface on the type of wave generated

شکل ۵ تأثیر سطح چشمه تولید موج در نوع موج ایجاد شده

برای مدل سازی، بر اساس مکانیزم شرح داده شده و فیزیک های مورد نیاز برای شبیه سازی، نرم افزار کامسول انتخاب شد. این نرم افزار قابلیت شبیه سازی چند فیزیک به صورت هم زمان را دارا می باشد. برای شبیه سازی تعلیق فراصوت از محیط های فیزیکی مکانیک جامد^۱، الکترواستاتیک^۲، آکوستیک فشار^۳ و ردیابی ذرات برای جریان سیالات^۴ استفاده شده است. از حل هم زمان محیط فیزیک جامد و الکترواستاتیک، جریان

می شود که در رابطه (۳) مشخص است. این نیروی بین ذره ای اکثراً قابل چشم پوشی است؛ مگر اینکه ذرات خیلی به هم نزدیک باشند. این نیرو ناشی از پراکندگی امواج است که به وسیله ذرات دیگر ایجاد شده است و به ذرات کمک می کند تا به صورت خوشه تبدیل شوند. هنگامی که دو ذره به یکدیگر نزدیک شدند سرعت برخورد آن ها به یکباره زیاد می شود. در واقع یک شتاب اضافی به آن ها وارد می شود که مقدار آن بین ۱ تا ۱۰ متر بر مجذور ثانیه می باشد. در سیستم هایی با جریان پیوسته چندان رایج نیست ولی در سیستم های راکد برای آگلومره کردن و رسوب سازی برای شفاف سازی مایعات به کار می رود.

این نیرو ناشی از تفاوت چگالی ذره با چگالی محیط اطراف یعنی آب می باشد. این پدیده ممکن است در مواردی به تفاوت در قابلیت فشردگی جسم و محیط اطراف مربوط شود. این نیرو به طور محسوسی سرعت برخورد دینامیکی دو ذره را افزایش می دهد. در شکل ۴ نشان داده شد اگر ذرات در جهت انتشار امواج به هم نزدیک شوند، نیروی صوتی ثانویه، باعث دافعه و اگر عمود بر جهت جریان نزدیک شوند، باعث جاذبه ذرات می شود.

$$F_{sr} = 2\pi a^6 \left[\frac{(\rho_p - \rho_m)^2 (3\cos^2\theta - 1)}{6\rho_m d^4} v_m^2(x) - \frac{w^2 \rho_m (\beta_p - \beta_m)}{9d^2} p^2(x) \right] \quad (۳)$$

که a شعاع ذره، d فاصله مرکز تا مرکز ذرات، $\omega = 2\pi k$ و θ زاویه بین خط مرکز تا مرکز ذرات جهت انتشار موج می باشد. سایر پارامترها در این فرمول مشابه با نیروی صوتی اولیه می باشد.

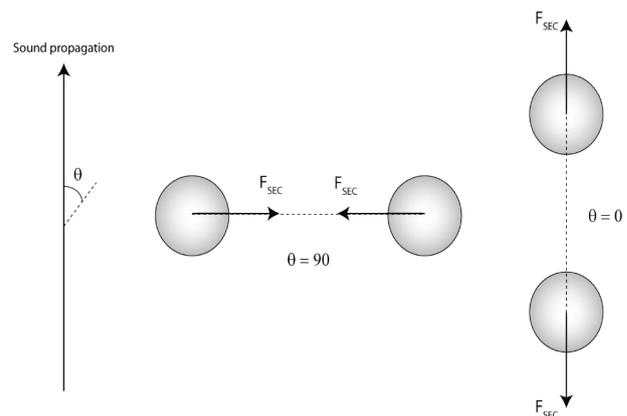


Fig. 4 Secondary sound force enters the particles

شکل ۴ نیروی صوتی ثانویه وارد به ذرات

۲- طراحی و شبیه سازی

در بخش طراحی ابتدا لازم است معادلات انتشار موج و روابط حاکم بر آن توضیح داده شود. سپس روش تعلیق ذره به وسیله پدیده آکوستوفرتیک بیان می شود.

¹ Solid Mechanics(solid)

² Electrostatics (es)

³ Pressure Acoustics, Frequency Domain (acpr)

⁴ Particle Tracing for Fluid Flow (fpt)

جدول ۱ ویژگی‌های مواد برای جایگزینی پلاکت و پلاسما با پلی‌استایرن و آب

Table 1 Properties of materials for replacing platelets and plasma with polystyrene and water

ماده	چگالی (kg/m ³)	سرعت صوت (m/s)	ضریب کنتراست
آب	۹۹۶	۱۴۹۸	-
پلاسما	۱۰۲۶	۱۵۴۶	-
پلی استایرن	۱۰۵۰	۱۸۴۰	۰/۴۲
پلاکت	۱۰۷۰	۱۶۲۰	۰/۱۷

جدول ۲ ویژگی‌های مواد برای جایگزینی آب و نفت با پلی‌استایرن و آب

Table 2 Properties of materials for replacing water and oil with polystyrene and water

ماده	چگالی (kg/m ³)	سرعت صوت (m/s)	ضریب کنتراست
نفت خام	۸۸۰	۱۴۳۰	-
آب	۹۹۶	۱۴۹۸	۰/۳۱
پلی استایرن	۱۰۵۰	۱۸۴۰	۰/۴۲

۲-۱- شرایط مرزی

فرکانس کاری مورد استفاده در این مقاله که مربوط به مود طولی ترانسدیوسر بوده ۲۰ kHz می‌باشد. در شبیه‌سازی توسط محیط آکوستیک، نرم‌افزار کامسول فشار صوتی و تراز شدت صوت ناشی از امواج ایستا را محاسبه می‌کند. در تحلیل آکوستیکی سطح هورن به‌عنوان تابنده شتاب عمودی و سطح بازتابنده روبه‌روی آن به‌عنوان مرز صوتی سخت که از آن، جهت بازتاب موج به‌صورت کامل استفاده می‌شود، در نظر گرفته شده و در حالت اول سایر جهتها در شرط مرزی تابش موج تخت^۲ جهت عبور موج از محیط تحلیل به‌صورت کامل و بدون بازتاب، در نظر گرفته شد. نتیجه شبیه‌سازی در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

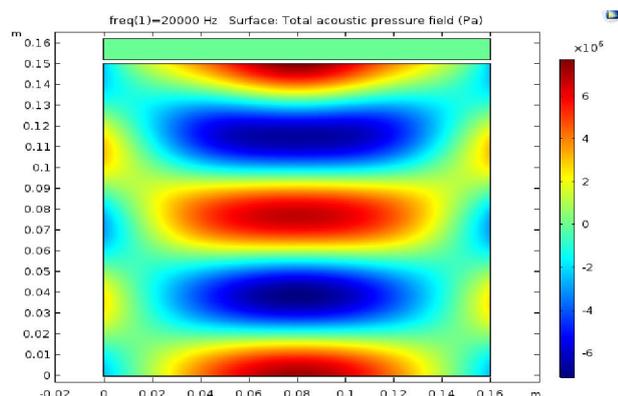


Fig. 6 Simulated acoustic pressure with a flat wave boundary condition around the transducer (wave passing through the analysis medium) [24]

شکل ۶ فشار آکوستیک شبیه‌سازی شده با شرط مرزی تابش موج تخت در اطراف ترانسدیوسر (عبور موج از محیط تحلیل) [۲۴]

الکتریکی با فرکانس بالا تبدیل به ارتعاشات مکانیکی، انتقال موج در محیط جامد و بازتاب موج توسط بازتابنده انجام می‌شود. در محیط آکوستیک فشار، موج فراصوت از مبدل وارد محیط سیال شده و فشار صوتی و تراز شدت ناشی از موج ایستای ایجاد شده در محیط تعلیق، شبیه‌سازی می‌شود. با استفاده از محیط ردیابی ذرات، رفتار ذرات کوچک تحت تاثیر امواج ایستا بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که نتایج به‌دست آمده در محیط مکانیک جامد و الکترواستاتیک به‌عنوان اطلاعات پیش‌فرض و ورودی در مطالعه آکوستیک فشار و ردیابی ذرات به‌کاررفته است. در محیط فشار آکوستیک قابلیت شبیه‌سازی تولید امواج صوتی و فراصوتی و نحوه انتشار آن در سیال وجود دارد. منبع تولید موج در این فیزیک به‌صورت شتاب عمودی^۱ تعریف می‌گردد.

برای تعلیق ذرات باید نیروی آکوستوفرتیک بر برآیند نیروهای گرانش و شناوری غلبه کند، برای افزایش نیروی آکوستوفرتیک در فرکانس ثابت باید فشار آکوستیک را افزایش داد جهت افزایش فشار آکوستیک باید توان مصرفی ترانسدیوسر را زیاد کرد، اما زیاد شدن توان ترانسدیوسر باعث ایجاد کویتاسیون در آب می‌شود و مانع تعلیق ذرات و باعث هم زدن آن‌ها می‌شود؛ بنابراین برای افزایش فشار آکوستیک از روش دیگری استفاده شد که در قسمت شرایط مرزی آورده شده است.

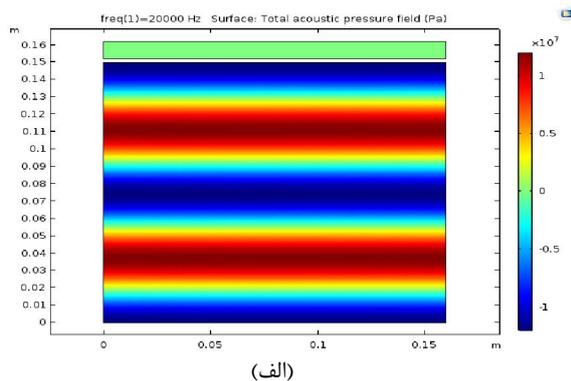
ذره و محیط استفاده شده در این مقاله به‌عنوان نماینده‌ای از ذرات موجود در خون با چنین ویژگی‌هایی است. در ابعاد میکروفلوئیدیک از این سیستم جهت جداسازی پلاکت خون از محیط پلاسما می‌توان استفاده کرد؛ که در ابعاد میکروفلوئیدیک به دلیل بالا بودن فرکانس مورد استفاده مشکل ایجاد کویتاسیون وجود ندارد و نیروی آکوستوفرتیک بسیار بیشتر از حالت ماکرو است بنابراین تعلیق و جداسازی در ابعاد میکرو ساده‌تر و امکان‌پذیرتر است. در جدول ۱ ویژگی‌های این مواد آمده است. ذرات با ضریب کنتراست مثبت در گره فشاری گرفتار می‌شوند.

همچنین از این روش، می‌شود برای جداسازی و ته‌نشین کردن سریع‌تر آب موجود در نفت خام در مقیاس ماکرو استفاده کرد. به این منظور ترانسدیوسری با فرکانس استفاده شده در این مقاله مورد نیاز است. برای این کار هم ذره پلی‌استایرن با ضریب کنتراست مثبت به‌عنوان نماینده آب موجود در نفت خام مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول ۲ ضریب کنتراست و ویژگی‌های آن‌ها مشخص است. در اینجا قطرات آب موجود در نفت به‌عنوان ذره، و محیط نفت است.

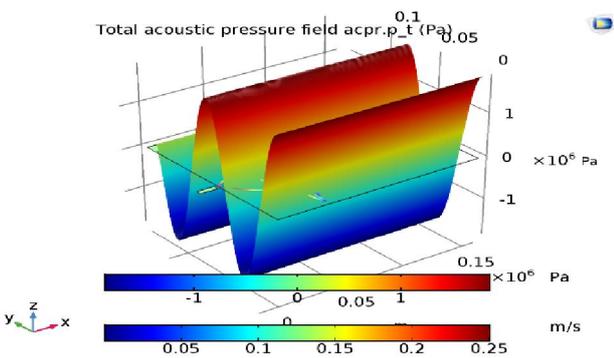
² Plane Wave Radiation

¹ Normal Acceleration

شناوری، نیروی حاصل از موج صوتی در محیط تعلیق (نیروی آکوستوفرتیک)، نیروی پسا^۱ و نیروی گرانش، به بررسی برآیند نیروهای وارد بر ذرات، پرداخته می‌شود و وضعیت تعلیق و مکان ذرات مشخص می‌شود. اگر ذرات به صورت تصادفی در محیط بسته سیال پخش باشند و میدان آکوستیک سپس فعال شود، می‌توان از نیروی بین ذرات چشم‌پوشی کرد؛ زیرا ذرات حرکت با سرعت کمی دارند که نیروی وارد شده به آن‌ها از ذرات مجاور، مقدار کمی می‌شود.



(الف)



(ب)

Fig. 8 Simulated acoustic pressure with hard sound boundary condition at all levels

شکل ۸ فشار آکوستیک شبیه‌سازی شده با شرط مرزی صحتی سخت در همه سطوح

در شکل ۹ ذرات پلی‌استایرن به صورت تصادفی در محیط مایع آب توسط نرم‌افزار کامسول پخش شدند و با توجه به ضریب کنتراست مثبت در گره معلق شدند.

در صورتی که دو ذره با سرعت اولیه متفاوت یا فاصله زمانی کوتاهی وارد محیط سیال تحت فشار آکوستیک شوند امکان قرارگیری در یک گره را دارند، این امکان در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در شکل ۶ نواحی گره امواج ایستا که فشار آکوستیکی در آن نقاط برابر صفر و نواحی شکم که فشار آکوستیک در آن نواحی حداکثر می‌باشد قابل مشاهده می‌باشد که ذرات با ضریب کنتراست مثبت در این نواحی گره به دام افتاده و معلق می‌شوند؛ اما برای بزرگ کردن طول نواحی گره و شکم، عدم تمرکز فشار آکوستیکی در مرکز ترانسدیوسر و همچنین امکان امتداد حرکت ذرات گرفتار شده در گره در جریان سیال حالت دیگری در شرایط مرزی قرار داده شد. به این صورت که علاوه بر سطح روبه‌روی ترانسدیوسر، سطح‌های جانبی را هم با شرط مرزی صحتی سخت در نظر گرفته شد که به عنوان یک بازتابنده عمل کنند. حال اگر سطح ترانسدیوسر از سطح بازتابنده روبه‌رو مقدار کمتری باشد، بازتاب‌های سطح‌های جانبی باعث تضعیف و آشفستگی و به هم خوردگی جریان و فشار آکوستیک می‌شود که در شکل ۷ نشان داده شده است.

اگر سطح رفلکتور روبه‌روی ترانسدیوسر با سطح ترانسدیوسر برابر باشد و ترانسدیوسر داخل محفظه بسته قرار گیرد به طوری که امواج از اطراف عبور نکنند، در این صورت فاصله بین ترانسدیوسر و رفلکتور باید مضربی از نصف طول موج باشد که به آن جریان ایستای رزونانسی می‌گویند. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود فشار آکوستیک محیط افزایش یافته و حداقل دو برابر می‌شود. در شکل ۸ (ب)، محور X و Y ارتفاع و عرض محفظه سیال و محور Z، فشار آکوستیک را نشان می‌دهد.

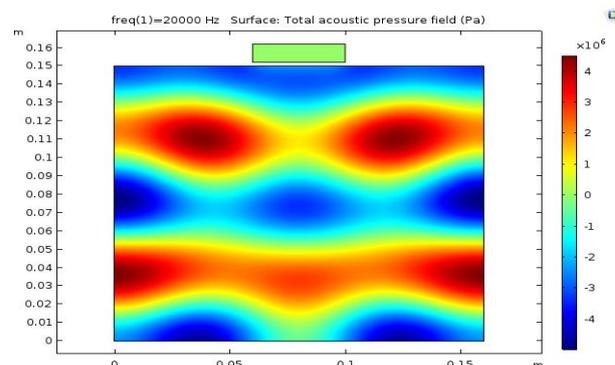


Fig. 7 Simulated acoustic pressure with hard sound boundary condition with distance from transducer at all levels

شکل ۷ فشار آکوستیک شبیه‌سازی شده با شرط مرزی صحتی سخت با فاصله از ترانسدیوسر در همه سطوح

در مرحله بعد توسط محیط ردیابی ذرات، ذرات پلی‌استایرن به محیط انتشار به صورت تزریق و از یک ورودی با سرعت اولیه ثابت به یک سیال ساکن و بدون جریان اضافه می‌شود. در این مرحله با اعمال نیروهای مؤثر بر ذرات که عبارت‌اند از نیروی

^۱ Drag

فاصله انداختن بین این ذرات و در بعضی موارد اگر سرعت اولیه بیشتر باشد باعث ته نشین شدن و عدم تعلیق بعضی ذرات می شود.

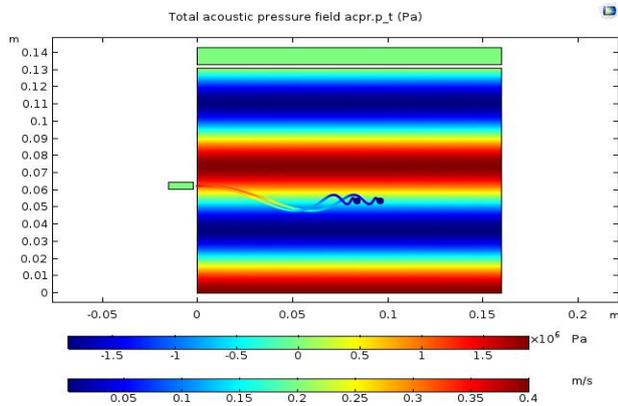


Fig. 10 Two particles were injected at different initial velocities
 شکل ۱۰ دو ذره با سرعت اولیه متفاوت تزریق شده اند.

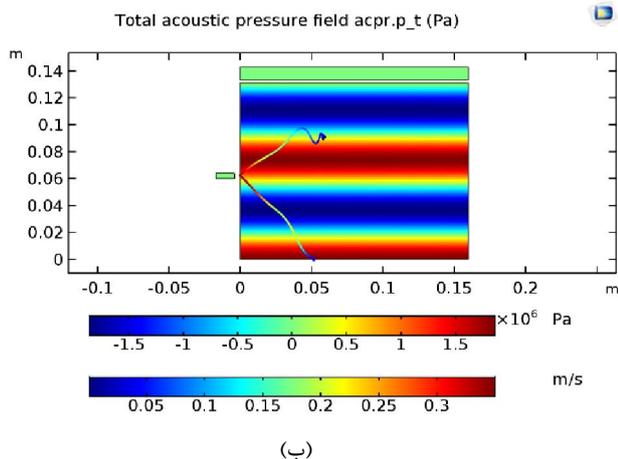
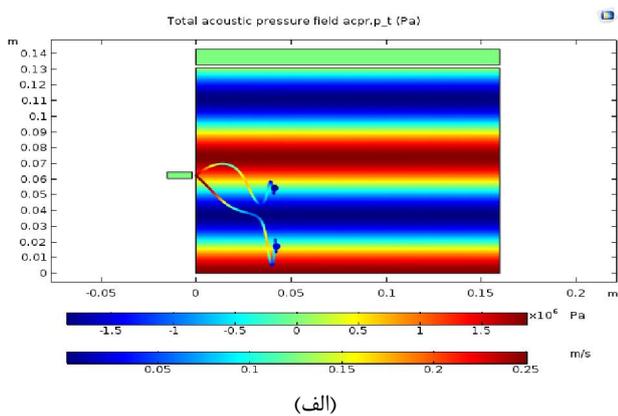


Fig. 11 A) Low initial velocity particles b) High initial velocity particles that caused some particles to settle

شکل ۱۱ الف) ذرات با سرعت اولیه پایین ب) ذرات با سرعت اولیه بالا که باعث ته نشین شدن بعضی از ذرات شد.

یکی دیگر از عوامل مؤثر در نیروی آکوستوفرتیک حجم ذره

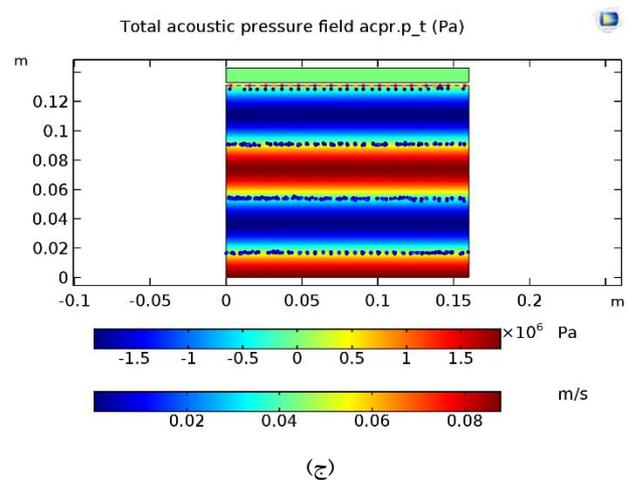
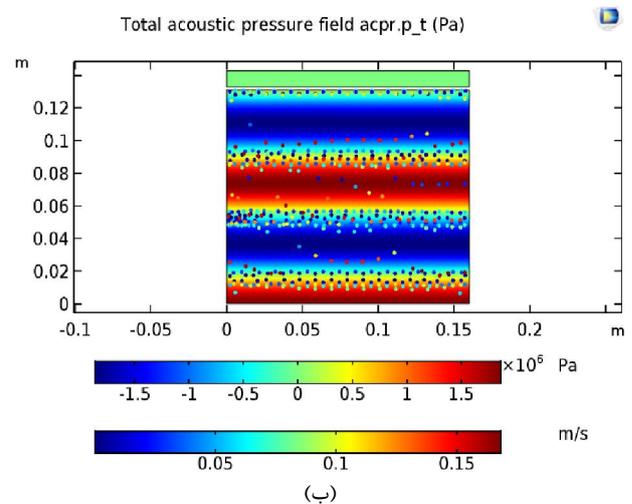
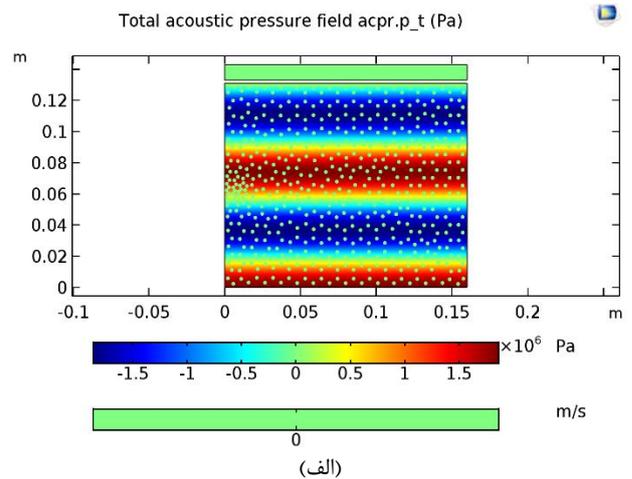


Fig. 9 The color of the particles indicates their speed. A) The particles are randomly in the fluid without velocity. B) The maximum velocity created in the particles to be in the node. C) Placement of particles in the node

شکل ۹ رنگ ذرات نشان دهنده سرعت آنهاست. الف) ذرات به صورت تصادفی در سیال بدون سرعت قرار دارند. ب) حداکثر سرعت ایجاد شده در ذرات برای قرار گرفتن در گره. ج) قرار گرفتن ذرات در گره

مطابق شکل ۱۱، اگر دو ذره در یک زمان و با یک سرعت، از یک نقطه وارد شوند، نیروی بین ذرات (نیروی ثانویه) باعث

اولیه ذرات یا جریان آرام محیط بالا باشد نیروی افقی ذرات را به سمت بیرون ناحیه آکوستیک پرتاب می‌کند. این مقدار از رابطه (۶) به دست می‌آید که به آن عدد هوملز^۱ گفته می‌شود.

$$\kappa = \frac{\pi f d}{c_f} \quad (۶)$$

در این رابطه κ عدد هوملز، d قطر ذره و c_f سرعت صوت در محیط سیال است. در شکل ۱۴ عدم ورود ذره به ناحیه آکوستیک قابل مشاهده می‌باشد.

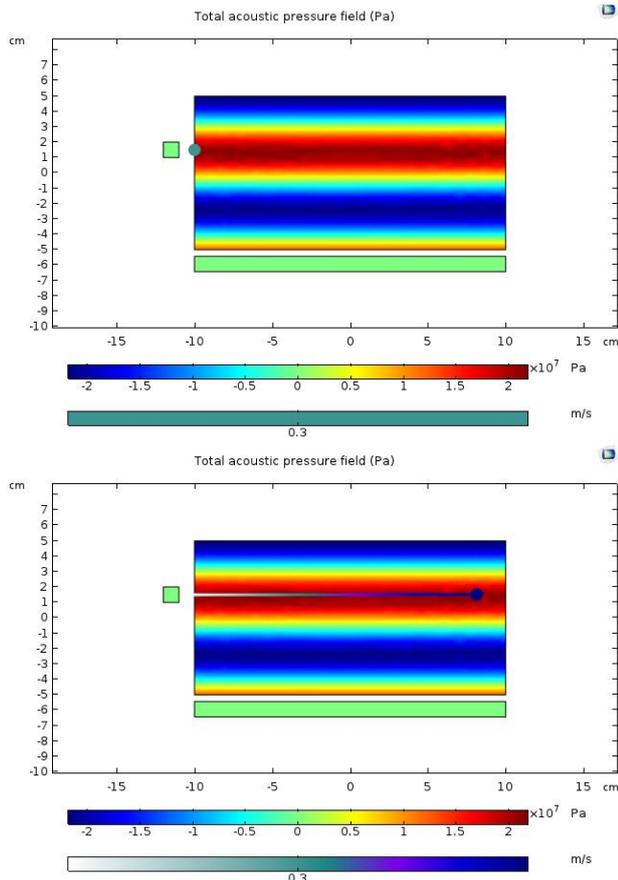


Fig. 13 The smaller particle continues to flow with the fluid and does not feel the acoustic force

شکل ۱۳ ذره کوچکتر با جریان سیال به راه خود ادامه داده و نیروی آکوستوفرتیک را حس نمی‌کند.

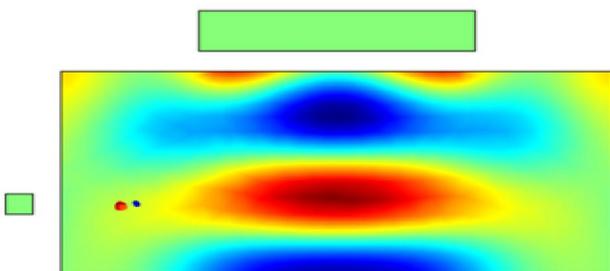


Fig. 14 Do not enter the acoustic area due to high Hummels number
شکل ۱۴ عدم ورود به ناحیه آکوستیک به دلیل عدد هوملز بالا

^۱ Helmholtz number

است که تاثیر مستقیم در این نیرو دارد و هرچه حجم ذره افزایش پیدا کند، نیروی صوتی اولیه وارد به آن بیشتر، شتاب ذره بیشتر و در نتیجه، سرعت حرکت آن به سمت گره بیشتر می‌شود. سپس با کمک شبیه‌سازی مشخص شد که ذره با حجم بیشتر با سرعت اولیه خیلی پایین‌تر مسافت بیشتری طی کرده و در ناحیه گره گرفتار می‌شود یا مؤلفه افقی نیروی آکوستوفرتیک مانع از ورود آن ذره با ضریب کنتراست منفی به ناحیه گره و شکم می‌شود. در شکل ۱۲ تاثیر حجم در نیروی آکوستیک تعلیق نشان داده شده است.

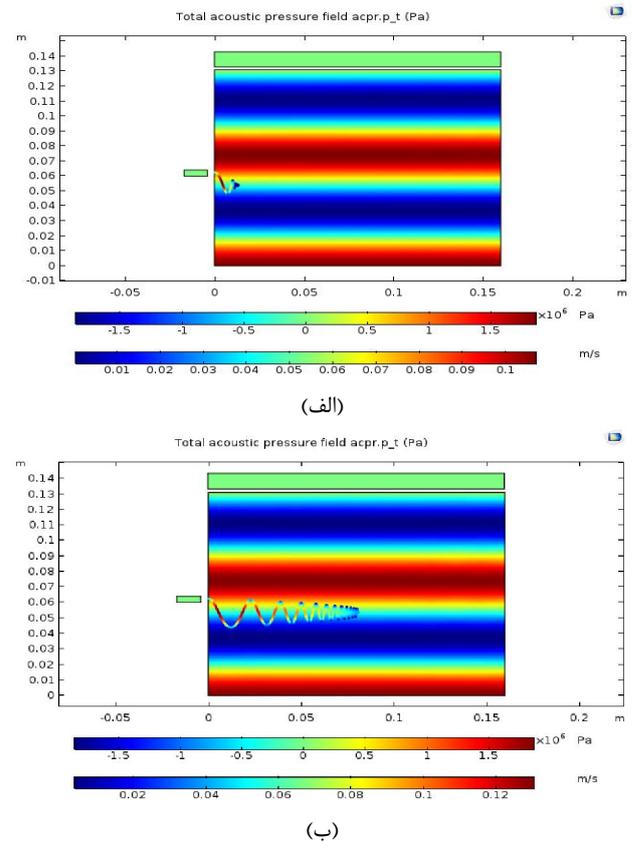


Fig. 12 The input speed is the same in both forms. A) Particle motion with less volume b) Particle motion with larger volume

شکل ۱۲ سرعت ورودی در هر دو شکل یکسان است. (الف) حرکت ذره با حجم کمتر (ب) حرکت ذره با حجم بیشتر

همچنین مطابق شکل ۱۳ اگر اندازه ذره از حدی کوچکتر باشد، ذره نیروی آکوستوفرتیک را حس نکرده و مسیر حرکت خود را ادامه می‌دهد، از این امکان برای جداسازی ذرات هم استفاده می‌شود [۲۵].

اگر حجم ذره یا فرکانس رزونانس از مقدار معینی بیشتر شود، مؤلفه افقی نیروی اولیه آکوستوفرتیک زیاد شده و اجازه ورود ذرات به ناحیه آکوستیک و پرفشار را نمی‌دهد و ذرات پشت ناحیه آکوستیک پرفشار گرفتار می‌شوند. حتی اگر سرعت

۳- آزمایش تجربی

برای بررسی نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده، عملگرهای متفاوت با شرایط خاص و نگهدارنده‌های مختلفی طراحی و ساخته شد که قسمتی از آن‌ها در شکل ۱۵ آمده است.

با توجه به ایجاد کائیتاسیون در محیط سیال و برهم‌خورده حالت سکون آب، نیروی ترکیدن حباب‌های حاصل از کائیتاسیون بیشتر از نیروی اکوستوفرتیک وارد بر ذرات عمل می‌کند و مانع از تعلیق ذرات می‌شود. شکل ۱۶ ایجاد کائیتاسیون را نشان می‌دهد.

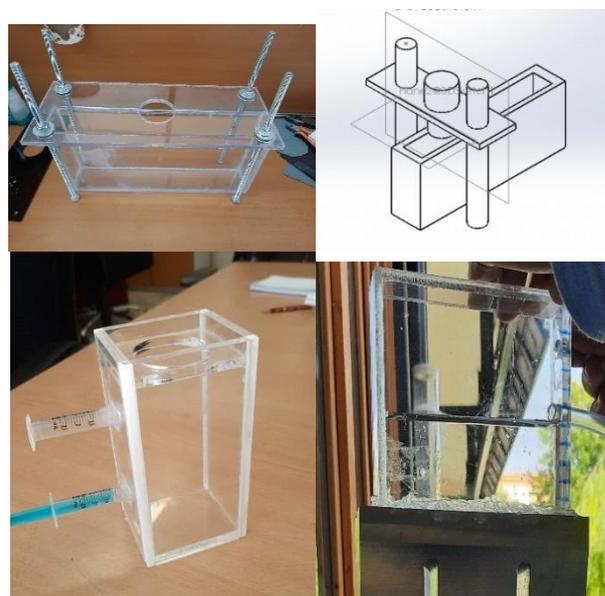


Fig. 15 Operators built and tested

شکل ۱۵ عملگرهای ساخته شده و تست شده

برای حل این مشکل ابتدا باکم کردن توان ترانس‌دیوسر و رساندن آن به ۱۵۰ وات، میزان کائیتاسیون به حداقل می‌رسد و سعی می‌شود که به زیر مقدار آستانه کائیتاسیون قرار گیرد. همچنین، استفاده از آب دیونیزه امکان ایجاد کائیتاسیون را کاهش می‌دهد. مطابق شبیه‌سازی با بستن اطراف ترانس‌دیوسر امواج ایستا با فشار بیشتر و با جبهه موج خطی‌تر ایجاد شد. برای ایجاد موج مسطح از منبع تولید موج نسبتاً بزرگی استفاده شد تا انتشار امواج به‌صورت کروی نباشد. در شکل ۱۷ موارد و تجهیزات نهایی و برای عدم کائیتاسیون و انجام آزمایش آورده شد.

در این آزمایش از یک منبع تغذیه $W 1500$ با فرکانس 20 kHz استفاده شد. ذراتی که در این آزمایش استفاده شد، ذرات پلی‌استایرن با چگالی 1050 کیلوگرم بر مترمکعب، ای‌بی‌اس با چگالی 1065 کیلوگرم بر مترمکعب با ابعاد حدود 3 میلی‌متر مکعب و چگالی آب دیونیزه استفاده‌شده حدود 996 کیلوگرم بر مترمکعب است. در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نمونه‌هایی از ذرات تعلیق شده پس از تزریق نشان داده شده است که فاصله منبع تولید موج و بازتابنده $111/2$ میلی‌متر (74 میلی‌متر طول موج) است و ذره در مکان گره تعلیق شده است.



Fig. 17 Vibrating horn surface with dimensions of 12 by 16 cm and power supply used

شکل ۱۷ سطح ارتعاشی هورن با ابعاد 12 در 16 سانتی‌متر و منبع تغذیه استفاده شده

۴- بحث نتایج

برای بررسی دقیق‌تر و صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام‌شده، تست عملی تعلیق صورت گرفت که نتیجه آن با نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مطابق داشت. نمودار سرعت حرکت یک‌ذره پلی‌استایرن در شبیه‌سازی به‌وسیله نرم‌افزار کامسول باحالت عملی آن که با فیلم‌برداری و داشتن طول محفظه و تقسیم مقدار حرکت ذره در هر $0/5$ ثانیه انجام‌شده بود، مقایسه شده و در شکل ۲۰ آورده شد.

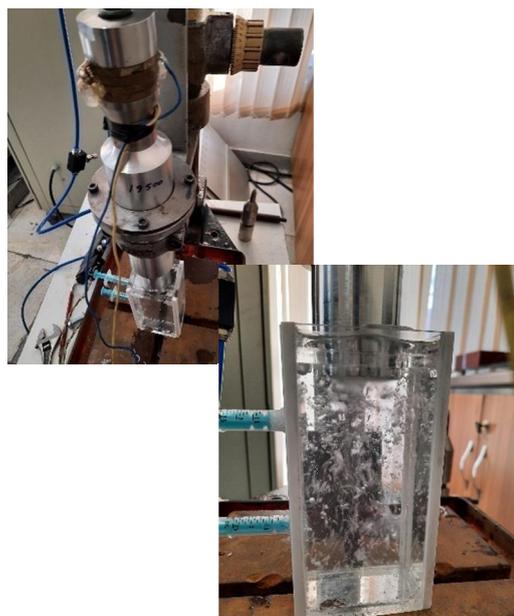


Fig. 16 Cavitation in water and no particle suspension

شکل ۱۶ ایجاد کائیتاسیون در آب و عدم تعلیق ذرات

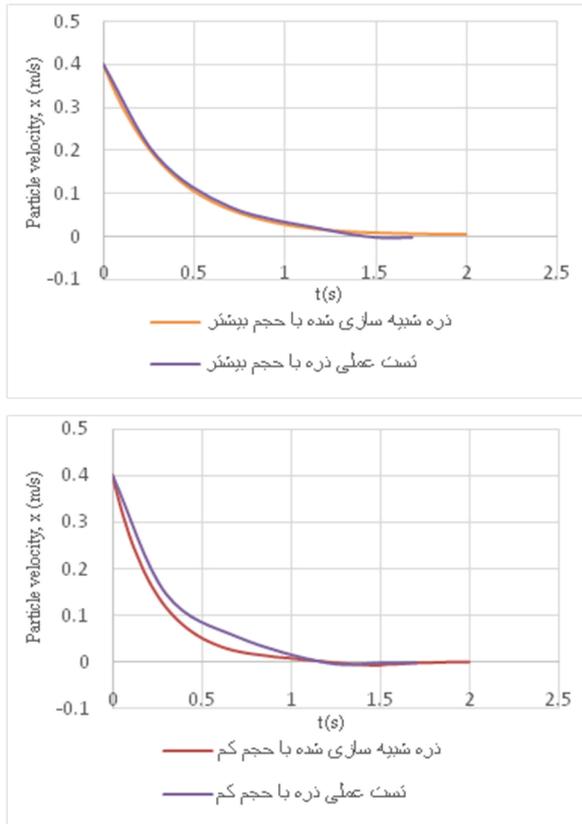


Fig. 20 Comparison of speed in simulation and practical testing
 شکل ۲۰ مقایسه سرعت در شبیه سازی و تست عملی

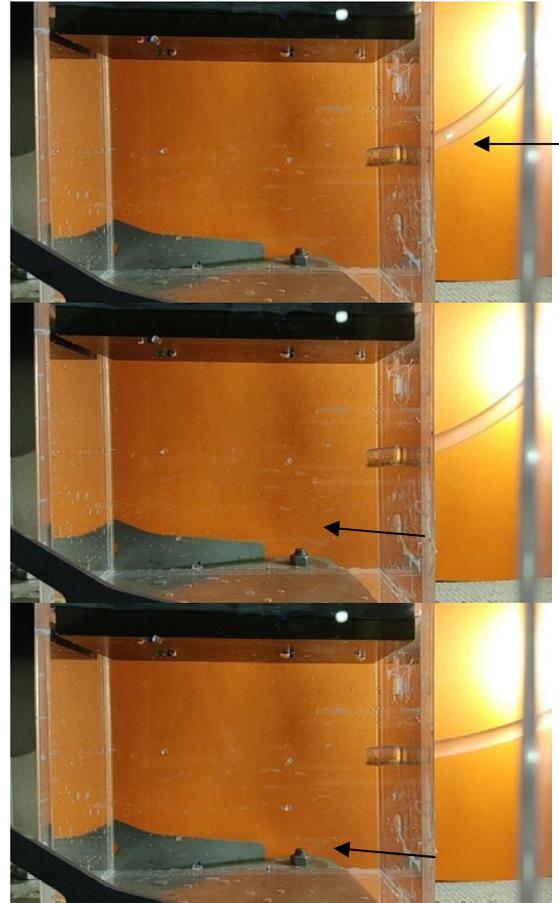


Fig. 18 Injection and suspension of polystyrene particles
 شکل ۱۸ تزریق و معلق شدن ذره پلی استارن



Fig. 21 Two particles with almost the same density and different volumes measured under a microscope (ABS red particle with dimensions of 3.4 mm, transparent polystyrene particle with dimensions of 2.4 mm)
 شکل ۲۱ دو ذره با چگالی تقریباً یکسان و حجم متفاوت اندازه گیری شده با میکروسکوپ (ذره قرمز ای بی اس با ابعاد ۳/۴ میلی متر، ذره شفاف پلی استارن با ابعاد ۲/۴ میلی متر)

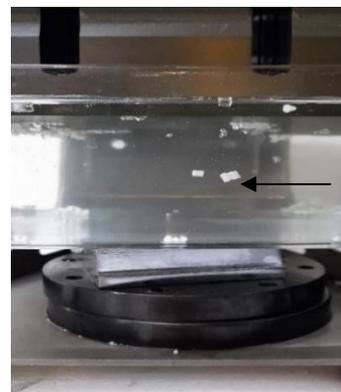


Fig. 19 Suspension of ABS particles
 شکل ۱۹ تعلیق ذرات ای بی اس

در بررسی شکل ۲۰ مشخص می شود که بیشترین اختلاف بین شبیه سازی و آزمایش ۸ درصد بوده و افزایش سرعت ذره به ازای زیاد شدن حجم ذره به این دلیل است که حجم اثر مستقیم در نیروی آکوستوفوریک دارد و وقتی نیرو افزایش یابد در نتیجه شتاب و سرعت ذره در اثر افزایش این نیرو افزایش پیدا می کند. جهت بررسی این موضوع دو ذره با حجم های مختلف توسط میکروسکوپ اندازه گیری شده و به عنوان نمونه برای بررسی مورد آزمایش قرار گرفت.

با تغییر در شرایط مرزی و قرار گرفتن ترانسدویسر در محیط بسته‌ای که سطح ترانسدویسر با سطح رفلکتور روبه‌روی آن برابر باشد فشار آکوستیک ایجاد شده در محیط ۲ برابر شده و نیروی آکوستوفرتیک وارد بر ذرات افزایش می‌یابد.

در نواحی گره فشاری ذرات هرچه حجم بیشتری داشته باشند نیروی بیشتری احساس کرده و سرعت و جابه‌جایی آن‌ها بیشتر می‌شود.

ذره‌ای که حجم پایینی داشته باشد نیروی آکوستیک را حس نمی‌کند و در همان خط راه خودش را ادامه می‌دهد. در این پژوهش مدت‌زمانی که ذرات از لحظه تزریق تا جداسازی حرکت داشتند حدود ۱/۷ ثانیه بود. این مقدار کوتاه نشان‌دهنده حرکت دقیق و سرعت بالای این روش و عملکرد در جداسازی ذرات می‌باشد.

اگر چگالی ذره و محیط یکی باشد ذره نیروی آکوستیک را حس نمی‌کند (ضریب کنتراست صفر می‌شود).

ذره پلی‌استایرن با ضریب کنتراست ۰/۴۲ پس از تزریق در نواحی گره معلق و جداسازی شد.

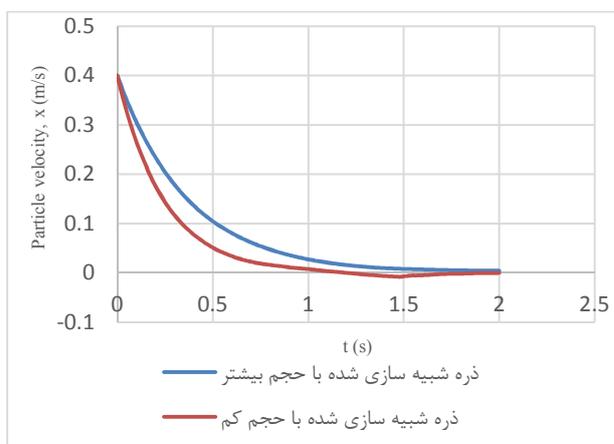
نیروی اولیه آکوستیکی دو مؤلفه عمودی و افقی دارد، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، نیروی افقی مانع ورود ذره با عدد هوملز بالای یک و ضریب کنتراست منفی به دلیل تاثیر حجم در نیرو آکوستوفرتیک و فشار آکوستیک بالا می‌شود. ولی ذرات با ضریب کنتراست مثبت و حجم بیشتر، تاثیر مؤلفه عمودی را بیشتر احساس کرده و سرعت بیشتری پیدا می‌کنند.

بیشترین اختلاف بین شبیه‌سازی و تست عملی ۸ درصد بوده بنابراین آزمایش‌های تجربی، صحت طراحی انجام‌شده و همچنین نتایج شبیه‌سازی را تایید نمودند.

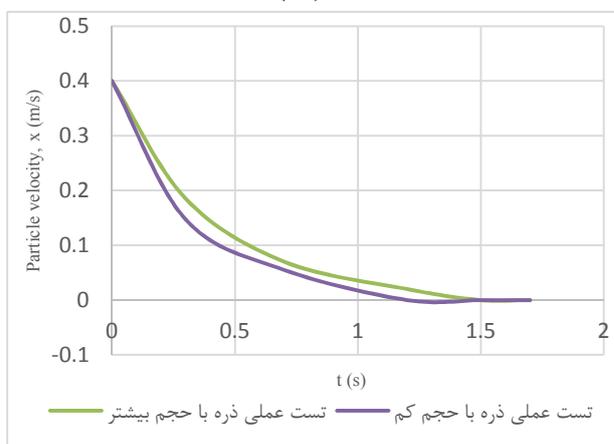
۶- مراجع

- [1] Fornell, A., Cushing, K., Nilsson, J. and Tenje, M., 2018. Binary particle separation in droplet microfluidics using acoustophoresis. *Applied Physics Letters*, 112(6), p. 063701.
- [2] Baret, J.C., Miller, O.J., Taly, V., Ryckelynck, M., El-Harrak, A., Frenz, L., Rick, C., Samuels, M.L., Hutchison, J.B., Agresti, J.J. and Link, D.R., 2009. Fluorescence-activated droplet sorting (FADS): efficient microfluidic cell sorting based on enzymatic activity. *Lab on a Chip*, 9(13), pp. 1850-1858.
- [3] Franke, T., Abate, A.R., Weitz, D.A. and Wixforth, A., 2009. Surface acoustic wave (SAW) directed droplet flow in microfluidics for PDMS devices. *Lab on a Chip*, 9(18), pp. 2625-2627.
- [4] Huebner, A., Bratton, D., Whyte, G., Yang, M., Demello, A.J., Abell, C. and Hollfelder, F., 2009.

نمودار سرعت در واحد زمان دو ذره با حجم‌های مختلف به‌صورت شبیه‌سازی و عملی در شکل ۲۲ آورده شده است.



(الف)



(ب)

Fig. 22 A) Comparison diagram of two particles with different volumes in simulation b) Comparison diagram of two particles with different volumes in practical test

شکل ۲۲ الف) نمودار مقایسه دو ذره با حجم متفاوت در شبیه‌سازی ب) نمودار مقایسه دو ذره با حجم متفاوت در تست عملی

همان‌طور که از شکل ۲۲ مشخص است، تفاوت سرعت بین ذره با حجم کم (۲/۴ میلی‌متر) و حجم زیاد (۳/۴ میلی‌متر) در حالت شبیه‌سازی برابر ۱۲/۵ درصد است که نشان‌دهنده افزایش سرعت به ازای افزایش حجم است. این مقدار در آزمایش حدود ۱۰ درصد به دست آمده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به شبیه‌سازی‌ها و تست‌های عملی انجام‌شده، در مورد تعلیق ذرات با ضریب کنتراست مثبت و همچنین تاثیر حجم در تعلیق و جداسازی ذرات، موارد زیر به دست آمدند:

- biological samples*. CRC Press.
- [16] Murimi, E., Kihui, J., Nyakoe, G. and Mutuli, S., 2017. A survey of Ultrasonic Waves in Powder Transportation.
- [17] Foresti, D., Nabavi, M., Klingauf, M., Ferrari, A. and Poulidakos, D., 2013. Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(31), pp. 12549-12554.
- [18] Gupta, T., Ghosh, R. and Ganguly, R., 2018. Acoustophoretic separation of infected erythrocytes from blood plasma in a microfluidic platform using biofunctionalized, matched-impedance layers. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 34(4), p. e2943.
- [19] Seyed Ali mirshabani, *Design and Fabrication of Langvin Ultrasonic Transducers Considering Radial, Vibration*, Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2016. (In Persian)
- [20] Foresti, D. and Poulidakos, D., 2014. Acoustophoretic contactless elevation, orbital transport and spinning of matter in air. *Physical review letters*, 112(2), p. 024301.
- [21] T. Laurell, F. Petersson, A. Nilsson, Chip integrated strategies for acoustic separation and manipulation of cells and particles, *Chemical Society Reviews*, 36, 492–506, 2007
- [22] A. Tojo, *Free Flow Acoustophoresis Technology Transfer from Silicon to Glass*, Master's Thesis, department of measurement technology and Industrial Electrical Engineering, Lund university, November, 2012
- [23] A. Khouzestani, Y. Hojjat, M. R. Karfi and H. S. Firoozabad, "Simulation and investigation of a particle positioning device performance by acoustophoretic phenomenon," 2016 4th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2016, pp. 501-505, doi: 10.1109/ICRoM.2016.7886792.
- [24] M. Ghazvini, Y. Hojjat, A. Khouzestani, "Suspension and separation of particles with different contrast coefficients and volumes by acoustofertic phenomenon," 2021, 17th National Conference and 6th International Conference on Manufacturing Engineering. (in Persian فارسی)
- [25] Yang, Y. and Li, X., 2003. Experimental and analytical study of ultrasonic micro powder feeding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36(11), p. 1349.
- Static microdroplet arrays: a microfluidic device for droplet trapping, incubation and release for enzymatic and cell-based assays. *Lab on a Chip*, 9(5), pp. 692-698.
- [5] Jung, J.H., Destgeer, G., Park, J., Ahmed, H., Park, K. and Sung, H.J., 2017. On-demand droplet capture and release using microwell-assisted surface acoustic waves. *Analytical chemistry*, 89(4), pp. 2211-2215.
- [6] Fornell, A., Nilsson, J., Jonsson, L., Periyannan Rajeswari, P.K., Joensson, H.N. and Tenje, M., 2015. Controlled lateral positioning of microparticles inside droplets using acoustophoresis. *Analytical chemistry*, 87(20), pp. 10521-10526.
- [7] Fornell, A., Ohlin, M., Garofalo, F., Nilsson, J. and Tenje, M., 2017. An intra-droplet particle switch for droplet microfluidics using bulk acoustic waves. *Biomicrofluidics*, 11(3), p. 031101.
- [8] Han, S.I., Kim, H.S. and Han, A., 2017. In-droplet cell concentration using dielectrophoresis. *Biosensors and Bioelectronics*, 97, pp. 41-45.
- [9] Brouzes, E., Medkova, M., Savenelli, N., Marran, D., Twardowski, M., Hutchison, J.B., Rothberg, J.M., Link, D.R., Perrimon, N. and Samuels, M.L., 2009. Droplet microfluidic technology for single-cell high-throughput screening. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(34), pp. 14195-14200. Acad. Sci. U.S.A. 106, 14195 (2009).
- [10] Gao, R., Cheng, Z., deMello, A.J. and Choo, J., 2016. Wash-free magnetic immunoassay of the PSA cancer marker using SERS and droplet microfluidics. *Lab on a Chip*, 16(6), pp. 1022-1029.
- [11] Fornell, A., Cushing, K., Nilsson, J. and Tenje, M., 2018. Binary particle separation in droplet microfluidics using acoustophoresis. *Applied Physics Letters*, 112(6), p. 063701.
- [12] Le, T. T., Jeon, J. U., Woo, S. J., & Higuchi, T. (2012). An electrostatic suspension system using piezoelectric actuators. *Smart Materials and Structures*, 21(2), 025012.
- [13] King, L.V., 1934. On the acoustic radiation pressure on spheres. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences*, 147(861), pp. 212-240.
- [14] L. P. Gor'kov, "Forces acting on a small particle in an acoustic field within an ideal fluid", *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 140:1 (1961), 88–91
- [15] Castillo-León, J., Svendsen, W.E. and Dimaki, M., 2011. *Micro and nano techniques for the handling of*