بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

# بررسی تاثیر نوع محلول گاز روی شدت تابش سونولومینیسانس تک حباب متحرک

مریم قشلاقی[۱]، هما ابراهیمی[۲]، مرتضی پیش بینی[۱] و رسول صدیقی بنابی[۲]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه پیام نور تهران، تهران

[۲]دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

چکیده - دما و فشار داخلی تک حباب متحرک سونولومینیسانس در آب با حضور گازهای نجیب Kr, Ar, Ne, He و Xe اندازه گیری و مقایسه گردید. همچنین شدت گسیل شده از تک حباب متحرک سونولومینیسانس، که وابسته به دمای حباب، منطبق بر مدل برمزاشترلاخ است، برای حبابهای گاز نجیب فوق اندازه گیری و مقایسه شد. معلوم شد که با افزایش وزن مولکولی گاز، دمای حباب افزایش یافته و درنتیجه شدت گسیلی نیز افزایش می یابد.

کلید واژه- سونولومینیسانس، تابش برمزاشترلانگ، گازهای نجیب

# Study of the gas solution's effect on the moving single bubble sonoluminescence radiation

Maryam Gheshlaghi[1], Homa Ebrahimi[2], Morteza Pishbini[1], Rasoul Sadighi-Bonabi[2]

[1]Department of physics, Payame Noor University Tehran, Tehran

[2]Department of physics, Sharif University of Technology, Tehran

Abstract- Temperature and Internal pressure were measured and compared for moving single bubble sonoluminescence in water with presence of noble gases He, Ne, Ar, Kr and Xe. Also temperature-dependent emission intensity of a bubble is based on Bremsstrahlung model for noble gas bubbles were measured and compared. It was found that with increasing the molecular weight of gas, the bubble temperature increases and hence the emission intensity enhances.

Keywords: Bremsstrahlung radiation, sonoluminescence, noble gases

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]

## ۱- مقدمه

حباب کوچک سونولومینیسانس، یک دستگاه میکرو مفید برای آزمایش و بررسی ویژگی های گازهای مختلف در دماهای خیلی بالا که دسترسی به آن دماها با هیترها و اجاقهای معمولی امکان پذیر نیست، می باشد[۱،۲]. حباب SL در دو گروه اصلی سونولومینیسانس تک حباب SBSL و سونولومینیسانس چند حبابی MBSL بررسی می شود[۳-۷]. نیروهای موثری که روی حباب های MBSL عمل می کنند، از جمله نیروهای فعل و انفعال بین حباب ها، در مایعات میزبان مختلف گزارش شده است[۸]. برای توصیف تابش حباب، مدلهای مختلف ارائه شده است. در مراحل اولیه مطالعه تابش SL، اعتقاد به تابش جسم سیاه به عنوان غالب ترین روش برای تولید فلاش های نوری بود [۱۰و۱۱]. نقطه ضعف تئوری جسم سیاه ناشی از موضوع کل تابش حباب خیلی زود ثابت شد و تلاش های بعدی برای معرفی تئوری های دیگر از جمله مدل برمزاشترلانگ جهت توصیف شدت تابش دقیق تر شد. فرمولاسیون پلاسمای داخل حباب در مدت فروریزش بعضی اثرات روی تابش SL، از جمله گسیل دو قطبی و چند قطبی را گزارش می کند. به هرحال تابش برمزاشترلانگ به عنوان فرایند حاکم بر تولید شدت گسیلی در دمای بالای داخل حباب به خوبی پذیرفته شد. براساس این مدل شدت گسیلی از حباب Xe تقریبا با گزارش تجربی یکسان است.

## ۲- روش کار

در این مقاله با استفاده از یک شبیه سازی کامپیوتری، تابش حباب برای محلول گازهای نجیب مختلف در آب مقایسه شد. دما و فشار داخلی حباب در زمانهای مختلف ناشی از حضور He, Ne, Ar, Kr و Xe مقایسه گردید. شدت گسیل شده که وابسته به یک دمای حباب منطبق بر مدل برمزاشترلانگ است، برای حباب های گاز نجیب بررسی و مقایسه شد. معلوم شدکه خواص حباب قویا به نوع گاز وابسته است.

### ۲-۱- مدل ریاضی

معادله ریلی پلست در مشارکت با یک معادله مرزی مناسب نوسان شعاعی حباب را کنترل می کند[۱۳].

$$\left(1-\frac{\dot{R}}{C}\right)R\ddot{R}+\frac{3}{2}\left(1-\frac{\dot{R}}{3c}\right)=\left(1+\frac{\dot{R}}{c}\right)\left(\frac{P_l-P_\infty}{\rho}\right)+\frac{R}{\rho c}\frac{dP_l}{dt} \quad (1)$$

که $\rho, \ddot{R}, \dot{R}, R$ و c به ترتیب شعاع حباب، سرعت دیواره، شتاب دیواره، چگالی سیال و سرعت صوت در سیال میزبان است. $P_l$ فشار سیال در دیواره حباب و $P_\infty$ [۶] فشار سیال در فاصله به اندازه کافی دور از حباب است[۱۴].

$$P_l = P_g - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu\frac{\dot{R}}{R} \quad (2)$$

$$P_\infty = P_0 + P_a(t) \quad (3)$$

$\sigma, P_g$ و $\mu$ در معادله ۲ به ترتیب فشار گاز در دیواره حباب، کشش سطحی، و ویسکوزیته برش سیال می باشد. در معادله۳، $P_0 = 1.031\ atm$ یک فشار محیطی است و $P_a(t)$ یک فشار صوتی اعمال شده به صورت زیر است:

$$P_a(t) = -P_a \sin(\omega t)\left(1-\frac{\pi^2|\chi|^2}{6R_{fl}^2}\right) \quad (4)$$

در این معادله $P_a$ دامنه فشار اعمالی و $\omega$ فرکانس است. $|\chi|$ فاصله حباب از مرکز کاواک و $R_{fl} = 3cm$ شعاع کاواک است. فشار داخلی $P_g$ به صورت زیر تعریف میشود:

$$P_g[R(t)] = \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0}\right)\left(\frac{R_0^3 - h^3}{R^3(t) - h^3}\right)^\gamma \quad (5)$$

$R_0$ شعاع داخلی حباب است و $h = \frac{R_0}{8.86}$ شعاع هسته سخت واندروالس Ar است و $\gamma$ ضریب پلی تروپیک موثر می باشد. برای محاسبه شعاع هسته سخت واندروالس برای گازهای دیگر ما این عدد را به صورت

$8.86 \times \frac{\text{شعاع اتمی گاز}}{\text{شعاع اتمی } Ar}$ به جای۸/۸۶ برای آرگون تخمین می زنیم. تغییرات دما ناشی از دینامیک حباب و رسانایی حرارتی در تعریف $\gamma$ توصیف می شود. اگر زمان نوسان دیواره حباب سریعتر از مقیاس زمانی هدایت حرارتی در دیواره حباب باشد، فروریزش تقریبا آدیاباتیک است و $\gamma \approx \Gamma$ که $\Gamma = 5/3$ معرف گاز تک اتمی آدیاباتیک است. در فواصل دور از فروریزش هدایت حرارتی سریعتر از حرکت دیواره حباب است بنابراین حباب تقریبا ایزوترمال است با $\gamma = 1$. برای فروریزش قوی حباب های SL بکار بردن یک وابستگی زمانی آنی عدد پکلت را می دهد$\gamma$ تابعی از $\dot{R}, R$ و T دمای گاز است[۱۵،۹-۱۷].

$$\gamma(\mathrm{Pe}) = 1 + (\Gamma - 1)exp\left(-\frac{A}{Pe^B}\right) \quad (6)$$



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]

$B \approx 0.6, A \approx 5.8$ و Pe عدد پکلت آنی است.

$$Pe = Pe(t) = \frac{R(t)|\dot{R}(t)|}{\chi_{gas}(R,T)} \quad (7)$$

اگر $\gamma(Pe \to 0) \to 1$ رفتار همدما داریم و دیفیوژن حرارتی غالب است و اگر $\gamma(Pe \to \infty) \to \Gamma = \frac{5}{3}$ رفتار آدیاباتیک داریم و فرارفت غالب است[۱۲].

$$\chi_{gas}(\mathrm{R,T}) = \frac{25}{48}\Gamma^{-1}\left(\frac{\pi a_{\mathrm{gas}}^2 \alpha \mathrm{T}}{\delta_{\mathrm{gas}}}\right)^{0.5} \mathrm{G(g)} \quad (8)$$

$T, \alpha, a_{gas}$ و $\delta_{\mathrm{gas}}$ به ترتیب قطر اتمی موثر، ثابت گاز ایده آل، دمای گازو وزن مولکولی گاز می باشد.G(g) به صورت زیر تعریف می شود:

$$G(g) = \frac{1}{g}\left(\frac{1}{1 + c_1 g + c_2 g^2 + c_3 g^3} + 1.2g + 0.755g^2(1 + c_1 g + c_2 g^2 + c_3 g^3)\right) \quad (9)$$

که درآن $c_4 = 0.115, c_2 = 0.2869, c_1 = 0.625$ و

$$g = \frac{2\pi N_a a_{gas}^3 R_0^3}{3\mathrm{K}\tau_m R^3} \quad (10)$$

$\mathrm{N_a}$ آووگادرو و $\tau_m$ حجم مولی موثر گاز است[۱۸]. دمای حباب از یک حجم محدود معادله حالت واندروالس $\mathrm{P_g}\frac{4\pi}{3}(R^3 - h^3) = \frac{4\pi}{3}R_0^3\tau_m\alpha T$ بدست می آید و تغییرات دما به صورت:

$$\dot{T} = -[\gamma(Pe) - 1]\frac{3R^2\dot{R}}{R^3 - h^3}T - \chi_{gas}\frac{T - T_\infty}{R^2} \quad (11)$$

است، $T_\infty$ دمای سیال را در بینهایت است.

## ۲-۲- مدل برمزاشترلانگ

در این مقاله فرض شده است که تابش نتیجه ای از فرآیندهای مختلف: برمزاشترلانگ الکترون- یون (گسیل نور از یک الکترون نوسانی در یک میدان کولنی حاصل از یک یون مثبت)، برمزاشترلانگ الکترون –اتم (گسیل نور از یک الکترون نوسانی در میدان کولنی یک اتم خنثی) و تابش ترکیبی از الکترون ها و یون ها است. در این فرضیه مشخصا دما و فشار در داخل حباب به جز در مرز لایه نزدیک دیواره حباب، یکنواخت هستند[۱۵]. همه اثرات هدایت حرارتی بین حباب و سیال و همچنین حضور بخار آب به عنوان یک محصول فعل و انفعال شیمیایی در دیواره حباب نیز در محاسبات به کار می رود. شدت گسیل شده از ترکیب برمزاشترلانگ الکترون-یون و الکترون- اتم به صورت زیر می باشد[۱۵]:

$$P_{Br,ion} = 1.57 \times 10^{-40} q^2 N^2 T^{0.5} \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (12)$$

$$P_{Br,atom} = 4.6 \times 10^{-44} q N^2 T \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (13)$$

که در آن $q, N$ و $T$ به ترتیب درجه یونیزاسیون، عدد دانسیته اتمها و دمای داخلی حباب هستند. درجه یونیزاسیون به صورت زیر است:

$$\frac{q^2}{1-q} = 2.4 \times 10^{21} T^{3/2} e^{-\epsilon_{gas}/KT}\frac{1}{N} \quad (14)$$

با $\epsilon_{gas}$ به عنوان یک پتانسیل یونیزاسیون گاز و K ثابت بولتزمن. معادلات ۱۲-۱۴ در واحدهای SI بیان میشوند. شدت گسیل به صورت زیر می باشد:

$$I = r_e\left(r_r h_{\mathrm{plank}}\overline{\nu} + P_{Br,ion} + P_{Br,atom}\right) \quad (15)$$

در این معادله $h_{\mathrm{plank}}\overline{\nu}$ و $r_r, \mathrm{r_e}$ به ترتیب میزان فوتون گسیلی از حباب میزان ترکیب تابشی و انرژی میانگین فوتون های گسیلی توسط ترکیب تابشی می باشد. با محاسبه معادلات بالا، خواص حباب از قبیل فشار، دمای داخلی و شدت گسیلی محلول پنج گاز نجیب محاسبه و مقایسه می گردد.

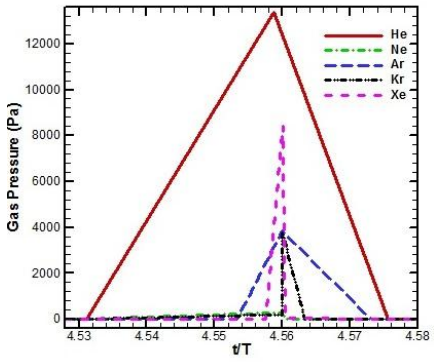
## ۲-۳- نتایج عددی

پارامترهای مختلف گازها و همچنین خواص فیزیکی آب در $^0\mathrm{C}$ ۲۳، به ترتیب در جداول۱و۲ بطورخلاصه نشان داده شده است.

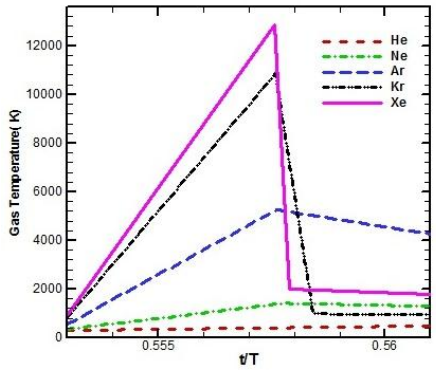
در این محاسبات $P_0 = 1.01325 \times 10^5 Pa$ فشار اولیه محیط است. فشار داخلی حباب، دما و شدت گسیل برای گازهای نجیب در شکل های ۱-۳ مقایسه می شوند. همانطوریکه در شکل۱ نشان داده شده است در مدت فروریزش، فشار به شدت وابسته به نوع گاز است. در شکل۲ دما برای گازهای نجیب در فروریزش حباب مقایسه شد. این شکل نشان می دهد که با افزایش وزن مولکولی گاز، دمای گاز در زمان فروریزش افزایش می یابد. در شکل۳ یک مقایسه برای شدت گسیل گازهای نجیب مختلف در لحظه فروریزش انجام شده است. در این شکل مقیاس محور چپ شدت گسیل از حباب های He وNe و مقیاس محور راست شدت گسیل از حباب های Ar,Kr و Xe می باشد و نشان می دهد که با افزایش وزن مولکولی، شدت گسیل شده افزایش می یابد، شدت گسیل از مرتبه $^{۹}۱۰$ است.



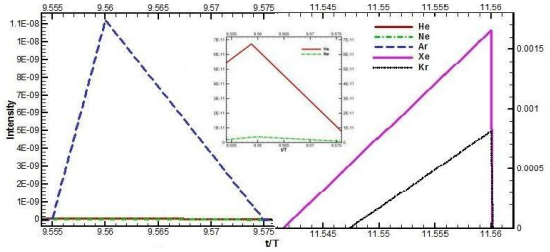
[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]




شکل۱: مقایسه فشار حباب سونولومینیسانس در حضور گازهای نجیب محتلف در زمان فروریزش حباب




شکل۲: مقایسه دمای حباب سونولومینیسانس در حضور گازهای نجیب محتلف در زمان فروریزش حباب




شکل۳: مقایسه شدت گسیل حباب سونولومینیسانس در حضور گازهای نجیب محتلف در زمان فروریزش حباب

## ۳- نتیجه‌گیری

اثر محلول گاز روی خواص SBSL در آب بررسی شد. نشان داده شد که با افزایش وزن مولکولی گاز، دمای داخلی حباب و شدت گسیلی افزایش می یابد، گرچه فشار داخلی حباب کاهش می یابد. هر چند افزایش وزن مولکولی گاز کوچک است اما می توان اختلاف بزرگی در پروفایل تابش ملاحظه کرد. با وجود اینکه اندازه های بدست آمده در توافق با نتایج محاسبه شده تجربی اخیر برای به کار بردن گازهای نجیب SBSL هستند، اختلاف بزرگ در اندازه ها قطعیت مدل برمزاشترلانگ را حداقل برای اتمهای سبک تر ثابت می کند. بنابراین لزوم بررسی بعضی مدل های تابشی دیگر برای یافتن یک مکانیزم تابش محیطی برای هر سیستم ایده آل احساس می شود.

جدول۱: پارامترهای مختلف گازهای نجیب

| گاز نجیب | He | Ne | Ar | Kr | Xe |
|---|---|---|---|---|---|
| شعاع موثر اتمی(A) | 1.4 | 1.54 | 1.88 | 2.20 | 2.16 |
| وزن مولکولی (kg/mole) | 0.00400 260 | 0.02017 97 | 0.0399 48 | 0.0837 98 | 0.1312 93 |
| حجم ویژه مولی (mol/m3) | 0.02242 4 | 0.02242 | 0.0223 92 | 0.0223 5 | 0.0223 |

جدول۲: خواص فیزیکی آب در $^0$c ۲۳

| | |
|---|---|
| سرعت صوت در آب | $C = 1485m.s^{-1}$ |
| ویسکوزیته جنبشی | $v = 10^{-6}m^2.s^{-1}$ |
| کشش سطحی | $\sigma = 0.072\ N.m^{-1}$ |
| چگالی | $\rho = 998\ Kg.m^{-3}$ |

## مراجع


[1] M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt and D. Lohse, Rev. Mod. Phys. **74**, 2 (2002).
[2] A. Moshaii, R. Rezaei-Nasirabad, Kh. Imani, M. Silatani, R. Sadighi-Bonabi, Phys. Lett. A **372** (2008).
[3] R. Sadighi-Bonabi, F. Razeghi, H. Ebrahimi , Sh. Fallahi and E. Lotfi, Phys. Rev. E **85**, 016302 (2012).
[4] R. Sadighi-Bonabi, N. Rezaee, H. Ebrahimi , and M. Mirheydari, Phys. Rev. E **82**, 016316 (2010).
[5] K. Yasui , Phys. Rev. E **60**, 2, 1754 (1999).
[6] Kh. Imani, F. Bemani, M. Silatani, R. Sadighi-Bonabi, Phys. Rev. E **85**, 016329 (2012).
[7] A. Moshaii and R. Sadighi-Bonabi, Phys. Rev. E **70**, 016304 (2004).
[8] R. Mettin, I. Akhatov, U. Parlitz, C. D. Ohl and W. Lauterborn, Phys. Rev. E **56**, 2924 (1997).
[9] R. Sadighi-Bonabi, R. Rezaei-Nasirabad and Z. Galavani, J. Acoust. Soc. Am. **126**, 2266 (2009).
[10] G. Vazquez, C. Camara, S. J. Putterman and K. Weninger, Phys. Rev. Lett**. 88**, 197402 (2002).
[11] R. Hiller, S. J. Putterman and B. P. Barber, Phys. Rev. Lett. **69**, 1182-84 (1992).
[12] S. Hilgenfeldt, S. Grossmann and D. Lohse, Phys. Fluids **11**, 6 (1999); A. Prosperetti, J. Acoust. Soc. Am. **61**, 17 (1977).
[13] R. Lofstedt, K. Weninger, S. J. Putterman and B. P. Barber, Phys. Rev. E **51**, 4400-10 (1995).
[14] C. D. Ohl, Phys. Rev. E **61**, 2 (2000).
[15] K. Yasui, Phys. Rev. E **56**, 6750 (1997).
[16] H. Kwak and J. H. Na, Phys. Rev. Lett. **77**, 4454 (1996).
[17] R. Lofstedt, B. P. Barber and S. J. Putterman, Phys. Fluids A **5**, 2911 (1993).




[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]