



## Systematic Review of the Theories and Applications of Acoustic Levitation of Liquids

Abbas Amoochi <sup>a</sup>, Mohammadreza Sheykholeslami <sup>a\*</sup>, Rafat Mohammadi <sup>a</sup>, Siamak Mazdak <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, 38156-88349, Iran


<sup>b</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tafresh University, Tafresh, 79611-39518, Iran

### Review Article

Use your device to scan  
and read the article online



**Citation:** Amoochi A, Sheykholeslami M R, Mohammadi R, Mazdak S. Systematic Review of the Theories and Applications of Acoustic Levitation of Liquids. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(3):310-324.

 <https://10.61186/masm.3.3.310>

### KEYWORDS

Ultrasonic levitation,  
levitation of liquids,  
The force of ultrasound radiation.

### ABSTRACT

The purpose of the levitation process is to neutralize the gravitational force on the sample with the help of a non-contact force and levitate the sample in the air without contacting the secondary surfaces. The benefits of eliminating the contact of a substance with external surfaces have led to the attention of the levitation process. Considering that among the levitation methods, ultrasonic levitation is the only method that can be applied to materials with different physical properties and geometries, levitation of the material in the liquid phase can also be done with the help of this method. The potential of ultrasonic levitation of liquids for use in cases such as pharmaceuticals, biology, controlling the structure of matter, etc., has led to several researches in the field of improving the conditions of this process. In this article, an attempt has been made in the first part to review the theory and analytical relationships of the ultrasonic levitation process, and then in the second part, the studies conducted in the field of improving the conditions of the levitation process and the factors affecting it have been examined. Finally, the future of research in this field has been looked at.

### Extended Abstract

#### 1. Introduction

Eliminating the contact of a material with secondary surfaces eliminates factors like friction, energy loss and the effect of external surfaces on the properties of the material. In the levitation process, by applying a non-contact force with the opposite direction of the gravitational force and the same size to the material, the material can be levitated at the point of application of the force. Therefore, levitation methods are classified based on the force used, which include levitation using magnetic, optical, compressed air, electricity, and ultrasonic waves [1]. acoustic levitation method, unlike other levitation methods, has the ability to suspend materials with different physical properties and shapes, and for this reason, it can be used in a wide range of cases [2]. acoustic suspension also provides the possibility of levitating liquids, as a result of which this method is used in cases such as pharmaceutical sciences, chemistry, biology, etc. [3]. Ultrasonic suspension can be done by two methods, standing waves and near zone, but due to more accuracy in positioning and better control of the suspended sample in the levitation method with the help of standing wave, in this article, this method and related articles are examined and reviewed take.

\* Corresponding author. Tel.: 98-86-32625722; Fax: +988632774031

E-mail address: [m-sheykholeslami@araku.ac.ir](mailto:m-sheykholeslami@araku.ac.ir)

DOI: <https://10.61186/masm.3.3.310>

Received: June 19, 2023; Received in revised form: October 21, 2023; Accepted: December 12, 2023.

© Author



66 years after that the levitation of solid particles using ultrasonic waves was first discovered by Kundt [4] in 1866, the possibility of droplet levitation using this method was reported by Bücks and Müller [5] in 1933. Achieving a mathematical model of the ultrasonic levitation process, in addition to understanding the process, can also play an important role in studying the factors affecting it. The first mathematical model to calculate the force of ultrasonic waves on a particle was presented in a simple form by Rayleigh [6]. In 1934, King [7] obtained a relation to calculate the force acting on a small, solid particle at a compression node from standing waves, which was improved by other researchers in the following years [8-13]. But Gor'kov [14] in 1962 obtained the force on the suspended particle based on the ultrasonic force potential.

The potential of ultrasonic levitation in order to suspend various liquids without contact with the wall or any second body makes it useful in research in fields such as chemistry [3], biology [15], measurement of sample properties [16], separation of two substances [17], structure control [18], vaccine making [19] and so on.

## 2. Theoretical background

In order to levitate a particle at a point, it is necessary that the result of the forces acting on the particle at that point is equal to zero. In acoustic levitation, the force of the ultrasonic waves must be equal to the sum of the forces of gravity, drag, and buoyancy. Therefore, to understand the ultrasonic suspension process, it is necessary to understand the mentioned forces.

## 3. Acoustic radiation force

If two sources of wave propagation are opposite each other and at a distance equal to the multiple of half the wavelength ( $H=n(\lambda/2)$ ), produces transient waves with the same properties, then the two waves form a standing wave. Also, according to Figure 1 placing a reflector in front of the wave propagation source equal to the mentioned distance also leads to the formation of a standing wave, and as a result, the particle can be suspended in the pressure node.

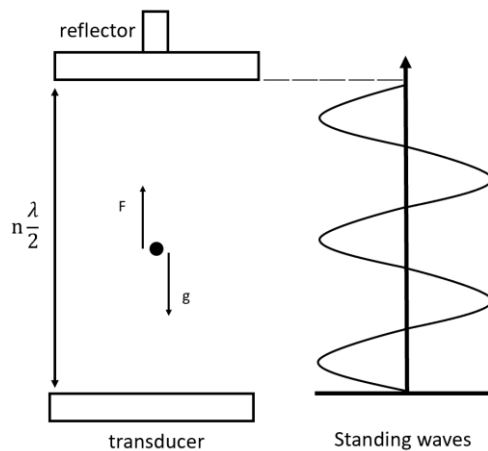


Figure 1. Standing waves and levitation system presented by [20]

In the process of levitation with the help of a standing wave, the waves produced by a continuous medium (air) are propagated and when the desired object is placed at the pressure node points of this wave, the necessary force for suspension is applied to it. The accurate calculation of the amount of the applied force requires the solution of the wave equation according to the initial and boundary conditions. Rayleigh [6] in 1902 calculated for the first time the average pressure produced by the vibration of a rod in terms of time. But the calculation of the effective force on a particle in the suspension process requires the exact solution of the wave equation according to the initial conditions of the suspension. In 1934, King [7] obtained the force of static ultrasound waves on an object, provided that it is spherical and much smaller than the length of the waves. He used concepts such as continuity, fluid state and Euler's equation to calculate this relationship. He considered the force caused by the standing waves to be more than the transient force with similar conditions [7].

Westervelt [8-10] was able to obtain the force from standing waves to the body placed in a node for any geometry by developing King's relations and proposed an integral relation for this purpose. He also calculated the energy dissipated at the particle level. estimated Embleton [11, 12] in 1954, based on King's relations, expressed relations for the force of spherical and cylindrical transient waves. In 1955, Yosioka [13] considered the

compressibility of the solid particle and improved King's calculations according to it, he also mentioned the tendency of the released bodies to settle in the knot. Hasegawa [22] in 1969 considered the effect of the elasticity of the body as well as the absorption of some wave power by the body to improve the force calculation. Another important result mentioned by Hasegawa was the ability to suspend an object larger than a wavelength.

In 1962, Gor'kov [14] worked differently from King to calculate the force of ultrasonic waves and after assuming air as an ideal fluid, he calculated the force on the spherical sample using the potential force of the waves. It is noteworthy that Gorkov's relationship can be used to calculate the force on solid particles and droplets [14].

#### 4. Investigating and improving factors affecting the levitation process

It is worth mentioning that the type of components and the geometry of the components of the ultrasonic levitation system (transducer-reflector) can affect the conditions of the levitation process such as the duration of the suspension of the object, stability, speed, etc., so extensive research is needed to achieve the set suspension has been done under the best working conditions, the most important of which are mentioned in this section. In 1946, Hanson et al. [29] replaced the flat reflector with a curved reflector, which increased the force concentration at the point of levitation of the droplet. Also, they were able to suspend droplets up to a radius of 3 mm. In 1974, Wang et al. [30] were able to suspend the sample and apply heat to the sample with the help of a suspension set including three transducers. They introduced this suspension method suitable for use in space research. Weimark [31] in 1975, using a furnace around the suspension assembly, controlled the suspended sample by applying melting heat and changing its shape by changing the ultrasonic force. They measured the amount of ultrasonic power was applied to the droplet by changing the distance between the transducer and the reflector. In 2001, Xie and Wei [32] obtained the optimal value for the reflector bending in the suspension assembly according to the suspension basics and were able to suspend a tungsten sample as a high-density particle in this assembly. Otsuka and Nakane [33] in 2002 reported that the exertion of two forces of gravity and ultrasound waves into the levitated droplet lead to its deformation. They also mentioned that the increase in frequency accelerates the collapse of the droplet. In 2009, Weber et al. [34] were able to suspend a droplet of water for one hour using two transducers in front of each other and were able to examine the structure of the drop during the suspension. They also mentioned that each temperature increase in the converter causes a 4 Hz change in the resonance frequency of the set. In 2011, Bear et al. [35] proved that the use of a transducer with a curved surface, along with the use of a curved reflector as shown in Figure 3, significantly improves droplet oscillation during suspension. According to the data recorded at the same time (Place the drop in the knot for 25 seconds), the dropped droplet in the assembly with the curved transducer surface experienced an oscillation amplitude close to half of the oscillation amplitude of the suspended drop in the assembly with the flat transducer.

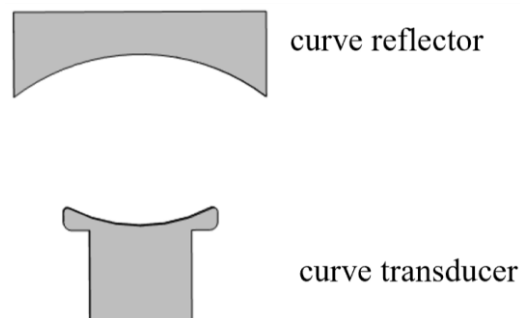


Figure 2. levitation set with two curved surfaces presented by [35]

#### 5. Liquid levitation applications

After the possibility of levitation of liquids by standing waves [5] was reported in 1933, a wide range of possible applications for it was proposed. Measuring the properties of suspended droplets is one of the properties of liquid suspensions. In 1995, Bayazitoglu [45] proposed the measurement of the surface tension of a suspended drop based on the amount of change in the shape of the drop as a result of forces applied to it. Tian et al [46] in 1995 proposed the magnitude of the surface tension of a suspended droplet based on its fluctuation rate before reaching stability at the node. Shen et al [16] in 2010 were able to calculate the surface tension of the drop very close to the results of other methods by improving the Rayleigh relations and recording the behavior of the drop according to the amount of force applied to it. Mixing and transfer of droplets can be mentioned as another application of the ultrasonic liquid suspension process.

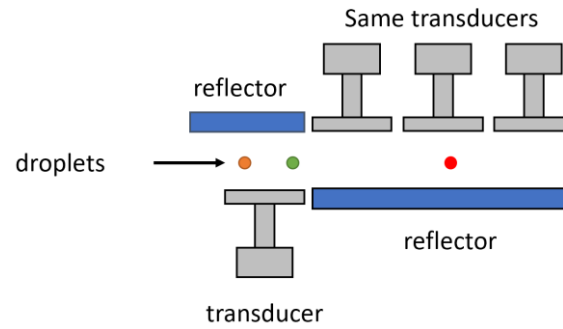


Figure 3. A suitable system for mixing and moving samples presented by [37]

In 2012, Ding et al [49], were able to use a 65 mm long aluminum plate connected to the transducer as a wave generator and a cut tube as a reflector, according to the phase difference created in the wave, to create, and move the drop along the plane.

### 5. The future of acoustic levitation

Along with the advantages of ultrasonic levitation, such as the ability to accurately control the location and speed of movement, improvements and advances in the design and construction of levitation assemblies have led to more accurate control of the process of ultrasonic suspension of liquids. As a result, applications such as use in special production processes, material handling in production and pharmaceutical lines can be made possible by conducting research on the factors affecting the drop shape change during levitation and controlling them, how to increase stability and improve the collection.



## مروری نظام‌مند بر مبانی و کاربردهای تعلیق فراصوت مایعات

عباس عموچی الف، محمد رضا شیخ‌الاسلامی ب\*، رفعت محمدی پ، سیامک مزدک ت

الف کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، [abbas.amoochi97@gmail.com](mailto:abbas.amoochi97@gmail.com)

ب استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، [m-sheykholeslami@araku.ac.ir](mailto:m-sheykholeslami@araku.ac.ir)

ج استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، [r-mohammadi@araku.ac.ir](mailto:r-mohammadi@araku.ac.ir)

د استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران، [s.mazdak@tafreshu.ac.ir](mailto:s.mazdak@tafreshu.ac.ir)

چکیده	واژگان کلیدی
منظور از فرایند تعلیق خنثی کردن نیروی جاذبه وارد به نمونه به کمک یک نیروی غیرتماسی و تعلیق نمونه در هوا بدون تماس با سطوح ثانویه می‌باشد. فواید حذف تماس یک ماده با سطوح خارجی باعث توجه قرار گرفتن فرایند تعلیق شده‌است. با توجه به این موضوع که در میان روش‌های تعلیق، تعلیق فراصوت تنها روشی است که برای مواد با خواص فیزیکی و هندسه‌های متفاوت قابل اعمال است، تعلیق ماده در فاز مایع نیز به کمک این روش قابل انجام است. پتانسیل تعلیق فراصوت مایعات برای استفاده در مواردی مانند داروسازی، زیست‌شناسی، کنترل ساختار ماده و غیره باعث انجام تحقیقات متعددی در زمینه بهبود شرایط این فرایند شده‌است. در این مقاله سعی شده‌است در بخش اول مروری بر تئوری و روابط تحلیلی فرایند تعلیق فراصوت انجام شود و سپس در بخش دوم مطالعات انجام شده در زمینه بهبود شرایط فرایند تعلیق و عوامل موثر بر آن مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت نگاهی به آینده تحقیقات در این زمینه شده‌است.	تعلیق فراصوت، تعلیق مایعات، نیروی تابش فراصوت.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۲۶
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱

### ۱- مقدمه

حذف تماس یک ماده با سطوح ثانویه باعث حذف مواردی مانند اصطکاک، اتلاف انرژی و تاثیر سطوح خارجی بر خواص ماده می‌شود. در فرایند تعلیق با اعمال یک نیروی غیرتماسی با جهت مخالف نیروی جاذبه و اندازه برابر آن به ماده، می‌توان ماده را در نقطه اعمال نیرو معلق کرد. بنابراین روش‌های تعلیق بر اساس نیروی به‌کاررفته دسته‌بندی می‌شوند که تعلیق به کمک نیروی مغناطیسی، نوری، هوای فشرده، الکتریکی و امواج فراصوت جزو آن‌ها هستند [۱]. روش تعلیق فراصوت<sup>۱</sup> برخلاف روش‌های دیگر تعلیق، قابلیت تعلیق مواد با خواص فیزیکی و شکل متفاوت را دارا می‌باشد و به همین دلیل در طیف وسیعی از موارد قابل استفاده است [۲]. تعلیق فراصوت همچنین امکان تعلیق مایعات را فراهم می‌کند که در نتیجه این روش در مواردی مانند علوم داروسازی، شیمی، زیست‌شناسی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. تعلیق فراصوت به دو روش موج ایستا<sup>۲</sup> و ناحیه نزدیک<sup>۳</sup> قابل انجام است، اما به دلیل دقت بیشتر در موقعیت‌دهی و کنترل بهتر نمونه تعلیق‌شده در روش تعلیق به کمک موج ایستا در این مقاله این روش و مقالات مرتبط با آن مورد بررسی و مرور قرار می‌گیرد.

<sup>1</sup> Acoustic levitation

<sup>2</sup> Standing wave acoustic levitation

<sup>3</sup> Near-field acoustic levitation

۶۶ سال پس‌ازآنکه تعلیق ذرات جامد به کمک امواج فراصوت اولین بار توسط کانت آگوست [۴] در سال ۱۸۶۶ کشف شد، امکان تعلیق قطره به کمک این روش توسط باکس و مولر [۵] در سال ۱۹۳۳ گزارش شد.

دستیابی به یک مدل ریاضی از فرایند تعلیق فراصوت علاوه به درک فرایند، در مطالعه عوامل مؤثر بر آن نیز می‌تواند نقش مهمی ایفا کند. اولین مدل ریاضی به‌منظور محاسبه نیروی وارد از طرف امواج فراصوت به یک ذره توسط ریلیگ [۶] به شکل ساده ارائه شد. لوییس کینگ [۷] در سال ۱۹۳۴ رابطه‌ای برای محاسبه نیروی وارد از طرف امواج ایستا به یک ذره کوچک و جامد در گره فشاری به دست آورد، که در سال‌های پس‌ازآن توسط محققان دیگر بهبود داده شد [۸-۱۳]. اما گورکوف [۱۴] در سال ۱۹۶۲ نیروی وارد بر ذره تعلیق شده را بر اساس پتانسیل نیروی فراصوت به دست آورد.

پتانسیل تعلیق فراصوت برای تعلیق مایعات گوناگون بدون تماس با دیواره یا هرگونه جسم خارجی باعث استفاده آن در پژوهش‌هایی از قبیل زیست‌شناسی [۱۵]، اندازه‌گیری خواص نمونه [۱۶]، جداسازی دو ماده [۱۷]، کنترل ساختار [۱۸]، ساخت واکسن [۱۹] و غیره شده است.

## ۲- تئوری و مدل ریاضی

به‌منظور تعلیق یک ذره در یک نقطه نیاز است که برآیند نیروهای وارد بر ذره در آن نقطه برابر صفر شود. در تعلیق فراصوت، نیروی امواج فراصوت<sup>۴</sup> می‌بایست برابر با برآیند نیروهای جاذبه<sup>۵</sup>، پسا<sup>۶</sup> و شناوری<sup>۷</sup> باشد. بنابراین برای درک فرایند تعلیق فراصوت نیاز است نیروهای ذکر شده مرور گردند.

### ۲-۱- نیروی جاذبه

نیروی جاذبه یا نیروی گرانش به‌واسطه جرم جسم از سوی کره زمین به آن وارد می‌شود. نیروی جاذبه عموماً به‌وسیله نیروی تکیه‌گاه تماسی خنثی می‌شود، اما در فرایند تعلیق این نیرو به‌وسیله یک نیروی غیرتماسی خنثی می‌شود. جهت نیروی جاذبه همواره به سمت زمین است و مقدار آن به کمک رابطه ۱ برای یک جسم کروی با شعاع  $r$  و چگالی  $\rho$  قابل محاسبه است [۲۰].

$$F_{gravity} = \frac{4\pi r^3 \rho g}{3} \quad (1)$$

### ۲-۲- نیروی پسا

در زمان انجام فرایند تعلیق، جسم مورد نظر پیش از رسیدن به ثبات در نقطه تعلیق، یک حرکت نوسانی حول این نقطه را تجربه می‌کند. نیروی پسا به دلیل اختلاف سرعت میان ذره و سیال زمینه (هوا)، در راستای مخالف حرکت ذره به آن وارد می‌شود. این نیرو از طرف هوا به جسم وارد می‌شود و بر اساس رابطه ۲ قابل محاسبه است [۲۱].

$$F_{drag} = \frac{1}{t_p} m_p (u - v) \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $u$  سرعت سیال،  $v$  سرعت ذره،  $m_p$  جرم جسم و  $t_p$  سرعت پاسخ است که به کمک رابطه ۳ قابل محاسبه است [۲۱].

$$t = \frac{d_p \rho_p}{18\mu} \quad (3)$$

<sup>4</sup> Acoustic radiation force

<sup>5</sup> Gravity force

<sup>6</sup> Drag force

<sup>7</sup> Buoyant force

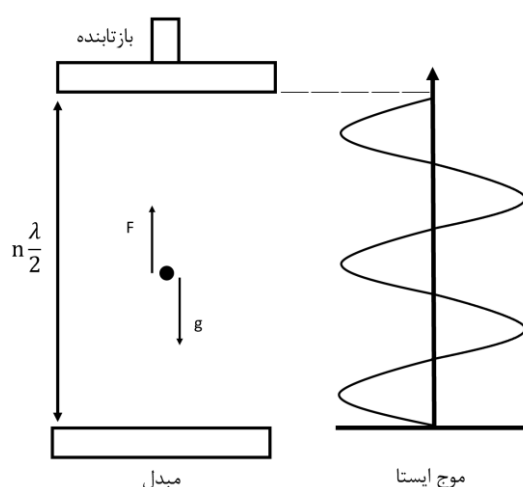
در رابطه ۳ قطر ذره،  $\rho_p$  چگالی ذره و  $\mu$  ویسکوزیته سیال زمینه می‌باشند [۲۱].

### ۲-۳- نیروی شناوری

هنگام قرار گرفتن جسم در سیال زمینه (هوا) به دلیل اختلاف فشار بالا و پایین جسم نیرویی در راستای مخالف نیروی جاذبه از طرف هوا به جسم وارد می‌شود. به دلیل ناچیز بودن اندازه این نیرو در مقایسه با نیروهای دیگر از آن در فرایند تعلیق می‌توان چشم‌پوشی کرد.

### ۲-۴- نیروی امواج فراصوت

اگر دو منبع انتشار موج مقابل یکدیگر و در فاصله‌ای برابر با مضرب نصف طول موج ( $H = n \left(\frac{\lambda}{2}\right)$ ) قرار بگیرند و امواج گذرا با خواص یکسان تولید کنند، برآیند دو موج یک موج ایستا تشکیل می‌دهد. همچنین قرار دادن یک بازتابنده در مقابل منبع انتشار امواج برابر با فاصله ذکر شده نیز منجر به تشکیل موج ایستا و در نتیجه تعلیق ذره در گره فشاری همانند شکل ۱ می‌شود [۲۰].



شکل ۱ امواج ایستا و مجموعه تعلیق ارائه شده در [۲۱]

در فرایند تعلیق به کمک موج ایستا، امواج تولید شده به وسیله یک محیط پیوسته (هوا) انتشار یافته و زمانی که جسم مورد نظر در نقاط گره فشاری این موج قرار داده شود نیروی لازم جهت تعلیق به آن وارد می‌شود. محاسبه دقیق مقدار نیروی وارد شده نیاز به حل رابطه موج با توجه به شرایط مرزی و اولیه دارد.

ریلیگ [۶] در سال ۱۹۰۲ برای اولین بار محاسبه فشار میانگین تولید شده توسط ارتعاش یک میله را برحسب زمان محاسبه کرد. ولی محاسبه نیروی مؤثر بر یک ذره در فرایند تعلیق نیاز به حل دقیق رابطه موج با توجه به شرایط اولیه تعلیق دارد. لوییس کینگ [۷] در سال ۱۹۳۴ نیروی وارد از طرف امواج فراصوت ایستا به یک جسم را به شرط کروی و بسیار کوچک‌تر بودن از طول امواج به دست آورد. او از مفاهیمی مانند پیوستگی<sup>۸</sup>، حالت سیال<sup>۹</sup> و رابطه اویلر<sup>۱۰</sup> برای محاسبه این رابطه استفاده کرد. او نیروی ناشی از موج ایستا را بیشتر از نیروی گذرا با شرایط مشابه دانسته و رابطه ۴ را برای محاسبه آن پیشنهاد داد [۷].

$$\overline{P}_k^1 = 2(\pi a^2)(ka) \sin(2kh) F_k^1 \frac{\rho_0}{\rho_1} \quad (4)$$

در رابطه ۴ چگالی انرژی برای امواج ایستا است در هر صفحه می‌باشد که طبق رابطه ۵ قابل محاسبه است، همچنین  $a$  شعاع کره جامد،  $\rho_0$  چگالی محیط،  $\rho_1$  چگالی ذره و  $k$  برابر عدد موج می‌باشد [۷]:

<sup>8</sup> Equation of continuity

<sup>9</sup> Equation of state of the fluid

<sup>10</sup> Euler's equation (equation of conservation)

$$F_k^1 \left( \frac{\rho_0}{\rho_1} \right) = \frac{1 + \frac{2}{3} \left( 1 - \frac{R}{\rho_2} \right)}{2 + \frac{\rho_0}{\rho_1}} \quad (5)$$

وسترولت [۸-۱۰] توانست با توسعه روابط کینگ نیروی وارد از طرف امواج ایستا به جسم قرار گرفته در یک گره را برای هر هندسه‌ای بدست آورد و برای این منظور یک رابطه انتگرالی پیشنهاد کرد، او همچنین انرژی اتلافی در سطح ذره را تخمین زد. امبلتون [۱۱، ۱۲] در سال ۱۹۵۴ بر اساس روابط کینگ، روابطی برای نیروی امواج گذرا کروی و استوانه‌ای بیان کرد. در سال ۱۹۵۵ یوسیکا [۱۳] تراکم‌پذیری ذره جامد را در نظر گرفت و محاسبات کینگ را با توجه به آن بهبود بخشید، او همچنین تمایل اجسام رها شده به قرارگیری در گره را ذکر کرد. هاوسگا [۲۲] در ۱۹۶۹ اثر خاصیت ارتجاعی جسم و همچنین جذب مقداری از نیرو موج توسط جسم را برای بهبود محاسبه نیرو در نظر گرفت. دیگر نتیجه مهم ذکر شده توسط هاوسگا قابلیت تعلیق جسم بزرگتر از طول موج بود.

در سال ۱۹۶۲ گورکوف [۱۴] برای محاسبه نیروی امواج فراصوت متفاوت از کینگ عمل کرد و پس از فرض هوا به‌عنوان سیال ایده‌آل، نیروی وارد به نمونه کروی را به کمک نیروی پتانسیل امواج محاسبه کرد. قابل توجه است رابطه گورکوف به‌منظور محاسبه نیروی وارد به ذره جامد و قطره قابل‌استفاده است. بر اساس پیشنهاد گورکوف نیروی وارد به ذره توسط رابطه ۶ قابل‌محاسبه است که در آن U پتانسیل نیروی امواج است و رابطه ۷ برای محاسبه آن پیشنهاد شده است [۱۴].

$$F = -\nabla U_{rad} \quad (6)$$

$$U = 2\pi r^3 \left[ \left( \frac{\overline{P_{in}^2}}{3\rho c^2} \right) f_1 - \left( \frac{\rho(v_{in}.v_{in})}{2} \right) f_2 \right] \quad (7)$$

مؤلفه ۲ نشان‌دهنده شعاع جسم،  $\rho$  برابر با چگالی محیط و c نشان‌دهنده سرعت صوت در محیط است. همچنین مقادیر  $f_1$  و  $f_2$  می‌توان به ترتیب از روابط ۸ و ۹ به دست آورد [۱۴].

$$f_1 = 1 - \frac{\rho c^2}{\rho_s c_s^2} \quad (8)$$

$$f_2 = \frac{2(\rho_s - \rho)}{(2\rho_s + \rho)} \quad (9)$$

در روابط ۸ و ۹  $\rho_s$  چگالی ذره و  $c_s$  سرعت صوت در ذره هستند. دو مقدار  $\overline{P_{in}^2}$  و  $(v_{in}.v_{in})$  به ترتیب فشار و سرعت ذره در نقطه معلق شده هستند و بر اساس روابط ۱۰ و ۱۱ قابل محاسبه می‌باشند [۲۳].

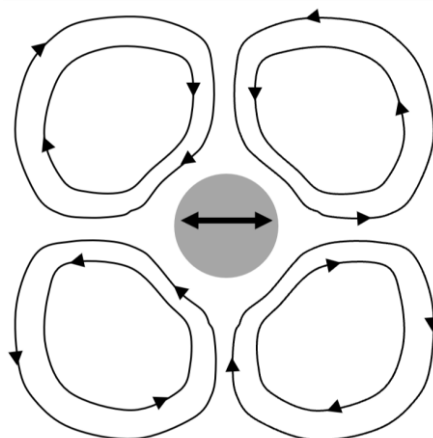
$$\overline{P_{in}^2} = \frac{P_s^2}{2} \cos^2(kz) \quad (10)$$

$$(v_{in}.v_{in}) = \frac{1}{2} \left( \frac{P_s}{\rho_s c_s} \right)^2 \sin^2(kz) \quad (11)$$

در روابط ۱۰ و ۱۱، k برابر عدد موج و  $P_s$  برابر با دامنه فشار اولیه است. به منظور به کارگیری آسان‌تر در تحقیقات، بارمتر [۲۴] در سال ۱۹۸۵ رابطه گورکوف را در دستگاه‌های استوانه‌ای و کروی نیز محاسبه کرد.

## ۵-۲- دینامیک سیالات

در تعلیق قطره تغییر شکل آن حین تعلیق اهمیت بسیاری دارد. این تغییر شکل به دلیل وارد شدن نیروهای ذکر شده در خلاف جهت یکدیگر در نقطه گره فشاری به قطره می‌باشد. همچنین جریان‌های داخل و اطراف قطره در روند تغییر شکل قطره موثر هستند [۲۵]. امواج ایستا در گپ تعلیق می‌توانند باعث ایجاد دو جریان ریلیگ و اکارت شوند که مطابق شکل ۲ در لایه‌های اطراف قطره ایجاد می‌شوند. این جریان‌های متناسب با خواص موج و خصوصیات فیزیکی ماده زمینه (هوا) به وجود می‌آیند [۲۶].



شکل ۲ الگوی جریان در سیال زمینه اطراف جسم تعلیق شده ارائه شده در [۲۶]

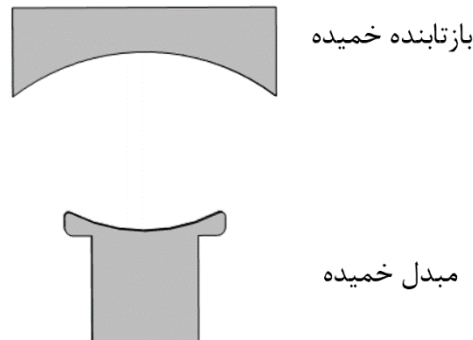
تنش سطحی ایجادشده در سطح قطره تابع ویسکوزیته آن است [۲۷]، همچنین اثر برنولی که به دلیل اختلاف فشار بالا و پایین قطره ایجاد می‌شود منجر به تولید جریانی در داخل و اطراف قطره می‌شوند که باعث چرخش قطره شده و باعث تغییر شکل قطره می‌شوند. قابل توجه است که ویسکوزیته و کشش سطحی تأثیر مستقیمی بر تغییر شکل قطره و روند آن دارند [۲۸].

### ۳- بررسی و بهبود عوامل مؤثر بر تعلیق

قابل توجه است که نوع اجزا تشکیل‌دهنده و هندسه اجزا مجموعه تعلیق فراصوت<sup>۱۱</sup> (مبدل-بازتابنده) می‌توانند بر شرایط فرایند تعلیق مانند مدت زمان تعلیق جسم، پایداری، سرعت و غیره تأثیرگذار باشند، بنابراین تحقیقات گسترده‌ای به‌منظور دستیابی به مجموعه تعلیق با بهترین شرایط کاری انجام شده است که در این بخش به مهم‌ترین آنان اشاره می‌شود. در سال ۱۹۴۶ هانسون و همکاران [۲۹] یک بازتابنده خمیده را جایگزین بازتاب تخت کردند که باعث افزایش تمرکز نیرو در نقطه تعلیق قطره شد. همچنین آن‌ها توانستند قطره تا شعاع ۳ میلی‌متر را تعلیق کنند. در سال ۱۹۷۴ وانگ و همکاران [۳۰] توانستند به کمک مجموعه تعلیق با سه مبدل<sup>۱۲</sup> نمونه را تعلیق و به نمونه اعمال حرارت کنند. آن‌ها این روش تعلیق را مناسب برای استفاده در پژوهش‌های فضایی معرفی کردند. وایمارک [۳۱] در سال ۱۹۷۵ با استفاده از یک کوره در اطراف مجموعه تعلیق، نمونه تعلیق شده را با اعمال حرارت ذوب و شکل آن را با تغییر نیروی فراصوت کنترل کردند. آنان مقدار نیروی فراصوت را با استفاده از تغییر فاصله مبدل و بازتابنده انجام دادند. ژای و وی [۳۲] در سال ۲۰۰۱ مقدار بهینه برای خمیدگی بازتابنده در مجموعه تعلیق را با توجه به مبانی تعلیق به دست آوردند و توانستند یک نمونه از جنس تنگستن به‌عنوان ذره با چگالی بالا را در این مجموعه تعلیق کنند. اتوسکا و ناکانه [۳۳] در سال ۲۰۰۲ قرار گرفتن قطره میان دو نیروی گرانش و نیروی امواج فراصوت را دلیل تغییر شکل قطره ذکر کردند. همچنین آن‌ها افزایش فرکانس را باعث تسریع در فروپاشی قطره ذکر کردند. در سال ۲۰۰۹ وبر و همکاران [۳۴] توانستند با استفاده از دو مبدل در مقابل یکدیگر قطره آب را به مدت یک ساعت تعلیق کنند و ساختار قطره را توانستند حین تعلیق مورد بررسی قرار دهند. همچنین آن‌ها ذکر کردند که هر درجه افزایش دما در مبدل باعث ۴ هرتز تغییر در فرکانس رزونانس مجموعه می‌شود. در ۲۰۱۱ بیر و همکاران [۳۵] ثابت کردند استفاده از مبدل با سطح خمیده، هم‌زمان با استفاده از بازتابنده خمیده مطابق شکل ۳ نوسان قطره هنگام تعلیق را به شکل قابل توجهی بهبود می‌بخشد. طبق اطلاعات ثبت شده در زمان مشابه (قرار دادن قطره در گره به مدت ۲۵ ثانیه) قطره رها شده در مجموعه با سطح مبدل خمیده دامنه نوسانی نزدیک به نصف دامنه نوسان قطره تعلیق شده در مجموعه با مبدل تخت را تجربه کرده است. در سال ۲۰۱۲ باسو و همکاران [۳۶] گزارش کردند وارد شدن حرارت به قطره تعلیق شده باعث کاهش کشش سطحی قطره و در نتیجه فروپاشی سریع‌تر آن می‌شود. همچنین آن‌ها خواصی مانند گرمای نهان و ویژه را مؤثر در زمان تعلیق قطره قبل از فروپاشی ذکر کردند.

<sup>11</sup> Setup of acoustic levitation

<sup>12</sup> Transducer



شکل ۳ مجموعه تعلیق با دو سطح خمیده استفاده شده در [۳۶]

در سال ۲۰۱۳ فورستی و همکاران [۳۷] توانستند در یک مجموعه تعلیق متشکل از تعدادی مبدل مشابه و یک بازتابنده واحد و تخت، با کنترل دامنه ورودی هر مبدل نمونه معلق را بین گره‌های ایجاد شده جابجا کنند. هوشی و همکاران [۳۸] در سال ۲۰۱۴ از دو آرایه فازی در مقابل یکدیگر برای تولید امواج ایستا استفاده کردند. آنها توانستند به کمک مجموعه تعلیق جدید علاوه بر موقعیت‌دهی دقیق، ذرات کوچک را در میان گره‌ها جابجا کنند. در سال ۲۰۱۴ اوچیای و همکاران [۳۹] با استفاده از ۴ آرایه فاز علاوه بر افزایش دقت موقعیت‌دهی، توانستند پایداری ذره در زمان تعلیق را افزایش دهند. مارزو و همکارانش [۴۰] در سال ۲۰۱۵ با استفاده از مجموعه متشکل از آرایه فازی و کنترل نقطه کانونی توانستند یک نمونه را با سرعت ۲۵ سانتیمتر بر ثانیه جابجا کنند. زنگ و همکاران [۴۱] در سال ۲۰۱۶ ذکر کردند تعلیق قطره با هندسه غیر یکنواخت باعث کاهش پایداری قطره هنگام تعلیق می‌شود. آنها زمان نوسان قطره با شکل غیر معمول قبل از پایداری را حدود دو برابر زمان نوسان تعلیق قطره با شکل یکنواخت گزارش کردند.

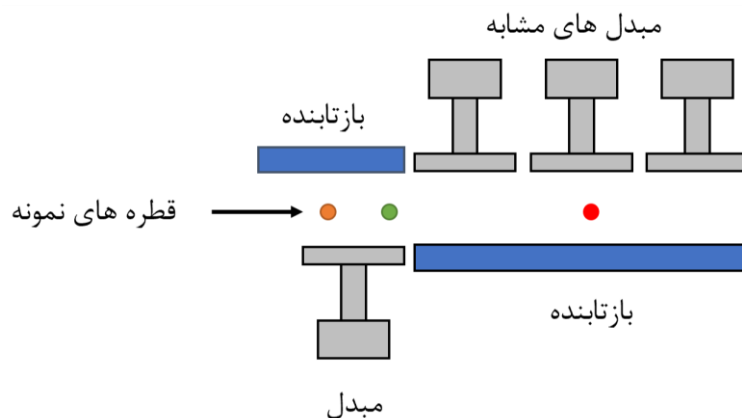
مازو و همکاران [۴۲] در سال ۲۰۱۷ قرارداد مبدل‌های یک آرایه فازی بر سطح خمیده را کارآمدترین روش برای ایجاد اختلاف‌فاز و ایجاد نقطه کانونی و کنترل آن گزارش کردند، سپس مازو و همکاران [۴۳] یک مجموعه تعلیق متشکل از دو آرایه فازی با هندسه خمیده روبروی یکدیگر را برای تعلیق پیشنهاد دادند. دو مشکل افزایش دمای مجموعه در حین تعلیق و پیچیدگی ساخت مبدل‌ها در مجموعه تعلیق پیشنهادی تا حد زیادی حل شدند. هاوسگا و موراتا [۴۴] در سال ۲۰۲۲ تأثیر تعلیق چند قطره به صورت هم‌زمان را بر دامنه نوسان قطره‌ها بررسی کردند. آنها دریافتند که دامنه نوسان قطرات حین تعلیق به صورت هم‌زمان رشد قابل توجهی را نسبت به دامنه نوسان قطره تعلیق شده به‌تنهایی تجربه می‌کنند.

#### ۴- کاربردهای تعلیق مایعات

طی آنچه در قسمت ۱ ذکر شد، پس از گزارش امکان تعلیق مایعات توسط امواج ایستا توسط باکس و مولر [۵] در سال ۱۹۳۳، طیف گسترده‌ای از کاربردهای ممکن برای تعلیق فراصوت مایعات پیشنهاد شد. اندازه‌گیری خواص قطره تعلیق شده یکی از خواص تعلیق مایعات است. در سال ۱۹۹۵ بازاتیگولوو و میچل [۴۵] اندازه‌گیری کشش سطحی قطره تعلیق شده را بر اساس میزان تغییر شکل قطره در نتیجه وارد شدن نیروها به آن را پیشنهاد دادند. تیان و همکاران [۴۶] نیز در سال ۱۹۹۵ کشش سطحی قطره تعلیق شده را بر اساس میزان نوسان آن قبل از رسیدن به پایداری در گره پیشنهاد کردند. شن و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۰ توانستند با بهبود روابط ریلیگ و ثبت رفتار قطره با توجه به میزان نیروی وارد به آن، کشش سطحی قطره را بسیار نزدیک به نتایج روش‌های دیگر محاسبه کنند. ماندراگون و همکاران [۴۷] در سال ۲۰۱۱ گزارش دادند بررسی رفتار قطره در دمای بالا می‌تواند به کمک تعلیق فراصوت انجام شود. یوشاکو و همکاران [۴۸] در سال ۲۰۲۱ اندازه‌گیری چگالی اکسید فلزات را به کمک تعلیق فراصوت در کنار تعلیق به کمک هوای فشرده پیشنهاد دادند. آنها به کمک پردازش تصویر رفتار اکسید ذوب‌شده در حین تعلیق چگالی آن را محاسبه کردند.

جابجایی و ترکیب قطره‌ها، یکی دیگر از کاربردهای ویژه تعلیق فراصوت است. در سال ۲۰۱۲ دینگ و همکاران [۴۹] توانستند

با استفاده از یک صفحه آلومینیومی به طول ۶۵ میلی‌متر متصل به مبدل به‌عنوان تولیدکننده موج و یک لوله برش خورده به‌عنوان بازتابنده، با توجه به اختلاف فاز به وجود آمده در موج ایجادشده، قطره را در راستای صفحه جابجا کنند. مجموعه پیشنهادی فورستی و همکاران [۳۷] (شکل ۴) با قابلیت جابجایی و ترکیب قطرات در سال ۲۰۱۳ پیشنهاد شد. آن‌ها از اختلاف فاز در امواج ایجاد شده و کنترل نیرو در هر گره برای جابجایی نمونه استفاده کردند. همان‌طور که در قسمت ۱ اشاره شد قابلیت جابجایی در پژوهش‌های زیستی نیز کاربرد دارد. واسیلو و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۶ مجموعه‌ی تعلیق را برای ترکیب دو نمونه زیستی به کمک کنترل امواج ایجاد شده پیشنهاد دادند. آن‌ها عدم تماس نمونه‌ها با سطوح ثانویه و دقت بالای فرایند را نقاط قوت اصلی این روش ذکر کردند که اثر سطوح ثانویه بر نمونه‌های زیستی را حذف می‌کند. آندراده و همکاران [۵۰] در سال ۲۰۱۸ مجموعه متشکل از یک آرایه فازی ۱۶ در ۱۶، یک بازتابنده، یک ورودی و یک خروجی قطره به‌عنوان مجموعه‌ای با قابلیت ترکیب و جابجایی قطره‌ها معرفی کردند. آن‌ها همچنین به پتانسیل مجموعه برای اضافه کردن تعداد بالاتر ورودی و خروجی قطره اشاره کردند که می‌تواند کاربردهای فراوانی داشته باشد. آرای و همکاران [۵۱] در سال ۲۰۲۲ بر اساس تحقیق خود گزارش کردند که کمک گرفتن از تعلیق فراصوت در فرایند جابجایی یک عامل زیستی مانند پلاسمای دی ان ای<sup>۱۳</sup> به یک سلول حیوانی در مقایسه با روش‌های سنتی مانند لوله‌های مخصوص شرایط را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد.



شکل ۴ سیستم مناسب برای ترکیب و جابجایی نمونه‌ها استفاده شده در [۳۷]

کنترل میزان قدرت و مکان گره ایجادشده امکان جداسازی دو قطره از هم در این روش را ممکن می‌سازد. سانتوس و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۴ تغییر تنظیمات مجموعه تعلیق مانند تغییر فاصله بین مبدل و بازتابنده را روشی مناسب جداسازی دو ماده معرفی کردند، آن‌ها این عملکرد را مناسب جداسازی اجزای داخل نمونه‌های زیستی معرفی کردند.

قابلیت کنترل ساختار قطره تعلیق شده و یا بررسی عوامل مؤثر بر آن جزو یکی از جدیدترین کاربردهای تعلیق فراصوت به حساب می‌آید. بنمور و وبر [۵۲] توانستند ریزساختار قطره تعلیق شده را کنترل کنند. آن‌ها در ۲۰۱۱ روش تعلیق فراصوت را برای تغییر ساختار دارو (آمورف کردن) و در نتیجه تغییر خواص آن (افزایش انحلال‌پذیری) را پیشنهاد کردند. کائو و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۲ تعلیق فراصوت را مناسب مطالعه ریزساختار ماده و عوامل مؤثر بر فرایند جوانه‌زایی و تشکیل دانه‌های جدید معرفی کردند. در سال ۲۰۲۱ مزایای ساخت واکنش با روش تعلیق فراصوت توسط مورگان و همکاران [۱۹] بررسی شد. آن‌ها مزیت‌هایی مانند قابلیت کنترل سایز و پراکندگی و همچنین قابلیت کنترل ساختار را برای این روش ذکر کردند. واسن و همکاران [۵۳] در سال ۲۰۲۱ دریافته‌اند فرایند آنالیز مواد شیمیایی به‌خصوص داروها با توجه به امکان استفاده از تجهیزاتی مانند لیزر در کنار مجموعه تعلیق و همچنین عدم تغییر خواص ماده مورد آنالیز با توجه به ماهیت فرایند تعلیق فراصوت، می‌تواند کاربردهای فراوانی در این زمینه داشته باشد.

<sup>13</sup> Plasmid DNA

## ۵- آینده تحقیقات تعلیق فراصوت

در کنار مزیت‌های تعلیق فراصوت مانند قابلیت کنترل دقیق مکان و سرعت جابجایی، بهبود و پیشرفت در طراحی و ساخت مجموعه‌های تعلیق منجر به کنترل دقیق‌تر بر فرایند تعلیق فراصوت مایعات شده‌اند. در نتیجه کاربردهایی مانند استفاده در فرایندهای تولید مخصوص، جابجایی مواد در خطوط تولید و داروسازی را می‌توان با انجام تحقیقات پیرامون عوامل مؤثر بر تغییر شکل قطره حین تعلیق و کنترل آن‌ها، چگونگی افزایش پایداری و بهبود مجموعه ممکن ساخت.

### Authorship Contribution Statement

Abbas Amoochi



**Biography:** MSc in mechanical engineering, Arak University.

**Contribution Statement:** Methodology, Investigation, Resources, Writing – original draft, Writing – review & editing

Dr. Mohammad Reza  
Sheykholeslami



**Biography:** Assistant Professor of Manufacturing Engineering at Arak University.

**Contribution Statement:** Conceptualization, Supervision, Project administration, Investigation,

Dr. Rafat Mohammadi



**Biography:** Associate Professor of Mechanical Engineering at Arak University.

**Contribution Statement:** Supervision, Investigation, Writing – review & editing

Dr. Siamak Mazdak



**Biography:** Assistant Professor of Manufacturing Engineering at Tafresh University.

**Contribution Statement:** Investigation, Writing – review & editing

## ۶- مراجع

- [1] Brandt EH. Levitation in physics. Science. 1989;243(4889):349-55.
- [2] Vandaele V, Lambert P, Delchambre A. Non-contact handling in microassembly: Acoustical levitation. Precision engineering. 2005;29(4):491-505.

- [3] Santesson S, Nilsson S. Airborne chemistry: acoustic levitation in chemical analysis. *Analytical and bioanalytical chemistry*. 2004;378:1704-9.
- [4] Kundt A. Ueber eine neue Art akustischer Staubfiguren und über die Anwendung derselben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen. *Annalen der Physik*. 1866;203(4):497-523.
- [5] Bücks K, Müller H. Über einige Beobachtungen an schwingenden Piezoquarzen und ihrem Schallfeld. *Zeitschrift für Physik*. 1933;84:75-86.
- [6] Rayleigh L. XXXIV. On the pressure of vibrations. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1902;3(15):338-46.
- [7] King LV. On the acoustic radiation pressure on spheres. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences*. 1934;147(861):212-40.
- [8] Westervelt PJ. The mean pressure and velocity in a plane acoustic wave in a gas. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1950;22(3):319-27.
- [9] Westervelt PJ. The theory of steady forces caused by sound waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1951;23(3):312-5.
- [10] Westervelt PJ. Acoustic radiation pressure. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1957;29(1):26-9.
- [11] Embleton TF. Mean force on a sphere in a spherical sound field. I.(Theoretical). *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1954;26(1):40-5.
- [12] Embleton TF. Mean force on a sphere in a spherical sound field. II.(Experimental). *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1954;26(1):46-50.
- [13] Yosioka K, Kawasima Y. Acoustic radiation pressure on a compressible sphere. *Acta Acustica united with Acustica*. 1955;5(3):167-73.
- [14] Gor'kov LP. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid. *In Sov. Phys.-Doklady 1962;Vol. 6, pp. 773-775*.
- [15] Vasileiou T, Foresti D, Bayram A, Poulidakos D, Ferrari A. Toward contactless biology: Acoustophoretic DNA transfection. *Scientific reports*. 2016;6(1):20023.
- [16] Shen C, Xie W, Wei B. Digital image processing of sectorial oscillations for acoustically levitated drops and surface tension measurement. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*. 2010;53:2260-5.
- [17] Santesson S, Barinaga-Rementeria Ramírez I, Viberg P, Jergil B, Nilsson S. Affinity two-phase partitioning in acoustically levitated drops. *Analytical chemistry*. 2004;76(2):303-8.
- [18] Cao HL, Yin DC, Guo YZ, Ma XL, He J, Guo WH, Xie XZ, Zhou BR. Rapid crystallization from acoustically levitated droplets. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012;131(4):3164-72.
- [19] Morgan BA, Niinivaara E, Xing Z, Thompson MR, Cranston ED. Validation of a diffusion-based single droplet drying model for encapsulation of a viral-vectored vaccine using an acoustic levitator. *International Journal of Pharmaceutics*. 2021;605:120806.
- [20] Hrka S. Acoustic levitation. University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, Ljubljana. 2015.
- [21] Clift R, Grace JR, Weber ME. Bubbles, drops, and particles.
- [22] Hasegawa T, Yosioka K. Acoustic-radiation force on a solid elastic sphere. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1969;46(5B):1139-43.
- [23] Andrade MA, Pérez N, Adamowski JC. Review of progress in acoustic levitation. *Brazilian Journal of Physics*. 2018;48:190-213.
- [24] Barmatz M, Collas P. Acoustic radiation potential on a sphere in plane, cylindrical, and spherical standing wave fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1985;77(3):928-45.

- [25] Pandey K, Prabhakaran D, Basu S. Review of transport processes and particle self-assembly in acoustically levitated nanofluid droplets. *Physics of Fluids*. 2019;31(11):112102.
- [26] Valverde JM. Convection and fluidization in oscillatory granular flows: The role of acoustic streaming. *The European Physical Journal E*. 2015;38:1-3.
- [27] Yamamoto Y, Abe Y, Fujiwara A, Hasegawa K, Aoki K. Internal flow of acoustically levitated droplet. *Microgravity Science and Technology*. 2008;20:277-80.
- [28] Basu S, Saha A, Kumar R. Criteria for thermally induced atomization and catastrophic breakup of acoustically levitated droplet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013;59:316-27.
- [29] Hanson AR, Domich EG, Adams HS. Acoustical liquid drop holder. *Review of Scientific Instruments*. 1964;35(8):1031-4.
- [30] Wang T, Saffren M, Elleman D. Acoustic chamber for weightless positioning. In 12th Aerospace Sciences Meeting 1974; p. 155.
- [31] Whymark RR. Acoustic field positioning for containerless processing. *Ultrasonics*. 1975;13(6):251-61.
- [32] Xie WJ, Wei B. Parametric study of single-axis acoustic levitation. *Applied Physics Letters*. 200;79(6):881-3.
- [33] Otsuka T, Nakane T. Ultrasonic levitation for liquid droplet. *Japanese journal of applied physics*. 2002;41(5S):3259.
- [34] Weber JK, Rey CA, Neufeind J, Benmore CJ. Acoustic levitator for structure measurements on low temperature liquid droplets. *Review of scientific instruments*. 2009;80(8):083904.
- [35] 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 Oct 21;82(10):105111.
- [36] Basu S, Saha A, Kumar R. Thermally induced secondary atomization of droplet in an acoustic field. *Applied Physics Letters*. 2012;100(5):054101.
- [37] Foresti D, Nabavi M, Klingauf M, Ferrari A, Poulidakos D. Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013;110(31):12549-54.
- [38] Hoshi T, Ochiai Y, Rekimoto J. Three-dimensional noncontact manipulation by opposite ultrasonic phased arrays. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2014;53(7S):07KE07.
- [39] Ochiai Y, Hoshi T, Rekimoto J. Three-dimensional mid-air acoustic manipulation by ultrasonic phased arrays. 2014;9(7).
- [40] Marzo A, Seah SA, Drinkwater BW, Sahoo DR, Long B, Subramanian S. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nature communications*. 2015;6(1):8661.
- [41] Marzo A, Ghobrial A, Cox L, Caleap M, Croxford A, Drinkwater BW. Realization of compact tractor beams using acoustic delay-lines. *Applied Physics Letters*. 2017;110(1):014102.
- [42] Zang D, Zhai Z, Li L, Lin K, Li X, Geng X. Vertical vibration dynamics of acoustically levitated drop containing two immiscible liquids. *Applied Physics Letters*. 2016;109(10):101602.
- [43] Marzo A, Barnes A, Drinkwater BW. TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator. *Review of Scientific Instruments*. 2017;88(8):085105.
- [44] Hasegawa K, Murata M. Oscillation Dynamics of Multiple Water Droplets Levitated in an Acoustic Field. *Micromachines*. 2022;13(9):1373.
- [45] Bayazitoglu Y, Mitchell GF. Experiments in acoustic levitation-surface tension measurements of deformed droplets. *Journal of thermophysics and heat transfer*. 1995;9(4):694-701.

- [46] Tian Y, Holt RG, Apfel RE. A new method for measuring liquid surface tension with acoustic levitation. *Review of scientific instruments*. 1995;66(5):3349-54.
- [47] Mondragon R, Hernandez L, Julia JE, Jarque JC, Chiva S, Zaitone B, Tropea C. Study of the drying behavior of high load multiphase droplets in an acoustic levitator at high temperature conditions. *Chemical engineering science*. 2011;66(12):2734-44.
- [48] Ushakov SV, Niessen J, Quirinale DG, Prieler R, Navrotsky A, Telle R. Measurements of density of liquid oxides with an aero-acoustic levitator. *Materials*. 2021;14(4):822.
- [49] Ding M, Koyama D, Nakamura K. Noncontact ultrasonic transport of liquid using a flexural vibration plate. *Applied physics express*. 2012;5(9):097301.
- [50] Andrade MA, Camargo TS, Marzo A. Automatic contactless injection, transportation, merging, and ejection of droplets with a multifocal point acoustic levitator. *Review of Scientific Instruments*. 2018;89(12):125105.
- [51] Arai T, Sato T, Matsubara T. Effective Cell Transfection in An Ultrasonically Levitated Droplet for Sustainable Technology. *Advanced Science*. 2022;9(30):2203576.
- [52] Benmore CJ, Weber JK. Amorphization of molecular liquids of pharmaceutical drugs by acoustic levitation. *Physical Review X*. 2011;1(1):011004.
- [53] Van Wasen S, You Y, Beck S, Riedel J, Volmer DA. Quantitative analysis of pharmaceutical drugs using a combination of acoustic levitation and high resolution mass spectrometry. *Analytical Chemistry*. 2021;93(15):6019-24.