



The Effect Of Initial Release Point On Particle Motion In Acoustic Levitation

Zahra Heidari ^a, Mohammadreza Sheykholeslami ^{a*}, Hamid Abdi ^b, Davood Dehghani ^a

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, 38156-88349, Iran

^b Senior member of IEEE, School of Engineering, Deakin University, Geelong Waurn Ponds Campus, Australia

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Heidari Z, Sheykholeslami M, Abdi H, Dehghani D. The Effect Of Initial Release Point On Particle Motion In Acoustic Levitation. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*, 2025;5(2):171-189.

 <https://10.66224/masm.5.2.171>

KEYWORDS

Ultrasonic levitation,
Initial release position,
Particle Movement.

ABSTRACT

Ultrasonic levitation, as an advanced non-contact particle manipulation technology, has gained prominence in modern research due to its independence from material physical properties and extensive applications in fields such as pharmaceuticals, microelectronics, and sonochemistry. However, optimal utilization of this technology requires a deep insight into parameters affecting particle stability and dynamics. In this study, the impact of initial particle release position—a less-explored key factor—on the dynamic behavior of particles levitated in an ultrasonic levitation system was investigated. Acoustic pressure at 20 kHz was modeled using Multiphysics simulation in COMSOL software, and the behavior of 20 polypropylene particles (diameter: 3 mm, density: 910 kg/m³) at various initial positions (ranging from 0.23 to 8.01) was analyzed. Drag forces, acoustic pressure forces, and gravitational forces were considered effective forces. Results revealed that particles released near pressure nodes exhibited the lowest oscillation amplitude and shortest stabilization time. As the initial release distance from pressure nodes increased, both oscillation amplitude and stabilization time increased. This factor's influence on stabilization time was more pronounced near the reflector than near the transducer, indicating that particles released close to the reflector achieve a more stable levitated state compared to those released close to the transducer. Experimental validation showed significant agreement with simulation results.

Extended Abstract

1. Introduction

Ultrasonic levitation is an advanced technology used for non-contact manipulation of particles, allowing them to be levitated in a fluid medium, typically air, using standing acoustic waves that create pressure nodes and antinodes. By eliminating physical contact with external surfaces, this method reduces the risk of contamination often associated with traditional particle handling techniques. This technology is leading to significant advancements in sensitive fields such as microelectronics and biomedicine [1]. Recent systematic reviews highlight the increasing importance of ultrasonic levitation in levitating liquids and colloidal particles, particularly in applications related to microfluidic systems and targeted drug delivery

* Corresponding author. Tel.: +98-8632625722

E-mail address: m-sheykholeslami@araku.ac.ir

DOI: <https://10.66224/masm.5.2.171>.

Received: July 06, 2025; Received in revised form: July 12, 2025; Accepted: August 25, 2025.

©Author



The extensive applications of this technology—spanning fields such as medicine (cell separation, targeted drug delivery), materials science (uniform nanoparticle synthesis), and analytical chemistry (contaminant-free reactions)—arise from distinct advantages, including independence from particle characteristics (e.g., electrical or magnetic conductivity), high mechanical precision (up to micrometer scale), and compatibility with sensitive chemical substances [3-5]. For example, in the semiconductor industry, ultrasonic levitation effectively manages delicate silicon wafers without causing surface abrasions [6], whereas in the pharmaceutical sector, it enables controlled nucleation and crystallization studies of drugs, eliminating interference from containment [7].

Despite its considerable potential, the widespread adoption of industrial applications necessitates overcoming significant challenges related to control and stability. Positional oscillations of particles diminish precision in material processing applications [8]. Achieving precise particle control is essential for various operations, including levitation, transport, coagulation, mixing, separation, evaporation, and extraction within microfluidic systems. Although the advantages of acoustic control are apparent, there remain obstacles in improving stability and control accuracy to facilitate broader applications [9]. Multiple factors, including operating frequency, applied voltage, transducer-reflector distance, and particle size, play a critical role in influencing levitation dynamics.

Barrios & Rechtman (2008) [10] reported that increasing particle-to-fluid density ratio shifts particles toward lower pressure nodes and intensifies nonlinear oscillations. Geometric parameters also significantly affect performance: Foresti et al. (2011) [11] observed substantial changes in acoustic potential distribution and stable levitation zones when altering transducer-reflector distance. Amouchi et al. (2024) [12] demonstrated that higher viscosity and density reduce oscillation amplitude and accelerate stabilization. Rotelsberger et al. (2022) [13] showed that higher operating frequencies disrupt acoustic fields and impair particle stability. Other studies confirm that applied voltage (via acoustic pressure modulation) [14] and particle size determine stability and positioning: particles smaller than half-wavelength stabilize at pressure nodes, while larger ones migrate toward antinodes [15].

The role of initial release position—a critical factor influencing trajectory, stabilization time, and ultimate stability—remains inadequately explored. Current research primarily focuses on the effects of unbalanced release positions that lead to particle ejection from levitation zones [16].

This study integrates multiphysics simulation using COMSOL's Acoustics and Particle Tracing modules with experimental validation to examine the relationship between initial release points and particle dynamics. Through the implementation of coupled physics simulations and the establishment of specialized parameter definitions, we offer comprehensive insights into these dynamics to enhance the efficiency of ultrasonic levitation. The simulations indicate two significant outcomes associated with an increased distance from pressure nodes: notably larger oscillation amplitudes and extended stabilization times.

2. Methodology

3D simulations employed a cylindrical levitation gap with parallel plates: a piezoelectric transducer (top, hard acoustic boundary) and reflector (bottom, harmonic displacement source, amplitude = 10 μm), separated by half-wavelength. The mesh size was $\lambda/10$. Figure 1 shows the calculated acoustic pressure based on defined parameters.

Particle trajectories of 20 polypropylene particles ($\rho = 910 \text{ kg/m}^3$, $r = 3 \text{ mm}$) under gravity, acoustic radiation, and drag forces were analyzed. Particles were released randomly (0.23–8.01 mm) based on acoustic field data. Figure 2 shows their positions after 10 s.

Parameters a, b, and c (referencing [17]) were defined to quantify behavior:

- a: Area above the mean displacement line (dominant upward forces)
- b: Area below the mean line (dominant downward forces)
- c: Ratio a/b

Validation compared simulation results with experimental data from Dehghani et al. [17].

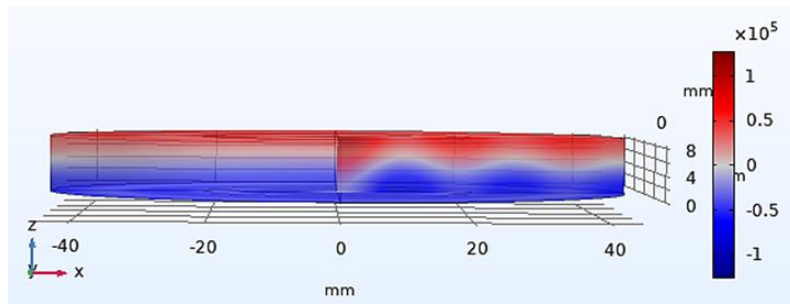


Figure 1. Sound pressure distribution contour in the levitation gap of half a wavelength



Figure 2. Location of particles in the levitation gap after 10 seconds

3. Results

Only 8 of 20 particles achieved stable levitation. Key finding is summarized as follows:

- Oscillation Amplitude

Simulations reveal that the further the initial release point lies from the node, the larger the initial oscillation amplitude. The oscillation amplitude of particles in three different intervals is shown in Table 1. As shown in Table 1, this effect diminished after ~2 s as particles approached equilibrium. In addition, the distance of the release point causes more initial disturbances and trajectory irregularity.

Table 1. Initial position of suspended particles along with oscillation amplitude in three different intervals

Initial position (mm)	Distance from the pressure node (mm)	Oscillation amplitude in 0-1 s (mm)	Oscillation amplitude in 1-2 s (mm)	Oscillation amplitude in 9-10 s (mm)	Stability time (s)	Rise time (s)
0.45	3.83	4.41	0.21	0.014	2	0.048
1.4	2.88	3.077	0.22	0.014	1.55	0.024
1.89	2.39	2.71	0.21	0.012	1.32	0.036
3.8	0.48	0.46	0.19	0.010	1.22	0.044
4.04	0.24	0.72	0.18	0.013	0.89	0.008
4.8	0.52	1.80	0.38	0.012	1.19	0.108
5.17	0.89	2.13	0.22	0.014	2.16	0.009
7.99	3.79	4.61	0.64	0.015	3.26	0.64

- Stabilization Time

Particles released near the node traverse shorter distances, resulting in shorter stabilization. Figure 3 compares the stability of two representative particles (positions 4.04 and 9.97 mm), indicating that the latter—farther from the node—requires significantly more time to stabilize. Furthermore, distance above the node (near the reflector) delays stabilization more than equivalent distance below the node (nearer the transducer). Figure 4 contrasts particles at 4.50 mm versus 9.97 mm, each ~3 mm from the node: although both exhibit similar initial disturbances, the lower-positioned particle stabilizes faster.

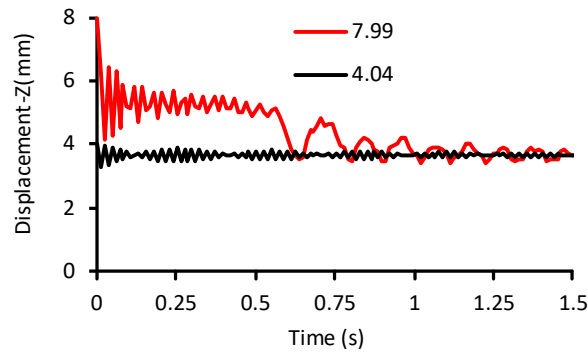


Figure 3. Comparing the stability of two particles with positions 4.04 and 7.99

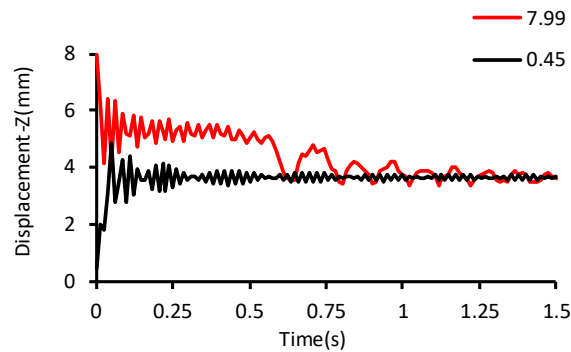


Figure 4. Comparison of two particles with positions 0.45 (below the pressure node) and 7.99 (above the pressure node)

Force Dynamics (a, b, c)

Particles released above the node exhibit $b > a$ and $c > 1$, indicating dominance of downward forces; those released below the node show $a > b$ and $c < 1$, reflecting dominance of upward forces. Notably, particles released slightly below the node (3.08 and 4.04 mm) displayed $b > a$ and $c > 1$ —a reversal attributed to gravitational equilibrium being located just beneath the node. Greater release-node distances amplify a–b disparities, underscoring increasing oscillatory asymmetry further from equilibrium.

4. Experimental Validation

A strong correlation between simulated and experimental trajectories was observed. The mean relative error between the c parameter was 2% confirming model accuracy despite minor amplitude discrepancies from nonideal experimental conditions.

5. Conclusion

The analysis results indicate that the amplitude of the initial oscillations exhibits a significant increase as the distance of particles from the pressure node (equilibrium point) grows. Conversely, this increased distance also extends the time required to attain stability. This effect is notably more pronounced at the upper sections of the node, which are closer to the reflector, in comparison to the lower sections nearer to the transducer. Examination of the dynamic parameters (a, b, c) reveals that particles situated above the pressure node demonstrate higher b value, indicative of dominant downward forces with c values greater than one. In contrast, particles located below the node exhibit a higher a value, reflecting prevailing lifting forces with c values less than one. Furthermore, the experimental validation has yielded an average relative error of 2%, demonstrating an acceptable correlation with the simulation results.



تأثیر موقعیت اولیه رهائش بر حرکت ذرات در محل تعلیق فراصوت

زهرا حیدری الف، محمدرضا شیخ‌الاسلامی ب^{*}، حمید عبدی ج، داود دهقانی د

الف دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، z.heydari.mech@gmail.com

ب استادیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، m-sheykholeslami@araku.ac.ir

ج عضو ارشد IEEE، دانشکده مهندسی، دانشگاه دیکین، استرالیا، hamid.abdi@deakin.edu.au

د دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، Davood1986@yahoo.com

چکیده	واژگان کلیدی
<p>تعلیق فراصوت به‌عنوان یک فناوری پیشرو در جانیایی غیرتماسی ذرات، به دلیل استقلال از خواص فیزیکی ماده و در نتیجه آن کاربردهای گسترده در حوزه‌هایی مانند صنایع داروسازی، میکروالکترونیک و مهندسی شیمی، جایگاه ویژه‌ای در پژوهش‌های نوین یافته است. با این حال، بهره‌برداری بهینه از این فناوری مستلزم شناخت عمیق پارامترهای مؤثر بر پایداری و دینامیک ذرات است. در این مطالعه، تأثیر موقعیت اولیه رهائش ذرات به‌عنوان یک عامل کلیدی، بر رفتار دینامیکی ذرات تعلیق شده در سیستم تعلیق فراصوت مورد بررسی قرار گرفت. فشار آکوستیک در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، با استفاده از شبیه‌سازی چند فیزیکی در نرم‌افزار کامسول مدل‌سازی و رفتار ۲۰ ذره پلی‌پروپیلن (قطر ۳ میلی‌متر، چگالی ۹۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب) در موقعیت‌های اولیه مختلف (از ۰/۲۳ تا ۸/۰۱) تحلیل شد. نیروهای درگ، فشارصوتی و گرانش به‌عنوان نیروهای مؤثر در گپ تعلیق در نظر گرفته شدند. نتایج به‌دست آمده نشان داد، ذرات رهائشده در مجاورت گره فشاری کم‌ترین دامنه نوسانات و کوتاه‌ترین زمان رسیدن به پایداری را تجربه می‌کنند. با افزایش فاصله‌ی محل رهائش اولیه ذرات از گره فشار دامنه‌ی نوسانی و زمان رسیدن به پایداری افزایش پیدا کرده است. تأثیر این عامل بر افزایش زمان پایداری در نقاط نزدیک به بازتابنده نسبت به نقاط نزدیک به مبدل بیش‌تر بوده که به معنی وضعیت پایدارتر ذرات تعلیق شده در این نقاط است. اعتبارسنجی تجربی تطابق قابل توجهی با نتایج شبیه‌سازی نشان داد.</p>	<p>تعلیق فراصوت، موقعیت اولیه رهائش، حرکت ذرات.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳</p>

۱- مقدمه

تعلیق فراصوت به‌عنوان یک فناوری پیشرفته در جانیایی غیرتماسی ذرات، با بهره‌گیری از امواج صوتی ایستا، امکان شناورسازی ذرات را در محیط سیال (معمولاً هوا) از طریق ایجاد نقاط گره و پادگره فشار فراهم می‌کند. این روش به دلیل حذف تماس فیزیکی با سطوح خارجی، از آلودگی ناشی از روش‌های سنتی جابه‌جایی ذرات جلوگیری می‌نماید و تحولی اساسی در حوزه‌های حساس به تماس مانند میکروالکترونیک و زیست‌پزشکی ایجاد کرده است [۱]. مطالعات نظام‌مند اخیر نشان می‌دهد که کاربردهای این فناوری در تعلیق مایعات و ذرات کلوئیدی، به‌ویژه در سیستم‌های میکروسیال و دارورسانی هدفمند، از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است [۲].

کاربردهای گسترده این فناوری، از پزشکی (جداسازی سلولی، دارورسانی هدفمند) تا علم مواد (سنتز نانوذرات یکنواخت) و

شیمی تحلیلی (انجام واکنش‌های بدون آلاینده)، ناشی از مزایای منحصربه‌فردی چون استقلال از خواص ذرات (مانند رسانایی الکتریکی یا مغناطیسی)، دقت مکانیکی بالا (تا مقیاس میکرومتر) و سازگاری با مواد شیمیایی حساس است [۳-۵]. به‌عنوان مثال، در صنایع نیمه‌هادی، از تعلیق فراصوت برای جابجایی و پفرهای سیلیکونی شکننده بدون ایجاد خراش سطحی استفاده می‌شود [۶]. در داروسازی، امکان مطالعه فرآیندهای هسته‌زایی و تبلور داروها در شرایط کنترل‌شده و بدون حضور دیواره‌های مزاحم فراهم می‌شود [۷].

در پیشرفت‌های اخیر صورت گرفته در این حوزه امکان پردازش بدون ظرف مواد با چگالی متوسط تا بالا در دماهای بسیار بالا از طریق چینش چندین مبدل صوتی قدرتمند در یک آرایه فراهم شده است که باعث افزایش کاربرد این روش در زمینه‌های پردازش مواد، تولید مواد آمورف و مطالعه‌ی خواص فیزیکی شده است [۱۸]. همچنین این روش قابلیت استفاده در محیط بدون گرانش را دارا بوده و چالش‌های موجود در زمینه‌ی کنترل سیالات، واکنش شیمیایی و سنتز مواد در فضا را نیز پاسخ‌گو است [۱۹].

با وجود پتانسیل بالای این فناوری، کاربرد صنعتی آن مستلزم غلبه بر چالش‌های مهمی همانند کنترل و پایداری است. نوسانات موقعیتی ذرات باعث کاهش دقت در مواردی مانند پردازش مواد می‌شود [۸]. کنترل دقیق ذرات امکان شناوری، حمل و نقل، انعقاد، مخلوط کردن، جداسازی، تبخیر و استخراج نمونه‌ها در سیستم‌های میکرو فلوئیدی را فراهم می‌کند [۹]. در حالی که مزایای کنترل دقیق صوتی مشهود است، چالش‌هایی در افزایش پایداری و دقت کنترل این فناوری برای کاربردهای گسترده‌تر همچنان وجود دارد. اگرچه در مطالعات اخیر صورت گرفته ترکیب مودهای عرضی مرتبه بالا و آرایه فازی نتایج موفقی در افزایش پایداری داشته‌اند اما پیچیدگی محاسباتی این روش در کنار محدودیت فرکانس و حساسیت شدید به اغتشاشات باعث محدودیت آن شده است [۲۰]. علاوه بر آن فاکتورها و عوامل متعدد دیگر همانند فرکانس کاری، ولتاژ اعمال شده، فاصله بازتابنده و مبدل، اندازه ذرات تعلیق شده و غیره بر دینامیک تعلیق فراصوت اثرگذار است. در همین راستا پژوهشگران به بررسی عددی و تجربی تأثیر این عوامل بر رفتار و پایداری ذرات تعلیق شده پرداخته‌اند.

باریوس و رچمن [۱۰] در سال ۲۰۰۸ گزارش کردند افزایش نسبت چگالی ذره به سیال، موجب جابجایی ذرات به سمت گره‌های فشار پایین‌تر و تشدید نوسانات غیرخطی می‌شود. از دیگر عوامل موثر بر عملکرد تعلیق، پارامترهای هندسی اجزای تعلیق است. در همین راستا فورستی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۱ با تغییر فاصله مبدل-بازتابنده تغییرات معناداری در توزیع پتانسیل آکوستیک و ناحیه تعلیق پایدار مشاهده کردند. مطالعه عموجی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۴ بر روی قطرات مایع حاکی از آن است که افزایش ویسکوزیته و چگالی باعث کاهش دامنه نوسانات و تسریع رسیدن به تعادل می‌شود. روتلسبرگر و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۲۲ نشان دادند که همچنین فرکانس‌های کاری بالاتر میدان صوتی را مختل کرده و می‌تواند در پایداری ذرات اختلال ایجاد کند. از نتایج سایر پژوهش‌ها در این حوزه می‌توان به این موارد اشاره کرد که ولتاژ اعمال شده به دلیل تغییر در فشار صوتی [۱۴] و اندازه ذرات نیز بر پایداری و محل قرار گیری ذرات تأثیر دارند. به‌طوری‌که ذرات با اندازه کوچک‌تر از نصف طول موج در محل‌های گره فشاری تعلیق می‌شوند، درحالی‌که ذرات با اندازه بزرگ‌تر از آن معمولاً به پادگره‌ها هدایت می‌شوند [۱۵].

با این حال، نقش موقعیت اولیه رهایش ذرات در گپ تعلیق، به‌عنوان عاملی کلیدی در تعیین مسیر حرکت، زمان تثبیت و پایداری نهایی، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌های موجود عمدتاً به تأثیر رهاسازی ذرات در موقعیت‌های نامتعادل بر خروج ذرات از محدوده تعلیق اشاره کرده‌اند [۱۶].

این مقاله با ترکیب شبیه‌سازی چند فیزیکی در نرم‌افزار کامسول (شامل ماژول‌های آکوستیک و ردیابی ذرات) و اعتبارسنجی تجربی، به بررسی رابطه بین نقطه رهایش اولیه ذرات و رفتار دینامیکی آن‌ها در فرایند تعلیق فراصوت، پرداخته است. در این راستا با استفاده از شبیه‌سازی چند فیزیکی در کامسول و تعریف پارامترهایی برای بررسی بهتر رفتار ذرات، تلاش شده است درکی عمیق و با جزئیات از این دینامیک ایجاد کرده تا بتوان باعث بهبود کارایی فرایند تعلیق فراصوت در زمینه‌های مختلف شود. بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزایش فاصله نقطه رهایش اولیه از گره فشار به دو پیامد کلیدی افزایش معنادار دامنه نوسانات ذرات و طولانی‌تر شدن زمان رسیدن به پایداری، منجر می‌شود. باتوجه‌به این موضوع در کاربردهای حساس به

پایداری همانند دارورسانی هدف‌مند، کریستالیزاسیون داروها و پوشش‌دهی نانوذرات، رهاسازی ذرات در نقاط نزدیک به گره برای دستیابی سریع به پایداری توصیه می‌شود. از طرفی در کاربردهایی نظیر واکنش‌های شیمیایی و سنتز نانوکامپوزیت‌ها که نیاز به اختلاط مواد وجود دارد، رهاسازی ذرات در نقاط دور از گره با ایجاد نوسانات گسترده‌تر و انتقال جرم می‌تواند رسیدن به این هدف را تسهیل کند.

۲- روش تحقیق

شبیه‌سازی سه‌بعدی سیستم تعلیق فراصوت در نرم‌افزار کامسول با تعریف یک گپ استوانه‌ای به‌عنوان محیط تعلیق انجام شد. دو صفحه موازی در بالا (مبدل پیزوالکتریک) و پایین (بازتابنده) به ترتیب به‌عنوان مرزهای سخت آکوستیک^۱ و منبع جابجایی هارمونیک^۲ با دامنه ۱۰ میکرومتر و با فاصله نصف طول موج از یک‌دیگر، تعریف شدند. در واقع برای افزایش سرعت حل، مبدل به‌صورت کامل مدل نشده است و جابجایی معادل حاصل از مبدل به عنوان جابجایی هارمونیک به صفحه‌ی پایینی گپ اعمال شده است. هندسه مبدل و بازتابنده به‌صورت ایده آل کاملاً صاف، موازی و بدون اعوجاج در نظر گرفته شد. نوع المان باتوجه‌به هندسه‌ی استوانه‌ای شکل مدل، المان هرمی شکل آزاد برای انطباق بهتر مش با این نوع هندسه انتخاب شد و برای کاهش هزینه‌ی محاسباتی و باتوجه‌به تامین دقت مورد نظر المان مرتبه‌ی اول استفاده شد. برای دستیابی به سائز مناسب مش آنالیز استقلال از اندازه‌ی مش بر مبنای کم‌ترین تغییرات در فشار صوتی انجام شد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، بعد از اندازه‌ی المان یک‌دهم طول موج تغییراتی در فشار صوتی صورت نگرفته است، بنابراین اندازه المان یک دهم طول موج به عنوان اندازه المان مناسب، انتخاب شد. میدان فشار آکوستیک و شدت صوت در فرکانس کاری ۲۰ کیلوهرتز با استفاده از محیط حوزه فرکانسی فشار صوتی^۳ و حل‌گر حوزه فرکانسی^۴ بر اساس رابطه ۱ محاسبه شد [۲۱].

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho c} (\nabla p t - q d) \right) - \frac{k^2 p t}{c} = Q m \quad (1)$$

در این رابطه pc چگالی ذره، pt فشار محیط، و kc عدد موج^۵ است. منظور از عدد موج تعداد امواج در واحد طول است و از نسبت 2π بر طول موج به‌دست می‌آید [۲۲]. شکل ۲ فشار آکوستیک محاسبه شده باتوجه‌به پارامترهای تعریف شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است در میانه‌ی گپ فشار صوتی صفر است که نشان‌دهنده‌ی گره فشار و محل تعادل ذرات است.

در ادامه نحوه حرکت ۲۰ ذره پلی‌پروپیلن با چگالی ۹۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب و قطر ۳ میلی‌متر در محیط ردیابی ذرات در محیط سیال^۶ و تحت تاثیر نیروهای گرانش^۷، نیروی تابش آکوستوفوریک^۸ و نیروی درگ^۹ و با استفاده از حل‌گر وابسته به زمان^{۱۰} بررسی شد. نیروی درگ وارده بر ذرات در این محیط با استفاده از رابطه ۲ و نیروی تابش صوتی به‌وسیله‌ی گرادیان پتانسیل تابشی نشان داده شده در رابطه‌ی ۴ با فرض جریان آرام و عدد رینولدز پایین برای سیال محیط تعلیق، محاسبه می‌شود [۲۳، ۲۴].

$$F_D = \frac{1}{\tau m} m_p (U - V) \quad (2)$$

منظور از m_p جرم ذره، U سرعت سیال، V سرعت ذره و τm سرعت پاسخ ذره می‌باشد که براساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود

¹Sound Hard Boundary

²Harmonic Displacement

³Acoustic Pressure Frequency Domain

⁴Frequency domain

⁵Wave number

⁶Particle Tracing for Fluid Flow

⁷Gravity force

⁸Acoustophoretic radiation force

⁹Drag force

¹⁰Time dependent

[۲۴، ۲۳].

$$\tau_m = \frac{p d^2}{18 \mu} \quad (۳)$$

در این رابطه p نشان‌دهنده‌ی چگالی ذره، d قطر ذره و μ ویسکوزیته سیال است.

$$U = 2\pi r^3 \left[\left(\frac{p^2}{3\rho c^3} \right) f_1 - \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) f_2 \right] \quad (۴)$$

منظور از P فشار ذره، V سرعت ذره، c سرعت موج صوتی در هوا است و f_1 و f_2 از طریق معادلات ۵ و ۶ محاسبه می‌شود.

$$f_1 = 1 - \frac{\rho c^2}{\rho_s c_s^2} \quad (۵)$$

$$f_2 = \frac{2(\rho_s - \rho)}{(2\rho_s + \rho)} \quad (۶)$$

در روابط ۵ و ۶ منظور از c_s سرعت موج صوتی در ذره و ρ_s چگالی ذره تعلیق شده است.

گپ تعلیق در نظر گرفته شده در محیط ردیابی ذرات به‌عنوان دیواره^۱ تعریف شد تا رفتار ذرات دقیقاً در همان محیط بررسی شود. رهاسازی ذرات در گپ تعلیق به‌صورت تصادفی و از موقعیت ۰/۲۳ تا ۸/۰۱ میلی‌متر با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده از محیط فشار صوتی انجام شد. همان‌طور که اشاره شد در این پژوهش جنس پلی‌پروپیلن برای انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب شد. دلیل انتخاب ذراتی از جنس پلی‌پروپیلن ارزان و در دسترس بودن این جنس و همچنین چگالی نزدیک به آب آن است که باعث تعلیق راحت‌تر این ذرات می‌شود [۲۵]. به‌علاوه این ذرات دارای امپدانس آکوستیکی نسبتاً نزدیک‌تر به هوا، محیط تعلیق فراصوت، بوده که در تعلیق بهتر این مواد اثرگذار است [۲۶]. همچنین کاربرد تعلیق این ذرات در الکترونیک و علم مواد از دیگر دلایل انتخاب این جنس است. از آنجایی که این جنس عایق الکتریکی مناسبی است، در فیلم‌های خازنی و پوشش سیم دارای کاربردهای فراوانی است که مطالعه تعلیق آن به قرارگیری دقیق مواد کمک می‌کند [۲۷]. پلیمریزاسیون ذرات تعلیق شده پلی‌پروپیلن به ساخت و اصلاح پلیمرها کمک می‌کند [۲۸]. قرارگیری تمامی این ویژگی‌ها کنار یک‌دیگر پلی‌پروپیلن را به گزینه‌ای مناسب برای انجام تعلیق فراصوت تبدیل کرده است. اندازه‌ی مناسب برای تعلیق ذرات در حدود ۰/۱۵ تا ۰/۱۵ طول موج است و از آنجایی که طول موج در این مقاله ۱۷/۱۵ میلی‌متر است؛ محدوده‌ی مناسب اندازه ذرات برای تعلیق بین ۲/۵۷ تا ۶ میلی‌متر قرار می‌گیرد. با توجه به تعلیق موفق ذرات در پژوهش‌های گذشته با اندازه ۳ میلی‌متر، در این مقاله نیز قطر ذرات ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [۲۹، ۳۰]. شکل ۳ محل قرارگیری ذرات رها شده در گپ تعلیق را پس از طی زمان ۱۰ ثانیه نشان می‌دهد.

برای مطالعه بهتر رفتار و حرکت ذرات در گپ تعلیق مشابه با مرجع [۱۷] پارامترهایی با توجه به مساحت زیر نمودار جابجایی ذرات تعریف شد. در واقع خط میانگین این نمودار که با استفاده از معادله ۷ محاسبه شده است، مینا قرار گرفته و پس از آن انحراف از میانگین با توجه به رابطه ۵ محاسبه شد و به‌وسیله آن مساحت سطح قسمت بالای خط میانگین پارامتر a ، به معنای غلبه‌ی نیروهای بالابرنده، و مساحت سطح قسمت پایین این خط پارامتر b ، به‌عنوان غلبه‌ی نیروهای پایین‌برنده، و نسبت این دو پارامتر به‌عنوان پارامتر c تعریف شدند که معادلات پارامترهای a ، b به‌ترتیب در روابط ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. پارامترهای موثر در این روابط در معادلات ۷ و ۸ ارائه شده است.

$$y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (۷)$$

در این رابطه منظور از N تعداد داده‌ها و منظور از y جابجایی ذرات است.

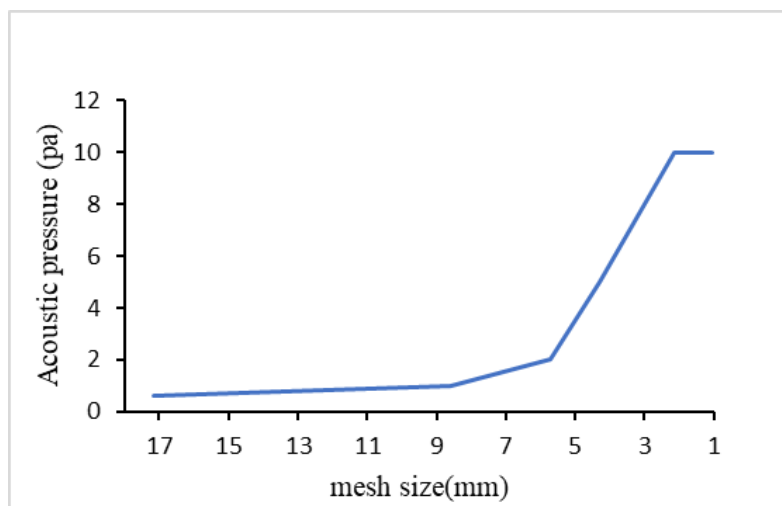
$$\Delta y = y_i - y \quad (۸)$$

^۱ wall

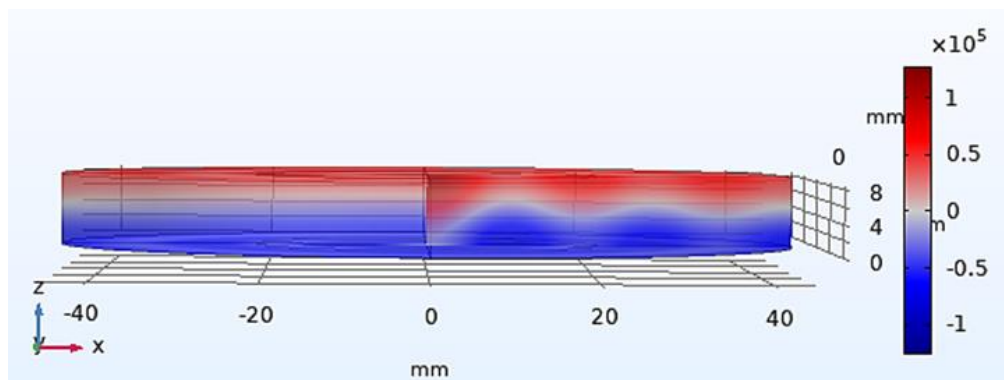
$$a = \sum_{i=1}^{N-1} \max \left(\frac{(\Delta y_i + 1 + \Delta y_i)}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \right) \quad (9)$$

$$b = \sum_{i=1}^{N-1} \min \left(\frac{(\Delta y_i + 1 + \Delta y_i)}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \right) \quad (10)$$

درنهایت برای اطمینان از دقت و صحت نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی، اعتبارسنجی از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی با اطلاعات موجود از آزمایش‌های تجربی مطالعه صورت‌گرفته توسط دهقانی و همکاران [۱۷] انجام شد.



شکل ۱ آنالیز استقلال از اندازه‌ی مش بر اساس تغییرات فشار صوتی



شکل ۲ توزیع فشار صوتی در گپ تعلیق



شکل ۳ محل قرارگیری ذرات رهاشده در گپ تعلیق پس از طی ۱۰ ثانیه

۳- نتایج

از تعداد ۲۰ ذره رها شده در گپ تعلیق از موقعیت‌های اولیه متفاوت، تعداد ۸ ذره تعلیق شدند باقی ذرات به‌طور کلی تعلیقی را تجربه نکردند. منظور از تعلیق موفق قرارگیری ذرات در گپ تعلیق در مدت زمان ۱۰ ثانیه که زمان در نظر گرفته شده برای انجام تعلیق است و همچنین حرکت نوسانی میراثونده به سمت نقطه‌ی تعادل، گره فشار، است. که تعداد ۳ ذره در ابتدای حرکت از گپ تعلیق خارج شدند و ۹ ذره نیز ایستا بودند که به معنای عدم تعلیق این ذرات است. در نتیجه تعداد ۸ ذره با دارا بودن شرایط بالا به‌عنوان ذرات معلق شده در نظر گرفته شدند.

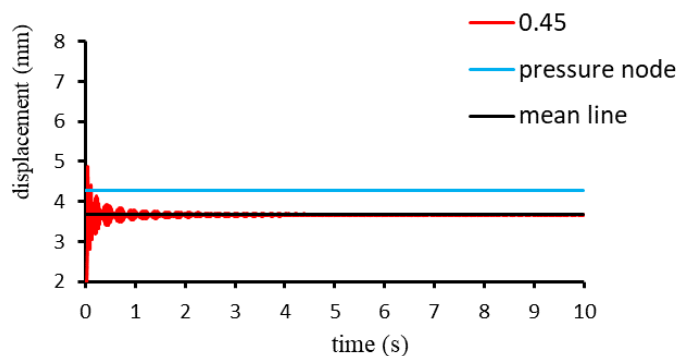
برای درک بهتر تأثیر موقعیت اولیه رهایش بر رفتار ذرات، تأثیر این پارامتر در ابتدا بر دامنه‌ی نوسانی ذرات تعلیق شده و سپس مدت زمان رسیدن به پایداری مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۱- تأثیر موقعیت اولیه رهایش بر دامنه نوسانی

بررسی نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دادند به‌طور کلی هرچه فاصله نقطه اولیه رهایش ذرات از گره فشار بیشتر باشد، حرکت نوسانی اولیه ذرات با دامنه بزرگ‌تری اتفاق می‌افتد. در واقع این مسئله در ابتدای حرکت ذرات به‌طور معناداری مشهود است؛ اما در ادامه حرکت دامنه نوسانی ذرات به یکدیگر بسیار نزدیک است. در واقع این رفتار ذرات باتوجه به تمایل آن‌ها برای حرکت به سمت گره فشاری توجیه‌پذیر است.

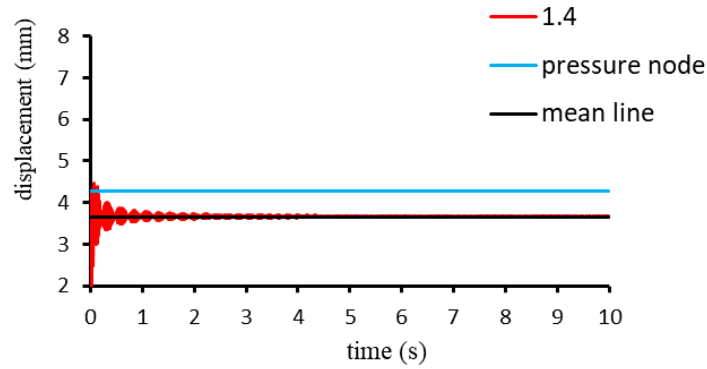
مطالعات انجام شده نشان داده‌اند ذرات با اندازه کوچک‌تر از طول موج در نقاط گره فشاری به تعادل می‌رسند. علت این امر تعادل بین نیروهای صوتی و گرانش در این نقطه است. توزیع نیروی صوتی در محل تعلیق باتوجه به معادلات گورکوف محاسبه می‌شود. حل معادلات گورکوف نشان می‌دهد گرادیان این نیرو در محل گره فشاری حداقل مقدار ممکن است و به دلیل اعمال این نیرو به‌صورت عمودی و روبه‌بالا در این نقطه تعادل بین نیروها اتفاق می‌افتد که باعث تثبیت موقعیت پایدار برای ذرات می‌شود. اگرچه در شرایط وجود گرانش محل تعادل نیروها کمی پایین‌تر از گره فشار قرار می‌گیرد [۳۱]، اما ذرات با هر موقعیت رهایش اولیه در نهایت به سمت گره فشاری حرکت می‌کنند. هرچه فاصله ذرات از گره فشار بیشتر باشد، ذرات برای رسیدن به این نقطه حرکت نوسانی با دامنه بزرگ‌تری را تجربه می‌کنند. در ادامه‌ی حرکت و با قرارگیری نسبی ذرات حول نقطه تعادل، دامنه‌ی نوسانی ذرات به یک میزان تقریباً یکسان کاهش پیدا می‌کند.

تمایل حرکتی ذرات برای قرارگیری و تثبیت در گره فشار در نمودار حرکتی آن‌ها نیز مشهود است. شکل ۴ نحوه جابه‌جایی و دامنه حرکتی ذرات ره‌اشده از نقاط پایین گره را در راستای محور z در مدت زمان ۱۰ ثانیه نشان می‌دهد. ذرات پس از ره‌سازی در موقعیت زیر گره فشار باتوجه به توضیحات داده شده به سمت بالا جابه‌جا می‌شوند. به همین دلیل در شکل نشان داده شده مساحت قسمت بالای نمودار (پارامتر a) مقدار بیش‌تری است که به معنای تلاش نیروهای بالابرنده برای هدایت ذرات به سمت گره فشار است.

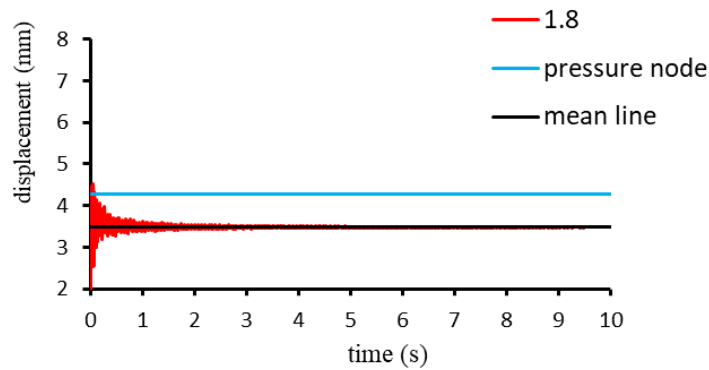


الف

شکل ۴ نمودار جابه‌جایی ذرات ره‌اشده از موقعیت پایین‌تر از گره فشار: الف) موقعیت اولیه ۰/۴۵



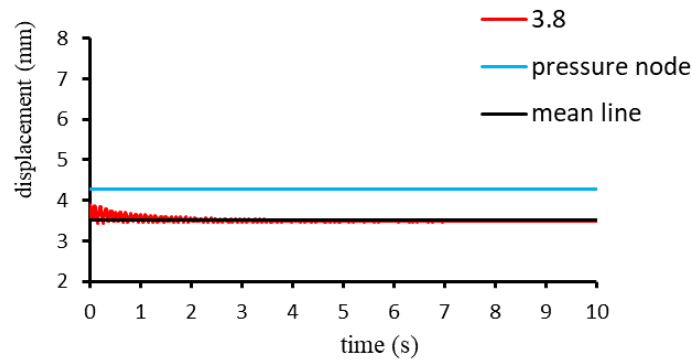
ب



ج

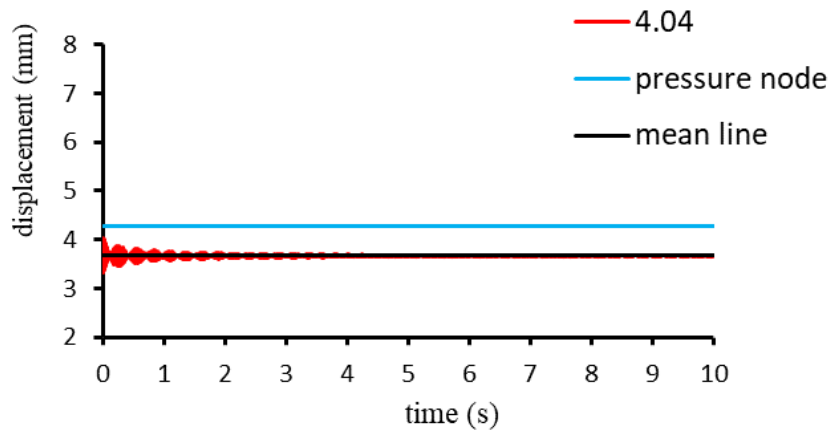
شکل ۴ نمودار جابجایی ذرات رهاشده از موقعیت پایین‌تر از گره فشار: (ب) موقعیت ۱/۴ و (ج) موقعیت اولیه ۱/۸ میلی‌متر

در شکل ۵ نحوه جابجایی و حرکت ذرات رهاشده از نزدیک‌ترین نقاط به گره فشار نشان داده شده است. در این قسمت ذرات با کم‌ترین جابجایی اولیه، به دلیل نزدیک بودن به گره فشار به سمت نقطه تعادل حرکت می‌کنند. هم‌چنین با توجه به نحوه جابجایی، پارامترهای مساحت سطح زیر نمودار در محدوده بالا و پایین خط میانگین دارای بیش‌ترین تقارن است که می‌تواند به معنای تعادل بیش‌تر نیروهای بالابرنده و نیروهای نزول‌دهنده در این نقاط باشد. ذرات با نقطه‌ی شروع نزدیک‌تر به محل تعادل، دارای حرکت یکنواخت‌تر و متقارن‌تری از ابتدای جابجایی هستند. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است ذره با موقعیت ۴/۰۴ دارای حرکت یکنواخت‌تری است و با بیش‌تر شدن فاصله از گره فشار، حرکت اولیه ذرات دارای غیریکنواختی بیش‌تری می‌شود.



الف

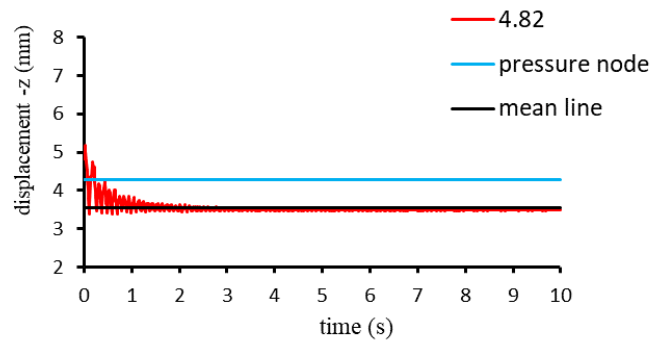
شکل ۵ نمودار جابجایی ذرات رها شده از موقعیت نزدیک به گره فشار (الف) موقعیت ۳/۸۹



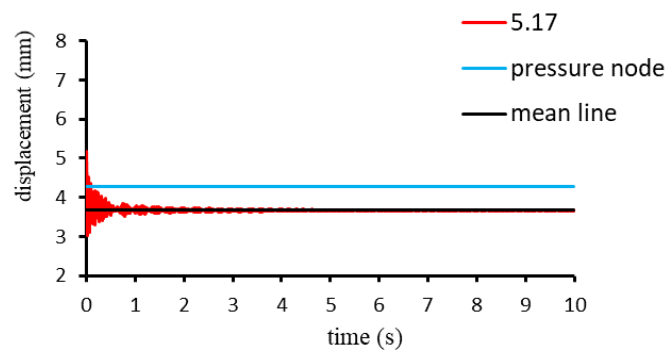
ب

شکل ۵ نمودار جابجایی ذرات رها شده از موقعیت نزدیک به گره فشار (ب) موقعیت ۴/۰۴

در ادامه نمودار جابجایی ذرات رها شده از بالای گره فشار در شکل ۶ نشان داده شده است. ذرات در این موقعیت به دلیل تمایل حرکتی خود برای رسیدن به گره فشار به سمت پایین هدایت می‌شوند. نمودار جابجایی این ذرات دارای مساحت زیر نمودار بزرگ‌تر در قسمت پایین خط میانگین هستند.

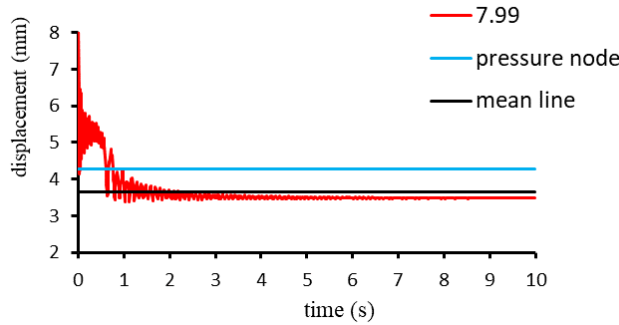


الف



ب

شکل ۶ نمودار جابجایی ذرات رها شده از موقعیت پایین‌تر از گره فشار: الف) موقعیت اولیه ۴/۸۲



ج

شکل ۶ نمودار جابجایی ذرات رها شده از موقعیت پایین‌تر از گره فشار: (ب) ۵/۱۷ و (ج) ۷/۹۹ میلی‌متر

جدول ۱ موقعیت‌های اولیه منجر به تعلیق، فاصله‌ی ذرات رها شده از گره فشار، دامنه‌ی نوسانی ذرات در ۳ بازه‌ی زمانی متفاوت، زمان پایداری و صعود را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشخص است در موقعیت ۳/۸ و ۴/۰۴ که نزدیک‌ترین ذرات به گره فشاری هستند، شاهد کم‌ترین دامنه‌ی نوسانی از ابتدای حرکت هستیم و با فاصله از این دونقطه به سمت پایین یا بالای جدول میزان دامنه‌ی نوسانی افزایش پیدا می‌کند. درحالی که این میزان اختلاف، به دلایل ذکر شده در زمان انتهایی تعلیق به طرز چشم‌گیری کاهش پیدا کرده است.

از دیگر موارد تحت‌تأثیر رهائش اولیه، زمان رسیدن به پایداری ذرات تعلیق شده است. هرچه ذرات از نقاط نزدیک‌تری به گره فشار رها شوند، به دلیل نیاز به طی فاصله کم‌تر تا محل تعادل و قرارگیری در معرض نیروهای متعادل‌تر، حرکت با دامنه کم‌نوسان‌تری را تجربه می‌کنند و با طی زمان کوتاه‌تری دامنه حرکت نوسانی کاهش یافته و معطوف به نوسان یکنواخت‌تر حول نقطه تعادل می‌شود. برای محاسبه‌ی زمان پایداری از مفهوم زمان نشست^۱ استفاده شد. درواقع زمان پایداری، زمان رسیدن به ۵٪ مقدار نهایی (گره فشار) در نظر گرفته شد. همان‌طور که در جدول ۱ نیز مشخص است، ذره با موقعیت اولیه‌ی رهائش ۰۴/۰۴ میلی‌متر، به‌عنوان نزدیک‌ترین ذره به گره فشار دارای کم‌ترین زمان پایداری است و در ذرات دیگر به نسبت میزان افزایش فاصله از گره فشار، زمان پایداری افزایش می‌یابد. ظاهراً افزایش زمان رسیدن به پایداری در ذرات رها شده در نزدیکی بازتابنده، به‌میزان بیش‌تری اتفاق می‌افتد. همچنین شکل ۷ نمودار حرکت ذرات با موقعیت اولیه ۴/۰۴ (نزدیک‌ترین ذره تعلیق شده به گره فشار) و ۷/۹۹ (دورترین ذره تعلیق شده به گره فشار) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است ذره با موقعیت اولیه ۷/۹۹ نسبت به ذره با موقعیت ۴/۰۴ در طی زمان طولانی‌تری به پایداری رسیده است. در ادامه زمان صعود نمودار جابجایی ذرات نیز مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در جدول ۱ نیز مشخص است، کم‌ترین زمان صعود مربوط به ذره با نزدیک‌ترین فاصله از گره فشار (۴/۰۴ میلی‌متر) و بیش‌ترین زمان صعود مربوط به ذره با موقعیت نزدیک‌ترین حالت به بازتابنده و بیش‌ترین فاصله از گره فشار (۷/۹۹ میلی‌متر) است، اما به‌صورت کلی رابطه و روند مشخصی بین زمان صعود و فاصله رهائش ذره از گره فشار مشاهده نشد.

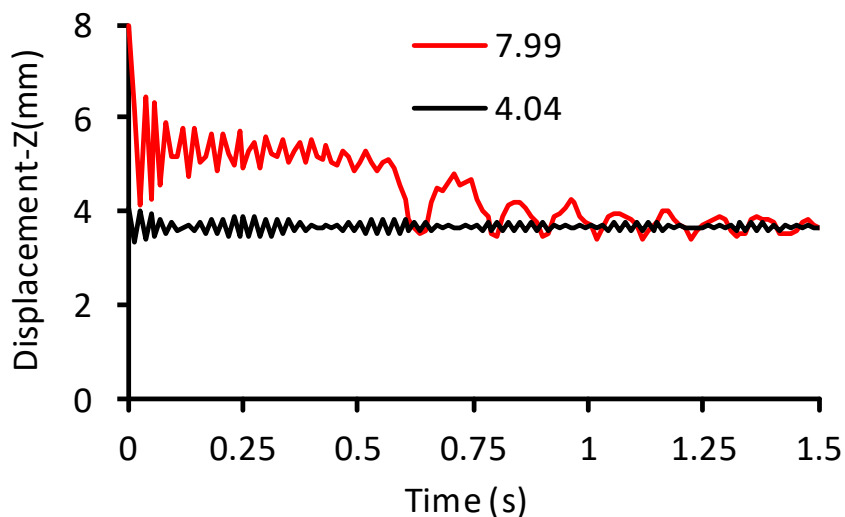
اگرچه فاصله از گره فشار بر پایداری و دامنه نوسان تأثیرگذار است؛ اما میزان تأثیر این پارامتر در نقاط بالاتر از گره فشار (نزدیک به بازتابنده) بیش‌تر از نقاط پایین گره فشار (نزدیک به مبدل) است. در شکل ۸ نمودار حرکت دو ذره با موقعیت ۷/۹۹ و ۰/۴۵ که هر دو دارای فاصله‌ی حدودی ۳ میلی‌متر از گره فشار هستند، نشان داده شده است. باوجود اغتشاش اولیه نسبتاً زیاد در حرکت هر دو ذره، رسیدن به پایداری سریعتر در رفتار ذره با موقعیت پایین گره فشار مشاهده شده است. به‌نظر می‌رسد ذراتی که در قسمت نزدیک به مبدل رها می‌شوند باوجود فاصله از نقطه تعادل، وضعیت پایداری را نسبت به ذرات نزدیک به بازتابنده تجربه می‌کنند. عدم تقارن در رفتار ذرات نزدیک به مبدل و بازتابنده، براساس معادلات گورکوف به‌دلیل ایجاد چگالی

^۱ Sattling time

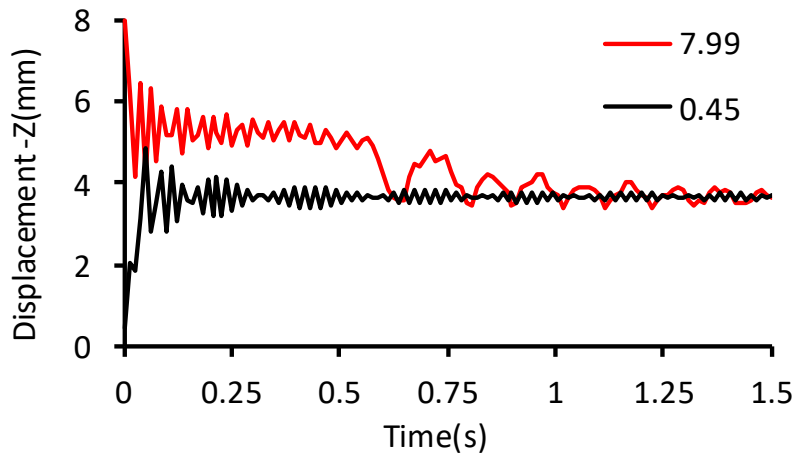
انرژی بیش‌تر در اطراف مبدل است که باعث تاثیر بیش‌تر نیروی صوتی بر ذرات این منطقه و غلبه بهتر بر نیروی گرانش می‌شود در نتیجه ذرات نوسانات کم‌تری داشته و باوجود ایجاد فاصله از گره سریع‌تر از ذرات قرار گرفته در نزدیکی بازتابنده به پایداری می‌رسند.

جدول ۱ موقعیت اولیه ذرات تعلیق شده به‌همرا دامنه نوسانی در سه بازه‌ی متفاوت

موقعیت اولیه ذرات در راستای محور Z (میلی‌متر)	فاصله اولیه ذرات رها شده از گره فشار (میلی‌متر)	دامنه نوسانی ذره در ۱ ثانیه ابتدایی حرکت (میلی‌متر)	دامنه نوسانی ذره در ۱ ثانیه دوم حرکت (میلی‌متر)	دامنه نوسانی ذره در ۱ ثانیه انتهایی حرکت (میلی‌متر)	زمان پایداری (ثانیه)	زمان صعود (ثانیه)
۰/۴۵	۳/۸۳	۴/۴۱	۰/۲۱	۰/۰۱۴	۲	۰/۰۴۸
۱/۴	۲/۸۸	۳/۰۷۷	۰/۲۲	۰/۰۱۴	۱/۵۵	۰/۰۲۴
۱/۸۹	۲/۳۹	۲/۷۱	۰/۲۱	۰/۰۱۲	۱/۳۲	۰/۰۳۶
۳/۸	۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۱۹	۰/۰۱۰	۱/۲۲	۰/۰۴۴
۴/۰۴	۰/۲۴	۰/۷۲	۰/۱۸	۰/۰۱۳	۰/۸۹	۰/۰۰۸
۴/۸	۰/۵۲	۱/۸۰	۰/۳۸	۰/۰۱۲	۱/۱۹	۰/۱۰۸
۵/۱۷	۰/۸۹	۲/۱۳	۰/۲۲	۰/۰۱۴	۲/۱۶	۰/۰۰۹
۷/۹۹	۳/۷۱	۴/۶۱	۰/۶۴	۰/۰۱۵	۳/۲۶	۰/۶۴



شکل ۷ مقایسه پایداری دو ذره با موقعیت ۴/۰۴ و ۷/۹۹



شکل ۸ مقایسه وضعیت دو ذره با موقعیت ۰/۴۵ (پایین گره فشار) و ۷/۹۹ (بالای گره فشار)

۳-۲- تأثیر موقعیت اولیه بر پارامترهای a,b,c

در مورد هر ذره تعلیق شده، باتوجه به نمودار جابه‌جایی، پارامترهای a,b,c محاسبه و با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج محاسبات در جدول ۲ نشان داده شده است. مقایسه نتایج حاصل نشان می‌دهد در نقاط بالای گره فشار پارامتر b بزرگ‌تر از پارامتر a است، در نتیجه مقدار پارامتر c عددی بزرگ‌تر از ۱ به دست آمده است که به معنای غلبه‌ی نیروهای است که ذره را به سمت پایین هدایت می‌کنند. در مورد نقاط پایین گره، عکس این مسئله صادق است. در این قسمت پارامتر a بزرگ‌تر از پارامتر b است و مقدار پارامتر c کوچک‌تر از ۱ است که نشان دهنده‌ی غلبه‌ی نیروهای بالابرنده است. این موضوع نیز به روشنی مطالعات پیشین در زمینه‌ی تمایل ذرات به قرارگیری و پایداری در نقاط گره فشاری را تأیید می‌کند. البته همان‌طور که در جدول مشخص است ذرات با موقعیت ۳/۸ و ۴/۰۴ با وجود قرارگیری در قسمت پایین گره فشار دارای پارامتر b بزرگ‌تر از پارامتر a است، که مشابه رفتار ذرات بالای گره است. دلیل این امر وجود نیروی گرانش و تعادل نیروها در قسمتی پایین‌تر از گره فشار است. که این موضوع نیز تأییدکننده پژوهش‌های پیشین در رابطه با پایداری ذرات در محلی زیر گره فشار است. با بیش‌تر شدن فاصله ذرات از گره فشار، اختلاف بین پارامترهای a و b نیز بیش‌تر می‌شود که نشان‌دهنده عدم تقارن و یکنواختی حرکتی ذرات با قرارگیری در نقاط دورتر از نقطه تعادل است.

جدول ۲ محاسبه‌ی پارامترهای a,b,c برای ذرات تعلیق شده

موقعیت اولیه	پارامتر a	پارامتر b	$ a - b $	پارامتر c
۰/۴۵	۰/۰۹۷۴	۰/۰۷۸۲	۰/۰۱۹۲	۱/۲۴۵۵
۱/۴	۰/۰۵۵۹	۰/۰۴۳۲	۰/۰۱۳۶	۱/۳۲۱۵
۱/۸۹	۰/۰۷۶	۰/۰۶۵۹	۰/۰۱۰۱	۱/۱۵۳۲
۳/۸	۰/۱۶۰۳	۰/۱۶۲۳	۰/۰۰۲	۱/۹۸۷۶
*۴/۰۴	۰/۰۰۸۹	۰/۰۱۱۲	۰/۰۰۲۳	۰/۷۹۴۶
۴/۸	۰/۴۱۶۸	۰/۴۲۴۱	۰/۰۰۷۳	۰/۹۸۲۷
۵/۱۷	۰/۰۵۳۳	۰/۰۶۲۲	۰/۰۰۸۹	۰/۸۵۶۹
۷/۹۹	۱/۱۸۶۶	۱/۲۱۱۸	۰/۰۲۵۲	۰/۹۷۹۲

۳-۳- اعتبارسنجی با نتایج تجربی

برای ارزیابی دقت مدل عددی، داده‌های تجربی حاصل از مرجع [۱۷] با نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول، مقایسه شدند. در مقاله اشاره شده از مبدل با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و توان ۲ کیلو وات استفاده شده است. همچنین از یک دوربین canon 80D

با قابلیت عکس‌برداری ۶۰ فریم در ثانیه برای ثبت حرکت ذرات استفاده شده است. جدول ۳ مقایسه پارامترهای a, b, c به دست آمده از آزمایش تجربی مرجع [۱۷] و نتایج حاصل از شبیه‌سازی را در سه فاصله‌ی هم‌اندازه با نصف طول موج، طول موج و سه برابر طول موج را نشان داده است. خطای نسبی حدود ۲٪ بین پارامتر c تجربی و عددی در سه فاصله اشاره شده، نشان‌دهنده‌ی تطابق مناسب آزمایشات تجربی با نتایج شبیه‌سازی‌ها و دقت قابل قبول روش عددی اتخاذ شده است. خطای بیش‌تر بین پارامتر a, b آزمایشات تجربی و عددی به دلیل عدم در نظرگیری تاثیرات اغتشاشات محیطی بر حرکت ذرات در شبیه‌سازی‌ها است.

جدول ۳ مقایسه پارامترهای a, b, c حاصل از نتایج تجربی مرجع [۱۷] و شبیه‌سازی عددی

پارامترها	نتایج تجربی			نتایج شبیه‌سازی			درصد خطای نسبی		
	$\frac{\lambda}{2}$	λ	$3\frac{\lambda}{2}$	$\frac{\lambda}{2}$	λ	$3\frac{\lambda}{2}$	$\frac{\lambda}{2}$	λ	$3\frac{\lambda}{2}$
a	۰/۳۲۸۱	۰/۰۵۲۳	۰/۰۱۳۶	۰/۲۹۶۹	۰/۰۶۱۲	۰/۰۱۲	۹/۵	۱۶/۹۸	۱۱/۷۶
b	۰/۳۱۵۲	۰/۰۴۲۳	۰/۰۱۳۵	۰/۳۱۲۳	۰/۰۵۰۶	۰/۰۱۱۷	۱۰/۷	۱۹/۶۲	۱۳/۳۳
c	۰/۹۴	۱/۲۳۶۴	۱/۰۰۷	۰/۹۵	۱/۲۰۹۴	۱/۰۲۵	۰/۷۷	۲/۱۷	۱/۰۶

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر موقعیت اولیه رهایش ذرات بر دینامیک حرکت آن‌ها در گپ تعلیق فراصوت، از طریق شبیه‌سازی چند فیزیکی در نرم‌افزار کامسول و اعتبارسنجی تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل جابه‌جایی هشت ذره تعلیق شده از بیست ذره پلی‌پروپیلن رها شده، نشان می‌دهد که با افزایش فاصله ذره از گره فشار (نقطه تعادل)، دامنه نوسانات اولیه به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. اگرچه پس از حدود ۲ ثانیه و نزدیک شدن ذرات به تعادل، دامنه نوسانات همگرا می‌شود، اما رهایش ذرات از فواصل دورتر از گره فشار موجب اغتشاشات شدیدتر اولیه و بی‌نظمی در نمودارهای جابه‌جایی می‌شود. از سوی دیگر، افزایش فاصله از گره فشار زمان رسیدن به پایداری را طولانی‌تر می‌کند. اثر مذکور در نقاط بالای گره (نزدیک به بازتابنده) بسیار بارزتر از نقاط پایین (نزدیک به مبدل) است. این امر بیانگر پایداری بالاتر ذرات در نزدیکی مبدل نسبت به بازتابنده، حتی در فواصل مشابه از گره فشار است. تحلیل پارامترهای دینامیکی (a, b, c) مؤید آن است که ذرات بالای گره فشار دارای مقدار b بزرگ‌تر (غلبه نیروهای نزولی و $c > 1$) و ذرات پایین گره دارای مقدار a بزرگ‌تر (غلبه نیروهای بالابرنده و $c < 1$) هستند که یافته‌ای همسو با مطالعات پیشین در تأیید تمایل ذرات به تثبیت در گره‌های فشار است. در نهایت، اعتبارسنجی تجربی با میانگین خطای نسبی ۲٪، تطابق قابل قبول با نتایج شبیه‌سازی را نشان داد. پژوهش‌های آتی در زمینه‌ی تعلیق فراصوت بر اساس محورهای گفته شده در دستور کار گروه تحقیقاتی است.

- انجام مطالعه‌ی آماری سیستماتیک با در نظر گرفتن آزمایش‌های تکراری و آنالیز عدم قطعیت داده‌ها
- انجام آنالیز حساسیت به‌منظور سنجش تأثیر همزمان فاکتورهای محیطی (رطوبت، دما) و عملیاتی (دامنه فرکانسی، هندسه مبدل) بر پایداری تعلیق.
- بررسی رفتار دینامیکی ذرات فوم خیس و تاثیر پارامترهایی نظیر موقعیت اولیه بر رفتار این ذرات

Authorship Contribution Statement

Zahra Heidari



Biography: MSc student in mechanical engineering, Arak University.

Contribution Statement: Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Dr. Mohammadreza Sheykhholeslami



Biography: Assistant Professor of Manufacturing Engineering at Arak University.

Contribution Statement: Conceptualization, Resources, Supervision, Investigation-review & editing.

Dr. Hamid Abdi



Biography: Senior member of IEEE, School of Engineering, Deakin University.

Contribution Statement: Conceptualization, Investigation.

Davood Dehghani



Biography: Ph.D student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, 38156-88349, Iran.

Contribution Statement: Software.

۵- مراجع

- [1] Hasegawa K, Kono K. Oscillation characteristics of levitated sample in resonant acoustic field. AIP Advances. 2019;9.
- [2] Amouchi A, Sheykhholeslami, M., Mohammadi, R., Mazdak, S.,. Systematic Review of the Theories and Applications of Acoustic Levitation of Liquids[In persian]. Advanced and Smart materials mechanics. 1402;3:310-24.
- [3] Andrade MA, Polychronopoulos S, Memoli G, Marzo A. Experimental investigation of the particle oscillation instability in a single-axis acoustic levitator. AIP Advances. 2019;9.

- [4] Tsujino S, Tomizaki T. Applications of acoustic levitation in chemical analysis and biochemistry. *Acoustic Levitation: From Physics to Applications*. 2020:151-79.
- [5] Wang S, Wang X, You F, Xiao H. Review of ultrasonic particle manipulation techniques: applications and research advances. *Micromachines*. 2023;14:1487.
- [6] Friend J, Yeo LY. Microscale acoustofluidics: Microfluidics driven via acoustics and ultrasonics. *Reviews of Modern Physics*. 2011;83:647-704.
- [7] Mu G, Qiao Y, Sui M, Grattan KT, Dong H, Zhao J. Acoustic-propelled micro/nanomotors and nanoparticles for biomedical research, diagnosis, and therapeutic applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023;11:1276485.
- [8] Baer S, Andrade MA, Esen C, Adamowski JC, Schweiger G, Ostendorf A. Analysis of the particle stability in a new designed ultrasonic levitation device. *Review of Scientific Instruments*. 2011;82.
- [9] Hasegawa K, Watanabe A, Abe Y. Acoustic manipulation of droplets under reduced gravity. *Scientific Reports*. 2019;9:16603.
- [10] Barrios G, Rechtman R. Dynamics of an acoustically levitated particle using the lattice Boltzmann method. *Journal of Fluid Mechanics*. 2008;596:191-200.
- [11] Foresti D, Bjelobrk N, Nabavi M, Poulikakos D. Investigation of a line-focused acoustic levitation for contactless transport of particles. *Journal of applied physics*. 2011;109.
- [12] Amoochi A, Sheykholeslami MR, Mohammadi R, Mazdak S, Abdi H. Effect of physical properties on the oscillation of an acoustically levitated droplet. *Journal of Particle Science and Technology*. 2024;10:33-40.
- [13] Röthlisberger M, Schuck M, Kolar JW. Kilohertz-frequency rotation of acoustically levitated particles. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2022;69:1528-34.
- [14] Vashi A, Yadav AS, Nguyen N-T, Sreejith KR. Parametric analysis of acoustically levitated droplet for potential microgravity application. *Applied Acoustics*. 2023;213:109624.
- [15] Pazos Ospina JF, Contreras V, Estrada-Morales J, Baresch D, Ealo JL, Volke-Sepúlveda K. Particle-size effect in airborne standing-wave acoustic levitation: Trapping particles at pressure antinodes. *Physical Review Applied*. 2022;18:034026.
- [16] Vollmer B, Elke WJ, Sracic MW, Suthar K. Investigation and validation of the dynamic response of an acoustically levitated particle using the lattice Boltzmann method. *AIP Advances*. 2020;10.
- [17] Dehghani D, . Sheykholeslami, M. R., Jabbari, A., & Mazdak, S. Investigation of Operational Parameters on the Motional Behavior and Maximum Particle Levitated Density in Ultrasonic Levitation [in Persian]. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 1400; 11:71-82.
- [18] Drewitt JW, Emmens B, Kong Z-H, Drinkwater BW, Barnes AC. MightyLev: An acoustic levitator for high-temperature containerless processing of medium-to high-density materials. *Review of Scientific Instruments*. 2024;95.
- [19] Raffel J, Böhm T, Düsing J, Röhl M, Schilde C, Malshe AP, et al. Ultrasonic Levitation as a Handling Tool for In-Space Manufacturing Processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2024;146:121001.
- [20] Contreras V, Volke-Sepúlveda K. Enhanced standing-wave acoustic levitation using high-order transverse modes in phased array ultrasonic cavities. *Ultrasonics*. 2024;138:107230.
- [21] AB C. COMSOL Reference Manual. Version 5.6 ed2020.
- [22] Griffiths DJ. Introduction to electrodynamics: Cambridge University Press, 2023.
- [23] Clift R, Grace JR, Weber ME. Bubbles, drops, and particles. 2005.

- [24] Hrka S. Acoustic levitation. University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, Ljubljana. 2015;21.
- [25] Bjelobrk N, Foresti D, Dorrestijn M, Nabavi M, Poulikakos D. Contactless transport of acoustically levitated particles. Applied Physics Letters. 2010;97.
- [26] Gor'kov LP. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid. Selected Papers of Lev P Gor'kov 2014. 315-7.
- [27] Inukai A, Birukawa J, Matsumura S. Polypropylene and application of said polypropylene to electric material. Google Patents; 2010.
- [28] Ma S-D, Zhong L-S, Wang W, Hu B, Xu C-X. Application Research Evolution of Ultrasonic Technology in Fabrication of Polymers. Gaofenzi Cailiao Kexue yu Gongcheng/ Polymer Materials Science & Engineering). 2007;23:15-8.
- [29] Xie W, Wei B. Dependence of acoustic levitation capabilities on geometric parameters. Physical Review E. 2002;66:026605.
- [30] Acoustofluidics HB. 7: The acoustic radiation force on small particles., 2012, 12. DOI: <https://doi.org/101039/c2lc21068a> PMID: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22349937>.1014-21.
- [31] Andrade MA, Buiocchi F, Adamowski JC. Finite element analysis and optimization of a single-axis acoustic levitator. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2010;57:469-79.