

# مدل‌سازی رشد و فروریزش تک‌حباب کاویتاسیونی با احتساب

## واکنش‌های شیمیایی و انتقال حرارت

علی چراغی<sup>۴</sup>

دانشکده مهندسی هوافضا

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهرزاد شمس<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۹/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۱)

سجاد محمدی بازرگانی<sup>۱</sup>، رضا ابراهیمی<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی هوافضا

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

### چکیده

تشکیل حباب‌های کاویتاسیونی و رشد و فروریزش آنها از مسائل مهم مهندسی با جنبه‌های مثبت و منفی می‌باشد. از مواردی که حباب‌های کاویتاسیونی در جریان سیال ایجاد می‌شود می‌توان به حضور این حباب‌ها در سیستم‌های خنک‌کاری ماهواره‌ها و همچنین جریان روی هیدروفویل‌ها اشاره نمود. عموماً هنگامی که در یک دمای خاص در جریان سیال فشار سیال تا نزدیکی فشار بخار آن کاهش می‌یابد، حباب‌های گاز به همراه بخار سیال در جریان ایجاد می‌شوند. هنگامی که این حباب‌ها به ناحیه پرفشار وارد می‌شوند حباب فروریزش می‌کند و شعاع آن به حداقل ممکن می‌رسد. در این حالت دما و فشار درون حباب به قدری افزایش می‌یابد که واکنش‌های شیمیایی درون حباب فعال شده و در اثر دمای بسیار بالا از حباب نور ساطع می‌شود. در تحقیق حاضر نرخ واکنش‌های شیمیایی درون حباب کاویتاسیونی تحت شرایط نوردی تک‌حباب محاسبه شده است. در محاسبات اثرات تبخیر و چگالش و همچنین انتقال حرارت از دیواره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** کاویتاسیون، حباب‌های کاویتاسیونی، نوردی تک‌حباب

## Modeling of Expansion and Collapsion of a Single-Bubble Cavitation with Considering of Chemical Reactions and Heat Transfer

S. Mohammadi-Bazargani and R. Ebrahimi

Aerospace Engineering Department  
K.N. Toosi University of Technology

M. Shams

Mechanical Engineering  
Department  
K.N. Toosi University of  
Technology

A. Cheraqi

Aerospace Engineering  
Department  
K.N. Toosi University of  
Technology

(Received: 20/December/2012; Accepted: 23/July/2013)

### ABSTRACT

Formation of cavitation bubbles and their collapse regarding its advantages and disadvantages are some important engineering issues. We can point out to some cases like the presence of these bubbles in the satellite cooling system and the flow over hydrofoils, where cavitation bubbles are formed in fluid flows. Generally, when the fluid pressure decreases so close to the vapor pressure at a specific temperature, the bubbles are created together with the fluid vapor. One time, these bubbles enter the high pressure region, they collapse and their radius take the minimum size, simultaneously. In this case pressure and temperature increases in the bubbles such that the chemical reaction which lead to molecular dissociation becomes active and as a result of very high temperature, bubble emits light. Along with this numerical study, bubble changes and its characteristics in different conditions were investigated and the effects of various factors on bubble growth and collapse were studied.

**Keywords:** Cavitation, Cavitation Bubbles, Single<sup>5</sup> Bubble Sonoluminescence

۱- کارشناسی ارشد: s.m.bazargani@gmail.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): rebrahimi@kntu.ac.ir

۳- دانشیار: shams@kntu.ac.ir

۴- کارشناسی ارشد: cheraqi.a@gmail.com

## ۱- مقدمه

نوردهی تک‌حباب<sup>۱</sup> (SBSL) ابتدا توسط گایتن<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۹ [۱] کشف شد. پدیده انتشار نور از تک‌حباب کاویتاسیونی که توسط امواج اولتراسونیک ایجاد می‌شود SBSL نامیده می‌شود. این کشف باعث شروع تحقیقات گسترده و پرهزینه‌ای بر روی SBSL شده است. فرضیات و تئوری‌های گوناگون و بسیار زیادی در مورد مکانیسم SBSL ارائه شده است ولی هنوز تئوری جامع و کاملی در توجیه این پدیده ارائه نشده است. در داخل حباب کاویتاسیونی و در هنگام فروریزش شدید، دما به قدری افزایش پیدا می‌کند که منجر به تولید واکنش‌های شیمیایی درون حباب می‌شود [۲]. وقتی که حباب در معرض میدان فشار نوسانی شدید قرار می‌گیرد، در دوره انبساطی نوسان فشار، حباب منبسط شده و انرژی جذب می‌کند. در دوره تراکم فشار، حباب متراکم شده و طی یک فرآیند پلی‌تروپیک به دلیل تراکم، گرم می‌شود و دمای آن زیاد می‌گردد. این افزایش دما می‌تواند منجر به واکنش‌های گرماگیر شود که باعث تجزیه درون حباب گردد. این به نوبه خود منجر به صدور نور با طول موج کوتاه (ماورا بنفش) می‌گردد.

مطالعات قبلی در مورد این پدیده بیشتر بر روی اثرات تبدیل فاز (تبخیر و چالش) [۳ و ۴] و انتقال حرارت [۴ و ۵] از دیواره‌ها بوده است. همچنین مطالعات تجربی و عددی در سال‌های اخیر توسط باربر<sup>۳</sup> و همکاران [۶]، یاسویی<sup>۴</sup> [۷]، کمث<sup>۵</sup> و همکاران [۸]، یوان<sup>۶</sup> [۹] و استوری و سزری<sup>۷</sup> [۱۰] بر روی اثرات واکنش‌های شیمیایی بر دینامیک حباب انجام گرفته است.

در تحقیق حاضر نرخ واکنش‌های شیمیایی درون حباب حاوی گاز آرگون به همراه اثرات انتقال حرارت از دیواره‌ها و تغییر فاز به صورت عددی محاسبه شده است [۸].

## ۲- دینامیک حباب

برای تعیین تغییرات شعاع حباب از معادله کلر- میکسیس<sup>۸</sup> برای جریان تراکم ناپذیر استفاده شده است. معادله کلر- میکسیس تراکم ناپذیر برای سیال غیرلزج به صورت زیر می‌باشد [۷].

$$(1-M)R\ddot{R} + \frac{3}{2}\left(1 - \frac{1}{3}M\right)\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho_l}(1+M)\left[P_B - P_\infty - P_a\left(t + \frac{R}{C}\right)\right] + \frac{R}{\rho_l C} \frac{dP}{dt}, \quad (1)$$

که در معادله فوق، C سرعت صوت در سیال در بی‌نهایت، R شعاع حباب، M عدد ماخ،  $\rho_l$  چگالی مایع در دیواره حباب،  $P_B$  ( $P_\infty$ ) فشار در دیواره حباب (بی‌نهایت) و  $P_a$  فشار موج صوتی است که برابر با  $P_a(t) = -A \sin(\omega t)$  است.

فشار در دیواره حباب وابسته به فشار داخل حباب می‌باشد که این رابطه به صورت مقابل می‌باشد [۶].

$$P_B(t) = P(t) - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R}\dot{R}, \quad (2)$$

که در رابطه فوق،  $\sigma$  و  $\mu$  به ترتیب نشان‌دهنده کشش سطحی و لزجت سیال هستند. برای محاسبه فشار داخل حباب از معادله حالت واندروالسی استفاده شده است.

$$\left(P(t) + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = R_g T, \quad (3)$$

که،  $a$  و  $b$  ثابت‌های واندر والس،  $R_g$  ثابت گاز،  $v$  حجم مولی و  $T$  نشان‌دهنده دمای داخل حباب هستند. ضرایب واندر والس از روابط زیر تعیین می‌گردند.

$$a = a_{Air} \left(\frac{n_{Air}}{n_t}\right)^2 + 2a_{Air-H_2O} \left(\frac{n_{Air}}{n_t}\right) \left(\frac{n_{H_2O}}{n_t}\right) + a_{H_2O} \left(\frac{n_{H_2O}}{n_t}\right)^2 \quad (4)$$

$$b = b_{Air} \left(\frac{n_{Air}}{n_t}\right)^2 + 2b_{Air-H_2O} \left(\frac{n_{Air}}{n_t}\right) \left(\frac{n_{H_2O}}{n_t}\right) + b_{H_2O} \left(\frac{n_{H_2O}}{n_t}\right)^2, \quad (5)$$

1- Single Bubble Sonoluminescence

2- Gaitan

3- Barber

4- Yasui

5- Kamath

6- Yuan

7- Storey and Szeri

8- Keller- Miksis

دمای داخل حباب توسط حل معادله زیر به دست می‌آید.

$$E = \frac{n_{Ar}}{N_A} C_{V,Ar} T + \quad (12)$$

$$\frac{n_{H_2O}}{N_A} C_{V,H_2O} T - \left( \frac{n_t}{N_A} \right)^2 \frac{a}{V}.$$

در رابطه فوق،  $n_t$  تعداد کل مولکول‌های داخل حباب (مجموع مولکول‌های بخار آب و هوا)،  $V$  حجم حباب،  $C_{V,H_2O}$  و  $C_{V,Air}$  گرمای نهان مولی مولکول‌های هوا و بخار آب در حجم ثابت هستند.

### ۳- واکنش‌های شیمیایی

واکنش‌های شیمیایی در داخل حباب در کمترین شعاع اتفاق می‌افتد. در این شعاع به علت دما و فشار بسیار بالا و فشردگی شدید اجزاء شیمیایی داخل حباب واکنش‌های شیمیایی آغاز می‌شوند. در پروژه حاضر از مکانیسم توضیح داده شده در مرجع [۱۲] استفاده شده است. تعداد واکنش‌های استفاده شده ۱۹ واکنش است و ۹ جزء شیمیایی در مکانیسم حاضر حضور دارند. واکنش‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر، از مرجع [۸] اقتباس گردیده‌اند. آرگون در این واکنش‌ها به عنوان جزء سوم حضور دارد. قانون اثر جرم برای تعیین نرخ تولید هر جزء شیمیایی به کار برده شده است.

$$\dot{\omega}_k = MW_k \sum_{i=1}^{N_r} (v_{ki}'' - v_{ki}') q_i, \quad (13)$$

$$q_i = k_{fi} \prod_{k=1}^N \left( \frac{\rho_k}{MW_k} \right)^{v_{ki}'} - k_{bi} \prod_{k=1}^N \left( \frac{\rho_k}{MW_k} \right)^{v_{ki}''}, \quad (14)$$

که در رابطه فوق،  $N_r$  تعداد کل واکنش‌ها،  $q_i$  نرخ خالص واکنش  $i$ ،  $MW_k$  جرم مولکولی،  $k_{fi}$  و  $k_{bi}$  ثابت‌های نرخ واکنش روبه جلو و رو به عقب هستند. ثابت‌های نرخ واکنش رو به جلو و رو به عقب توسط قانون آرنیوس تعیین می‌گردند.

$$k_{fi} = A_i^f T^{\beta_i^f} \exp\left(-\frac{C_i^f}{T}\right). \quad (15)$$

$$k_{bi} = A_i^b T^{\beta_i^b} \exp\left(-\frac{C_i^b}{T}\right). \quad (16)$$

ثابت‌های معادلات بالا ( $A_i$  و  $\beta_i$  و  $C_i$ ) از مرجع [۸] انتخاب شده‌اند.

تغییرات تعداد مولکول‌های آب برحسب زمان از طریق رابطه زیر به دست می‌آید [۷].

$$\frac{dn_{H_2O}}{dt} = 4\pi \dot{m} R^2, \quad (6)$$

$\dot{m}$  نشان‌دهنده نرخ خالص تبخیر و چگالش (بر واحد سطح و زمان) است. نرخ خالص تبخیر و چگالش از طریق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\dot{m} = \frac{\alpha_M}{\sqrt{2\pi R_v}} \left( \frac{P_{sat}}{\sqrt{T_l}} - \frac{\Gamma P_v}{\sqrt{T_v}} \right), \quad (7)$$

در رابطه فوق،  $R_v$  ثابت بخار،  $P_{sat}$  فشار بخار اشباع،  $P_v$  فشار جزئی بخار آب و  $\Gamma$  ضریب تصحیح و  $\alpha_M$  ضریب چگالش است که نشان‌دهنده مقدار مولکول‌های بخار آب است که در برخورد با سطح مایع جذب شده‌اند. در تحقیق حاضر مقدار  $\alpha_M$  برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شده است [۱۱].

ضریب تصحیح به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Gamma = \exp(-\Omega^2) - \Omega \sqrt{\pi} \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\Omega} \exp(-x^2) dx \right), \quad (8)$$

$$\Omega = \frac{\dot{m}}{P_v} \sqrt{\frac{R_v T_v}{2}}. \quad (9)$$

دمای داخل حباب در همه جهتها یکنواخت در نظر گرفته شده است. برای به دست آوردن دمای داخل حباب از معادله انرژی استفاده شده است. تغییرات انرژی داخلی برای حباب در معادله ۱۰ آورده شده است [۷].

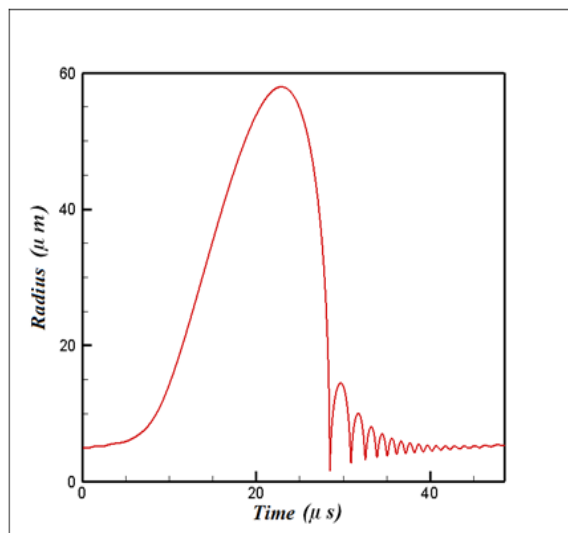
$$\dot{E} = -P(t) \frac{\Delta V(t)}{\Delta t} + 4\pi R^2 \dot{m} e_{H_2O} + \frac{4}{3} \pi R^3 \sum_i (-q_i) \Delta H_{if}, \quad (10)$$

در رابطه فوق ترم اول در سمت راست معادله بیانگر کار فشار در حباب است. ترم دوم انرژی حمل شده توسط مولکول‌های تبخیری و چگالشی و ترم سوم انتقال حرارت ناشی از واکنش‌های شیمیایی داخل حباب را نشان می‌دهد. انرژی حمل شده توسط مولکول‌های بخار آب توسط رابطه زیر به دست می‌آید.

$$e_{H_2O} = \frac{1}{N_A} C_{V,H_2O}(T), \quad (11)$$

انجام گرفته سرعت صوت ( $C_{\infty}$ ) درون سیال (آب) برابر با  $m/s$  ۱۴۸۳ و چگالی سیال ( $\rho_{\infty}$ )  $998/2 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است.

در تمامی حالت‌های بررسی شده برای حباب حاوی گاز آرگون، میدان موج آکوستیکی (فشار نوسانی) اعمال شده یکسان است.



شکل (۱): تغییرات شعاع حباب حاوی گاز آرگون بر حسب زمان.

تمامی کمیت‌های فیزیکی حباب به‌غیر از تعداد مولکول‌های آرگون ( $n_{Ar}$ )، با تغییرات فشار آکوستیکی در طول زمان، تغییر می‌کنند. با توجه به فرکانس اعمال شده، هر نوسان این موج حدوداً  $48 \mu s$  طول می‌کشد.

تغییرات شعاع در طول زمان برای یک دوره نوسان موج آکوستیکی در شکل ۱ نمایش داده شده است. تغییرات شعاع حباب در طول زمان با حل عددی معادله کلمر - میکسیس به‌دست می‌آید. برای حل معادله فوق ابتدا باید فشار داخل حباب محاسبه گردد که این فشار با توجه به دمای داخل حباب به‌دست می‌آید (از طریق رابطه واندروالسی). دما نیز با توجه به تغییرات انرژی به‌دست می‌آید. تغییرات انرژی در داخل حباب با توجه به ترم‌های واکنش‌های شیمیایی، اثرات انتقال حرارت و نفوذ جرم از دیواره به داخل حباب، محاسبه می‌گردد.

تغییرات شعاع در شکل ۱ برحسب میکروثانیه (محور عمودی) بیان شده است. همان‌طور که از شکل ۱ پیداست، حباب با رشد بسیار سریع از شعاع ۵ میکرومتر تا حدود ۵۸ میکرون می‌رسد. سپس توسط یک فروپاشی قوی<sup>۱</sup> به شعاع

شعاع اولیه حباب به پارامترهای تجربی همانند دمای سیال، دامنه فشار نوسانی و تعداد مولکول‌های هوا محلول در آب بستگی دارد.

مقادیر اولیه محصولات احتراقی در شروع حل صفر در نظر گرفته شده است.

#### ۴- نتایج حاصل از حل عددی معادلات

در این بخش به بررسی نتایج به‌دست آمده از تحلیل حباب‌های کائیتاسیونی می‌پردازیم. بدین منظور، حباب‌های کائیتاسیونی برای سه حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. حالت اول شامل یک حباب حاوی گاز آرگون و بخار در درون آب مایع و بدون در نظر گرفتن انتقال حرارت از دیواره‌ها و واکنش‌های شیمیایی درون حباب، است. حالت دوم نیز برای حباب آرگون و بخار آب با در نظر گرفتن انتقال حرارت هدایتی و عدم وجود واکنش‌های شیمیایی درون آن است و در انتها حالت سوم به بررسی حباب حالت‌های قبلی در حضور واکنش‌های شیمیایی و انتقال حرارت پرداخته شده است. این سه حالت به‌طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.

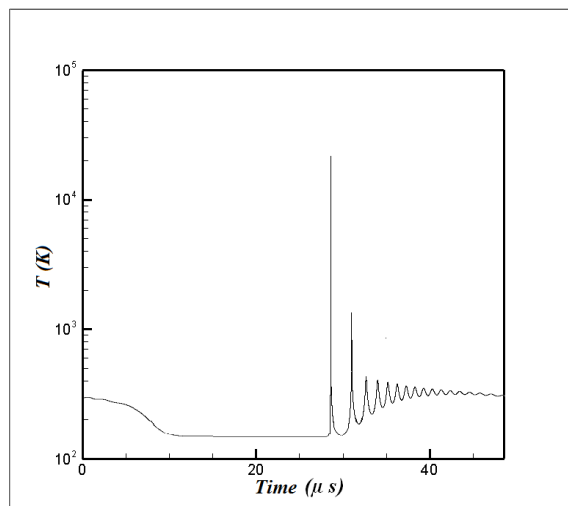
جدول (۱): حالت‌های مورد بررسی برای حباب کائیتاسیونی.

حالت	تغییر فاز	انتقال حرارت	واکنش شیمیایی
I	بله	خیر	خیر
II	بله	بله	خیر
III	بله	بله	بله

در دو حالت اول شعاع اولیه حباب  $5 \mu m$  در نظر گرفته شده است. فرکانس و دامنه موج آکوستیکی اعمال شده به ترتیب  $20/6 \text{ khz}$  و  $1/3 \text{ atm}$  است. دما و فشار اولیه حباب و مایع به ترتیب  $300 \text{ K}$  و  $1 \text{ atm}$  است. برای حالت سوم نیز جهت مقایسه نتایج با داده‌های تجربی، شعاع حباب  $4/5 \mu m$  و فرکانس و دامنه موج آکوستیکی به ترتیب  $26/5 \text{ khz}$  و  $1/275 \text{ atm}$  است [۶].

تمامی حالت‌های مورد بررسی حباب آکوستیکی پایدار در نظر گرفته شده‌اند و فرض بر این شده است که تغییرات فشار و دما درون حباب یکنواخت می‌باشد.

تمامی محاسبات تحت شرایط  $SBSL$  برای سه حالت نشان داده شده در جدول ۱ انجام گرفته است. در تمام محاسبات



شکل (۳): نمودار تغییرات دما برحسب زمان برای حالت I.

در ادامه با فروریزش شدید حباب رشد ناگهانی دمای داخل حباب شروع می‌شود و به حدود  $20000\text{ K}$  در شعاع مینیمم حباب می‌رسد و با رشد و فروریزش دوباره حباب این نوسانات شدید دمایی ادامه پیدا می‌کند تا دما در داخل حباب به حدود  $300\text{ K}$  در انتهای دوره نوسانی برسد. در ادامه نیز همانند نمودار شعاع، تغییرات دمایی در ادامه نوسان‌های آکوستیکی تکرار می‌شود.

در شکل ۴ این تغییرات دمایی برای حالت II ارائه شده است. همان‌طور که از این شکل پیداست، به‌علت وجود انتقال حرارت هدایتی از دیواره‌های حباب دما در ابتدای رشد حباب تقریباً ثابت باقی می‌ماند (در حدود  $300\text{ K}$ ) و در ادامه همانند حالت قبلی دما افزایش چشم‌گیری دارد ولی نسبت به حالت قبلی این افزایش دما (به‌علت انتقال حرارت از دیواره‌ها) کم است. حداکثر دمای به‌دست آمده از این حالت  $9800\text{ K}$  است. دمای مایع اطراف حباب (در درون لایه مرزی اطراف حباب که انتقال حرارت در درون آن اتفاق می‌افتد) در این حالت تقریباً برابر با دمای بی‌نهایت ( $T_\infty$ ) باقی می‌ماند ولی در فروریزش‌های شدید این دما افزایش بسیار زیادی دارد و هم‌رتبه با دمای درون حباب افزایش پیدا می‌کند.

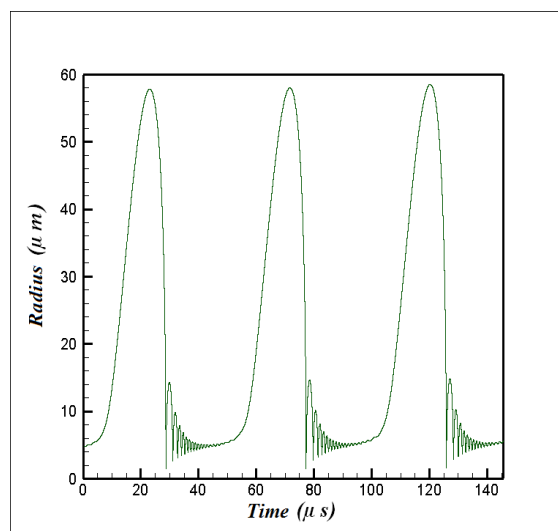
در حالت کلی این افزایش دما به‌طور عمده، مربوط به انتقال گرمای درون حباب به‌صورت هدایتی به مایع اطراف انجام می‌پذیرد. در صورت صرف‌نظر کردن از گرمای نهان، دمای مایع اطراف فقط ۱٪ کاهش پیدا می‌کند.

کمتر از شعاع اولیه خود می‌رسد. اینجا جایی است که مقادیر دما و فشار به بالاترین مقدار خود در طول کل فرآیند می‌رسند همان‌طور که اشاره شد زمان شروع واکنش‌های شیمیایی در حدود نزدیک همین منطقه است. بعد از این مرحله شعاع حباب در حوالی شعاع اولیه خود نوسان می‌کند. این پروسه (رشد و فروریزش حباب) با شروع نوسان بعدی تکرار می‌شود. کل این پروسه در زمان کمتر از  $48$  میکروثانیه به وقوع می‌پیوندد.

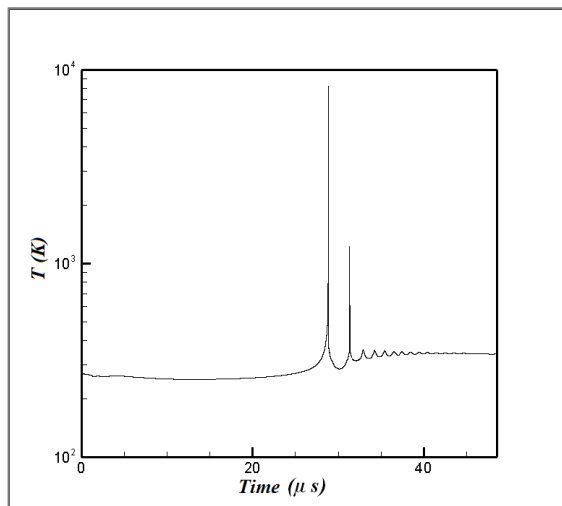
نمودار شعاع برحسب زمان برای تمامی حالت‌های بررسی شده تقریباً یکسان است و تنها فرق آنها تغییر در مقدار بیشتر و کمتر است. به‌طور کلی زمان رشد و فروریزش حباب تنها تابع فرکانس و دامنه موج فشاری اعمال شده است.

از شکل ۱ می‌توان فهمید که در هنگام منفی‌بودن موج فشاری، شعاع افزایش پیدا می‌کند و با مثبت‌شدن این موج فروریزش بسیار شدید حباب رخ می‌دهد.

در شکل ۲ رشد و فروریزش حباب در سه دوره موج آکوستیکی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با ادامه اعمال موج سینوسی، این نوسان شعاع (رشد و فروریزش) در دوره‌های بعدی ادامه می‌یابد. در شکل ۳ تغییرات دمایی برای حالت I برحسب زمان ترسیم شده است. محور عمودی که بیانگر تغییرات دماست، به‌صورت لگاریتمی نشان داده شده است و محور عمودی نیز نشانگر زمان است. در ابتدای رشد حباب دما کاهش پیدا می‌کند و به حدود  $K$  در نزدیکی شعاع ماکزیمم می‌رسد.

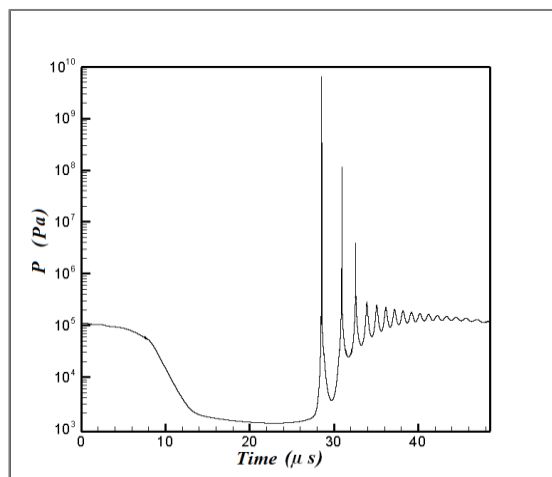


شکل (۲): تغییرات شعاع حباب در طول سه دوره موج نوسانی.



شکل (۵): نمودار تغییرات دما برحسب زمان برای حالت III

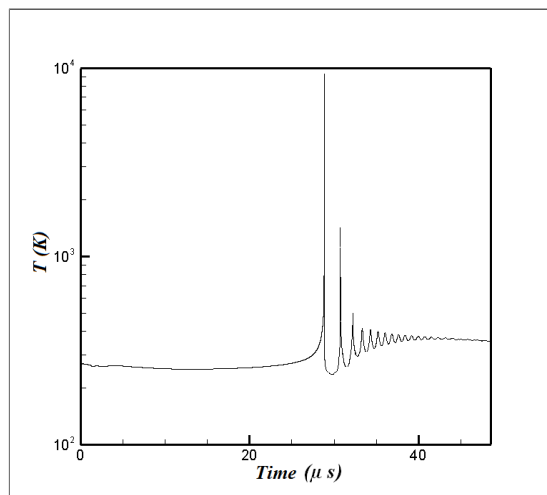
در شکل ۶ نمودار تغییرات فشار برحسب زمان نشان داده شده است. در این شکل، محور عمودی که به صورت لگاریتمی نشان داده شده است، نمایانگر فشار و محور افقی نیز مانند اشکال قبلی محور زمان برحسب میکروثانیه است. نمودار فشار برای تمامی حالت‌ها کمابیش یکسان است.



شکل (۶): نمودار تغییرات فشار برحسب زمان.

در ابتدا همانند نمودار دما فشار کاهش پیدا می‌کند و در فروریزش شدید فشار افزایش بسیار زیادی دارد که به مرتبه  $10^{10}$  می‌رسد. در ادامه نیز فشار کاهش پیدا می‌کند و سپس به فشار اولیه درون حباب می‌رسد. تعداد مولکول‌های درون حباب نیز در طول زمان تغییر می‌کنند.

این تغییرات در شکل ۷ ترسیم شده است. بیشتر تغییرات مولکول‌های آب درون حباب در اثر تبخیر و چگالش انجام می‌گیرد و تعداد مولکول‌های گاز آرگون در طول زمان ثابت باقی می‌ماند، چون گاز آرگون در این واکنش‌ها به صورت جسم



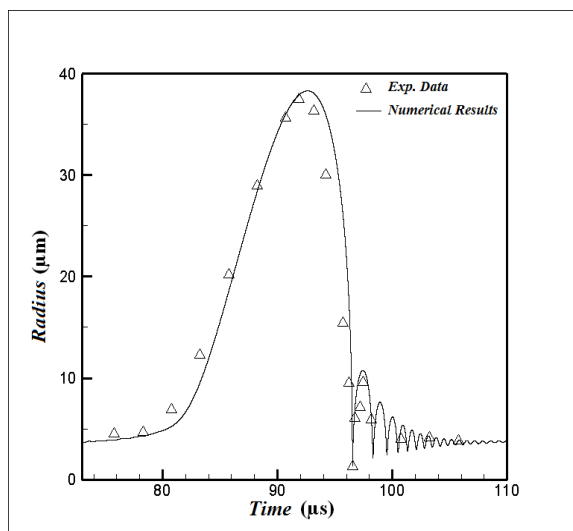
شکل (۴): نمودار تغییرات دما برحسب زمان برای حالت II

در حقیقت در مرحله نهایی فروریزش شدید حباب، شار حرارتی که از انتقال حرارت هدایتی ( $f_1$ ) به وجود می‌آید بسیار بیشتر از شار حرارتی ناشی از گرمای نهان ( $f_2$ ) است.

$$f_1 = -4\pi R^2 \kappa \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_{\min}} \approx 1.2 \text{ (J/s)}. \quad (17)$$

$$f_2 = -4\pi R^2 \dot{m} L \Big|_{r=R_{\min}} \approx 0.014 \text{ (J/s)}. \quad (18)$$

لایه مرزی حرارتی خارج حباب بسیار باریک است و برای ماه‌های بالای  $500 \text{ K}$  در حدود  $0.01$  میکرون است. تغییرات دمایی برای حالت III در شکل ۵ نشان داده شده است. واکنش‌های شیمیایی در درون حباب در نزدیکی‌های مینیمم شعاع شروع می‌شوند. در اینجا فشردگی شدید گازهای درون حباب و وجود دماها و فشارهای بسیار بالا، باعث رخ دادن واکنش مابین گاز و بخار می‌شود. شدت دما و فشار به قدری بالاست که حتی گاز آرگون و رادیکال‌های آزاد یونیزه می‌شوند. این واکنش‌های شیمیایی گرماگیر بوده و باعث می‌شوند دمای درون حباب کاهش پیدا کند. حداکثر دمای به دست آمده در این حالت  $8100 \text{ K}$  بود. لازم به ذکر است که حداکثر دمای به دست آمده برای این حالت، توسط استوری و سزری  $[10] \text{ K}$   $7500$  بود. البته استوری و سزری از مکانیسم متفاوتی برای رشد و فروریزش حباب استفاده کردند. البته برای حالت‌های I و II دمای به دست آمده توسط ایشان به ترتیب برابر با  $2900 \text{ K}$  و  $9700 \text{ K}$  بود.



شکل (۸): نمودار تغییرات شعاع به‌همراه داده‌های تجربی [۶]، نقاط مثلثی داده‌های تجربی و خط توپر نتایج عددی.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثرات انتقال حرارت و واکنش‌های شیمیایی بر رشد و فروریزش حباب کاویتاسیونی تحت شرایط *SBSL* مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این حباب اثرات تبدیل فاز (تبخیر و چگالش) و نفوذ مولکولی گاز (هوا و آرگون) به درون حباب مدنظر قرار گرفت. دمای درون حباب توسط حل معادله انرژی به دست می‌آید. شار حرارتی وارد از دیواره حباب و گرمای نهان بخار آب از اصلی‌ترین عوامل تغییر دمای درون حباب هستند.

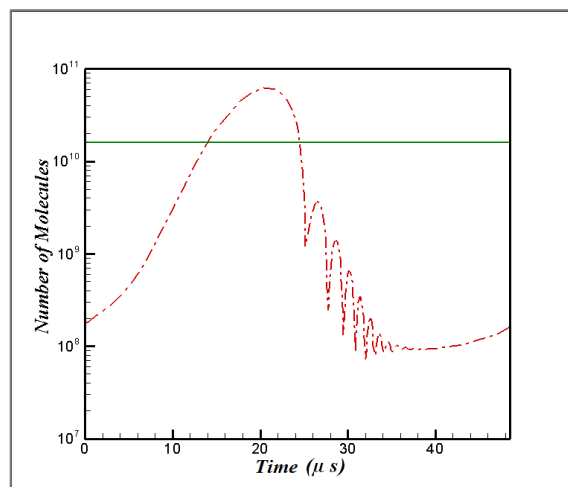
برای بررسی اثرات فوق از حل توامان مدل دینامیک حباب برای مایعات تراکم ناپذیر با معادلات انتقال حرارت هدایتی به‌همراه نرخ واکنش، معادله انرژی و معادله حالت واندروالس استفاده شد.

نتایج تحقیق نشان می‌دهد که انتقال حرارت از دیواره‌ها باعث کاهش دمای درون حباب نسبت به حالت بدون انتقال حرارت می‌شود. همچنین وجود واکنش‌های شیمیایی نتیجه شبیه به احتساب انتقال حرارت دارد و دلیل این امر گرماگیر بودن این واکنش‌هاست.

#### ۶- مراجع

- Gaitan, D.F., Crum, L.A., Church, C.C., and Roy, R.A., "Sonoluminescence and Bubble Dynamics for a Single, Stable, Cavitation Bubble", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 91, No. 6, pp. 3166-3183, 1992.

سوم شرکت می‌کند. در این شکل خط توپر نشانگر تغییرات مولکول‌های آرگون و خط- نقطه نشان‌دهنده تغییرات برای مولکول‌های آب است.



شکل (۷): نمودار تغییرات تعداد مولکول‌های درون حباب خط توپر نشان‌دهنده آرگون و خط نقطه‌چین برای مولکول‌های آب است.

در ابتدا هنگام افزایش شعاع و رشد حباب با کاهش فشار و به‌علت بالا بودن نرخ تبخیر (که در نتیجه کاهش فشار است) تعداد مولکول‌های بخار آب درون حباب افزایش پیدا می‌کند و در انتهای گسترش حباب (شعاع ماکزیمم) تعداد مولکول‌های بخار به بیشترین مقدار خود می‌رسند. در ادامه با کاهش شعاع و افزایش فشار چگالش در درون حباب رخ می‌دهد که باعث کاهش تعداد مولکول‌های بخار آب در درون حباب می‌شود.

در شکل ۸ نمودار تغییرات شعاع به همراه نتایج تجربی نشان داده شده است. به این علت که این داده‌های تجربی فقط در سیکل سوم از موج فشاری موجود بودند، منحنی تغییرات شعاع در این دوره تناوبی رسم شده‌اند. در این شکل نتایج تجربی به‌صورت مثلث‌های توخالی نمایش داده شده است [۶] و خط توپر بیانگر نتایج حاصل از حل عددی می‌باشد. همان‌طور که از این شکل مشخص می‌شود، نتایج عددی تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارند. البته در فروریزش‌های بسیار شدید، به این علت که فرض یکنواخت بودن فشار درون حباب صادق نیست، نتایج به‌دست‌آمده از مدل ارائه‌شده، در این قسمت از منحنی، کمی با نتایج تجربی به‌دست‌آمده متفاوت است.

2. Storey, B.D. and Szeri, A.J., "A Reduced Model of Cavitation Physics for Use in Sonochemistry", Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 457, No. 2011, pp. 1685-1700, 2001.
3. Fujikawa, S. and Akamatsu, T., "Effects of the Non-Equilibrium Condensation of Vapour on the Pressure Wave Produced by the Collapse of a Bubble in a Liquid", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 97, No. 3, pp. 481-512, 1980.
4. Prosperetti, A., Crum, L.A., and Commander, K. W., "Nonlinear Bubble Dynamics", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 83, No. 2, pp. 502-514, 1988.
5. Yasui, K., "Alternative Model of Single-Bubble Sonoluminescence", Physical Review E, Vol. 56, No. 6, pp. 6750-6760, 1997.
6. Barber, B.P. and Putterman, S.J., "Light Scattering Measurements of the Repetitive Supersonic Implosion of a Sonoluminescing Bubble", Physical Review Letters, Vol. 69, No. 26, pp. 3839-3842, 1992.
7. Yasui, K., "Chemical Reactions in a Sonoluminescing Bubble", Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 66, No. 9, pp. 2911-2920, 1997.
8. Kamath, V., Prosperetti, A. and Egolfopoulos, F. N., "A Theoretical Study of Sonoluminescence", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 94, No. 1, pp. 248-260, 1993.
9. Yuan, L., "Sonochemical Effects on Single-Bubble Sonoluminescence", Physical Review E, Vol. 72, No. 4, p. 46309, 2005.
10. Storey, B.D. and Szeri, A.J., "Water Vapour, Sonoluminescence and Sonochemistry", Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 456, No. 1999, pp. 1685-1709, 2000.
11. Fujikawa, S. and Maerefat, M., "A Study of the Molecular Mechanism of Vapour Condensation", JSME international journal. Series 2, Fluids engineering, heat transfer, power, combustion, thermophysical properties, Vol. 33, No. 4, pp. 634-641, 1990.
12. Yasui, K., "Effect of Non-Equilibrium Evaporation and Condensation on Bubble Dynamics near the Sonoluminescence Threshold", Ultrasonics, Vol. 36, No. 1-5, pp. 575-580, 1998.