

### اندازه‌گیری توان جریان صوتی در یک پروب فراآوا

اباذر حاج نوروزی<sup>۱\*</sup>، رضا افضلزاده<sup>۲</sup>

۱. استادیار گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شاهد

۲. دانشیار گروه فیزیک حالت جامد، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

#### چکیده

پروب فراآوا با انتقال موج فراآوایی به درون محلول آبی می‌تواند منجر به خواص منحصر به فرد در فرآیندهای گوناگون شود. موج صوتی هنگامی که از مایعی عبور می‌کند، به خاطر اصطکاک ناشی از لزجت حرکت خود را به مرور از دست می‌دهد. حرکت به مایع انتقال می‌یابد و در نتیجه، شکل‌گیری حرکت مایع در جهت انتشار موج است. این جریان، شاری را القاء می‌کند که اغلب به جریان صوتی یا ریزجریان معروف است. در این مقاله برای اندازه‌گیری توانی که توسط ریزجریان ایجاد می‌شود، سامانه ساده‌ای طراحی و ساخته شد. به کمک اندازه‌گیری و تحلیل روابط، توان ریزجریان در دامنه‌های مختلف یک پروب فراآوا محاسبه شد.

**کلیدواژه‌ها:** پروب فراآوا، ریزجریان، فشار صوتی، ابر حباب.

#### ۱. مقدمه

امواج فراآوا از انتقال علامت برقی (سیگنال الکتریکی) مولد به مبدل فراآوایی که متشکل از پیزوالکتریک، بوستر و نوک پروب است، تولید می‌شود. درصدی از توان در مدارات برقی و در پیزوالکتریک‌های درون مبدل فراآوایی تلف می‌شود و مابقی توان هم به صورت موج فراصداپی وارد محلول آبی می‌گردد. انرژی موج صوتی به جریان ریزموج، میکروتوربولنس، موج شوک و ریزفوران (میکروجت) تبدیل شده و قسمتی از آن هم صرف تشکیل و فروریختن حباب‌های فراآوا می‌گردد [۱]. کل انرژی موج فراآوا در نهایت به شکل گرما به مایع انتقال داده می‌شود [۲-۳].

تلاش‌های زیادی برای شناسایی توان تبدیل شده به موج صوتی وجود دارند. ماتیس جوشک و همکارانش، چهار روش مختلف اعم از شناسایی با هیدروفن، تخریب آلومینیوم، نورتابی آواشیمی و دزیمتری یدیدپتاسیم را برای شناسایی به کار برده‌اند و هر یک از این روش‌ها را با

یکدیگر مقایسه کرده‌اند [۴-۵]. دانشمندان دیگر نیز برای گونه‌های مختلف مولد فراآوایی، روی یک یا چند روش فوق تمرکز کرده و به بررسی توان تبدیلی به فراآوا پرداخته‌اند. برای مثال، ابراهیمی و دیگران برای راکتور ۱/۵ مگا هرتزی روش دزیمتری یدید پتاسیم و دزیمتری مفتالیک اسید را به کار برده‌اند [۶]. یانگ سون و همکاران در راکتور استوانه‌ای به کمک هیدروفن و نورتابی آواشیمی به بررسی فعالیت فراآوایی پرداختند [۷].

در این مقاله قصد داریم تا به بررسی توان مصرفی در جریان صوتی را بررسی کنیم.

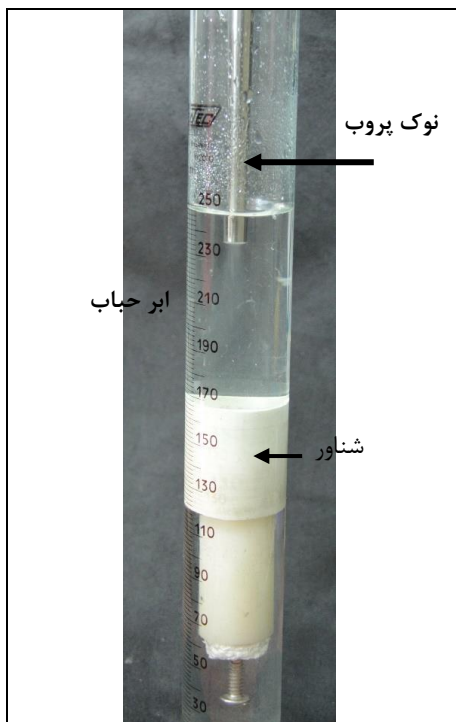
جریان صوتی، تکانه منتقل شده به مایع توسط پروب فراآوا است که منجر به حرکت مایع در جهت انتشار موج می‌گردد. موج فراآوا، شاری را درون محلول القاء می‌کند که همان ریزجریان<sup>۱</sup> است [۱].

برای بررسی توانی که دستگاه فراآوا صرف ریزجریان می‌کند، قطعه‌ای از جنس پلی‌اتیلن با چگالی بسیار نزدیک به آب استفاده شد. با اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی قطعه

<sup>۱</sup> Microstreaming

\* نویسنده پاسخگو: ahajnorouzi@shahed.ac.ir

در صورت اعمال فشار صوتی توسط پروب (شکل ۱)، شناور جابه‌جا شده و طول مشخصی را درون استوانه مدرج به سمت پایین می‌پیماید و همان‌جا قرار می‌گیرد. وقتی فشار صوتی قطع می‌شود شناور تحت تاثیر نیروی شناوری به آرامی بالا رفته و سر جای اول خود قرار می‌گیرد. لذا جابه‌جایی شناور می‌تواند به خوبی معرف شار جریان صوتی باشد.



شکل ۱ جابه‌جایی شناور تحت تاثیر اعمال فشار صوتی. ابر حباب در زیر نوک پروب نشان داده شده است.

اکنون می‌خواهیم نیرویی که پروب به سبب جریان صوتی به شناور وارد می‌کند را محاسبه کنیم. اگر فرض کنیم که نیروی مقاومت شاره  $F(v)$ ، با سرعت پایین رفتن شناور رابطه خطی دارد، آنگاه معادله حرکت به صورت زیر است:

$$-cv = -m \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

که در آن  $c$  ضریب میرایی در مایع می‌باشد. با حل معادله دیفرانسیل بالا زمان حرکت به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$t = -\frac{m}{c} \int_{v_0}^v \frac{dv}{v} = -\frac{m}{c} \ln \left( \frac{v}{v_0} \right) \quad (2)$$

در برابر تابش فراآوایی درون آب، میزان توان مصرفی و میزان فشار صوتی برای ریزجریان در درصدهای توانی مختلف دستگاه فراآوا با معادلات فیزیکی محاسبه گردیدند.

## ۲. آزمایش‌ها

در این تحقیق از پروب فراآوا نمونه فایان ۴۰۰ آر<sup>۱</sup> (ساخت ایران)، استفاده شده است. نوک پروب تیتانیومی مخروطی شکل و به قطر ۷ م.م. هست. بسامد کاری این دستگاه توسط مولتی‌متر<sup>۲</sup> اندازه‌گیری شد که به میزان ۲۳۸۰۰ هرتز است. توان خروجی مولد فراآوا در نه پله از ۲۰ تا ۱۰۰ درصد توان قابلیت تنظیم دارد. درصد بیشینه توان دستگاه با پی‌ام‌پی<sup>۳</sup> نشان داده شده است. در ادامه توان مصرفی در ریزجریان، ترمودینامیک رشد و فروریختگی حباب، اندازه‌گیری کالریمتری و در نهایت میزان بهینه حباب‌زایی ارائه و مورد تحلیل قرار خواهند گرفت.

## ۳. مبانی نظری و بررسی معادلات

نوک پروب فراآوا دارای حرکت رفت و برگشتی در ابعاد چند ده میکرومتر است که منجر به انتشار موج فراآوایی درون مایع می‌شود. به جهت بررسی توان اتلافی در ایجاد شار و انتقال ذرات مایع از قطعه‌ای با چگالی بسیار نزدیک به چگالی آب استفاده شد. بنابراین، قطعه درون آب به طور کامل شناور است. از این پس، این قطعه را شناور می‌نامیم. شناور درون استوانه مدرجی با سطح مقطعی کمی بزرگ‌تر از سطح شناور و پر از آب قرار دارد.

این شناور از جنس پلی‌اتیلن و با مقطع استوانه‌ای مطابق با شکل ۲ است. درون آن چاله‌ای تعبیه شده تا آب به راحتی در آن قرار گیرد. در انتهای این شناور پیچ استیلی نصب شده تا هنگام حرکت شناور تعادل قطعه حفظ شود و آن را همواره به شکل قائم نگه دارد. از قطعه کوچک یونولیتی برای تنظیم میزان شناوری قطعه استفاده شده است.

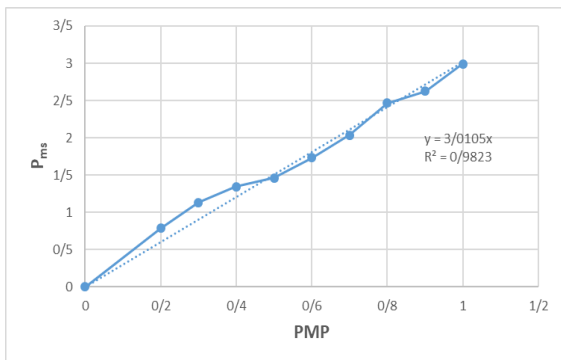
<sup>1</sup> Fpan 400R

<sup>2</sup> SANWA 5000- Japan

<sup>3</sup> PMP

#### ۴. نتایج و بحث

برای درصدهای مختلف توانی دستگاه از ۲۰ تا ۱۰۰ درصد از بیشینه توان پی‌ام‌پی، مقدار  $y_{lim}$  اندازه‌گیری و توان ریزجریان محاسبه گردیدند. نمودار شکل ۲ توان ریزجریان را در درصدهای مختلف دامنه توانی نشان می‌دهد.



شکل ۲ توان ریزجریان اندازه‌گیری شده بر حسب درصدهای مختلف توانی دستگاه فراآوا.

نمودار شکل ۲، رابطه خطی را بین پی‌ام‌پی و توان ریزجریان نشان می‌دهد که ضریب هم‌دوسی  $R = 0.98$  می‌باشد. با داشتن رابطه زیر می‌توان در هر درصد توانی از دستگاه، توان مصرفی مربوط به ریزجریان را محاسبه نمود.

$$P_{ms} = 3.0105 \text{ PMP} \quad (8)$$

از طرفی شدت صوتی معرف توان صوتی (انرژی در واحد زمان) بر واحد سطح می‌باشد و با مجذور فشار صوتی طبق رابطه زیر ارتباط دارد.

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P_A^2}{2\rho c} \quad (9)$$

$P$  توان است و  $A$  سطح مقطع نوک پروب فراصداپی می‌باشد. در برخی از مقالات مقدار توان را توان برقی، و در برخی مقالات توان گرمایی قرار می‌دهند [۹]. در اینجا مقدار مؤثر توان را معادل  $P$  توانی است که توسط ریزجریان بوجود می‌آید. با جایگذاری توان بدست آمده در رابطه بالا فشار صوتی بیشینه محاسبه و در جدول ۱ نشان داده شده است.

مقدار فشار صوتی نیز به طور تناوبی کم و زیاد می‌شود و در هر دوره تناوب به یک نقطه بیشینه می‌رسد. گزارش‌های پیشین نیز مقادیر فشار صوتی را برای

و سرعت لحظه‌ای شناور در هر لحظه به صورت زیر به دست می‌آید،

$$v = v_0 \cdot e^{-\frac{ct}{m}} \quad (3)$$

بنابراین سرعت به صورت نمایی با زمان کاهش می‌یابد. مکان شناور که مورد نظر است نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$y = \int_0^t v_0 \cdot e^{-ct/m} dt = \frac{mv_0}{c} (1 - e^{-ct/m}) \quad (4)$$

پس در نهایت جا به جایی شناور ( $y$ ) به مقدار حدی زیر می‌رسد:

$$y_{lim} = \frac{mv_0}{c} \quad (5)$$

یادآوری می‌شود که  $v_0$  همان سرعت قطعه ( $v$ )، در لحظه برخورد با شناور است [۸]. در این آزمایش ضریب  $m/c$  در معادله (۶) معادل  $0.15 \text{ s}^{-1}$  است که به روش تجربی بدست آمده است.

وقتی پروب فراصداپی کار می‌کند، فشار صوتی شناور را به پایین می‌راند. به ازای درصدهای مختلف توانی امواج فراآوا، شناور مقدار مشخص حداکثری که همان  $y_{lim}$  است، درون استوانه مدرج به پایین می‌رود. برای هر توان فراصداپی حداکثر جابه‌جایی  $y_{lim}$  را ابتدا عکس‌برداری و سپس با استفاده از مقیاسی که در کنار استوانه مدرج تعبیه شده است، اندازه‌گیری می‌شود.

نکته دیگر، اختلاف فشاری است که بر روی شناور توسط فشار صوتی ایجاد می‌شود. این فشار معادل فشار ستون آب ( $\rho g y_{lim}$ ) است که در بالای شناور قرار دارد. لذا نیرویی که از طرف نوک پروب وارد می‌شود معادل ( $\rho g A y_{lim}$ ) است که  $A$  سطح مقطع شناور و  $\rho$  چگالی آب هستند. با استفاده از رابطه (۶) و نیروی وارده از طرف نوک پروب، می‌توان توانی که صرف ریزجریان  $P_{ms}$  می‌شود را محاسبه نمود،

$$P_{ms} = Fv = \rho g A y_{lim} v = \rho g A y_{lim} \frac{c}{m} = \text{const} \cdot y_{lim} \quad (7)$$

بنابراین، برای محاسبه توان مصرفی برای ریزجریان باید ابتدا  $y_{lim}$  اندازه‌گیری کرد و سپس با استفاده از رابطه (۷) مقدار توان را محاسبه نمود.

- [4] M. Jüschke, CH. Koch, "Model processes and cavitation indicators for a quantitative description of an ultrasonic cleaning vessel: Part I: Experimental results," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 19, no. 4, pp. 787–795, 2012.
- [5] CH. Koch, M. Jüschke, "Model processes and cavitation indicators for a quantitative description of an ultrasonic cleaning vessel: Part II– Multivariate data analysis," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 19, no. 4, pp. 796–802, 2012.
- [6] A. Ebrahimi, M. Mokhtari-Dizaji, T. Toliyat, "Correlation between iodide dosimetry and terephthalic acid dosimetry to evaluate the reactive radical production due to the acoustic cavitation activity," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 20, no. 1, pp. 366–372, 2013.
- [7] Y. Son, M. Lim, J. Khim, M. Ashokkumar, "Acoustic emission spectra and sonochemical activity in a 36 kHz sonoreactor," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 19, no. 1, pp. 16–21, 2012.
- [8] G. Fowles, L.C. George, "Analytical Mechanics," Seventh Edition, ISBN 0-534-40813-3, Thomson; India Edition edition, 2006.
- [9] M. Ajmal, S. Rusli, G. Fieg, "Modeling and experimental validation of hydrodynamics in an ultrasonic batch reactor," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 28, pp. 218–229, 2016.
- [10] G.S. Bruno Lebon, I. Tzanakis, G. Djambazov, K. Pericleous, D.G. Eskin, "Numerical modelling of ultrasonic waves in a bubbly Newtonian liquid using a high-order acoustic cavitation model," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 37, pp. 660–668, 2017.
- [11] A. Žnidarčič, R. Mettin, M. Dular, "Modeling cavitation in a rapidly changing pressure field– application to a small ultrasonic horn," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 22, pp. 482–492, 2015.

پروپ‌های فراآوایی دیگر از مرتبه حدوداً ۲ تا ۶ اتمسفر بدست آورده‌اند [۱۰–۱۱].

جدول ۱ محاسبه مقادیر توان مصرفی شده به صورت ریزجریان و فشار صوتی بیشینه در درصدهای توانی مختلف پروپ فراآوا.

درصد توانی (PMP)	وات مصرفی برای ریزجریان (W)	فشار صوتی بیشینه (atm)
۱۰۰	۲/۹۹	۴/۶۷
۹۰	۲/۶۲	۴/۳۷
۸۰	۲/۴۶	۴/۲۴
۷۰	۲/۰۳	۳/۸۵
۶۰	۱/۷۳	۳/۵۶
۵۰	۱/۴۶	۳/۲۶
۴۰	۱/۳۴	۳/۱۳
۳۰	۱/۱۳	۲/۸۷
۲۰	۰/۷۹	۲/۴۰

#### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله برای بدست آوردن توان ریزجریان از روش جدیدی استفاده شد. به جای بررسی تکانه انتقال یافته به ذرات شاره، تکانه منتقل شده به شناور محاسبه شد. زیرا بررسی جابه‌جایی شناور به مراتب ساده‌تر از اجزاء شاره است. اندازه‌گیری فشار صوتی می‌تواند در شبیه‌سازی و محاسبات انرژی در تابش فراصدايي مفید واقع شود. همچنین، فشار صوتی پارامتر مفید برای مقایسه شرایط مختلف تابش‌دهی می‌باشد.

#### ۶. فهرست منابع

- [1] R. Kuppa, V.S. Moholkar, "Physical features of ultrasound-enhanced heterogeneous permanganate oxidation," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 17, no. 1, pp. 123–131, 2010.
- [2] A. Hajnorouzi, R. Afzalzadeh, F. Ghanati, "Studies on the regularity of wave intensity in ultrasonic bath and spherical reactor," *Journal of Acoustical Engineering Society of Iran*, vol. 2, No. 1, pp. 32–39, 2014.
- [3] M. Toma, S. Fukutomi, Y. Asakura, S. Koda, "A calorimetric study of energy conversion efficiency of a sonochemical reactor at 500 kHz for organic solvents," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 18, no. 1, pp. 197–208, 2011.