

## بررسی شرایط عملکردی بر رفتار حرکتی ذره و حداکثر چگالی قابل تعلیق در فرآیند تعلیق فراصوت

داود دهقانی<sup>۱</sup>، محمدرضا شیخ الاسلامی<sup>۲\*</sup>، علی جباری<sup>۳</sup> و سیامک مزدک<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

<sup>۴</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

### چکیده

تعلیق فراصوت به دلیل عدم وابستگی به جنس ماده، پتانسیل بالایی برای استفاده در کاربردهای مختلف دارد. از میان پارامترهای موثر، فاصله بازتابنده تا مبدل و ولتاژ نقش موثرتری در این فرآیند ایفا می‌کنند. ارائه یک مدل عددی دقیق، نقش موثری در مطالعه کارایی پارامترها دارد. در این مقاله، یک مدل عددی دقیق برای بررسی اثرات موثر در فرآیند ارائه شد. در مدل ارائه شده، با حل همزمان معادلات حاکم بر پیزوالکتریک، معادله موج در محیط جامد و سیال و نیز در نظر گرفتن شرایط سه بعدی تعلیق سعی شده شرایط شبیه‌سازی مشابه حالت تجربی باشد. تطابق مناسب نتایج مدل و نتایج تجربی به همین دلیل است. با استفاده از مدل عددی، اثر ولتاژ و فاصله بین مبدل و بازتابنده بر تعلیق ذرات بررسی شد. حرکت ذره حین تعلیق، با استفاده از پارامترهای پیشنهاد شده مشخصی در این مقاله توصیف شد. تعریف پارامترهای فوق، امکان مقایسه شرایط ذره معلق در شرایط کاری مختلف را ایجاد می‌کند. نتایج نشان داد که برای تعلیق مناسب ذرات، تنظیم پارامترهای ذکر شده باید بر اساس مقادیر یکدیگر انجام شود؛ همچنین با مدل عددی ارائه شده، حداکثر چگالی قابل تعلیق در شرایط کاری مختلف با دقت ۰/۴۵ درصد ارائه شد.

**کلمات کلیدی:** تعلیق فراصوت؛ مبدل لانگویین؛ مدل عددی دقیق؛ اختلاف پتانسیل؛ فاصله مبدل از بازتابنده.

## Investigation of Operational Parameters on the Motional Behavior and Maximum Particle Levitated Density in Ultrasonic Levitation

D. Dehghani<sup>1</sup>, M. R. Sheykhosslami<sup>2,\*</sup>, A. Jabari<sup>3</sup>, S. Mazdak<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Master of Science (MSc), Department of mechanical engineering, Arak University, P.O. Box 38156 – 879, Arak, Iran.

<sup>2</sup> Assistant professor, Department of mechanical engineering, Arak University, P.O. Box 38156 – 879, Arak, Iran.

<sup>3</sup> Associate professor, Department of mechanical engineering, Arak University, P.O. Box 38156 – 879, Arak, Iran.

<sup>4</sup> Assistant professor, Department of mechanical engineering, Tafresh University, P. O. Box 79611-39518 Tafresh, Iran.

### Abstract

Ultrasonic levitation has a high potential to be used in different applications due to its independence from the material. Among effective parameters, the distance between the reflector and the transducer and applied voltage plays an important role in the process. Presenting a precise numerical model would be helpful. In this paper, a precise numerical model was presented to study of the process. In the model, by simultaneous solving the equations of the piezoelectric and the wave equations in the solid and fluid medium as well as considering the three-dimensional levitation, the simulation conditions were similar to the experiments. Hence results agreed well with the experimental results. The effect of voltage and distance between the transducer and the reflector on the levitated particle was investigated using the model. Particle motion during levitation was explained using the proposed certain parameters. Defining the parameters makes it possible to compare the particle conditions at different working status. The results showed that to properly levitated object conditions, the adjustment of the parameters should be made based on each other's values. Moreover, the maximum density in different working conditions with an accuracy of 0.45% was predicted using the numerical model.

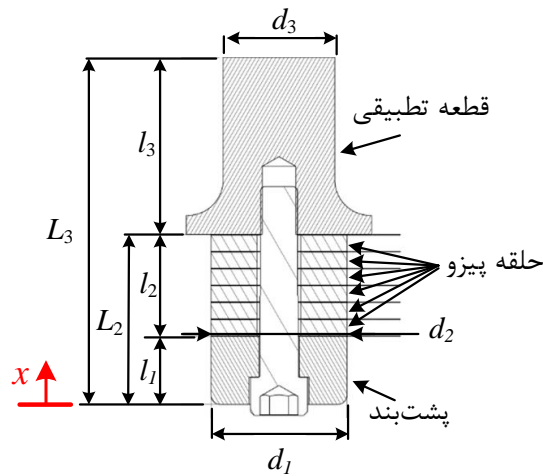
**Keywords:** Langevin Transducer; Precise Numerical Model; Potential Difference; The Distance Between the Transducer from the Reflector.

## ۱- مقدمه

امواج فراصوت، امواج مکانیکی هستند که توسط موج‌های ایستا تولید می‌شوند. این امواج کاربردهایی از قبیل نرم‌شوندگی آکوستیکی در فلزات [۱] تا غلبه بر نیروی جاذبه و تعلیق اجسام در فضا را دارند. رفتار اجسام در فضا و تأثیر بی‌وزنی روی آن از دیرباز مورد توجه محققان قرار دارد. روش‌های مختلفی برای تعلیق اجسام شامل تعلیق الکترومغناطیسی، الکتریکی و نوری معرفی شدند. محدودیت مهم روش‌های تعلیق مذکور، وابستگی آن‌ها به جنس ماده تعلیق شده است. در تعلیق مغناطیسی تعلیق محدود به مواد مغناطیسی، در تعلیق الکتریکی محدود به ذرات باردار و در تعلیق نوری به ذره شفاف است. تعلیق فراصوت روش دیگری است که اخیراً برای تعلیق ذرات توسعه داده شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. مزیت سیستم تعلیق فراصوت عدم وابستگی آنها به جنس ماده معلق شده است. این مطلب باعث امکان‌پذیر شدن مطالعه روی مایعات [۲ و ۳]، سلول‌های زنده، داروسازی و مطالعات پزشکی [۴-۶] می‌شود. پارامترهای موثر بر تعلیق فراصوت و اثرات آنها بر فرایند تعلیق صوتی به‌صورت کامل شناخته شده نیست و نیازمند بررسی و مطالعه است.

پیرامون تعلیق فراصوت تحقیقات زیادی انجام شده است. هاجیمه هاتانو و همکاران [۷]، به بررسی آرایش‌های مختلف دستگاه‌های شناورسازی فراصوت پرداخته‌اند. با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود قدرت و پایداری نیروی موقعیت‌دهی امواج ایستاده موثر بر نمونه‌ها در تعلیق با آرایش لوله‌ای را بررسی کردند. آن‌ها توزیع نیروی وارد بر ذره تعلیق شده را بدست آوردند. برمتز و کالاس [۸]، به بررسی روابط بین فشار منتشر شده و نیروهای موثر امواج ایستاده بر ذرات کوچک کروی در مختصات صفحه‌ای، استوانه‌ای و کروی پرداختند. در سه دستگاه مختصات موقعیت‌هایی که بیشترین نیروهای موثر بر اثر امواج ایستاده دارند را مشخص کردند. تتسر و اوتسوکا [۹]، با استفاده از فیلم‌برداری سرعت بالا به بررسی اثرات امواج ایستای فراصوت روی قطرات معلق پرداختند. آزمایش آنها با استفاده از یک مبدل و یک بازتابنده در فاصله ۵ برابر طول موج انجام گرفت و مشاهده کردند که قطرات هنگام تعلیق به‌مرور از گره‌های بالایی به گره‌های پایینی منتقل

می‌شوند؛ شکل این قطره‌ها به‌صورت کروی نبوده و در طول مسیر انتقال از کره کامل به دیسک و بلعکس تبدیل می‌شوند. ژی و همکاران [۱۰]، به بررسی امکان تعلیق فراصوت حشرات و حیوانات کوچک پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده زنده ماندن حشرات تحت تأثیر امواج فراصوت بود؛ همچنین نشان داده شد که تعلیق اجسام نامتقارن امکان‌پذیر است. سو ژاوو و همکاران [۱۱]، به بررسی سیستم‌های مختلف یاتاقان‌بندی بدون تماس با مکانیزم تعلیق فراصوت پرداختند. در این بررسی دو مدل تحلیلی بر اساس معادلات دینامیک سیالات و تئوری آکوستیک ارائه دادند. بر اساس معادلات دینامیک سیالات توزیع فشار وارد بر شفت در اثر ارتعاشات فراصوت بدست آوردند و بر اساس تئوری آکوستیک پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند را شناسایی و توسط بهبود این پارامترها ظرفیت بار قابل تحمل افزایش دادند. دنیل فراستی و همکاران [۱۲]، آرایش جدیدی را برای چیدمان شیپوره‌های فراصوت به‌منظور تعلیق و کنترل قطرات با استفاده از فراصوت پیشنهاد کردند. در طرح پیشنهادی آن‌ها تعلیق و جابجایی قطرات در هوا در هم آمیختن قطرات در هم امکان‌پذیر است. سو ژاوو و همکاران [۱۳]، یک یاتاقان لغزشی فراصوت با قابلیت کنترل هم‌محوری ساختند. آنها با استفاده از آرایش ۱۲۰ درجه‌ای سه عدد شیپوره فراصوت توانستند، یک محور مدور را تعلیق نمایند. یوایچی ایچیای و همکارانش [۱۴]، دستگاهی را برای تعلیق سه بعدی ذرات پلی استایرن با اندازه در حدود میلیمتری را با استفاده از امواج ایستاده فراصوت ساختند و نتایج شبیه‌سازی را با نتایج تجربی مقایسه نمودند. دستگاه مذکور شامل یک قاب مربعی است که روی سطوح داخلی آن مبدل‌های فراصوت به‌صورت ساختار موزاییکی  $17 \times 17 \text{mm}$  کار گذاشته شده و رفتار هر مبدل به‌صورت جداگانه با استفاده از کنترل‌گر قابل‌کنترل است. نتیجه این آرایش همراه با کنترل‌گر، امکان تعلیق ذرات در سه بعد و حرکت دادن دقیق آنها را فراهم می‌کند. فنگ-گو و همکاران [۱۵]، با استفاده از تغییر فاز موج‌های ایستاده فراصوت ذرات معلق را به‌صورت سه‌بعدی حرکت داده و آنها را کنترل کردند. آنها با استفاده از دو جفت مبدل بین دنده‌ای دوطرفه متعامد، موج‌های ایستاده دوطرفه ایجاد کردند و سپس با انتشار این امواج



شکل ۱- اجزای مبدل و پارامترهای استفاده شده در طراحی

جدول ۱- قطر و مساحت قسمت‌های مبدل

نام پارامتر	مقدار (mm)	نام پارامتر	مقدار (mm <sup>2</sup> )
$d_1$	۵۰	$s_1$	۱۹۶۳
$d_2$	۵۰	$s_2$	۱۹۶۳
$d_3$	۴۱	$s_3$	۱۳۲۰

ریاضی صرف نظر شده، کل قطعه با قطر قسمت کوچکتر قطعه تطبیقی در نظر گرفته می‌شود. قطر و مساحت هر قسمت مبدل، مطابق جدول ۱ محاسبه شد. با توجه به شکل ۱ طول قسمت‌های مبدل مطابق رابطه‌های ۱ تا ۳ محاسبه می‌شود.

$$L_1 = l_1 \quad (1)$$

$$L_2 = l_1 + l_2 \quad (2)$$

$$L_3 = l_1 + l_2 + l_3 \quad (3)$$

نظر به تجربه طول پشت‌بند ( $l_1$ ) برابر ۲۵ mm در نظر گرفته شد. با توجه به توان مورد نیاز، ۲ kW تعداد ۶ عدد حلقه پیزوالکتریک در نظر گرفته شد. برای اتصال برق متناوب به آن از ۷ الکتروود مسی استفاده شد. ضخامت پیزوالکتریک برابر ۶ mm و ضخامت الکتروودها برابر ۰/۲ mm است. از اینرو طول  $l_2$  برابر ۳۷/۴ mm در نظر گرفته شد. با استفاده از رابطه ۲ مقدار  $L_2$  برابر ۶۲/۴ mm بدست می‌آید.

گره‌های با ثبات سه‌بعدی ایجاد کردند. موقعیت این گره‌های سه‌بعدی با استفاده از تغییرات فاز و زاویه مبدل‌ها انجام می‌گیرد.

همانطور که پیشتر بیان شد، تعلیق فراصوت فرایندی کاربردی که نیازمند کنترل دقیق است. به منظور کنترل دقیق، پارامترهای تاثیرگذار اختلاف پتانسیل اعمالی و فاصله مبدل و بازتابنده در این مقاله بررسی شد. در ابتدا یک مبدل با توجه شرایط تعلیق طراحی شد؛ سپس با حل معادلات مربوطه پارامترهای مهم طراحی استخراج شد. در ادامه برای حداقل کردن فرض‌ها و همچنین مشابه شرایط واقعی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود کامسول شبیه‌سازی سه بعدی بر اساس کوپل محیط‌های فیزیکی، مکانیک جامد، الکترواستاتیک، آکوستیک فشار و ردیابی ذرات برای جریان سیالات انجام شد. در انتها شرایط تعلیق ذرات برای اختلاف پتانسیل‌های مختلف و سه فاصله بازتابنده تا مبدل  $\frac{3\lambda}{2}, \lambda, \frac{\lambda}{2}$  بررسی شد.

## ۲- طراحی مبدل

مبدل وسیله‌ای برای تبدیل جریان متناوب به جابجایی مکانیکی با فرکانس بالا است. در این مقاله فرکانس اختلاف پتانسیل اعمالی بر مبدل برابر ۲۰ kHz در نظر گرفته شد. مبدل طراحی شده در سه بخش کلی طراحی شد. بخش اول مربوط به قطعه پشت‌بند است که طولی برابر با  $L_1$  دارد، بخش دوم مربوط به مجموع طول حلقه‌های پیزوالکتریک (PZT) و الکتروودها است با طول کلی برابر با  $L_2$  و بخش سوم مربوط به طول قطعه تطبیقی به طول  $L_3$  است. در شکل ۱ قسمت‌های مختلف مبدل نشان داده شده است.

حلقه‌های پیزو دارای استاندارد می‌باشند؛ از اینرو قطر حلقه‌ها برابر ۵۰ mm، مطابق با استاندارد و قدرت مورد نیاز انتخاب شد. قطر قسمت پشت‌بند برای جلوگیری از ارتعاشات جانبی حتی الامکان باید کوچک فرض شود. با توجه به قطر حلقه‌های پیزوالکتریک، قطر قطعه پشت‌بند برابر ۵۰ mm در نظر گرفته شد.

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، قطعه تطبیقی در یک طرف قطر بیشتری دارد؛ علت این امر افزایش سطح قطعه تطبیقی به منظور افزایش انتقال حرارت است. در این مقاله از اختلاف قطر قطعه تطبیقی برای ساده‌تر شدن حل

در ادامه با مشتق‌گیری از روابط ۶ تا ۸، سرعت موج مطابق روابط ۹ تا ۱۱ بدست می‌آید.

$$\frac{du_1}{dx} = -A_1 \frac{\omega}{c_1} \sin \frac{\omega}{c_1} x + A_2 \frac{\omega}{c_1} \cos \frac{\omega}{c_1} x \quad (9)$$

$$\frac{du_2}{dx} = -A_3 \frac{\omega}{c_2} \sin \frac{\omega}{c_2} x + A_4 \frac{\omega}{c_2} \cos \frac{\omega}{c_2} x \quad (10)$$

$$\frac{du_3}{dx} = -A_5 \frac{\omega}{c_3} \sin \frac{\omega}{c_3} x + A_6 \frac{\omega}{c_3} \cos \frac{\omega}{c_3} x \quad (11)$$

برای جلوگیری از پیچیده شدن معادلات در حل‌های عددی، از  $C_1$  و  $E_1$  (با اندیس ۱) برای فولاد ضدزنگ ۳۰۴، از  $C_2$  و  $E_2$  (با اندیس ۲) برای مجموعه حلقه‌های پیزوالکتریک و از  $C_3$  و  $E_3$  (با اندیس ۳) برای قسمت آلومینیومی استفاده شد. به ترتیب  $C$  و  $E$  سرعت صوت و مدول الاستیسیته می‌باشند. مبدل با هوا در تماس است و هوا نیروی کمی به مبدل وارد می‌کند. در این مقاله برای ساده‌سازی از این نیرو صرف‌نظر شده است؛ در نتیجه در  $x = 0$  مبدل بی‌بار فرض می‌شود؛ بنابراین نیروی وارد بر مبدل ( $F_I$ ) برابر صفر می‌شود. صفر شدن نیرو به معنای صفر بودن تنش و در نتیجه صفر بودن کرنش می‌شود. رابطه ۱۲ از نتیجه صفر بودن کرنش بدست آمده است.

$$\varepsilon_1 = 0 \rightarrow \left. \frac{du_1}{dx} \right|_{x=0} = 0 \rightarrow A_2 \frac{\omega}{c_1} = 0 \quad (12)$$

از طرفی طبق شرط پیوستگی جابجایی دو قطعه  $u_1$  و  $u_2$  در نقطه  $x = L_1$  با یکدیگر برابر است. رابطه ۱۳ بر اساس این شرط پیوستگی نوشته شد. با جایگذاری رابطه ۶ و ۷ در رابطه ۱۳، رابطه ۱۴ بدست می‌آید.

$$x = L_1 = L_1 \rightarrow u_1(L_1) = u_2(L_1) \quad (13)$$

$$A_1 \cos \frac{\omega}{c_1} L_1 + A_2 \sin \frac{\omega}{c_1} L_1 - A_3 \cos \frac{\omega}{c_2} L_1 - A_4 \sin \frac{\omega}{c_2} L_1 = 0 \quad (14)$$

طبق قانون دوم نیوتن بین دو قطعه ۱ و ۲ (قطعه پشت‌بند و مجموعه حلقه‌های پیزوالکتریک) در  $x$  برابر  $L_1$  نیرویی که به هم وارد می‌کنند با هم برابر است. رابطه ۱۵ این برابری را بیان می‌کند.

$$F_1(L_1) = F_2(L_1) \quad (15)$$

با استفاده از قانون هوک و مفهوم کرنش رابطه ۱۵ به صورت رابطه ۱۶ می‌توان نوشت.

مقدار  $l_3$  مجهول است که به صورت پارامتری در روابط قرار داده می‌شود و مطابق روند توضیح داده شده در ادامه بدست می‌آید.

قطعه پشت‌بند از فولاد ضد زنگ ۳۰۴ و قطعه تطبیقی از آلومینیوم ۷۰۷۵-T6 استفاده شد [۱۶]. حلقه‌های پیزو از جنس PZT4 در نظر گرفته شد. یکی از مواردی که در طراحی مبدل نیاز است؛ سرعت صوت در مواد انتخاب شده است. سرعت صوت از رابطه ۴ بدست می‌آید. در رابطه  $\rho$  چگالی،  $E$  ضریب الاستیسیته و  $C$  سرعت صوت در قطعه است.

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4)$$

با در نظر گرفتن دمای استاندارد ضریب الاستیسیته، چگالی و سرعت صوت مواد انتخاب شده با استفاده از رابطه ۴ مطابق جدول ۲ بدست آمد.

با توجه به تقارن محوری مبدل و اعمال ارتعاشات در راستای محوری، از معادله موج یک بعدی استفاده شد. رابطه ۵ معادله موج یک‌بعدی را نشان داده شده است [۱۸]. مبدا  $x$  در شکل ۱ نشان داده شده است.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5)$$

از حل رابطه ۵ برای سه قسمت مدل روابط ۶ تا ۸ بدست می‌آید.

$$u_1(x) = A_1 \cos \frac{\omega}{c_1} x + A_2 \sin \frac{\omega}{c_1} x \quad (6)$$

$$u_2(x) = A_3 \cos \frac{\omega}{c_2} x + A_4 \sin \frac{\omega}{c_2} x \quad (7)$$

$$u_3(x) = A_5 \cos \frac{\omega}{c_3} x + A_6 \sin \frac{\omega}{c_3} x \quad (8)$$

جدول ۲- چگالی، ضریب الاستیسیته و سرعت صوت برای

مواد استفاده شده [۱۷]

ماده	چگالی ( $\frac{kg}{m^3}$ )	ضریب الاستیسیته (GPa)	سرعت صوت (m/s)
فولاد ضد زنگ ۳۰۴	۷۸۶۰	۲۰۵	۹۹/۵۱۰۶
آلومینیوم ۷۰۷۵ T6	۲۸۱۰	۷۷/۱	۳/۵۰۵۱
PZT4	۷۶۰۰	۷۸	۶/۳۲۰۳

دستگاهی از معادله‌های ۱۴، ۱۷، ۲۰ و ۲۲ بر حسب پارامترهای ثابت  $A_1$  تا  $A_6$  تشکیل داده شد. ماتریس ضرایب دستگاه مذکور به شکل رابطه ۲۴ است. برای وجود جواب‌های غیر صفر لازم است که دترمینان ماتریس ضرایب (رابطه ۲۴) برابر صفر باشد. با برابر قرار دادن دترمینان ماتریس ضرایب برابر صفر و جایگذاری روابط ۱ تا ۳ در معادله مذکور با توجه به اینکه تنها مجهول  $l_3$  است؛ مقدار  $l_3$  بدست می‌آید. برای حل معادله مذکور از روش حل عددی به کمک نرم‌افزار ممتیکا استفاده شده است. در شکل ۲ مقدار معادله مذکور بر حسب  $L_3$  نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود؛  $L_3$  برابر  $125/96$  mm ریشه معادله حاصل از دترمینان ماتریس ضرایب است. با استفاده از رابطه ۳ مقدار  $l_3$  برابر  $63/4$  mm بدست می‌آید. فرکانس تشدید مبدل طراحی شده با فرکانس طراحی مطابقت مناسبی داشته و خطای کمتر از ده درصد بین فرکانس تشدید طراحی مبدل و فرکانس تشدید مبدل وجود دارد.

### ۳- مکانیزم تعلیق

مکانیزم فرایند تعلیق فواصل مجموعه‌ای از پدیده‌های فیزیکی است که هر کدام فیزیک مختص به خود را دارند. در این مکانیزم ابتدا جریان متناوب با فرکانس بالا به حلقه‌های پیزوالکتریک اعمال می‌شود. حلقه‌های پیزوالکتریک جریان متناوب را به ارتعاشات مکانیکی با فرکانس بالا تبدیل می‌کنند. ارتعاشات مکانیکی در طول قطعه تطبیقی انتشار پیدا کرده و وارد هوا می‌شود.

با برهم‌نهی موج رفت و برگشت امواج ایستا ایجاد می‌شود. ذراتی که به صورت اتفاقی در فضای بین مبدل و بازتابنده قرار دارند؛ در نواحی گره امواج ایستا به صورت معلق در می‌آیند.

$$E_1 S_1 \left. \frac{du_1}{dx} \right|_{x=L_1} = E_2 S_2 \left. \frac{du_2}{dx} \right|_{x=L_1} \quad (16)$$

با جایگذاری رابطه ۹ و ۱۰ در رابطه ۱۶، می‌توان رابطه ۱۷ را نوشت.

$$-E_1 S_1 \frac{\omega}{c_1} (A_1 \sin \frac{\omega}{c_1} L_1 + A_2 \cos \frac{\omega}{c_1} L_1) + E_2 S_2 \frac{\omega}{c_2} (A_3 \sin \frac{\omega}{c_2} L_1 - A_4 \cos \frac{\omega}{c_2} L_1) = 0 \quad (17)$$

طبق قانون دوم نیوتن بین دو قطعه ۲ و ۳ (مجموعه حلقه‌های پیزوالکتریک و قطعه تطبیقی) در  $x$  برابر  $L_2$  نیرویی که به هم وارد می‌کنند با هم برابر است. رابطه ۱۸ این برابری را بیان می‌کند.

$$F_2(L_2) = F_3(L_2) \quad (18)$$

با استفاده از قانون هوک و مفهوم کرنش رابطه ۱۸ به صورت رابطه ۱۹ می‌توان نوشت.

$$E_2 S_2 \left. \frac{du_2}{dx} \right|_{x=L_2} = E_3 S_3 \left. \frac{du_3}{dx} \right|_{x=L_2} \quad (19)$$

با جایگذاری رابطه ۱۰ و ۱۱ در رابطه ۱۹، می‌توان رابطه ۲۰ را نوشت. در  $x = L_3$  به دلیل تماس مبدل با هوا مطابق فرض در نظر گرفته شده، نیرو صفر در نظر گرفته شد. در نتیجه رابطه ۲۱ را می‌توان نوشت.

$$E_2 S_2 \frac{\omega}{c_2} \left( -A_3 \sin \frac{\omega}{c_2} L_2 + A_4 \cos \frac{\omega}{c_2} L_2 \right) - E_3 S_3 \frac{\omega}{c_3} \left( -A_5 \sin \frac{\omega}{c_3} L_2 + A_6 \cos \frac{\omega}{c_3} L_2 \right) = 0 \quad (20)$$

$$\left. \frac{du_3}{dx} \right|_{x=L_3} = 0 \quad (21)$$

با جایگذاری رابطه ۸ در رابطه ۲۱، رابطه ۲۲ بدست می‌آید.

$$-A_5 \frac{\omega}{c_3} \sin \frac{\omega}{c_3} L_3 + A_6 \frac{\omega}{c_3} \cos \frac{\omega}{c_3} L_3 = 0 \quad (22)$$

رابطه ۲۲، رابطه بین بسامد و بسامد زاویه‌ای را نشان می‌دهد.

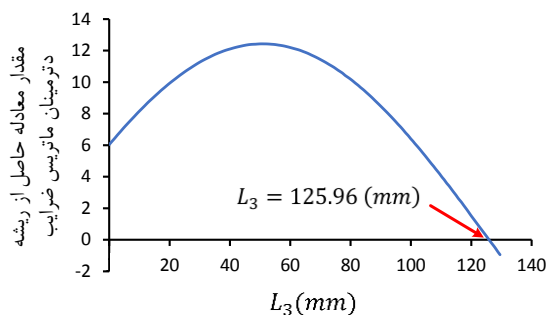
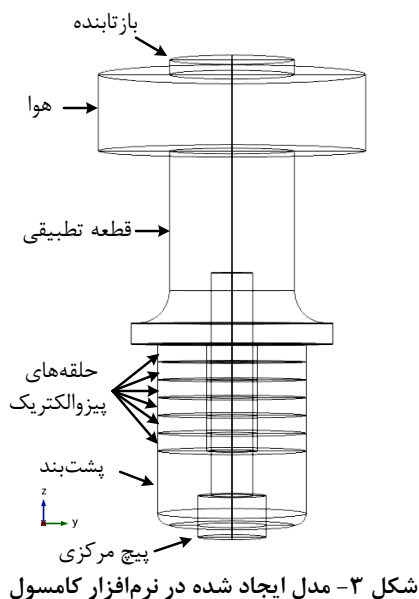
$$\omega = 2\pi f \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega}{c_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \frac{\omega}{c_1} L_1 & \sin \frac{\omega}{c_1} L_1 & -\cos \frac{\omega}{c_2} L_1 & -\sin \frac{\omega}{c_2} L_1 & 0 & 0 \\ -E_1 S_1 \frac{\omega}{c_1} \sin \frac{\omega}{c_1} L_1 & E_1 S_1 \frac{\omega}{c_1} \cos \frac{\omega}{c_1} L_1 & E_2 S_2 \frac{\omega}{c_2} \sin \frac{\omega}{c_2} L_1 & -E_2 S_2 \frac{\omega}{c_2} \cos \frac{\omega}{c_2} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \frac{\omega}{c_2} L_2 & \sin \frac{\omega}{c_2} L_2 & -\cos \frac{\omega}{c_3} L_2 & -\sin \frac{\omega}{c_3} L_2 \\ 0 & 0 & -E_2 S_2 \frac{\omega}{c_2} \sin \frac{\omega}{c_2} L_2 & E_2 S_2 \frac{\omega}{c_2} \cos \frac{\omega}{c_2} L_2 & E_3 S_3 \frac{\omega}{c_3} \sin \frac{\omega}{c_3} L_2 & -E_3 S_3 \frac{\omega}{c_3} \cos \frac{\omega}{c_3} L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\omega}{c_3} \sin \frac{\omega}{c_3} L_3 & \frac{\omega}{c_3} \cos \frac{\omega}{c_3} L_3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

تعلیق به صورت یک استوانه با قطر ۹۰mm در حدفاصل بین مبدل و بازتابنده مدل گردید. با توجه به اینکه امواج ایستا فقط در ضرایب صحیح از نصف طول موج تشکیل می‌شوند، فاصله مبدل و بازتابنده به صورت ضرایب نصف طول موج در نظر گرفته شده تا امواج ایستا تشکیل گردد. در شکل ۳ مدل ایجاد شده در نرم‌افزار کامسول نشان داده شده است.

#### ۴-۲- المان بندی و شرایط مرزی

از المان هرمی شکل مرتبه اول و به صورت آزاد برای المان‌بندی در این شبیه‌سازی استفاده شده است. برای بررسی استقلال از المان‌بندی از اندازه المان بزرگ شبیه‌سازی انجام شد و با روش نصف کردن اندازه المان‌ها کوچک شد. اندازه اولیه المان‌ها برابر  $\lambda$  که طول موج ایجاد شده است؛ در نظر گرفته شده و حل با آن انجام گردید. سپس اندازه المان را نصف کرده و مجدداً شبیه‌سازی انجام شد. این روند تا زمانی ادامه داده شد که اختلاف نتایج (مقدار تراز شدت صوتی در دو اندازه المان متوالی) کمتر از ۵ درصد باشد. با شبیه‌سازی اندازه‌های مختلف المان مشاهده شد که با کوچک‌تر شدن اندازه المان از اندازه  $\lambda/10$  به بعد اختلاف نتایج کمتر از ۵ درصد است، از اینرو اندازه المان  $\lambda/10$  برای شبیه‌سازی انتخاب شد. در مرحله اول تحلیل همزمان الکترواستاتیک و جامد انجام شد. در این مرحله از شبیه‌سازی



شکل ۲- نمودار حاصل از حل عددی ریشه دترمینان ماتریس ضرایب

#### ۴- شبیه‌سازی المان محدود

##### ۴-۱- مدل‌سازی

بر اساس مکانیزم شرح داده شد و فیزیک مورد نیاز برای شبیه‌سازی المان محدود، نرم‌افزار کامسول انتخاب شد. این نرم‌افزار قابلیت شبیه‌سازی چند فیزیک به صورت همزمان را دارا است. برای شبیه‌سازی تعلیق فراصوت از محیط‌های فیزیکی، مکانیک جامد<sup>۱</sup>، الکترواستاتیک<sup>۲</sup>، آکوستیک فشار<sup>۳</sup> و ردیابی ذرات برای جریان سیالات<sup>۴</sup> استفاده شده است. از حل همزمان محیط فیزیک جامد و الکترواستاتیک، جریان الکتریکی با فرکانس بالا تبدیل به ارتعاشات مکانیکی، انتقال موج در محیط جامد و بازتاب موج توسط بازتابنده انجام می‌شود. در محیط آکوستیک موج فراصوت از مبدل وارد هوا شده همچنین 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 تأثیر امواج ایستا بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در مطالعه فیزیک جامد و الکترواستاتیک به عنوان اطلاعات ورودی در مطالعه فیزیک آکوستیک و ردیابی ذرات به کار رفته است. برای شبیه‌سازی محیط انتشار امواج صوتی و تشکیل امواج ایستا، مبدل صوتی به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی گردید. مبدل شامل چهار قسمت اصلی، قطعه تطبیقی، حلقه‌های پیزوالکتریک، پیچ مرکزی و پشت‌بند است که همه آنها به صورت سه‌بعدی مدل گردید. فضای

<sup>1</sup> Solid Mechanics(solid)

<sup>2</sup> Electrostatics (es)

<sup>3</sup> Pressure Acoustics, Frequency Domain (acpr)

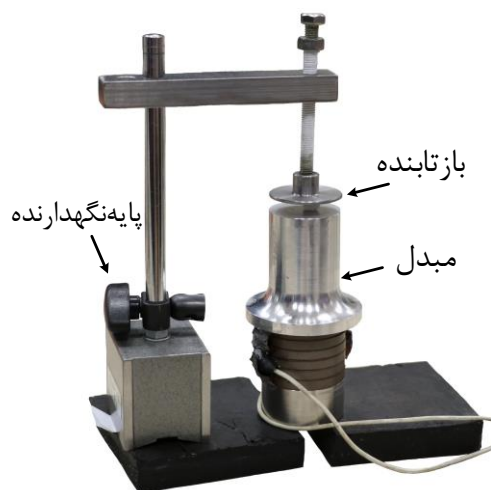
<sup>4</sup> Particle Tracing for Fluid Flow (fpt)

بررسی رفتار ذرات نمودار برای ذرات تعلیق شده رسم و موقعیت ذرات تعلیق شده بررسی شد. لازم به ذکر است که فقط نتایج ذرات معلق شده در نظر گرفته شد و نتایج ذراتی که از محیط تعلیق خارج شده‌اند و یا سقوط کرده و به مبدل چسبیدند حذف شد.

### ۵- آزمایش تجربی

برای بررسی نتایج بر اساس نتایج بدست آمده از طراحی مبدل یک مبدل ساخته شد. در شکل ۴ مجموعه دستگاه ساخته شده برای بررسی نتایج نشان داده شده است. از یک منبع تغذیه  $2\text{ kW}$  با فرکانس  $20\text{ kHz}$  در آزمایش تجربی استفاده شد. در آزمایش تجربی ذراتی از جنس فوم استفاده شد. چگالی ذرات  $40$  کیلوگرم بر متر مکعب است. در شکل ۴ نمونه‌ای از ذرات تعلیق شده نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری موقعیت ذرات از یک دوربین *Canon 80D* با قابلیت فیلم‌برداری  $60\text{ Fps}$  استفاده شد. موقعیت ذرات با بررسی فریم به فریم عکس‌ها استخراج شد. دقت موقعیت مکانی ذرات به این روش برابر  $0.1\text{ mm}$  است.

در شکل ۵ نمونه‌ای از ذره تعلیق شده با شرایط اختلاف پتانسیل  $300\text{ V}$  و فاصله بازتابنده تا مبدل  $17/15$  میلی‌متر (معادل طول موج) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ذره در مکان گره ۱ تعلیق شده است. فاصله ذره از سطح ترانسیدوسر  $3/93$  میلی‌متر و تا نقطه گره  $0.7$  میلی‌متر است.

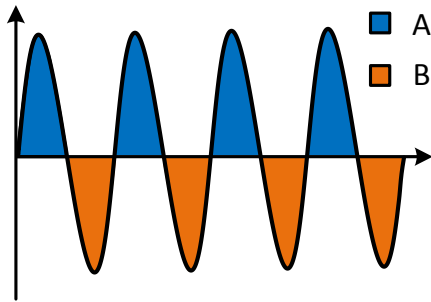


شکل ۴- مبدل و بازتابنده استفاده شده در آزمایش تجربی

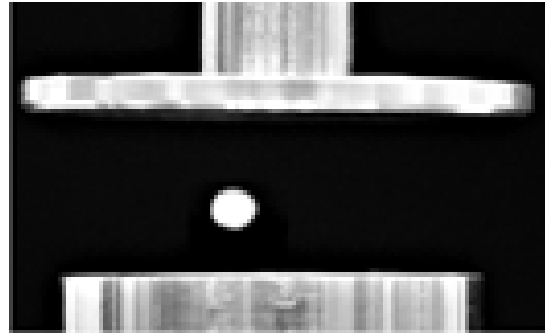
اختلاف پتانسیل مد نظر به صورت سینوسی و با فرکانس  $20\text{ kHz}$  و اختلاف پتانسیل صفر به گونه‌ای وارد شد که بدنه مبدل دارای اختلاف پتانسیل صفر و صفحات هم‌پتانسیل در حلقه‌های پیروها در مجاورت هم باشند؛ وارد شد. در این مرحله اختلاف پتانسیل متناوب تبدیل به ارتعاشات مکانیکی می‌شود. سطح بیرون حلقه واقع بر قطعه تطبیقی در تمام جهات مقید شد. برای تمام سطوح در تماس با هم تماس تعریف شد. از برهم‌کنش امواج منتشرشده و امواج بازتابنده، امواج ایستا به وجود آمد. در مرحله دوم شبیه‌سازی توسط محیط آکوستیک، نرم‌افزار کامسول فشارصوتی و تراز شدت صوت ناشی از موج ایستای حاصل را محاسبه می‌کند. در تحلیل آکوستیکی تمام سطوح خارجی هورن و فضای تعلیق و سطح بازتابنده به عنوان مرز صوتی سخت در نظر گرفته شد. همچنین به عنوان شرایط مرزی اولیه فشار صوتی را در هورن و فضای تعلیق صفر نسبت به اتمسفر در نظر گرفته شد. در مرحله بعد توسط محیط ردیابی ذرات، ذرات قابل تعلیق را به محیط انتشار امواج اضافه می‌شود. در این مرحله با اعمال نیروهای موثر بر ذرات که عبارت‌اند از نیروی گرانش، نیروی شناوری، نیروی پسا<sup>۱</sup> و نیروی حاصل از موج صوتی در محیط تعلیق (نیروی آکوستوفروتیک) به بررسی برآیند نیروهای وارد بر ذرات، ناشی از فشار آکوستیک پرداخته می‌شود و وضعیت تعلیق و مکان ذرات مشخص می‌شود. سطح بازتابنده به عنوان یک انعکاس دهنده کامل در نرم‌افزار تعریف شده و از اثر موج عبوری از این سطح صرف‌نظر شده است. با توجه به خصوصیات آکوستیکی آلومینیم، این فرض در نظر گرفته شده است. سطوح خارجی استوانه تعلیق را به صورت دیوار در نظر گرفته شد، به صورتی که ذرات هنگامی که ذرات به دیواره برخورد میکنند ناپدید می‌شوند.

در این مقاله اثر مقدار اختلاف پتانسیل و فاصله بازتابنده بر حداکثر چگالی قابل تعلیق و نوسانات ذره‌های تعلیق شده، با قرار دادن مبدل در فاصله‌های  $\frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}$  از بازتابنده و تحریک مبدل را با اعمال اختلاف پتانسیل‌های  $300, 400$  و  $500$  ولت در فرکانس  $20$  کیلوهرتز انجام گرفت. در ادامه تعداد  $5$  ذره به محیط تعلیق وارد شد و وضعیت ذرات به مدت  $3$  ثانیه و در فواصل زمانی  $0.1$  ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. برای

<sup>1</sup> Drag



شکل ۶- تقسیم‌بندی مساحت زیر نمودار برای تفسیر نتایج



شکل ۵- نمونه‌ای از ذره تعلیق شده در آزمایش تجربی

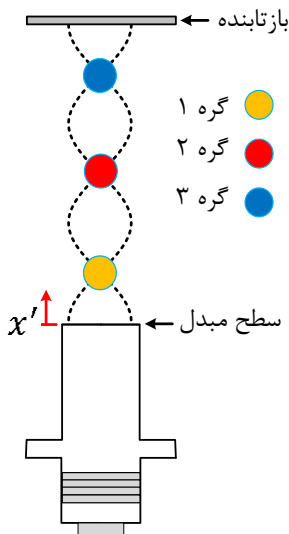
### ۶- نتایج

برای بررسی بهتر نتایج برای نمودار موقعیت، سرعت و شتاب ذره در راستای  $x'$ ، مساحت زیر سطح نمودار، مطابق شکل ۶ محاسبه شد. مساحت ناحیه A در نمودارها نماینده غلبه نیروهای تعلیق کننده بر نیروهایی که سبب سقوط ذره می‌شوند. مساحت B نشان دهنده غلبه نیروهایی که سبب سقوط ذره می‌شوند؛ بر نیروهایی که سبب تعلیق می‌شوند. فاصله بازتابنده از سطح مبدل برابر  $\frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}$  در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن این فاصله‌ها در فضای بین بازتابنده و سطح مبدل حداکثر سه ناحیه گره به وجود می‌آید. این سه ناحیه مطابق شکل ۷ نامگذاری شد. توجه شود در حالت فاصله  $\lambda$  دو ناحیه گره (گره ۱ و ۲) و در حالت  $\frac{\lambda}{2}$  یک ناحیه گره (گره ۱) بوجود می‌آید.

همانطور که پیشتر بیان شد؛ شبیه‌سازی‌ها با مقادیر ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ ولت و با فواصل  $\frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}$  تکرار شد.

### ۱-۶- صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی از آزمایش تجربی استفاده شد. به این منظور برای دو فاصله  $\frac{\lambda}{2}$  و  $\lambda$  اختلاف پتانسیل اعمالی ۳۰۷V تعلیق صورت گرفت. برای مقایسه نتایج پارامتر C (حاصل تقسیم A به B) استفاده شد. سرعت و شتاب با استفاده از مشتق گرفتن از نمودارهای جابجایی ذره نسبت به زمان (شکل ۱۰) به دست آمده است. این نمودار به صورت تجربی با پردازش تصاویر متوالی از تعلیق ذره به دست آمده است. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، بیشینه خطا برابر ۸/۱ درصد است.



شکل ۷- نامگذاری نواحی گره‌های ایجاد شده

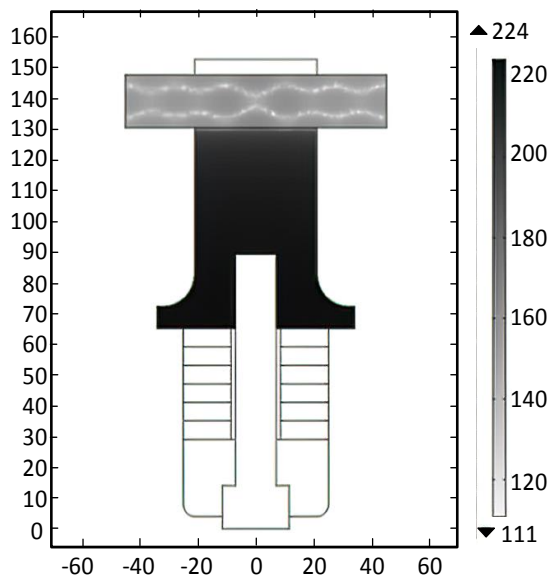
جدول ۳- پارامتر C برای آزمایش تجربی و شبیه‌سازی

	تجربی		شبیه‌سازی		درصد خطا	
	$\frac{\lambda}{2}$	$\lambda$	$\frac{\lambda}{2}$	$\lambda$	$\frac{\lambda}{2}$	$\lambda$
موقعیت	۰/۹۴	۱/۲۷	۰/۹۹۶	۱/۱۸۶	۶	۶/۶
سرعت	۱/۱	۰/۸۷	۱/۰۱	۰/۹۴۱	۷/۷	۸/۱
شتاب	۰/۹۲	۱/۱۵	۰/۹۸۲	۱/۰۸	۶/۸	۶

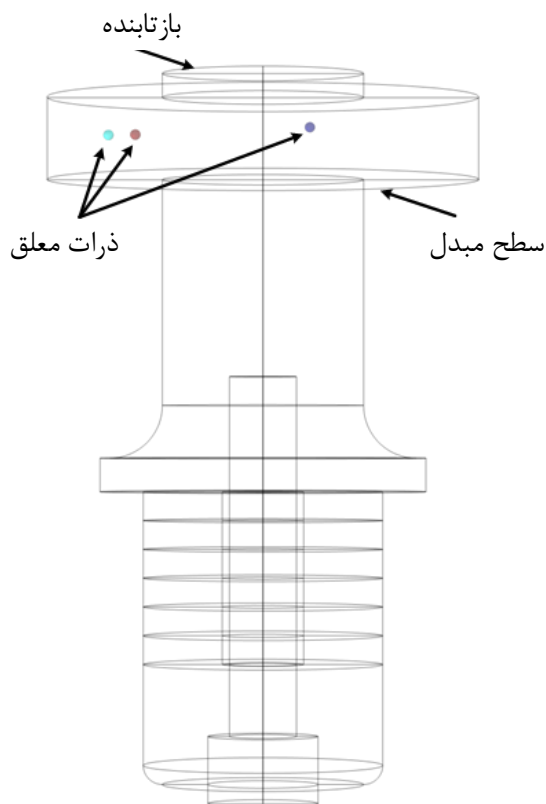
### ۲-۶- توزیع تراز شدت صوتی

برای تفسیر نتایج، مبنای تعلیق را معلق ماندن حداقل یک ذره از ۵ ذره مورد استفاده برای تعلیق در نظر گرفته شد. شکل ۸ نمونه‌ای از کانتور توزیع تراز شدت صوتی را نشان می‌دهد. شکل ۹ نمونه‌ای از نتایج تعلیق ذرات را نشان





شکل ۸- نمونه‌ای از کانتور شدت تراز صوتی



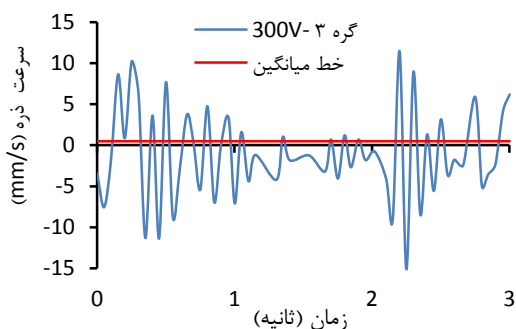
شکل ۹- نمونه‌ای از شبیه‌سازی ذرات معلق شده

می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد؛ از ۵ ذره، ۳ ذره معلق شده و ۱ ذره سقوط نموده و ۱ ذره‌ای هم از محیط تعلیق خارج شده است. همانطور که مشاهده می‌شود؛ امواج ایستا در شبیه‌سازی ایجاد شده است.

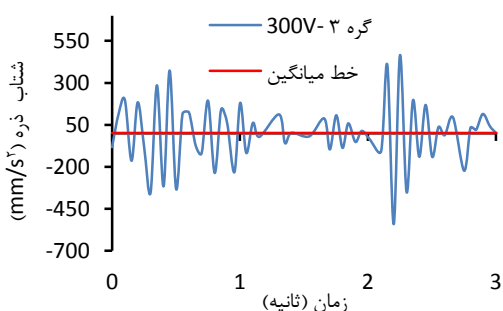
در جدول ۵ تاثیر فاصله بازتابنده تا مبدل در اختلاف پتانسیل‌های ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰۷ بر تراز شدت صوتی و بیشینه جابجایی ذرات نشان داده شده است. ذره در محدوده منطقه گره ارتعاشی رها شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله تراز شدت صوتی چه در بیشینه و چه در کمینه کاهش می‌یابد. این پدیده به علت افزایش استهلاک موج فراصوتی رخ داده است. افزایش مسیر رفت و برگشت موج در هوا سبب افزایش استهلاک می‌شود. کاهش تراز شدت صوت سبب ایجاد پایداری بیشتر تعادل ذره می‌شود. این موضوع با برابری نیروی وزن و نیروی آکوستوفروتیک به دست می‌آید. با این حالت تمایل ذره برای حرکت به سمت بازتابنده به سبب نیروی آکوستوفروتیک کاهش می‌یابد. البته کاهش بیشتر تراز شدت صوت، سبب ناپایداری تعادل و تمایل به حرکت ناپایدار ذره با تحریک به سمت مبدل می‌شود؛ بنابراین مقدار مناسبی از این پارامتر در تعلیق یک ذره با شرایط آزمایشگاهی مشخص تعریف می‌شود. مطابق جدول ۴، در ولتاژ ۵۰۰، با افزایش فاصله دامنه جابجایی ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است. کاهش دامنه در ابتدا به سبب دور شدن از سطح هورن است. در فاصله یک و نیم برابر طول موج، کاهش تراز شدت صوت سبب افزایش ناپایداری ذره شده است. در ولتاژ ۴۰۰ ولت، کاهش تراز شدت صوت کمتر بوده در نتیجه ناپایداری ذره در فواصل یک برابر و یک و نیم برابر طول موج یکسان است. کاهش شدت صوت در این فواصل در ولتاژ ۳۰۰ ولت، سبب افزایش ناپایداری شده است.

### ۳-۶- اثر شرایط بر موقعیت، سرعت و شتاب ذره

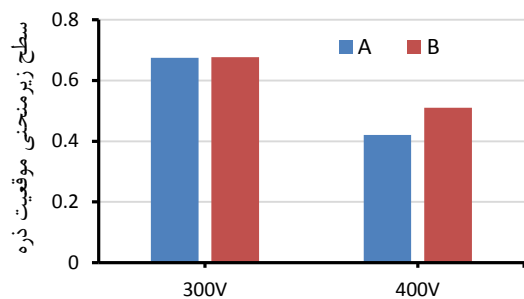
برای بررسی تاثیر فاصله و اختلاف پتانسیل بر وضعیت ذره ابتدا موقعیت ذره در راستای  $x'$  در بازه ۳ ثانیه اول از تعلیق بدست آمد. سپس با مشتق گرفتن از داده‌ها سرعت و شتاب بدست آمد شکل ۱۰ تا ۱۲ نمونه‌ای از موقعیت، سرعت و شتاب ذره تعلیق شده با اختلاف پتانسیل ۳۰۰۷ و فاصله  $\frac{3\lambda}{2}$  نشان داده شده است با توجه به اینکه مقایسه حالت‌های



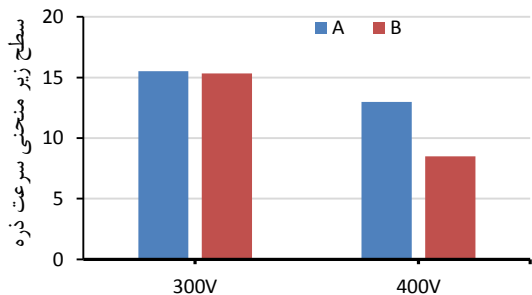
شکل ۱۱- سرعت ذره تعلیق شده در راستای  $x'$



شکل ۱۲- شتاب ذره تعلیق شده در راستای  $x'$



شکل ۱۳- سطح زیر نمودار منحنی موقعیت ذره (فاصله  $\frac{\lambda}{2}$ )

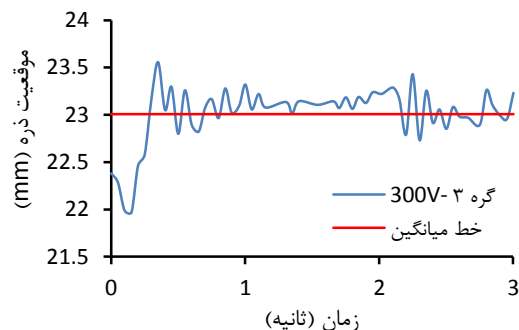


شکل ۱۴- سطح زیر نمودار منحنی سرعت ذره (فاصله  $\frac{\lambda}{2}$ )

مختلف نیازمند بررسی و پردازش نمودارها می‌باشد؛ مطابق با روشی که پیشتر توضیح داده شد؛ سطح زیر نمودار موقعیت، سرعت و شتاب بدست آمد. مطابق شکل ۱۳، ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود؛ هنگامیکه فاصله بازتابنده از مبدل برابر  $\frac{\lambda}{2}$  است. با افزایش اختلاف پتانسیل، تفاوت A و B در هر سه منحنی افزایش یافته است. افزایش مقدار B برای منحنی شتاب نشان دهنده بزرگتر بودن نیروی برآیند ناشی از وزن ذره است؛ در نتیجه ذره تمایل به سقوط دارد.

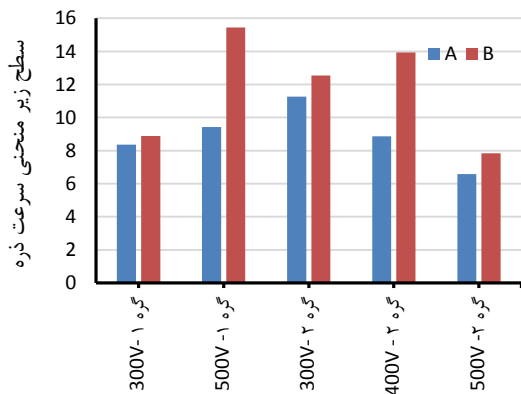
جدول ۴- دامنه جابجایی ذرات در فواصل و

فاصله	اختلاف پتانسیل‌های مختلف			
	تراز شدت صوتی (dB)	تراز شدت صوتی (dB)	تراز شدت صوتی (dB)	
دامنه جابجایی ذره (mm)	کمینه	بیشینه	پتانسیل (V)	
۲/۵	۱۴۰	۱۶۵	۳۰۰	
۳/۵	۱۴۲	۱۶۷	۴۰۰	$\frac{\lambda}{2}$
۴/۵	۱۴۵	۱۷۰	۵۰۰	
۲/۵	۱۳۰	۱۶۱	۳۰۰	
۳	۱۲۲	۱۶۳	۴۰۰	$\lambda$
۱/۵	۱۳۴	۱۶۵	۵۰۰	
۴	۱۲۵	۱۵۷	۳۰۰	
۳	۱۲۷	۱۶۰	۴۰۰	$\frac{3\lambda}{2}$
۳	۱۲۹	۱۶۳	۵۰۰	

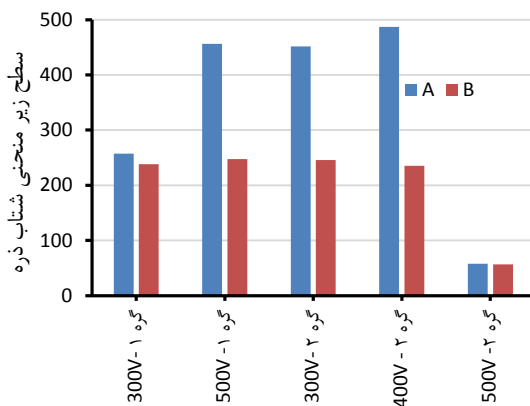


شکل ۱۰- موقعیت ذره تعلیق شده در راستای  $x'$

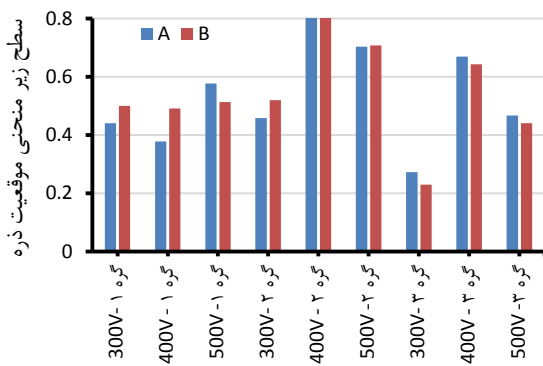
افزایش یافته که نشان دهنده کاهش پایداری ذره است. با مقایسه حالات مختلف هنگامی که اختلاف پتانسیل برابر  $300V$  است و ذره در گره ۳ قرار دارد؛ پایدارترین حالت تعلیق در مواردی که بررسی شد.



شکل ۱۷- سطح زیر نمودار منحنی سرعت ذره (فاصله  $\lambda$ )



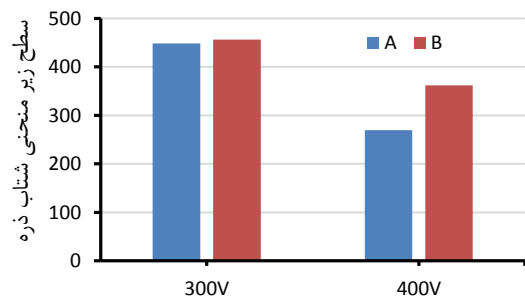
شکل ۱۸- سطح زیر نمودار منحنی شتاب ذره (فاصله  $\lambda$ )



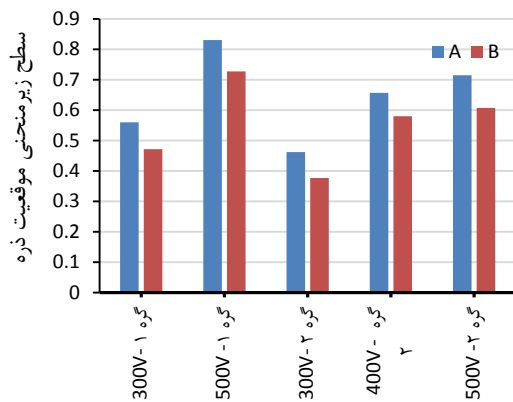
شکل ۱۹- سطح زیر نمودار منحنی موقعیت ذره (فاصله  $\frac{3\lambda}{2}$ )

با بررسی شکل ۱۶، ۱۷ و ۱۸ می‌توان نتیجه گرفت با افزایش اختلاف پتانسیل در حالتی که فاصله بازتابنده تا مبدل برابر  $\lambda$  است؛ اختلاف A و B بیشتر شده و همواره مقدار A از مقدار B بیشتر است که نشان دهنده تمایل ذره به صعود است. از طرفی بزرگتر شدن مقادیر A و B نشان دهنده ناپایداری بیشتر ذرات در اختلاف پتانسیل بیشتر است. با مقایسه مقدار A و B برای دو گره در اختلاف پتانسیل برابر مشاهده می‌شود که در گره ۲ (گره‌ای که در فاصله دورتری نسبت به مبدل است) به علت کمتر بودن مقدار A و B دارای پایداری بیشتری است. دلیل این پدیده را می‌توان دور شدن از منبع موج دانست. در اطراف منبع موج صوتی، اغتشاش بیشتر است و با دور شدن از این ناحیه پایداری ذره بیشتر می‌شود.

از شکل ۱۹، ۲۰ و ۲۱ مشاهده می‌شود که در فاصله  $\frac{3\lambda}{2}$  نتایج بدست آمده برای حالت فاصله  $\lambda$  تکرار می‌شود. با توجه به بیشتر بودن مقدار A از B نشان دهنده تمایل صعود ذره در این حالت است و با افزایش اختلاف پتانسیل مقادیر A و B



شکل ۱۵- سطح زیر نمودار منحنی شتاب ذره (فاصله  $\frac{\lambda}{2}$ )

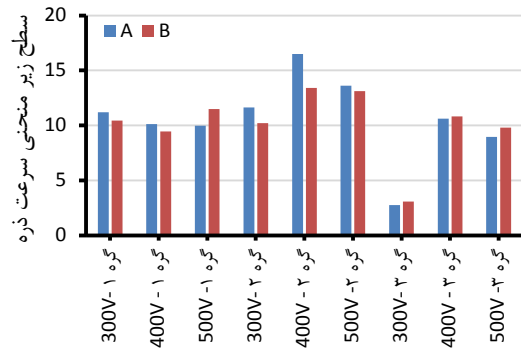


شکل ۱۶- سطح زیر نمودار منحنی موقعیت ذره (فاصله  $\lambda$ )

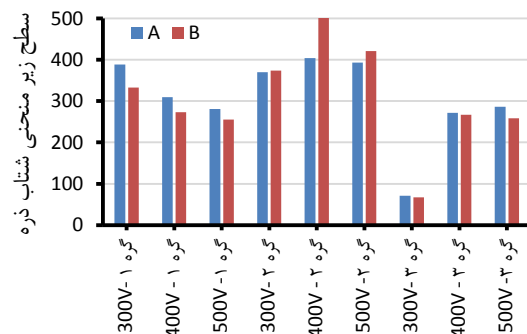
جدول ۵- مقایسه پارامتر C برای تمام حالات

فاصله	اختلاف پتانسیل (V)	C		
		موقعیت	سرعت	شتاب
$\frac{\lambda}{2}$	۳۰۰	۰/۹۹۶۴	۱/۰۱۰۵	۰/۹۸۲۲
	۴۰۰	۰/۵۰۹۸	۱/۵۲۵۹	۰/۷۴۳۹
	۵۰۰	۱/۱۸۶۶	۰/۹۴۱۹	۱/۰۸۰۲
۱ گره $\lambda$	۳۰۰	۱/۱۴۲۵	۰/۶۱۰۵	۱/۸۴۲
	۴۰۰	۱/۲۲۶۶	۰/۸۹۸	۱/۸۳۸۹
	۵۰۰	۱/۱۳۱۲	۰/۶۳۶۱	۲/۰۷
$\frac{3\lambda}{2}$ گره ۱	۳۰۰	۰/۸۸۱۳	۱/۰۷۳	۱/۱۶۹
	۴۰۰	۰/۷۶۸۷	۱/۰۷۱	۱/۱۳۵
	۵۰۰	۱/۱۲۲۹	۰/۸۶۹	۱/۰۹۸
$\frac{3\lambda}{2}$ گره ۲	۳۰۰	۰/۸۸۱۳	۱/۱۳۷	۰/۹۸۸
	۴۰۰	۰/۹۶۵۸	۱/۲۳	۰/۷۵۶۵
	۵۰۰	۰/۹۹۲۹	۱/۰۳۹	۰/۹۳۲۹
$\frac{3\lambda}{2}$ گره ۳	۳۰۰	۱/۱۸۸	۰/۸۹۸	۱/۰۵۵
	۴۰۰	۱/۰۳۹۸	۰/۹۸	۱/۰۱۷
	۵۰۰	۱/۰۶	۰/۹۱	۱/۱۰۹۴

با کاهش فاصله بین مبدل و بازتابنده بیشینه چگالی قابل تعلیق افزایش می‌یابد. این پدیده به توزیع فشار در نقاط گره قابل توجه است. با کاهش فاصله به علت کمتر شدن مسافت پیموده شده توسط موج ایستا، استهلاک موج ایستا کاهش می‌یابد. با کاهش استهلاک موج ایستا پروفیل فشار ایجاد شده، پرفشارتر می‌شود؛ در نتیجه ذره با چگالی بیشتر قابل تعلیق است. با افزایش اختلاف پتانسیل اعمالی، انرژی موج ایستا ایجاد شده افزایش می‌یابد، در نتیجه چگالی قابل تعلیق افزایش می‌یابد.



شکل ۲۰- سطح زیر نمودار منحنی سرعت ذره (فاصله  $\frac{3\lambda}{2}$ )



شکل ۲۱- سطح زیر نمودار منحنی شتاب ذره (فاصله  $\frac{3\lambda}{2}$ )

برای جمع‌بندی نتایج از پارامتر C استفاده شد. در جدول ۵ پارامتر C برای تمام حالات شبیه‌سازی پارامتر C نشان داده شده است. هر چقدر این پارامتر به ۱ نزدیک‌تر باشد، به معنای پایداری بیشتر تعلیق است. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالتی که فاصله بین بازتابنده و مبدل برابر  $\frac{3\lambda}{2}$  و ۳ گره پارامتر C به ۱ نزدیک‌تر است.

#### ۴-۶- بیشینه چگالی قابل تعلیق

یکی از مواردی که در تعلیق فراصوت از اهمیت فراوان برخوردار است، بیشینه چگالی قابل تعلیق است. در این مقاله با در نظر گرفتن قطر ذره به اندازه  $\frac{\lambda}{10}$  چگالی بیشینه چگالی قابل تعلیق برای اختلاف پتانسیل‌ها و فواصل مختلف با شبیه‌سازی عددی تخمین زده شد. افزایش چگالی با روش نصف کردن انجام شد. معیار تعلیق همانند حالات دیگر، حداقل تعلیق یک ذره از ۵ ذره وارد شده در محیط در نظر گرفته شد. در جدول ۶ مقادیر بیشینه چگالی قابل تعلیق نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود

## ۸- مراجع

- [1] Sheykhleslami M, Cinquemani S, Mazdak S (2018) Numerical study of the of ultrasonic vibration in deep drawing process of circular sections with rubber die. Proceedings Volume 10595, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems XII 10595.
- [2] Zang D, et al. (2017) Acoustic levitation of liquid drops: Dynamics, manipulation and phase transitions. Adv Colloid Interfac 243: 77-85.
- [3] Kremer J, et al. (2018) Viscosity of squalane under carbon dioxide pressure—Comparison of acoustic levitation with conventional methods. J Supercrit Fluid 141: 252-259.
- [4] Bowen L (2014) Floating on sound waves with acoustic levitation. COMSOL News 44-45.
- [5] Karlsen JT, Bruus H (2015) Forces acting on a small particle in an acoustical field in a thermoviscous fluid. Phys Rev E 92(4): 043010.
- [6] Cristiglio V, et al. (2017) Combination of acoustic levitation with small angle scattering techniques and synchrotron radiation circular dichroism. BBA-Gen Subjects 1861(1): 3693-3699.
- [7] Hatano H, et al. (1982) Ultrasonic levitation and positioning of samples. Jpn J Appl Phys 21(S3): 202.
- [8] Barmatz M, Collas P (1985) Acoustic radiation potential on a sphere in plane, cylindrical, and spherical standing wave fields. J Acoust Soc Am 77(3): 928-945.
- [9] Otsuka T, Nakane T (2002) Ultrasonic levitation for liquid droplet. JJAP 41(5S): 3259.
- [10] Xie W, et al. (2006) Acoustic method for levitation of small living animals. Appl Phys Lett 89(21): 214102.
- [11] Zhao S (2010) Investigation of non-contact bearing systems based on ultrasonic levitation. PhD Thesis, Paderborn university.
- [12] Foresti D, et al. (2013) Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. PNAS 110(31): 12549-12554.
- [13] Zhao S, Mojrzisch S, Wallaschek J (2013) An ultrasonic levitation journal bearing able to control spindle center position. Mech Syst Signal Pr 36(1): 168-181.
- [14] Ochiai Y, Hoshi T, Rekimoto J (2014) Three-dimensional mid-air acoustic manipulation by ultrasonic phased arrays. PloS One 9(5): e97590.
- [15] Guo F, et al. (2016) Three-dimensional manipulation of single cells using surface acoustic waves. PNAS 113(6): 1521027.
- [16] Sheykhleslami MR, Hojjat Y, Cinquemani S, Ghodsi M, Karafi M (2016) An approach to design

## جدول ۶- بیشینه چگالی قابل تعلیق برای تمام حالات

اختلاف پتانسیل (V)	فاصله	بیشینه چگالی قابل تعلیق $\frac{kg}{m^3}$
۳۰۰		۲۱۹۰
۴۰۰	$\frac{\lambda}{2}$	۳۶۷۴
۵۰۰		۵۷۵۵
۳۰۰		۶۱۰
۴۰۰	$\lambda$	۱۰۴۵
۵۰۰		۱۶۴۲
۳۰۰		۲۱۴
۴۰۰	$\frac{3\lambda}{2}$	۳۰۸
۵۰۰		۴۶۸

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله اثر فاصله مبدل تا بازتابنده و اختلاف پتانسیل اعمالی در فرایند تعلیق به کمک امواج فراصوت بررسی شد. در این بررسی فرایند تعلیق به صورت سه بعدی به روش المان محدود شبیه سازی شد. شبیه سازی به صورت کوپل، مکانیک جامد، الکترواستاتیک، آکوستیک فشار و ردیابی ذرات انجام شد. نتایج شبیه سازی توسط آزمایش تجربی صحت سنجی شده و نشان داده که با افزایش اختلاف پتانسیل تمایل به نوسان ذره حول نقطه تعلیق شده افزایش می یابد؛ همچنین با افزایش فاصله به علت افزایش استهلاک صوتی، مقدار تراز صوتی کاهش می یابد. با افزایش فاصله بازتابنده و مبدل به علت کاهش تراز صوتی شتاب اعمالی به ذره کاهش می یابد. ذره در حالتی که فاصله مبدل و بازتابنده برابر  $\frac{3\lambda}{2}$  است نسبت به حالات  $\lambda$  و  $\frac{\lambda}{2}$  دارای پایداری بیشتری است. دور بودن از منبع موج سبب افزایش پایداری ذره می شود. در فواصل خیلی زیاد از منبع موج صوتی به سبب پراکندگی زیاد موج، پایداری ذره کمتر شده و برای جبران این موضوع، باید شدت انرژی صوتی بالاتری اعمال شود؛ همچنین با کاهش فاصله بازتابنده و مبدل و افزایش اختلاف پتانسیل اعمالی مقدار چگالی قابل تعلیق افزایش می یابد.

- [18] Sheykhosslami M, Hojjat Y, Ghodsi M, Kakavand K, Cinquemani S (2015) Investigation of effect on vibrational behavior of giant magnetostrictive transducers. Shock Vib 2015.
- and fabrication of resonant giant magnetostrictive transducer. Smart Struct Syst 17(2): 313-325.
- [17] Abdullah A, Shahini M, Pak A (2009) An approach to design a high power piezoelectric ultrasonic transducer. J Electroceram 22(4): 369-382.