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

نقش دامنه فشار آکوستیکی بر شدت تابش تک حباب سونولومینسانسی متحرک

مرتضی پیش بینی[۱]، شادی فلاحی[۲]، مریم قشلاقی[۱] و رسول صدیقی بنابی[۲]

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

[۲]دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

چکیده - در این مقاله با استفاده از شبیه سازی عددی، اثر فشار آکوستیکی بر شدت تابش تک حباب سونولومینسانسی متحرک مورد بررسی قرار گرفته است. تحولات درون حباب به صورت شبه آدیاباتیک در نظر گرفته شده، بدین ترتیب که در لحظه فروریزش به دلیل کوچک بودن بازه زمانی فرآیند آدیاباتیک و در بقیه سیکل فرآیند به صورت همدما فرض می شود. برای بررسی اثر فشار آکوستیکی برروی شدت تابش حباب، حباب آرگون در سیال آب در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهد که افزایش دامنه فشار آکوستیکی منجر به افزایش در پیک دما و فشار حباب و در نتیجه افزایش شدت تابش در لحظه فروریزش می شود. از الگوریتم رانژ-کوتا مرتبه چهارم برای شبیه سازی دینامیک حباب استفاده شده است. نتایج توافق خوبی با گزارش های آزمایشگاهی روی تک حباب سونولومینسانسی متحرک دارد.

کلید واژه- تابش برم اشترلانگ، دینامیک حباب، سونولومینسانس متحرک

Effect of Acoustic Pressure on the Radiation of Moving Single-Bubble Sonoluminescence

Morteza Pishbini[1], Shadi Falahi[2], Maryam Gheshlaghi[1], Rasoul Sadighi-Bonabi[2]

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

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

Abstract- The effect of acoustic pressure on the radiation of a moving single bubble sonoluminescence (m-SBSL) has been numerically investigated. It is assumed that the bubble interior evolution follows the quasi adiabatic model which is adiabatic in the collapse time and isothermal in remained cycle. To consider the effect of acoustic pressure on a bubble radiation, an argon bubble in water is investigated. It is shown that with increasing the acoustic pressure the bubble's temperature, pressure and radiation increases. The four-order Range-Kutta algorithm is used to simulate the bubble dynamics. The results are in good agreement with the experimental reports on m-SBSL.

Keywords: Bremsstrahlung Radiation, Bubble dynamic, Moving Sonoluminescence

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

۱- مقدمه

سونولومینسانس یک پدیده فیزیکی است که در آن فونون های آکوستیکی تبدیل به فوتون های نوری می شود. سونولومینسانس های چند حبابی[۱-۲]و تک حبابی متحرک به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته اند[۳-۴]. تک حباب سونولومینسانسی در فیزیک کاویتاسیونی نقش اتم هیدروژن در فیزیک اتمی را بازی می کند. ایزوله کردن حباب از اختلال، و ثابت نگه داشتن مکان آن بدون حرکت انتقالی مطالعه را ساده تر می کند.

گاز اتمی و مولکول ها به دلیل دما و فشار بالا در هنگام فروریزش تک حباب سونولومینسانسی تشکیل پلاسما با طیف فوتونی گسترده می دهد. در این مقاله دینامیک شعاعی- انتقالی حباب سونولومینسانسی به صورت عددی با استفاده از شبیه سازی شبه-آدیاباتیک در آب برآورد شده و نقش فشار آکوستیکی بر روی دما، فشار و شدت تابش حباب گاز آرگون بررسی شده است. برای محاسبه تابش نیز از مکانیسم برم اشترلانگ استفاده شده است. نشان می دهیم که در تک حباب سونولومینسانسی متحرک افزایش دامنه فشار آکوستیکی منجر به افزایش پیک دما و فشار و در نتیجه افزایش شدت تابش تک حباب سونولومینسانسی متحرک در لحظه فروریزش در آب می شود.

۲- تئوری

در مقاله حاضر از معادله حرکت جفت شده شعاعی– انتقالی استفاده شده است [۵]. اگرچه معادله ارائه شده توسط توگل با بعضی از پارامترهای حباب مانند سرعت توافق دارد اما در محاسبه پارامترهای درونی مانند دمای درونی حباب ناتوان است. به همین دلیل برای بررسی دمای درونی حباب و تحولات شعاعی از یک معادله حالت شبه بی دررو برای گاز درون حباب استفاده شده است. در مرجع [۵] توگل از معادله واندروالس همدما برای بررسی تحولات شعاعی حباب سونولومینسانس استفاده کرده است.

۲-۱- دینامیک شعاعی حباب

معادله تحول شعاعی حباب به معادله ریلی – پلست مشهور است [۶]:

$$\left(1-\frac{\dot{R}}{C}\right)R\ddot{R}+\frac{3}{2}\left(1-\frac{\dot{R}}{3C}\right)\dot{R}^2=\frac{R}{\rho C}\dot{P}_g-\frac{4\mu\dot{R}}{R}-\frac{2\sigma}{\rho R}+\left(1+\frac{\dot{R}}{C}\right)\frac{P_g-P_{aco}-P_0}{\rho} \quad (۱)$$

که R، C، ρ، μ و σ به ترتیب شعاع حباب، سرعت صوت در سیال، چگالی سیال، ویسکوزیته سیال و کشش سطحی در دیواره حباب است. P_0 فشار محیطی و P_g فشار گاز درون حباب است [۷-۸]:

$$P_g=\left(P_0+\frac{2\sigma}{R_0}\right)\frac{\left(R_0{}^3-h^3\right)^{\Gamma}}{\left(R(t)^3-h^3\right)^{\Gamma}} \quad (۲)$$

که R_0، h و Γ به ترتیب شعاع اولیه حباب، شعاع هسته سخت واندروالس و مولفه پلی تروپیک است. برای محاسبه دمای گاز درون حباب، معادله ریلی – پلست را با معادله دیفرانسیل زیر همراه می کنیم [۹]:

$$\dot{T}_g=-\left[\Gamma\left(Pe(t)\right)-1\right]\frac{3R^2\dot{R}}{R^3-h^3}T_g-\left(T_g-T_w\right)\chi_g/R^2 \quad (۳)$$

که $\Gamma\left(Pe(t)\right)$ تابع انتقال متغیر از حالت همدما به حالت حرارتی درون حباب است [۱۰]. در معادله (۱) P_{aco} فشار جزئی توزیع شده اطراف دیواره حباب در مایع است:

$$P_{aco}=-P_a\sin(\omega t)\left(1-\frac{\pi^2\left|\vec{X}\right|^2}{6R^2{}_{fl}}\right) \quad (۴)$$

که P_a، ω، $\vec{X}$ و R_{fl} به ترتیب دامنه فشار رونده، فرکانس زاویه ای میدان صوتی، مکان حباب متحرک و شعاع فلاسک است.

۲-۲- دینامیک انتقالی حباب

حرکت انتقالی حباب سونولومینسانسی با دو بار انتگرال-گیری از شتاب انتقالی حباب محاسبه می شود، که از طریق دینامیک شعاعی – انتقالی با نیروی موازنه شده تک حباب سونولومینسانسی متحرک بدست می آید:

$$R(t)^{3\cdot}=\frac{d}{dt}\left[\left(18\mu R+3R^2\dot{R}\right)(u-v)+3R^{3\cdot}-2R^3g\right]$$
$$-3R^2\ddot{R}+3\frac{\Theta_r\Theta_t}{R^2}\left[\left(6\mu R+3R^2\dot{R}\right)(u-v)+3R^{3\cdot}-2R^3g-R^{3\cdot}\right] \quad (۵)$$

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

که به ترتیب μ ویسکوزیته وابسته به حرکت (ویسکوزیته جانبی/چگالی) مایع، u و v میدان سرعت موج ایستاده و بردار سرعت حباب است. g شتاب گرانشی و $R(t)$ شعاع حباب است که با معادله (۱) داده می شود. Θ_r و Θ_t سوئیچ هایی جهت فعال سازی اثر نیروی هیستوری است.

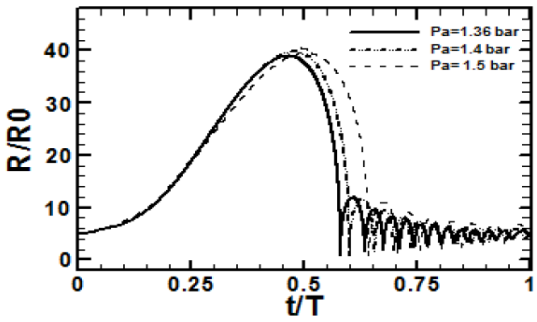
۳- نتایج عددی

نتایج محاسبات عددی در شکل های (۱) تا (۴) نمایش داده شده است. در این محاسبات، فشار محیطی $P_0 = 1.013\times10^5\,Pa$، فرکانس موج صوتی $f=33.4kHz$، و مولفه های مکان اولیه حباب آرگون $X_0 = 0.75\times10^{-4}\,m$ ، $Y_0 = -0.175\times10^{-4}\,m$ $Z_0 = 1.24\times10^{-3}\,m$ می باشد. همچنین خواص فیزیکی آب در دمای $۲۰\,^0C$ عبارتند از: کشش سطحی $\sigma=0.072N/m$، لزجت $\mu=0.001003kg/m.s$، چگالی سیال $\rho = 998\ kg/m^3$ و سرعت صوت در سیال $C=1486m/s$. مقادیر عددی مربوط به خواص فیزیکی آب با توجه به مرجع [۱۱] تخمین زده شده است.

پارامترهای اولیه را باید طوری در نظر گرفت که مقادیر انتخابی در دیاگرام فاز مربوطه، در محدوده مجاز قرار گیرد بدین معنی که شرایط پایداری انتشاری و شکلی برای آن برقرار باشد. با توجه به موارد مذکور، دامنه فشارهای صوتی و شعاع اولیه حباب آرگون متحرک در آب بدین صورت انتخاب می شوند:

R_0=5μm, P_a=1.36bar - R_0=5.5μm, P_a=1.4bar
R_0=7μm, P_a=1.5bar

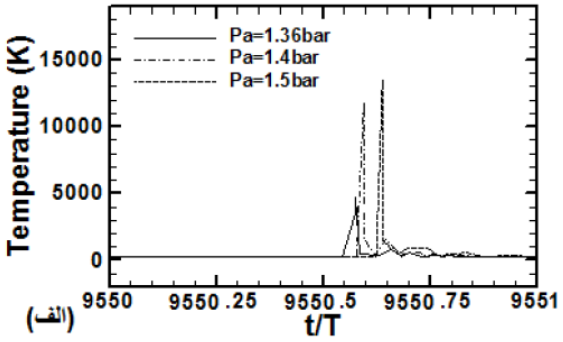
در شکل (۱) مشاهده می شود که افزایش دامنه فشار آکوستیکی، بازه زمانی انبساط حباب را افزایش می دهد.



شکل(۱): مقایسه شعاع حباب برای یک سیکل آکوستیکی در دمای $۲۰\,^0C$، در سه دامنه فشار اعمالی

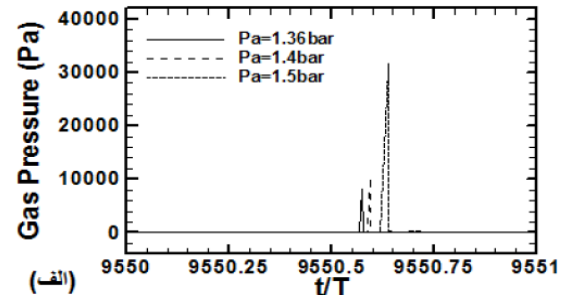
علاوه براین هرچه دامنه فشار اعمالی را افزایش دهیم، تعداد پس جهش هایی که رخ می دهد، کاهش می یابد.

در شکل (۲) دمای درون حباب، برای سه دامنه فشار صوتی، با هم مقایسه شده اند. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، بیشینه دمای گاز درون حباب در لحظه فروریزش رخ می دهد. با توجه به اینکه افزایش در دامنه فشار صوتی سبب افزایش در آهنگ فروریزش حباب می گردد، لذا همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود، با افزایش دامنه فشار صوتی اعمالی، دمای درون حباب نیز افزایش می یابد.



شکل(۲): مقایسه تغییرات دمای درون حباب در طول یک سیکل آکوستیکی در دمای $۲۰\,^0C$، در سه دامنه فشار اعمالی

در شکل (۳) نیز فشار گاز درون حباب برای سه دامنه فشار صوتی، در یک سیکل آکوستیکی نمایش داده شده است. مشاهده می شود که هرچه دامنه فشار صوتی بزرگتر باشد، آهنگ فروریزش حباب شدیدتر بوده و تراکم حباب در لحظه فروریزش بیشتر است که موجب بالا رفتن فشار گاز درون حباب می گردد.

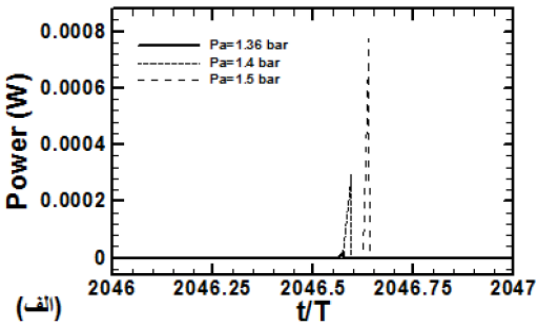


شکل(۳): مقایسه تغییرات فشار درون حباب در طول یک سیکل آکوستیکی در دمای $۲۰\,^0C$، در سه دامنه فشار اعمالی

در شکل (۴) توان تابشی ناشی از حباب حاوی گاز آرگون، که با استفاده از مکانیسم برم اشترلانگ محاسبه شده، در

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

سه دامنه فشار صوتی برای یک سیکل صوتی نمایش داده شده است.



شکل(۴): توان برم اشترلانگ تابشی از حباب، در طول یک سیکل آکوستیکی در دمای C^{0} ۲۰، در سه دامنه فشار اعمالی

همان طور که مشاهده می شود افزایش دامنه فشار صوتی باعث افزایش میزان تابش از تک حباب سونولومینسانسی متحرک می شود.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی اثر دامنه فشار آکوستیکی بر شدت تابش تک حباب سونولومینسانسی متحرک، با استفاده از یک مدل شبه- بی دررو برای شبیه سازی گاز آرگون درون حباب، در سیال آب پرداخته شده است. برای محاسبه شدت تابش تک حباب سونولومینسانسی نیز از مکانیسم برم اشترلانگ استفاده شده است. همان طور که مشاهده می شود افزایش فشار آکوستیکی باعث افزایش دما و فشار گاز درون حباب و در نتیجه افزایش شدت تابش حباب سونولومینسانسی متحرک در لحظه فروریزش می گردد.

مراجع

[1] F. R. Young, *Cavitation* (CRC Press, Boca Raton, FL, 2005).
[2] R. Sadighi-Bonabi, N. Rezaee, H. Ebrahimi, and M. Mirheydari, Phys. Rev. E **82**, 016316 (2010).
[3] Y. T. Didenko,W. B. McNamara, and K. S. Suslick, Nature (London) **407**, 877 (2000).
[4] R. Sadighi-Bonabi,M.Mirheydari, N. Rezaee, and H. Ebrahimi, Phys. Rev. E **84**, 026301 (2011).
[5] R. Toegel, S. Lutter, D. Lohse, "Viscosity Destabilizes Sonoluminescing Bubbles, " *Phys. Rev. Lett*, vol. 96 pp. 114301, 2006.
[6] B. Keller, M. miksis, . "Bubble oscillations of large amplitude, "*J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 68, pp. 628, 1980.
[7] Lofstedt, R. K. Weninger, S. Putterman, and B. P. Barber, ''Sonoluminescing bubbles and mass diffusion,'' Phys. Rev. E., vol. 51,pp. 4400-4410, 1995.
[8] B. P. Barber, R. A. Hiller, R. Lo¨ fstedt, , S. J. Putterman, K. R.Weninger, ''Defining the unknowns of sonoluminescence,'' *Phys. Rep.*,vol. 281, pp. 65–143, 1997.
[9] Hilgenfeldt, S., S. Grossmann, and D. Lohse, ''Sonoluminescence light emission,'' *Phys. Fluids*, vol. 11, pp. 1318–1330, 1999.
[10] A. Prosperetti, , ''Thermal effects and damping mechanisms in the forced radial oscillations of gas bubbles in liquid,'' *J. Acoust. Soc. Am*. vol. 61, pp. 17–27.World Academy of Science, Engineering and TechnologyVol:19 2008-07-21524 International.
[11] CRC Handbook of Chemistry and Physics, edited by D. R. Lided (CRC Press, Boca Rat On, 1991).

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