

شبیه‌سازی تأثیر نوع گاز نجیب حل‌شده بر شدت تابش تک‌حباب سونولومینسانسی ایستا در سیال آب و اسید فسفریک ۶۵٪

مرتضی پیش‌بینی

morteza_pishbini@yahoo.com

مری، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۱/۲۸

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۱۷

چکیده

در این مقاله با استفاده از مدل هیدروشیمیایی و مکانیسم برم اشتراک‌کننده حرارتی و الگوریتم رانگ-کوتا مرتبه چهار تأثیر نوع گاز نجیب حل‌شده در سیال بر پارامترهای خروجی تک‌حباب سونولومینسانسی ایستا در دو سیال پایه آب و اسید فسفریک ۶۵٪ به‌عنوان غلظت بهینه اسید فسفریک به‌صورت عددی، مورد بررسی قرار گرفته است. برای داشتن تک‌حباب سونولومینسانسی ایستا و پایدار و محاسبه پارامترهای اولیه حباب شامل شعاع و دامنه فشار آکوستیکی، ناپایدارهای شکلی، انتشاری و مکانی با استفاده از نمودار فاز بررسی و از پارامترهای به‌دست آمده در محاسبه‌ها استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو سیال آب و اسید فسفریک ۶۵٪ با افزایش جرم اتمی گاز نجیب حل‌شده در سیال از He به Xe شاهد افزایش دما و شدت تابش تک‌حباب ایستا در لحظه فروریزش هستیم که انطباق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی موجود از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که در سیال آب با افزایش جرم اتمی گاز نجیب بازه زمانی فروریزش حباب افزایش می‌یابد، حال آن‌که در سیال اسید فسفریک ۶۵٪ عکس این حالت اتفاق می‌افتد.

واژه‌های کلیدی: تک‌حباب سونولومینسانسی، مدل هیدروشیمیایی، مکانیسم برم اشتراک‌کننده حرارتی

۱. مقدمه

همچنین مکانیسم‌های مختلفی برای محاسبه دما و شدت تابش تک‌حباب سونولومینسانسی در لحظه فروریزش ارائه شده است [۷].

دماهایی در حد چند ده هزار کلوین در لحظه فروریزش تک‌حباب سونولومینسانسی محققان را متقاعد ساخته است که می‌توان از این پدیده برای دستیابی به سونوفیوژن^۴ استفاده کرد [۸]. از آنجا که افزایش دما و شدت تابش گسیلی از حباب سونولومینسانسی در لحظه فروریزش از اهداف اصلی محققان این عرصه است، اثر احتمالی عوامل دیگر از جمله گاز حل‌شده در سیال بر افزایش دما و شدت نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در شرایط محیطی مناسب، گاز حل‌شده در سیال می‌تواند

از زمان کشف پدیده سونولومینسانس تک‌حبابی به‌وسیله فیلیپ گایتان^۱ و همکارانش، جنبه‌های مختلفی از این پدیده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۱-۲]. علی‌رغم وجود سونولومینسانس چندحبابی^۲، به دلیل پایداری بیشتر، ایزوله بودن، دما، فشار و شدت بالاتر در لحظه فروریزش، سونولومینسانس تک‌حبابی^۳ در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه محققان بوده است [۲]. پارامترهای مختلف تک‌حباب سونولومینسانسی از جمله تغییرات شعاعی حباب، دما و شدت تابش گسیلی در لحظه فروریزش به‌صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل نشان می‌دهد که این پارامترها به دمای محیطی [۳]، نوع سیال [۴-۵] و دامنه فشار آکوستیکی [۶] به‌شدت حساس هستند.

در گام اول به تعداد ذرات موجود درون تک‌حباب وابسته است. به‌عنوان نمونه، یک حباب سونولومینسانسی نمونه با بسامد تحریکی ۳۰ KHz و شعاع محیطی $6\ \mu\text{m}$ شامل 10^{10} ذره است. شبیه‌سازی چنین سیستمی با استفاده از رایانه‌های امروزی بسیار سخت و در اغلب موارد غیرممکن است [۱۴].

مدلی که در این مقاله از آن برای بررسی تحولات درونی تک‌حباب سونولومینسانسی ایستا استفاده کرده‌ایم مدل هیدروشمیایی است که نخستین بار به‌وسیله یاسویی^۹ در سال ۱۹۹۷ میلادی پیشنهاد شد و بسیاری از خصوصیات و پیچیدگی‌های موجود از جمله انتشار، واکنش‌های شیمیایی، ویسکوزیته، تبخیر و چگالش بخار آب، تبادل حرارت بین گاز نجیب و سیال اطراف و یونیزاسیون اتم‌ها و مولکول‌ها را در برمی‌گیرد [۱۵-۱۶].

در ادامه به‌طور خلاصه معادله‌های حاکم بر دینامیک شعاعی حباب و تحولات درونی آن را در مدل هیدروشمیایی مرور می‌کنیم.

۲-۱. دینامیک شعاعی غیرخطی حباب

در پدیده سونولومینسانس، دیواره حباب حاوی گاز که در سیال نوسان می‌کند، دینامیک شعاعی غیرخطی دارد. تحول زمانی حرکت شعاعی دیواره حباب سونولومینسانسی را می‌توان با معادله ریلی-پلست^{۱۰} بیان کرد [۱۷]:

$$\left(1 - \frac{\dot{R}}{C_l}\right) R \ddot{R} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{\dot{R}}{3C_l}\right) \dot{R}^2 = \frac{R}{\rho C} \frac{d}{dt} (P_l - P_a) + \left(1 + \frac{\dot{R}}{C}\right) \frac{P_l - P_a - P_0}{\rho} \quad (1)$$

که در آن فشار سیال (P_l) و فشار گاز موجود درون حباب (P_g) با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$P_l = P_g - 4 \frac{\mu R}{R} - 2 \frac{\sigma}{R}, \quad P_g(t) = \frac{N_{tot}(t) k_B T_g}{V - N_{tot}(t) B} \quad (2)$$

در این معادله‌ها R شعاع حباب و \dot{R} و \ddot{R} مشتقات مرتبه اول و دوم زمانی آن هستند. C_l ، σ ، μ ، ρ به ترتیب سرعت

سبب افزایش دما و شدت تابش گسیلی حباب سونولومینسانسی در لحظه فروریزش شود [۲، ۹-۱۱].

در این مقاله با استفاده از مدل هیدروشمیایی^۵ و مکانیسم برم اشتراک^۶ حرارتی به بررسی تأثیر نوع گاز نجیب حل شده بر پارامترهای خروجی تک‌حباب سونولومینسانسی ایستا در سیال پایه آب و سیال اسید فسفریک در غلظت بهینه یعنی اسید فسفریک ۶۵٪ پرداخته‌ایم. با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود، غلظت ۶۵٪ سیال اسید فسفریک به‌عنوان غلظت بهینه، در لحظه فروریزش دما و شدت بالاتری را نسبت به سایر غلظت‌های اسید فسفریک ایجاد می‌کند [۴]. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش جرم اتمی گاز نجیب از He به Xe شاهد افزایش دما و شدت تابش گسیلی تک‌حباب سونولومینسانسی ایستا در لحظه فروریزش هستیم که انطباق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. علاوه‌براین نتایج عددی نشان می‌دهند که بازه زمانی فروریزش در سیال پایه آب با افزایش جرم اتمی گاز نجیب افزایش می‌یابد، حال آن که در سیال اسید فسفریک ۶۵٪ عکس این حالت روی می‌دهد.

۲. مدل هیدروشمیایی

برای بررسی تحولات درونی تک‌حباب سونولومینسانسی، چندین مدل از جمله مدل شبه آدیاباتیک^۷ - هم‌دما [۱۲] و مدل شبیه‌سازی دینامیک مولکولی^۸ ارائه شده است [۱۳-۱۴]. اما هر کدام از این مدل‌ها نقاط ضعفی دارند. مدل شبه آدیاباتیک - هم‌دما بسیار ساده است و تحولات درونی حباب را در لحظه فروریزش به دلیل بازه زمانی بسیار کوتاه، آدیاباتیک و در زمان باقی‌مانده از سیکل به دلیل انبساط آرام حباب هم‌دما در نظر می‌گیرد. نقطه‌ضعف این مدل آن است که بسیاری از پارامترهای مهم حباب و سیال میزبان مانند واکنش‌های شیمیایی و تبادل بخار آب بین حباب و سیال در این مدل نادیده گرفته می‌شود. مدل شبیه‌سازی دینامیک مولکولی نیز بسیار زمان‌بر است و تنها برای سیستم‌هایی که اندازه فیزیکی کوچکی دارند، قابل استفاده است. بررسی دینامیک مولکولی، به‌عنوان روش مدل‌سازی درونی حباب،

برابر با جمع تغییرات انرژی ناشی از کار فشار خارجی، اتلاف انرژی در فصل مشترک، انرژی واکنش‌های شیمیایی و تغییر در آنتالپی است. با توجه به موارد گفته‌شده، تغییرات زمانی دمای گاز نجیب درون حباب با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود [۲۰، ۵]:

$$\dot{T}_g \frac{\partial e_{th,j}}{\partial T_g} N_j = \dot{Q} - P_g \dot{V} - \sum_j e_{th,j} \dot{N}_j + \dot{E}_{chem} + \sum_j h_{w,j} \dot{N}_j^d \quad (۳)$$

که در آن T_g دمای گاز نجیب درون حباب، N_j تعداد مولکول‌های بخار ذره نوع j حاصل از تجزیه مولکول‌های اولیه و \dot{N}_j بر آهنگ زمانی تغییر تعداد این مولکول‌ها درون حباب دلالت دارد. در این رابطه $\left(1 + \frac{f_j}{2}\right)KT_0$ آنتالپی مولکولی ذره‌های نوع j در دمای دیواره T_0 و f_j مجموع درجه‌های آزادی چرخشی و انتقالی است. کمیت \dot{E}_{chem} نیز آهنگ زمانی تغییرات انرژی شیمیایی حباب گاز به خاطر واکنش‌های در نظر گرفته شده در مدل هیدروشیمیایی را مشخص می‌کند. \dot{Q} و V به ترتیب نرخ انتقال حرارت در دیواره حباب و حجم حباب را مشخص می‌کنند. همچنین $e_{th,j}$ انرژی حرارتی مولکول نوع j است که با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$e_{th,j} = \frac{f_j}{2}KT_g + \sum_l \frac{K\Theta_{j,l}}{\exp(\Theta_{j,l}/T_g) - 1} \quad (۴)$$

در این رابطه $\Theta_{j,l}$ مشخصه دمای نوسانی ذره j است. جزئیات کامل تری در رابطه با معادله (۳) را می‌توان در مراجع [۱۶، ۱۹] مشاهده کرد که به دلیل خلاصه کردن مطالب ارائه نشده است. با حل عددی این مجموعه معادله‌ها در مدل هیدروشیمیایی می‌توان تغییرات شعاعی حباب و تحولات ترمودینامیکی درون حباب را به دست آورد.

۲-۵. پایداری حباب سونولومینسانسی

برای داشتن نوسان‌های پایدار در یک بازه زمانی طولانی، حباب سونولومینسانسی باید در مقابل سه ناپایداری اصلی شکلی، انتشاری و مکانی از خود مقاومت نشان دهد [۲]. این

موج صوتی درون سیال، کشش سطحی، ویسکوزیته و چگالی سیال هستند. P_0, P_l, P_a, P_g نیز به ترتیب فشار گاز درون حباب، فشار آکوستیکی در محل حباب ($P_a = -p_a(\sin \omega t)$ که ω فرکانس موج آکوستیکی است)، فشار سیال اطراف حباب و فشار محیطی هستند. N_{tot}, T_g, B, k_B به ترتیب ثابت بولتزمن، پارامتر هسته سخت، دمای گاز نجیب و تعداد کل ذرات موجود درون حباب هستند که در این تحقیق پارامتر هسته سخت برای تمامی ذرات یکسان و مقدار ($B = 5.1 \times 10^{-29} m^3$) فرض شده است [۱۸].

۲-۲. واکنش‌های شیمیایی

در ابتدای هر سیکل، حباب نوسان‌کننده حاوی گاز و مولکول‌های بخار آب است. به دلیل تجزیه مولکول‌های بخار آب، در انتهای بازه زمانی فروریزش حباب، پنج محصول در حباب تولید می‌شود که شامل: H, O, OH, H_2, O_2 هستند. در این مدل هشت واکنش شیمیایی بین ذره‌های درون حباب در نظر گرفته می‌شود و نسبت واکنش‌ها از طریق قانون آرنوس^{۱۱} محاسبه می‌شود [۱۸].

۲-۳. انتقال جرم و حرارت

در مدل هیدروشیمیایی برای بررسی انتقال حرارت بین حباب و سیال اطراف آن از یک فرمول‌بندی لایه‌مرزی استفاده می‌شود که در آن نسبت تبادل انرژی حرارتی بین حباب و سیال متناسب با دمای حباب و دمای سیال است [۵]. علاوه بر این، تغییرات رسانندگی حرارتی گاز نجیب در دماهای بالای $2500 K$ با یک چندجمله‌ای مرتبه چهار محاسبه شده است [۱۹]. انتشار محصولات حاصل از واکنش‌های شیمیایی نیز با فرمول‌بندی لایه‌مرزی مشابه محاسبه می‌شود [۵].

۲-۴. معادله انرژی

برای محاسبه تحول زمانی دمای حباب، سهم فرایندهای انرژی مختلف در تحول آن در یک معادله انرژی در نظر گرفته می‌شود [۵]. در این معادله، تغییر انرژی حرارتی حباب

و \bar{v} نشان دهنده سرعت متوسط الکترون‌های آزاد است که با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8K_B T_g}{\pi m_e}} \quad (۸)$$

در این رابطه m_e به جرم الکترون و K_B به ثابت بولتزمن اشاره دارد. زمانی که تابش، ناشی از حرکت یک الکترون آزاد در میدان کولنی یک یون مثبت باشد، توان تابشی با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۲-۲۳]:

$$P_{Br,ion} = 1.57 \times 10^{-40} q^2 N^2 T_g^{1/2} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) \quad (۹)$$

که در آن تمام کمیت‌ها در دستگاه (SI) بیان شده است. تابش ترمزی می‌تواند زمانی که یک الکترون از میدان یک اتم خنثی عبور می‌کند، اتفاق بیفتد. در این حالت توان تابشی با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$P_{Br,atom} = 4.6 \times 10^{-44} q N^2 T_g \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) \quad (۱۰)$$

برای محاسبه توان تابشی علاوه بر دو فرایند بیان شده فرایند بازترکیب تابشی الکترون-یون نیز در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن هر سه فرایند، توان تابشی کل حباب به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I = \left(r_e h \bar{v} + P_{Br,ion} + P_{Br,atom} \right) r_e \quad (۱۱)$$

که در این رابطه $h \bar{v} = \frac{3}{2} K_B T_g$ میانگین انرژی یک فوتون تولیدشده در بازترکیب تابشی است. کمیت r_e نیز نرخ فرار فوتون‌های تاییده شده از حباب سونولومینسانسی است که نحوه محاسبه آن با جزئیات محاسبه شدت تابش به روش یاسویی در مرجع [۲۱] آمده است.

۳. مروری بر نتایج آزمایشگاهی

تحقیقات آزمایشگاهی مختلف نشان می‌دهد که افزودن گازهای نجیب به پایداری و افزایش شدت پدیده سونولومینسانس منجر می‌شود. برای نمونه، اضافه کردن He، Ar و Xe به N_2 ، زمانی که غلظت گاز نجیب از ۱ درصد تجاوز نکند، می‌تواند شدت بالاتری را نسبت به گاز نجیب خالص یا هوای خالص ایجاد کند [۲۵].

سه ناپایداری را می‌توان به‌طور هم‌زمان به صورت منحنی‌هایی در نمودار (R_0, P_a) که نمودار فاز^{۱۲} نامیده می‌شود، نمایش داد [۱۸]. با استفاده از نمودار فاز می‌توانیم به صورت تئوری بازه مجاز شعاع اولیه حباب (R_0) و دامنه فشار آکوستیکی (P_a) را برای تک‌حباب سونولومینسانسی پایدار به دست آوریم.

۲-۶. مکانیسم تابش حباب سونولومینسانسی

به دلیل دمای بالای گاز درون حباب سونولومینسانسی در لحظه فروریزش، می‌توان محیط درونی حباب را یونیزه در نظر گرفت. حضور الکترون‌های آزاد و یون‌ها درون حباب سونولومینسانسی در لحظه فروریزش باعث می‌شود تا بتوان از مکانیسم برم اشتراک‌نگ حرارتی برای توصیف شدت تابش استفاده کرد. در این مقاله برای محاسبه شدت تابش گسیلی از مدل یاسویی که در سال ۱۹۹۹ میلادی ارائه شده، استفاده می‌کنیم [۲۱]. در این مدل سه فرایند تابش ترمزی الکترون-اتم، تابش ترمزی الکترون-یون و بازترکیب تابشی الکترون‌ها و یون‌ها عوامل اصلی حاکم بر تابش حباب در لحظه فروریزش هستند. شدت تابش متناسب است با درجه یونیزاسیون گاز نجیب درون حباب (q) ، که با معادله ساها^{۱۳} محاسبه می‌شود [۲۲-۲۳]:

$$\frac{q^2}{1-q} = 2.4 \times 10^{21} T_g^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{x}{K_B T_g}} \frac{1}{N} \quad (۵)$$

$$n_e = \frac{4}{3} \pi R^3 q N \quad (۶)$$

در این روابط n_e تعداد الکترون‌های آزاد درون حباب، N چگالی اتم‌های گاز بی‌اثر موجود درون حباب، T_g دمای گاز درون حباب سونولومینسانسی و x ، پتانسیل یونیزاسیون گاز درون حباب است. در انتهای بازه فروریزش حباب که تابش سونولومینسانسی رخ می‌دهد، بیشتر اتم‌های موجود درون حباب گازهای نجیب هستند و در نتیجه تابش حباب عمدتاً مربوط به این اتم‌هاست. نرخ بازترکیب الکترون‌های آزاد با یون‌های داخل حباب با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$r_r = \frac{4}{3} \pi R^3 (qN)^2 \sigma_{fb} \bar{v} \quad (۷)$$

در این رابطه σ_{fb} سطح مقطع بازترکیب الکترون‌ها و یون‌ها

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در هر دو سیال با افزایش جرم اتمی گاز نجیب از He به Xe شاهد افزایش شدت تابش تک‌حباب سونولومینسانسی متحرک در لحظه فروریزش هستیم که این تغییرات با توجه به نوع سیال و شرایط حاکم بر آزمایش متفاوت است.

در ادامه این تحقیق، سعی می‌کنیم با در نظر گرفتن شرایط لازم برای داشتن تک‌حباب سونولومینسانس پایدار به شبیه‌سازی عددی تک‌حباب ایستا پردازیم تا شرایط دستیابی به دما و شدت بالاتر در لحظه فروریزش حباب حاصل گردد. علاوه بر این تأثیر تغییر گاز نجیب بر روی پارامترهای خروجی تک‌حباب سونولومینسانسی ایستا را بررسی می‌نماییم.

۴. شبیه‌سازی عددی و نتایج

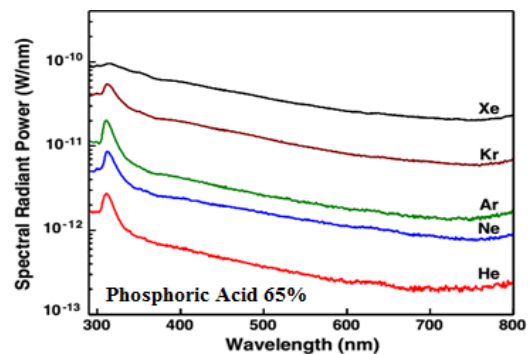
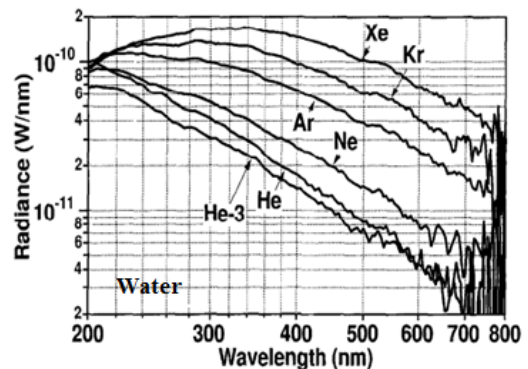
همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، نتایج آزمایشگاهی روی سیال‌های مختلف از جمله آب و اسید فسفریک ۶۵٪ نشان می‌دهد که افزایش عدد اتمی گاز نجیب حل‌شده در سیال، سبب افزایش شدت تابش سونولومینسانس تک‌حباب متحرک در لحظه فروریزش می‌شود.

در راستای تأیید نظری نتایج تجربی گزارش شده و آشنایی با شرایط بهینه برای دستیابی به دما و شدت بالاتر در لحظه فروریزش حباب، با استفاده از مدل هیدروشیمیایی و الگوریتم رانگ-کوتا^۴ مرتبه چهار به شبیه‌سازی عددی فروریزش تک‌حباب ایستا در دو سیال آب و اسید فسفریک ۶۵٪ در دمای اتاق و در حضور گازهای نجیب مختلف می‌پردازیم. در این محاسبات، فرکانس موج آکوستیکی را ۳۸ kHz و فشار محیط را ۱ atm در نظر گرفتیم. شرایط اولیه برای داشتن حباب سونولومینسانسی پایدار شامل پایداری انتشاری، شکلی و مکانی از طریق نمودار فاز (R_0 , P_a) مشخص می‌شود [۲۰۱۸]. همان‌طور که در بخش قبلی مشاهده شد، شرایط اولیه آزمایش‌ها طوری طراحی شده که حباب‌های سونولومینسانسی موجود متحرک هستند، یعنی پایداری مکانی ندارند. این امر سبب می‌شود که مقدار زیادی انرژی صرف حرکت حباب شده و دما و شدت تابش در لحظه فروریزش حباب کاهش یابد.

همچنین نتایج تجربی مختلف نشان می‌دهد که تغییر گاز نجیب حل‌شده در سیال‌های مختلف می‌تواند به افزایش شدت تابش تک‌حباب سونولومینسانس در لحظه فروریزش منجر شود. این امر می‌تواند گامی مثبت برای دستیابی به پدیده سونوفورژن باشد [۲۶، ۱۰، ۲۷].

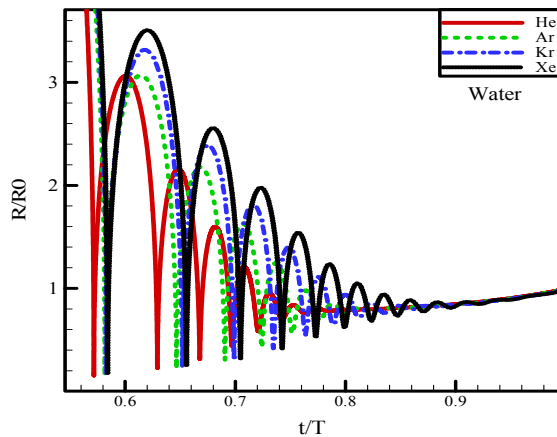
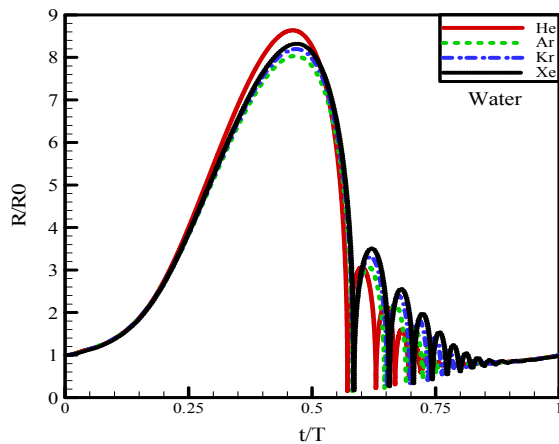
در سال ۱۹۹۴ هیلر و همکارانش؛ به بررسی تجربی طیف حاصل از گازهای نجیب مختلف در سیال پایه آب در دمای اتاق و در فشار جزئی حدود ۴ تور پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها برای تک‌حباب سونولومینسانس متحرک در شکل ۱ نمایش داده شده است [۱۰].

در سال ۲۰۱۰ ژو و همکارانش؛ تحقیق مشابهی در مورد اسید فسفریک ۶۵٪ انجام دادند. آزمایش در فشار جزئی ۵۰ تور و در دمای اتاق انجام شد. اثرات گاز نجیب حل‌شده بر طیف گسیلی در طول موج‌های مختلف در تک‌حباب سونولومینسانسی متحرک در شکل ۱ قابل مشاهده است [۲۶].

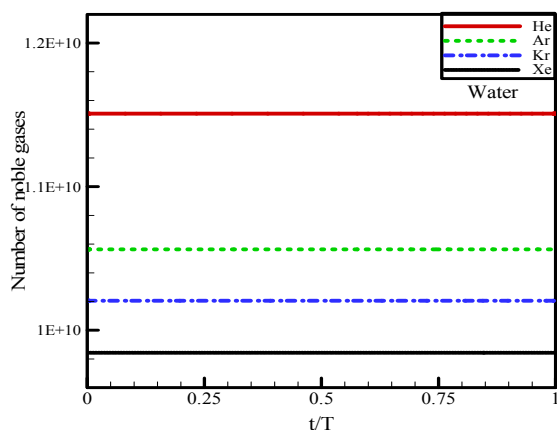


شکل ۱. نتایج تجربی طیف تک‌حباب سونولومینسانسی متحرک ناشی از گازهای نجیب مختلف بر حسب طول‌موج در سیال آب با فشار جزئی ۴ تور و اسید فسفریک ۶۵٪ با فشار جزئی ۵۰ تور در دمای اتاق [۲۶، ۱۰].

بیشترین دما و شدت که به ترتیب متعلق به گاز He و Xe است، به ترتیب حدود ۲۰۰۰۰K و سه مرتبه دامنه است.



شکل ۲. تحول زمانی شعاع تک‌حباب سونولومینسانسی ایستا و بزرگ‌نمایی پس جهش‌های آن در سیال پایه آب در طول یک سیکل آکوستیکی برای گازهای نجیب مختلف در دمای اتاق.



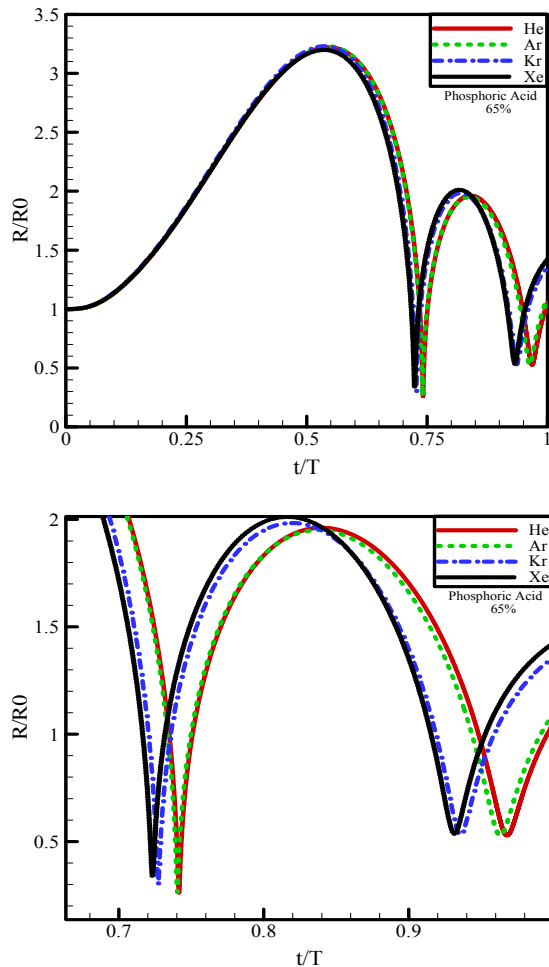
شکل ۳. تعداد ذره‌های گازهای نجیب مختلف در طول یک سیکل آکوستیکی درون تک‌حباب سونولومینسانسی ایستا در سیال پایه آب در دمای اتاق.

به منظور دستیابی به دما و شدت بالاتر در لحظه فروریزش، شرایط اولیه شبیه‌سازی به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که پایداری مکانی حباب نیز محقق شود و در واقع یک حباب سونولومینسانسی پایدار و ایستا داشته باشیم. ابتدا به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی تحول زمانی شعاع تک‌حباب سونولومینسانسی ایستا در سیال آب در فشار جزئی ۴ تور در طول یک سیکل آکوستیکی برای گازهای نجیب مختلف در دمای اتاق که در شکل ۲ نمایش داده شده است، می‌پردازیم. محور عمودی این شکل نسبت شعاع لحظه‌ای حباب به شعاع اولیه آن (R_0) را نمایش می‌دهد. علاوه بر این؛ برای بررسی دقیق‌تر پس جهش‌های موجود در تک‌حباب، این بخش از شکل بزرگ‌نمایی شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش جرم اتمی گاز نجیب از He به Xe شاهد افزایش بازه زمانی فروریزش تک‌حباب هستیم. علاوه بر این در سیال آب، با افزایش جرم اتمی گاز نجیب، پس جهش‌های تک‌حباب قوی‌تر و قابل ملاحظه‌تر خواهد بود.

در ادامه تعداد ذره‌های گازهای نجیب مختلف در طول یک سیکل آکوستیکی درون حباب سونولومینسانسی در سیال پایه آب در دمای اتاق و براساس شرایط اولیه تک‌حباب سونولومینسانسی پایدار به صورت عددی محاسبه شد. همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، تعداد ذره‌های گاز نجیب درون حباب با افزایش جرم اتمی گاز نجیب کاهش می‌یابد که از کاهش شعاع اولیه حباب در راستای پایداری آن ناشی می‌شود [۱۸].

شکل (۴) تحول زمانی دمای گاز نجیب درون حباب و شدت تابش سونولومینسانس گسیلی حباب در سیال آب را به عنوان سیال پایه همراه با گازهای نجیب مختلف در فشار جزئی ۴ تور، دمای اتاق و در طول یک سیکل آکوستیکی نشان می‌دهد. همان‌طور که دوباره و با وضوح بیشتر ملاحظه می‌شود با افزایش جرم اتمی گاز نجیب شاهد افزایش بازه زمانی فروریزش حباب هستیم. علاوه بر این با افزایش جرم اتمی گاز نجیب از He به Xe، دما و شدت تابش گسیلی حباب افزایش می‌یابد، به طوری که اختلاف بین کمترین و

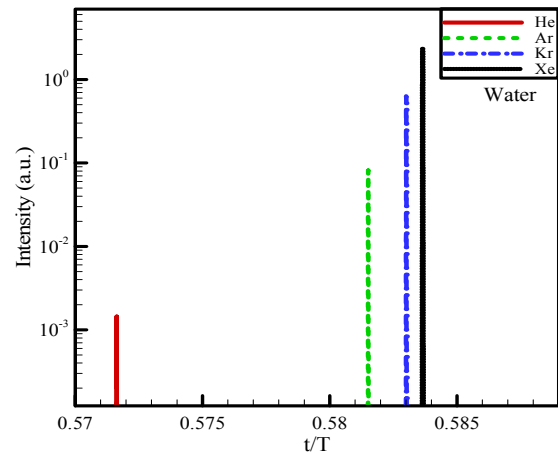
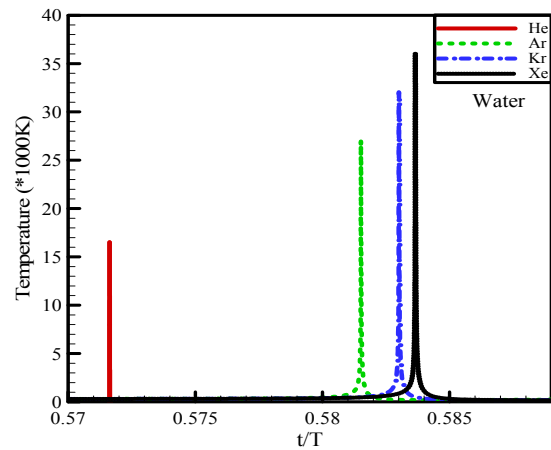
ویسکوزیته بالا و کشش سطحی پایین سیال اسید فسفریک ۶۵٪ نسبت به سیال پایه آب باشد.



شکل ۵. تحول زمانی شعاع تک‌حباب سونولومینسانسی ایستا و بزرگ‌نمایی پس‌جهش‌های آن در سیال اسید فسفریک ۶۵٪ در فشار جزئی ۵۰ تور در طول یک سیکل برای گازهای نجیب مختلف.

تعداد ذره‌های گاز نجیب موجود درون حباب سونولومینسانسی پایدار در سیال اسید فسفریک ۶۵٪ برای گازهای نجیب مختلف نیز در شکل (۶) نمایش داده شده است که نتایج آن مشابه با سیال پایه آب است. دلیل بیشتر بودن تعداد ذره‌های گاز نجیب در سیال اسید فسفریک ۶۵٪ نسبت به سیال پایه آب بزرگ‌تر بودن شعاع اولیه حباب پایدار در سیال اسید فسفریک ۶۵٪ نسبت به سیال پایه آب است [۱۸].

تحول زمانی دمای گاز نجیب درون حباب و شدت تابش گسیلی حباب سونولومینسانسی در سیال اسید فسفریک ۶۵٪



شکل ۴. تحول زمانی دمای گاز نجیب و شدت تابش گسیلی حباب در سیال آب برای گازهای نجیب مختلف در طول یک سیکل آکوستیکی.

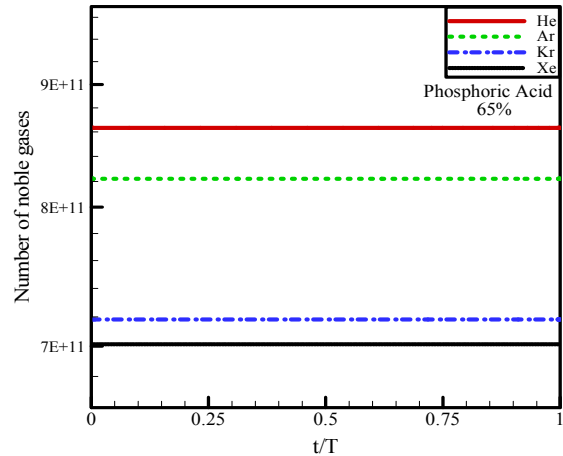
در ادامه با تغییر پارامترهای اولیه سیال در شبیه‌سازی، به بررسی نتایج آزمایشگاهی مربوط به سیال اسید فسفریک ۶۵٪ پرداختیم. از آنجا که فشار جزئی گاز نجیب در آزمایش‌های انجام‌شده ۵۰ تور است، با ثابت نگه داشتن سایر شرایط همانند سیال پایه آب، فشار گاز را از ۴ تور به ۵۰ تور افزایش دادیم. نتایج شبیه‌سازی عددی تحول زمانی شعاع تک‌حباب سونولومینسانس و بزرگ‌نمایی پس‌جهش‌های حباب در طول یک سیکل آکوستیکی در شکل (۵) نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برخلاف سیال پایه آب، بازه زمانی فروریزش با افزایش جرم اتمی گاز نجیب کاهش می‌یابد. علاوه بر این اختلاف بین پس‌جهش‌ها در سیال اسید فسفریک ۶۵٪ با تغییر گاز نجیب بسیار کم و تعداد آن‌ها نیز بسیار کمتر از سیال پایه آب است که می‌تواند ناشی از

در طول یک سیکل آکوستیکی نیز در شکل (۷) نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش جرم اتمی گاز نجیب، بازه زمانی فروریزش کاهش می‌یابد. علاوه‌براین همانند سیال پایه آب، افزایش جرم اتمی گاز نجیب به افزایش دما و شدت تابش گسیلی در لحظه فروریزش منجر می‌شود.

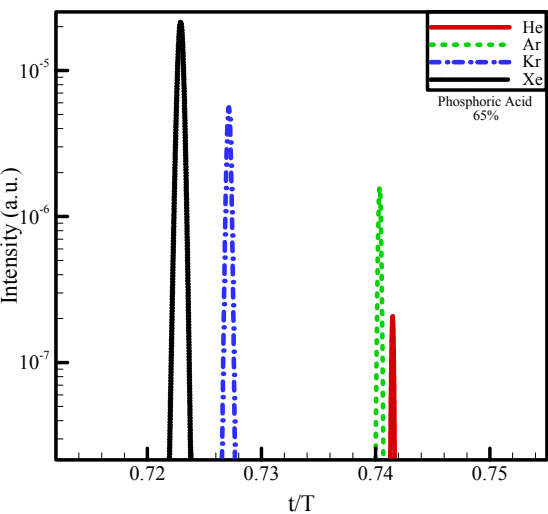
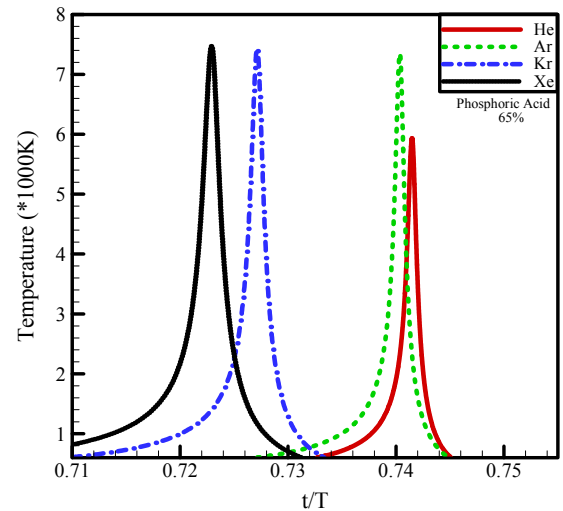
از مقایسه با شکل ۴ می‌توان دریافت که تغییرات دما و شدت نسبت به سیال پایه آب بسیار کمتر است، به طوری که در سیال اسید فسفریک افزایش دما بیش از 1000K و افزایش شدت تابش حدود دو مرتبه دامنه است. علت این امر بالاتر بودن فشار جزئی گاز نجیب در سیال اسید فسفریک ۶۵٪ نسبت به سیال پایه آب است که به تغییر منحنی‌های نمودار فاز و شرایط اولیه حباب برای پایداری تک‌حباب سونولومینسانسی منجر می‌شود. علاوه‌براین باید خاطر نشان کرد که بر اساس نتایج آزمایشگاهی، تأثیر تغییر فشار جزئی از ۴ تور به ۵۰ تور روی دما و شدت تابش تک‌حباب سونولومینسانسی در سیال پایه آب برخلاف سیال اسیدسولفوریک و اسید فسفریک بسیار کم است. جزئیات مربوط به تأثیر فشار جزئی گاز نجیب را می‌توان در مرجع [۵] مطالعه نمود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از مدل هیدروشیماپی و مکانیسم برم اشتراک‌کننده حرارتی تأثیر نوع گاز نجیب بر شعاع، دما و شدت تابش گسیلی تک‌حباب سونولومینسانسی ایستا در دو سیال پایه آب و اسید فسفریک ۶۵٪ به صورت عددی شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر گاز نجیب از He به Xe در سیال پایه آب به افزایش و در سیال اسید فسفریک ۶۵٪ به کاهش بازه زمانی فروریزش حباب منجر می‌شود. علاوه‌براین تغییر گاز نجیب می‌تواند تا حدی پس‌جهش‌ها را تحت تأثیر خود قرار دهد، به طوری که افزایش جرم اتمی گاز نجیب به تقویت پس‌جهش‌ها منجر می‌شود که این امر در سیال پایه آب به دلیل ویسکوزیته پایین سیال با وضوح بیشتری قابل مشاهده است.



شکل ۶. تعداد ذره‌های گازهای نجیب مختلف در طول یک سیکل آکوستیکی درون تک‌حباب سونولومینسانسی ایستا در سیال اسید فسفریک ۶۵٪ با فشار جزئی ۵۰ تور در دمای اتاق.



شکل ۷. تحول زمانی دمای گاز نجیب و شدت تابش گسیلی حباب در سیال اسید فسفریک ۶۵٪ برای گازهای نجیب مختلف در طول یک سیکل آکوستیکی در فشار جزئی ۵۰ تور در دمای اتاق.

- [5] Moshaii A, Imani K, Silatani M. Sonoluminescence radiation from different concentrations of sulfuric acid. *Physical Review E*. 2009; 80(1):0463251-7.
- [6] Pishbini M, Shokri AA. Dependence of Single Bubble Sonoluminescence Radiation to Host Liquid, Acoustic Pressure and Noble Gas. *Indian Journal of Science and Technology*. 2015 Nov 1;8(29).
- [7] Pishbini M, Sadighi-Bonabi R. A new source of radiation in single bubble sonoluminescence. *Pramana journal of physics*. 2017;88: 72-78.
- [8] Taleyarkhan RP, Cho JS, West CD, Lahey RT, Nigmatulin RI, Block RC. Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitation. *Science*. 2002; 295:1868-1873.
- [9] Hopkins SD, Putterman SJ, Kappus BA, Suslick KS, Camara CG. Dynamics of a sonoluminescing bubble in sulfuric acid. *Physical Review Letters*. 2005; 95: 254301.
- [10] Hiller R, Weninger K, Putterman SJ, Barber BP. Effect of noble gas doping in single - bubble sonoluminescence. *Science*. 1994; 266: 248-50.
- [11] Arakeri VH. Influence of various gases on single bubble sonoluminescence. *Pramana journal of physics*. 1993; 41(3): 291-94.
- [12] Kwak H, Na JH. Hydrodynamic solutions for a sonoluminescing gas bubble. *Physical Review Letters*. 1996; 77: 4454.
- [13] Ruuth SJ, Putterman S, Merriman B. Molecular dynamics simulation of the response of a gas to a spherical piston: Implications for sonoluminescence. *Physical Review E*. 2002 Sep 20;66(3):036310.
- [14] Matsumoto M, Miyamoto K, Ohguchi K, Kinjo T. Molecular dynamics simulation of a collapsing bubble. *Progress of Theoretical Physics Supplement*. 2000 Apr 1;138:728-9.
- [15] Yasui K. Alternative model of single-bubble sonoluminescence. *Physical Review E*. 1997; 56:6750-60.
- [16] Moshaii A, Sadighi-Bonabi R. Role of liquid compressional viscosity in the dynamics of a sonoluminescing bubble. *Physical Review E*. 2004; 70(1):016304.
- [17] Keller JB, Miksis M. Bubble oscillations of large amplitude. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1980 Aug;68(2):628-33.
- [18] Lu X, Prosperetti A, Toegel R, Lohse D. Harmonic enhancement of single-bubble sonoluminescence. *Physical Review E*. 2003;67:056310.

نتایج همچنین نشان می‌دهند که افزایش جرم اتمی گاز نجیب از He به Xe باعث افزایش دما و شدت تابش گسیلی در لحظه فروریزش می‌شود که این در انطباق با نتایج آزمایشگاهی است. دلیل این امر را می‌توان تأثیر دو پارامتر کلیدی دانست. یکی از این پارامترها رسانش گرمایی گاز بی‌اثر است که با افزایش جرم اتمی گاز نجیب از He به Xe کاهش می‌یابد. هرچه رسانش حرارتی گاز نجیب بیشتر باشد، دمای حباب سونولومینسانسی در لحظه فروریزش پایین‌تر خواهد بود. پارامتر مؤثر دیگر انرژی یونیزاسیون گاز بی‌اثر است که آن هم با افزایش جرم اتمی کاهش می‌یابد؛ بنابراین در صورتی که دمای گاز نجیب موجود در حباب سونولومینسانسی برای گازهای نجیب مختلف یکسان باشد، تعداد ذره‌های یونیزه در حباب Xe بیشتر از حباب سایر گازهای نجیب خواهد بود که این امر با توجه به مکانیسم برم اشتراک‌نگ حرارتی موجب افزایش درجه یونیزاسیون و شدت تابش در لحظه فروریزش خواهد شد. با توجه به دو پارامتر گفته‌شده منطقی است که دما و شدت تابش تک‌حباب سونولومینسانسی در حباب Xe در لحظه فروریزش بیشتر از سایر گازهای نجیب باشد؛ بنابراین می‌توان با افزایش عدد اتمی گاز نجیب و بهبود شرایط اولیه در پدیده سونولومینسانس گامی مثبت به سمت پدیده سونوفیوژن برداشت.

مراجع

- [1] Gaitan DF, Crum LA, Church CC, Roy RA. Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable, cavitation bubble. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1992 Jun;91(6):3166-83.
- [2] Brenner MP, Hilgenfeldt S, Lohse D. Single bubble Sonoluminescence. *Reviews of Modern Physics*. 2002;74(2):425-484.
- [3] Vazquez GE, Putterman SJ. Temperature and pressure dependence of Sonoluminescence. *Physical Review Letters*. 2000;85(14):3037-3040.
- [4] Troia A, Ripaa DM, Spagnolo R. Moving single bubble Sonoluminescence in phosphoric acid and sulfuric acid solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2006;13(3):278-282.

پی نوشت

1. Flip Gaitan
2. Multi Bubble Sonoluminescence
3. Single Bubble Sonoluminescence
4. sonofusion
5. hydrochemical model
6. Bremsstrahlung
7. quasi adiabatic
8. Molecular Dynamics Simulation
9. Yasui
10. Rayleigh-Plesset
11. Arrhenius law
12. phase space
13. Saha equation
14. Runge- Kutta algorithm

- [19] Moshaii A, Rezaei-Nasirabad R, Imani KH, Silatani M, Sadighi-Bonabi R. Role of thermal conduction on single bubble cavitation. *Physics Letters A*. 2008;372:1283.
- [20] Toegel R, Hilgenfeldt S, Lohse D. Suppressing dissociation in sonoluminescing bubbles: the effect of excluded. *Physical Review Letters*. 2002;88:034301-4.
- [21] Yasui K. Mechanism of single-bubble sonoluminescence. *Physical Review E*. 1999;60:1754.
- [22] Wu CC, Roberts PH. Shock wave propagation in a sonoluminescing gas bubble. *Physical Review Letters*. 1993;70:3424.
- [23] Rybicki GB, Lightman AP. *Radiative processes in Astrophysics*. New York: Wiley interscience; 1979.
- [24] Taylor RL, Caledonia G. Experimental determination of the cross-sections for neutral Bremsstrahlung: I. Ne, Ar and Xe. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1969 May 1;9(5):657-79.
- [25] Barber BP, Hiller R, Lofstedt R, Putterman S, Weninger K. Defining the Unknowns of Sonoluminescence. *Physics Reports*. 1997;281:65-143.
- [26] Xu H, Suslick K. Molecular emission and temperature measurements from single bubble Sonoluminescence. *Physical Review Letters*. 2010;104(24):244301-4.
- [27] Flannigan D, Suslick SK. Molecular and atomic emission during single – bubble cavitation in concentrated sulfuric acid. *Acoustic Research Letters Online*. 2005;157-61.