



بررسی ترموفیزیکی تماس یک قطره آب با متان مایع

علی جهانگیری^۱، مجتبی بیگلری^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

* سمنان، صندوق پستی ۳۵۱۳۱-۱۹۱۱۱، mbiglari@semnan.ac.ir

چکیده- یکی از راه‌های انتقال گاز طبیعی به بازارهای دوردست، مایع سازی و حمل آن با کشتی است. در این راستا تأمین ایمنی انتقال گاز طبیعی به بازارهای مصرف جهانی، اهمیت ویژه‌ای دارد. در اثر تماس و برخورد هر ماده خارجی با سیال LNG، جوشش سریع همراه با افزایش ناگهانی در فشار، رخ خواهد داد. در این مقاله، برخورد آب در دمای 0°C (سیال با دمای بالاتر) با متان مایع (به دلیل نزدیک بودن خواص ترموفیزیکی به LNG) در دماهای بسیار پایین (-162°C) از نظر ترموفیزیکی بررسی شده است. شدت انتقال حرارت بین قطره آب و متان مایع، رشد سریع فیلم بخار متان و افزایش ناگهانی فشار داخل فیلم را به همراه دارد. در این شرایط رخداد پدیده انفجار بخار، ایمنی سیستم را به مخاطره می‌اندازد. مدل ریاضی این پدیده با در نظر گرفتن شرایط اشباع در سطح بین فازی بدست آمده و سپس میزان افزایش فشار ناگهانی، افزایش دما در سطح بین فازی و رشد فیلم بخار در اثر تغییر پارامترهای ترموفیزیکی مختلف عین شده است. بر اساس نتایج بدست آمده پالس فشار بخار ایجاد شده درون فیلم، در مواردی حتی بیش از ۳ برابر فشار اولیه بوده که می‌تواند ایمنی سیستم را مختل نماید.

کلیدواژگان: متان مایع، قطره آب، فیلم بخار، انتقال حرارت و سطح بین فازی.

Thermo physical Investigation of contact between water drop and liquid methane

A. Jahangiri¹, M. Biglari^{2*}

1- PhD Student, Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran

2- Assist. Prof., Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran

* P.O.B. 35131-19111 Semnan, Iran. mbiglari@semnan.ac.ir

Abstract- Marine transportation is the most conventional method for transportation of natural gas, mostly liquid form; namely, Liquefied Natural Gas (LNG) to international far market. Hereon provide safe transportation of natural gas is very important. In the event of exterior material contact to LNG, swift boiling and exploding anticipated. The paper, investigates thermo physical water contact (0°C as a fluid with higher temperature) with liquid methane (cause the similarity of thermo physical properties to LNG) at low temperature (-162°C). The intensity of heat transfer between water particle and liquefied methane resulted to swift pressure increase in vapor film. It causes the generation and swift growth of methane vapor film which has been resulted from abrupt evaporation and results to liquid methane explosion. In this situation, the intense vapor explosion phenomena, endangers the safety of system. Mathematical model of these phenomena has been developed by assuming saturation condition on interface phase. Then, the effects of different thermo physical parameter changes on vapor film growth have been investigated. Based on the results, in some cases, the vapor pressure pulse created in the film has been more than 3 times the initial pressure, which can endanger the safety of system.

Keywords: Liquid Methane, Water Drop, Vapor Film, Heat Transfer, Phase Transition Interface.

۱- مقدمه

گاز طبیعی مایع شده^۱، مایعی روشن و بدون هیچ رنگ و بو است که بخش اعظم آن از متان تشکیل شده است و درصد ناچیزی هم هیدروکربن‌های آلی و نیتروژن در آن یافت می‌شود. گاز طبیعی مایع شده را می‌توان از سردسازی گاز طبیعی در دمای -162°C به دست آورد. حجم گاز طبیعی در این تبدیل، به یک شش‌صدم تقلیل می‌یابد. کاهش حجم گاز طبیعی مایع شده امکان ارسال و انتقال آن را توسط حمل و نقل دریایی به وسیله کشتی فراهم می‌کند. در فرایند تولید، ذخیره‌سازی و حمل و نقل گاز طبیعی مایع امکان برخورد هر ماده خارجی با دمایی بالاتر از گاز طبیعی مایع وجود دارد و در صورت بروز چنین تماس و برخوردی، جوشش سریع و تشکیل فیلم بخار گاز طبیعی مایع همراه با افزایش ناگهانی فشار محتمل می‌باشد و شرایط رشد ناگهانی فیلم بخار گاز طبیعی و رخداد پدیده انفجار بخار^۲ وجود دارد. بنابراین مطالعه فرایند انتقال حرارت در شرایط تشکیل حباب یا فیلم بخار روی سطوح تماس گاز طبیعی مایع با یک جسم در دمای بالاتر اهمیت بسزایی دارد. بروز پدیده‌های مشابه در صنایعی مانند انرژی هسته‌ای، ذوب و لعاب فلزات و همچنین در پدیده‌های طبیعی مانند ریزش گدازه‌های آتشفشانی در آب دریا [۱]، مشاهده شده است. بر اساس ترکیبات بکار رفته در گاز طبیعی، خواص ترموفیزیکی آن نیز اندکی با متان متفاوت است ولی با توجه به اینکه متان بیشترین سهم ترکیبات موجود در گاز طبیعی را دارد؛ در مقاله حاضر انتقال حرارت و رشد فیلم ناشی از تماس بین یک ماده (مانند قطره آب) و متان مایع (یک ماده خنک‌تر ولی نسبتاً فرارتر) بررسی می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

خابیف [۲] به بررسی معادلات حاکم بر رفتار دینامیکی برخورد یک قطره گاز طبیعی مایع شده با آب پرداخته است. وی در این تحقیق با توجه به اینکه تغییرات دما درون قطره گاز طبیعی مایع و نیز درون آب بسیار اندک است، برای بررسی

رفتار دینامیکی حاکم، فقط به شبیه‌سازی و حل معادلات درون لایه بخار پرداخته است. خابیف اشاره کرده است که تغییرات دمای اشباع روی سطح قطره گاز طبیعی مایع شده و نیز تغییرات دمای سطح فیلم بخار در مرز بین فازی بسیار اندک است. بر این اساس، محاسبات مسأله ساده‌سازی شده و این دماها ثابت فرض شده‌اند. لذا از حل معادله انتقال حرارت درون قطره گاز مایع شده و نیز در آب (سیال پیرامونی^۳) صرف‌نظر شده است. وی اشاره می‌کند که از آنجا که چگالی فاز بخار بسیار کوچکتر از فاز مایع این گاز مایع شده می‌باشد، زمان مشخصه تغییرات شعاع قطره گاز مایع شده، بسیار بزرگتر از زمان مشخصه فرایند انتقال حرارت می‌باشد. بنابراین با توجه به در نظر گرفتن زمانی در حدود زمان فرایند انتقال حرارت، در این محاسبات می‌توان از تغییرات شعاع قطره صرف‌نظر نمود. در نهایت در این تحقیق خابیف به بررسی تغییر شعاع اولیه فیلم بخار موجود بر سطح قطره گاز مایع شده، پرداخته است و اشاره کرده که کاهش ضخامت فیلم اولیه بخار منجر به افزایش دامنه نوسانات فشار و افزایش ناگهانی در نرخ تبخیر و سرعت مرز بین فازی خواهد شد.

دیموپولوس و فرانکوپولوس [۳] به بررسی یک مدل دینامیکی جهت تحلیل بخار تولید شده از گاز طبیعی مایع در فرایند حمل و نقل دریایی کپسولها و مخازن گاز طبیعی مایع پرداختند. هدف از این مدل دینامیک، بهینه کردن سیستم‌های انرژی کشتی‌های حمل مخازن سوخت مایع گاز طبیعی بوده است. در این تحقیق تغییرات زمانی مقدار بخارات^۴ تشکیل شده از گاز طبیعی مایع، درون مخزن حاوی گاز طبیعی مایع، مدل شده است. مخزن حاوی گاز طبیعی مایع، همراه این بخارات بصورت یک سیستم انرژی در نظر گرفته شده است. ایشان با ارائه معادلات ترمودینامیکی، دینامیکی حاکم و تعادل بین دو فاز، به بررسی تغییرات ترمودینامیکی بخارات بوجود آمده در طول حمل و نقل دریایی درون مخزن حاوی گاز طبیعی مایع شده، پرداخته‌اند. ایشان با حل معادلات مربوطه، جرم بخارات تشکیل شده برحسب زمان را محاسبه نمودند و بر این اساس حرارت ناشی از تبخیر بر حسب زمان را بدست آوردند. ایشان اشاره کرده‌اند که این تحقیق یک بررسی اجمالی و اولین مرحله از مطالعه تبخیر گاز طبیعی مایع بوده و امکان

1. Liquefied Natural Gas (LNG)

۲- پدیده انفجار بخار در اثر انتقال حرارت بسیار شدید ناشی از تماس یک ماده داغتر و یک ماده خنک و نسبتاً فرارتر ایجاد می‌شود. در اثر شدت انتقال حرارت فشار داخل فیلم بخار تشکیل شده بر روی ذره داغ در مدت کوتاهی افزایش می‌یابد که می‌تواند به انهدام مخزن (سازه) نگهدارنده مواد مربوطه منجر شود [۲].

3. Bulk

4. Boil-off Gas (BOG)

این زمان برای کوچک‌ترین قطره آب ($R_w = 0.001 \text{ m}$) مورد نظر در این مقاله، حدود 0.0028 ثانیه و برای بزرگ‌ترین قطره ($R_w = 0.005 \text{ m}$) حدود 7.028 ثانیه محاسبه شده است. البته باید توجه داشت که با تشکیل فیلم بخار متان اطراف این قطره از شدت انتقال حرارت مربوط به انجماد قطره آب کاسته شده و لذا زمان انجماد بالاتر هم خواهد رفت. در مسأله حاضر، با توجه به این که پدیده تشکیل و رشد فیلم بخار، روی سطح قطره آب بسیار لحظه‌ای و دارای زمانی به مراتب کوتاه‌تر از زمان انجماد قطره می‌باشد، می‌توان در خلال این فرایند، دمای قطره آب را ثابت و برابر دمای انجماد 0°C در نظر گرفت. و نیز فرض می‌شود قطره آب در عمق معین داخل گاز طبیعی مایع غوطه‌ور است و فیلم نازکی از بخار متان مایع از ابتدا بر روی سطح کروی قطره وجود دارد. برای محاسبه ضخامت اولیه فیلم بخار، در لحظه شروع فرایند، می‌توان از رابطه (۳) که توسط میکیک ارائه شده است؛ استفاده کرد [۷].

$$t^+ = t \frac{A^2}{B^2} \ll 1 \Rightarrow R(t) \approx At$$

$$A = \left[b \frac{\Delta T_{\text{sat}} h_{\text{fg}} \rho_v}{T_{\text{sat}} \rho_f} \right]^{0.5}, \Delta T_{\text{sat}} = (T_w - T_{\text{sat}})$$

$$B = \left[\frac{12}{\pi} \text{Ja}^2 \alpha_f \right]^{0.5}, \alpha_f = \left[\frac{k}{\rho C_p} \right]_f$$

$$b = \frac{\pi}{7}, \text{Ja} = \frac{(T_w - T_{\text{sat}}) \rho_f C_{p_f}}{\rho_v h_{\text{fg}}} \quad (3)$$

بر این اساس در لحظه زمانی اولیه $t_1 = 1 \times 10^{-6} \text{ s}$ شعاع محاسبه شده از رابطه میکیک از مرتبه $3/8 \times 10^{-4} \text{ m}$ خواهد بود و بنابراین انتخاب شعاع فیلم بخار اولیه معادل 0.001 m مناسب است.

به منظور تحلیل رشد فیلم بخار برحسب زمان، معادلات دیفرانسیلی بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی برای یک ذره سیال به فرم کلی و در مختصات کروی نوشته می‌شود و سپس بر اساس فرضیات و فیزیک مسأله، سیستم معادلات لازم برای حل مسأله توسعه داده می‌شود.

شکل ۱ هندسه یک قطره کروی آب به شعاع R_w و دمای سطح T_w که در عمق معین h از متان مایع فرو رفته است را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن هندسه شکل ۱ و فرضیات اشاره شده، معادلات حاکم به شکل ساده‌تر بازنویسی می‌شود.

ارزیابی و برآورد نیازهای ترموآکونومیک حمل و نقل دریایی مخازن گاز طبیعی مایع، را فراهم خواهد نمود. در تحقیق دیگر منتشر شده توسط آیوماسیک [۴] به مدل‌سازی پاشیده شدن سیالات فرار (گاز طبیعی مایع) بر روی سطح آب یا سطوح دیگر و میزان بخار تولید شده ناشی از آن پرداخته و نتایج مدل‌سازی خود را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه نموده است. در این تحقیق میزان و نرخ تبخیر زمانمند سیال فرار پاشیده شده، روی سطوح با حل معادلات انتقال حرارت و جرم و در نظر گرفتن شرایط سطح تماس بدست آمده است. مک گیل [۵] نیز به شبیه‌سازی انتشار متان مایع شده و تولید بخار و احتراق گاز ناشی از پخش آن بر روی آب پرداخته است. وی با استفاده از یک برنامه کامپیوتری به روش دینامیک سیالات محاسباتی^۱ و در نظر گرفتن معادلات احتراق، ایجاد شعله و احتراق ناشی از بخارات متان پخش شده در سطح آب را مدل‌سازی نمود.

مطالعه ادبیات موجود نشان می‌دهد که تاکنون فرایند تکامل فیلم بخار بر روی سطح اجسام غوطه‌ور در مایعات فرارتر (مانند برخورد قطره آب با متان مایع) با در نظر گرفتن اثرات غیر تعادلی و تغییرات دمای سطح بین فازی مایع-بخار بطور جامع و گسترده مورد بررسی قرار نگرفته است و ارائه مدل مناسب برای بررسی این پدیده ضروری به نظر می‌رسد.

۳- مدل‌سازی مسأله

فرض می‌شود یک قطره آب با دمای اولیه مشخص به سطح متان مایع تماس حاصل می‌کند با توجه به پایین بودن دمای متان مایع شده، قطعاً قطره آب با از دست دادن حرارت انجماد ($m_{\text{drop}} h_{\text{if}}$) پس از گذشت زمان مشخصی، منجمد خواهد شد. می‌توان زمان مورد نیاز جهت انجماد قطره آب را با بررسی مسأله استفان [۶] (با استفاده از رابطه (۱)) تخمین زد. که در رابطه (۱)، Ste، عدد استفان (نسبت گرمای محسوس به گرمای نهان انجماد آب) می‌باشد. عدد استفان با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۶].

$$t_{\text{fr}} = \frac{\rho h_{\text{if}} R_w^2}{6k_{\text{ice}} (T_{\text{fr}} - T_b)} (1 + \text{Ste}) \quad (1)$$

$$\text{Ste} = \frac{C_{p_{\text{ice}}} (T_{\text{fr}} - T_b)}{h_{\text{if}}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (8)$$

با انتگرال‌گیری از معادله (۷) و اعمال شرط مرزی روی دیواره پوسته حباب ($u(r=R) = u_R = \dot{R}$) و قرار دادن نتیجه حاصل در معادله (۸) و سپس انتگرال‌گیری از طرفین معادله اخیر، از شعاع r تا ∞ ، و همچنین با استفاده از رابطه هیدرواستاتیک $P(\infty) = P_0 + \rho gh$ و اعمال تنش سطحی، نهایتاً معادله رشد حباب بخار را می‌توان به صورت رابطه (۹) نوشت.

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + 4v\frac{\dot{R}}{R} = -\frac{1}{\rho} \left[P_0 + \rho gh - P^{(G)} + \frac{2\sigma}{R} \right] \quad (9)$$

که در آن $\ddot{R} = d^2R/dt^2$ ، شتاب ذره واقع بر سطح حباب است. در معادله (۹) اگر از آثار لزجت و کشش سطحی صرف‌نظر شود معادله ریلی [۹-۱۱] حاصل خواهد شد.

برای تعیین فشار اشباع P_s برحسب دمای اشباع متناظر نیز از رابطه پنگ رابینسون (معادله ۱۰) استفاده می‌شود [۱۲]. در این معادله فشار بحرانی متان مایع در دمای بحرانی متناظر آن (T_{crit}) می‌باشد.

$$P_s(T_{sat}) = \frac{R_{متان} T_{sat}}{\left(\frac{1}{\rho_v}\right) - b} - \frac{ac}{\left(\frac{1}{\rho_v}\right)^2 + 2b\left(\frac{1}{\rho_v}\right) - b^2}$$

$$a = \frac{0.457235 R_{متان}^2 T_{crit}^2}{P_{crit}}$$

$$b = \frac{0.077796 R_{متان} T_{crit}}{P_{crit}}$$

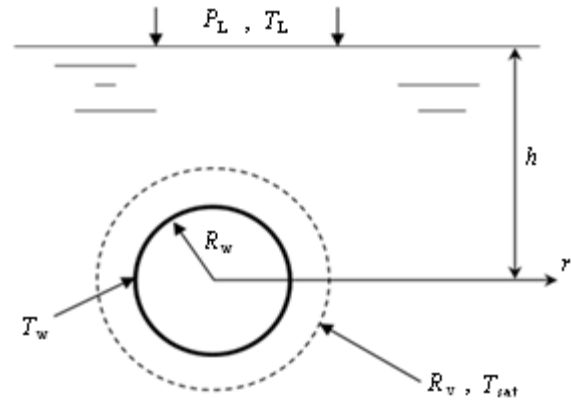
$$c = \left(1 + d \left(1 - T_r^{0.5}\right)\right)^2, \quad T_r = \frac{T_{sat}}{T_{crit}}$$

$$d = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$$

$$\omega_{متان} = 0.0115 \quad [13] \quad (10)$$

۳-۱- انتقال حرارت از میان فیلم بخار

از کل شار ساطع شده از قطره آب که روی سطح بین فازی منتقل می‌شود، بخشی از آن سبب تبخیر مقداری از گاز طبیعی مایع شده (به بخار داخل فیلم افزوده می‌شود) و بخش باقی‌مانده آن در فاز متان مایع منتقل می‌شود (در حالت ساده فرض می‌شود ترابری انرژی در فاز مایع را بتوان با استفاده یک ضریب انتقال حرارت مناسب محاسبه نمود).



شکل ۱ نمای کلی هندسه مسأله

فرم کلی معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی به ترتیب در روابط ۴ تا ۶ ارائه شده است [۸].

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (4)$$

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \quad (5)$$

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q''' + \mu \phi \quad (6)$$

اگر شار حرارتی ناشی از دمای سطح قطره آب بیشتر از شار حرارتی بحرانی مورد نیاز برای جوشش باشد، رشد فیلم بخار ادامه می‌یابد و در غیر این صورت بخار تقطیر شده و فیلم بخار از بین می‌رود. دمای اولیه قطره آب، قطر، فشار و دمای بخار بر روی سطح آزاد گاز طبیعی مایع و همچنین عمق قرارگیری مرکز قطره کروی آب مشخص فرض می‌شود. همچنین فرض می‌شود هر دو فاز مایع و بخار گاز طبیعی لزج می‌باشد. هدف، یافتن تغییرات فشار درون پوسته و همچنین تغییرات شعاع فیلم بخار با گذشت زمان یعنی $R(t)$ می‌باشد.

با در نظر گرفتن پوسته کروی حباب بخار تشکیل شده بر روی سطح قطره و تراکم ناپذیر بودن و غیرلزج بودن گاز موجود درون این پوسته و تقارن موجود در مسأله مورد نظر، معادله پیوستگی (معادله ۴) برای حباب بخار در مختصات کروی و در امتداد شعاع بصورت رابطه (۷) ساده می‌شود.

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 u) = 0 \quad (7)$$

معادله مومنتم (معادله ۵) برای حباب بخار در مختصات کروی که در آن از نیروهای جسمی صرف‌نظر شده باشد، به شکل رابطه (۸) نوشته می‌شود.

در ادامه لازم است ترابری انرژی درون متان مایع، بررسی شود بدین منظور با استفاده از ضریب انتقال حرارت کلی مناسب، این انتقال انرژی، با در نظر گرفتن تبخیر روی مرز بین فازی به شکل معادله (۱۳) بازنویسی می‌شود.

$$q''_{\text{درون فاز مایع}} (4\pi R_v^2) = Q_i - \dot{m} h_{fg} \quad (13)$$

$$q''_{\text{درون فاز مایع}} = \bar{h} (T_{i(\text{sat})} - T_\infty)$$

در مسأله حاضر، ضریب انتقال حرارت معادل با استفاده از رابطه (۱۴) که توسط گورنفلو [۱۵] ارائه شده و مربوط به ضریب انتقال حرارت جابجایی در وضعیت وجود تبخیر می‌باشد؛ محاسبه شده است.

$$h (\text{W/m}^2 \text{K}) = 7000 F_{PF} (q'' (\text{W/m}^2) / 20000)^{nf}$$

$$F_{PF} = 1.2 \left(\frac{P}{P_{\text{crit}}} \right)^{0.27} + 2.5 \left(\frac{P}{P_{\text{crit}}} \right) + \frac{P}{P_{\text{crit}} - P}$$

$$nf = 0.9 - 0.3 \left(\frac{P}{P_{\text{crit}}} \right)^{0.3} \quad (14)$$

لازم به ذکر است که در سطح بین فازی، چگالی فاز بخار و گرمای نهان تبخیر متان به شدت متغیر بوده و تابعی از دمای اشباع در مرز می‌باشد، بنابراین برای محاسبه چگالی فاز بخار متان از معادله (۱۵) و نیز برای محاسبه گرمای نهان تبخیر متان از معادله (۱۶) استفاده شده است تا تغییرات این پارامترها در محاسبات لحاظ شود.

$$\ln \left(\frac{\rho_v}{\rho_{\text{crit}}} \right) = c_1 \tau^{0.354} + c_2 \tau^{5/6} + c_3 \tau^{3/2} + c_4 \tau^{5/2} + c_5 \tau^{25/6} + c_6 \tau^{47/6} \quad [16]$$

$$\tau = 1 - \frac{T}{T_{\text{crit}}}$$

$$c_1 = -1.8802840, c_2 = -2.8526531$$

$$c_3 = -3.0006480, c_4 = -5.2511690$$

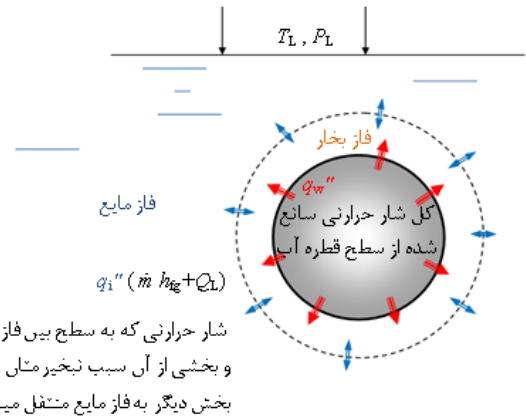
$$c_5 = -13.191859, c_6 = -37.553961 \quad (15)$$

$$h_{fg} = h'_{fg} \left[\frac{1 - T_r}{1 - T'_r} \right]^{0.38} \quad [17]$$

$$T_r = \frac{T_{\text{sat}}}{T_{\text{crit}}} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، T'_r و h'_{fg} در یک دمای مرجع که خواص ترموفیزیکی آن در دسترس باشد، لحاظ می‌شوند. همچنین

برای بررسی مسأله می‌توان مطابق شکل ۲ انتقال حرارت را به دو بخش درون فاز بخار و در فاز مایع تقسیم کرد. در حالت کلی انتقال حرارت در فیلم بخار بطور هم‌زمان بصورت هدایت و جابجایی صورت می‌گیرد. البته متداول است با تعریف یک ضریب هدایت معادل (k_{eq}) تبادل حرارت صرفاً هدایت فرض شود (رابطه ۱۱).



شکل ۲ انتقال انرژی روی مرزها

$$q''_{\text{درون فیلم بخار}} = \frac{k_{eq}}{\delta} (T_w - T_v) \quad (11)$$

که در آن δ ضخامت فیلم بخار است. نشان داده شده است که هرگاه $[Gr Pr < 10^3]$ باشد، می‌توان مقدار ضریب هدایت معادل (k_{eq}) را با دقت کافی برابر با ضریب هدایت بخار (k_v) در نظر گرفت [۱۴]. اعداد Gr و Pr بایستی در میانگین دمای سطح بین فازی و سطح قطره آب محاسبه شوند.

به منظور تعیین شار حرارتی q''_i روی سطح بین فازی، ضروری است که شار حرارتی روی سطح کره (q''_w) تعیین شود. با در نظر گرفتن کل انرژی موجود روی سطح بین فازی در مختصات کروی می‌توان شار موجود روی سطح بین فازی را به شکل رابطه (۱۲) بدست آورد که البته تا اینجا صرف‌نظر از تبخیر روی سطح بین فازی است:

$$q''_i = k_v \frac{T_w(t) - T_{i(\text{sat})}(t)}{R(t) - R_w} \frac{R_w}{R(t)} \quad (12)$$

واضح است که دمای بخار در امتداد فیلم متغیر است و این امر در مقدار ضریب هدایت حرارتی بخار تاثیر می‌گذارد. در اولین تقریب خواص موجود در میانگین دمای اولیه سطح بین فازی و دمای سطح کره $(T_w + T_{i(\text{sat})})/2$ در نظر گرفته می‌شوند.

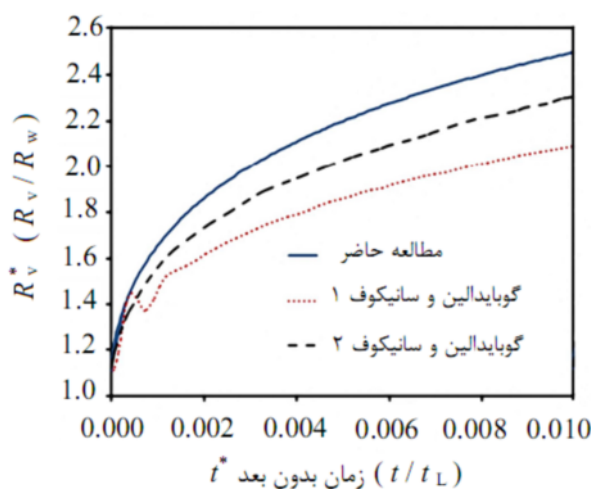
است. همان‌طور که از آن برمی‌آید تطابق روند تغییرات شعاع حباب بخار تضمین می‌شود. لازم به توضیح است که زمان بدون بعد در نمودار شکل ۳ به صورت $t^* = t/t_L$ تعریف شده است که در آن، t_L ، با توجه به پژوهش گوبایدالین و سانیکوف، برابر با زمان مشخصه انتشار حرارت درون فاز مایع در نظر گرفته شده است [۱۹].

۴- نتایج

نتایج بدست آمده از حل عددی سیستم معادلات مذکور با تغییر تمامی پارامترهای مهم اعم از دمای قطره آب، دمای متان مایع، عمق برخورد و ضخامت اولیه فیلم بخار بررسی شده است که به تک تک آنها پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که مسأله مذکور برای برخورد ذره کروی از جنس آب با متان مایع می‌باشد و خواص ترموفیزیکی آب و متان مایع در شرایط حل مسأله وارد شده‌اند.

۴-۱- اثر تغییر ضخامت اولیه فیلم بخار

همان‌طور که اشاره شد با استفاده از رابطه میکیک ضخامت اولیه فیلم بخار از مرتبه 0.001 محاسبه شد ولی برای روشن‌تر شدن موضوع، اثر تغییر ضخامت اولیه فیلم بخار، در نتایج بررسی می‌گردد. در این بخش تماس قطره کروی آب (شعاع 1 mm و دمای 0°C) با متان مایع در دمای 167°C در عمق 1 cm پایین تر از سطح آزاد مایع در نظر گرفته شده است.



شکل ۳ مقایسه تغییرات شعاع بدون بعد فیلم بخار نسبت به زمان بی بعد با استفاده از ۳ روش حل متفاوت

می‌توان نشان داد که در شرایطی که بیشترین مقدار انتقال حرارت تشعشی وجود دارد، تاثیر انتقال حرارت تشعشی در حل این مسأله بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر خواهد بود. با توجه به اختلاف دمای مرز بین فازی و دمای سطح قطره آب، شار تشعشی ساطع شده از سطح قطره آب در سطح بین فازی ظاهر خواهد شد که مقدار شار حرارتی تشعشی رسیده روی سطح بین فازی با استفاده از رابطه (۱۷) قابل محاسبه خواهد بود.

$$q''_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_{\text{sat}}^4) \quad (17)$$

برای این منظور قابل اشاره است که نسبت بیشترین شار حرارتی تشعشی ناشی از دمای سطح کره $q''_{\text{rad}} (\text{W/m}^2)$ که از مرتبه 10^2 می‌باشد، به شار کل حرارتی رسیده به مرز بین فازی اولیه $q''_{\text{ایله}}/q''_{\text{rad}} < 0.01$ (۱٪) در حدود کمتر از ۱٪ است.

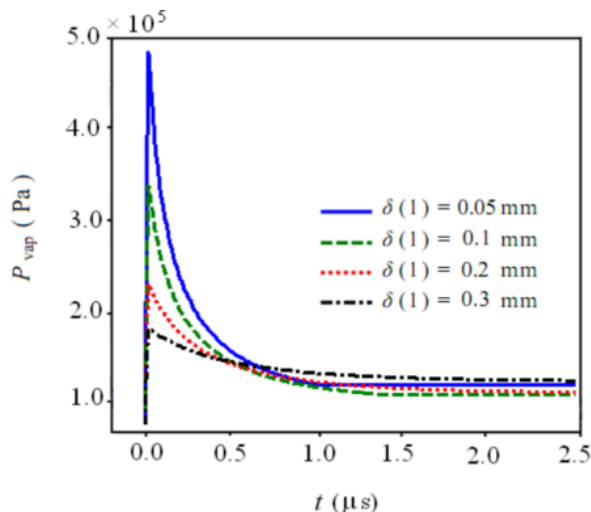
۳-۲- اعتبارسنجی حل

برای حل هم‌زمان سیستم معادلات ۹ تا ۱۷ از یک برنامه رایانه‌ای به زبان فرترن استفاده شده است و اندازه گام‌ها به گونه‌ای کوچک انتخاب شده است که کوچک‌تر کردن بیشتر آن تأثیری در نتایج بدست آمده نداشته باشد. در حل عددی سیستم معادلات، از روش رونگ-کوتا^۱ مرتبه ۴ استفاده شده است که در آن مرتبه خطاهای قابل پیش‌بینی، تابعی از گام زمانی انتخابی بوده و از مرتبه $O(\Delta t^4)$ می‌باشد [۱۸].

همچنین برای تأیید و اعتبار بیشتر از آنجا که اندرکنش بین آب و گاز طبیعی مایع در هیچ کدام از سوابق پیشین مدل نشده است، لذا نتایج بدست آمده از برنامه نوشته شده برای برخورد یک جسم کروی داغ از جنس مس با آب، با نتایج محاسباتی گوبایدالین و سانیکوف [۱۹] مقایسه شده است که با توجه به نمودار شکل ۴، نزدیک بودن جواب‌ها (متوسط خطای مشاهده شده در این مقایسه حدود $\pm 6\%$ می‌باشد) و روند تغییرات شعاع فیلم بخار گواهی بر این مدعاست. این نتایج برای برخورد کره داغ از جنس مس با دمای 1356 K با آب مایع در دمای 368 K بدست آمده است. این گروه با استفاده از دو روش که در پژوهش مذکور آمده است تغییرات شعاع بدون بعد حباب بخار را برحسب زمان بدون بعد رسم نموده‌اند که نتایج کار ایشان با مدل ریاضی پژوهش حاضر مقایسه شده

1. Runge-Kutta

میزان تغییرات انرژی لازم برای رشد مقدار معینی از حباب کاسته می‌شود (حباب با صرف انرژی کمتری به مقدار بیشینه رشد خود می‌رسد) و لذا تغییر ناگهانی دما و فشار کاهش می‌یابد.



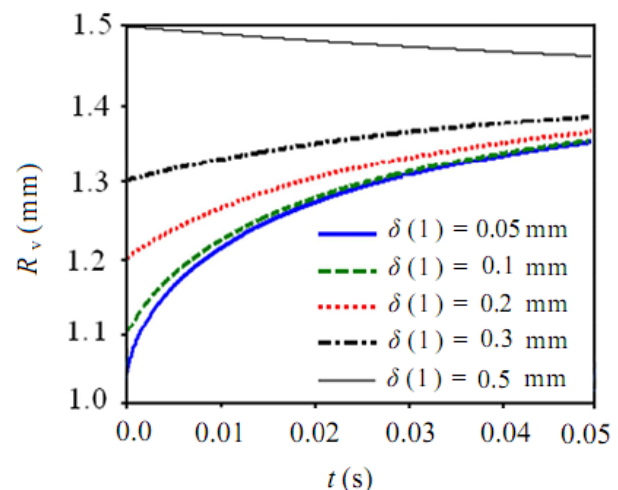
شکل ۶ تغییرات فشار بخار درون فیلم نسبت به زمان با افزایش ضخامت اولیه فیلم

۴-۲- اثر تغییر شعاع قطره کروی آب

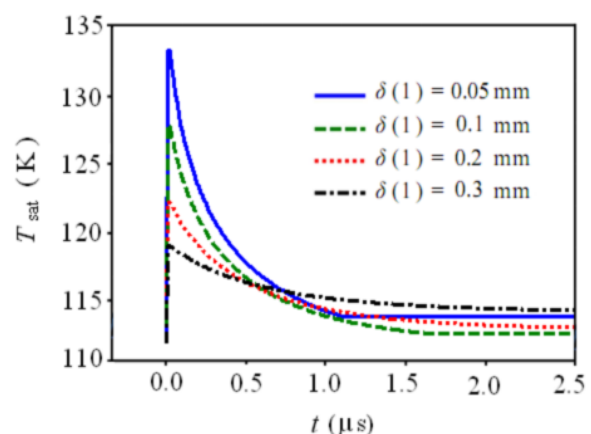
برای بررسی اثر تغییر شعاع قطره آب، تماس‌قطره‌های مختلف قطره کروی آب (دمای °C) با متان مایع در دمای °C ۱۶۷- در عمق ۱ cm پایین‌تر از سطح آزاد مایع در نظر گرفته شده است. همان‌طور که پیش از این ذکر شد برای استفاده از ضریب هدایت معادل (k_{eq}) با دقت کافی برابر با ضریب هدایت بخار (k_v) بایستی شرط $[Gr Pr < 10^3]$ برقرار باشد، لذا از آنجا که در قطرهای بالاتر از ۱ cm با توجه به افزایش عدد گرافش این شرط ارضاء نخواهد شد، بررسی افزایش شعاع قطره آب تا ۵ mm محدود شده است. در شکل ۷ رفتار افزایش شعاع حباب بخار با افزایش شعاع اولیه قطره آب مشاهده می‌شود.

با توجه به نمودارهای ۸ و ۹ از آنجا که با افزایش شعاع قطره آب در واقع نرخ حرارت ساطع شده از آن متناسب با افزایش سطح جانبی کره بالا می‌رود و حرارت بیشتری به سطح بین فازی می‌رسد قابل انتظار است که دمای اشباع نظیر نیز دچار افزایش شده و پالس فشار درون فیلم بخار نیز بالاتر رود. حتی شیب تغییرات دمای اشباع روی سطح بین فازی و تغییرات فشار درون فیلم بخار نیز با افزایش شعاع کاهش یافته و دمای مرز و فشار درون فیلم بخار به آرامی کم می‌شود.

با توجه به نمودار شکل ۴ در صورت افزایش ضخامت اولیه فیلم بخار باندازه بیشتر از نصف شعاع ذره کروی، به جای رشد فیلم بخار تقریباً کاهش شعاع فیلم را به همراه خواهد داشت. این نشان می‌دهد که رشد فیلم بخار با توجه به مدل ریاضی پدیده مقدار بیشینه مشخصی دارد و در صورتی که شعاع اولیه بیشتر از این مقدار لحاظ شود حتی کاهش شعاع فیلم بخار را به دنبال خواهد داشت. همچنین با افزایش ضخامت اولیه فیلم بخار، مطابق شکل‌های ۵ و ۶ مقدار بیشینه دمای اشباع در سطح بین فازی و پالس اولیه فشار بخار درون فیلم، کاسته خواهد شد.



شکل ۴ تغییرات شعاع فیلم بخار نسبت به زمان با افزایش ضخامت اولیه فیلم



شکل ۵ تغییرات دمای سطح بین فازی نسبت به زمان با افزایش ضخامت اولیه فیلم

این بدان علت است که با افزایش ضخامت اولیه فیلم بخار، از

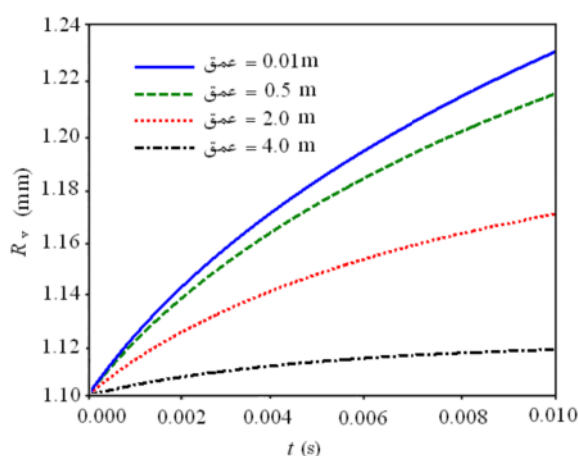
۴-۳- اثر تغییر عمق مرکز قطره آب درون گاز طبیعی مایع

با تغییر عمق فرو روی قطره آب، در این بخش تماس قطره کروی آب (شعاع ۱mm و دمای °C) با متان مایع در دمای °C ۱۶۷- در نظر گرفته شده است.

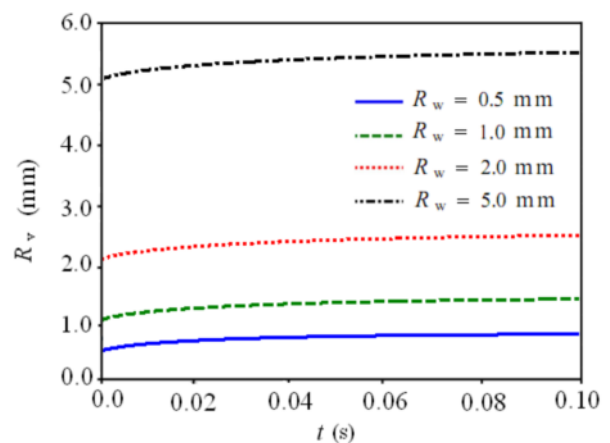
همان‌طور که قابل پیش بینی است افزایش فشار هیدرواستاتیک (افزایش عمق فرو روی قطره آب درون متان مایع) فشار بیرونی روی پوسته حباب را افزایش داده و امکان افزایش شعاع حباب بخار را محدود می‌کند. در نتیجه مطابق شکل ۱۰ با افزایش عمق فرو روی قطره آب، کاهش رشد حباب بخار و حتی کاهش شیب تغییرات شعاع بخار مشاهده می‌شود. با توجه به شرایط مسأله، در عمق‌های مختلف میزان انرژی که به سطح بین فازی می‌رسد تغییر نخواهد کرد، بنابراین با افزایش عمق، مطابق شکل‌های ۱۱ و ۱۲، بیشینه دمای اشباع و پالس فشار درون فیلم بخار، چندان تغییری نکرده است. ولی از آنجا که در عمق‌های پائین‌تر، فشار هیدرواستاتیک بیشتری روی سطح حباب اعمال می‌شود، شیب تغییرات دما و فشار مذکور، کاهش می‌یابد. بطوری که دمای اشباع نهایی و فشار بخار مربوطه در مقدار بالاتری باقی می‌ماند.

۴-۴- اثر کاهش دمای گاز طبیعی مایع

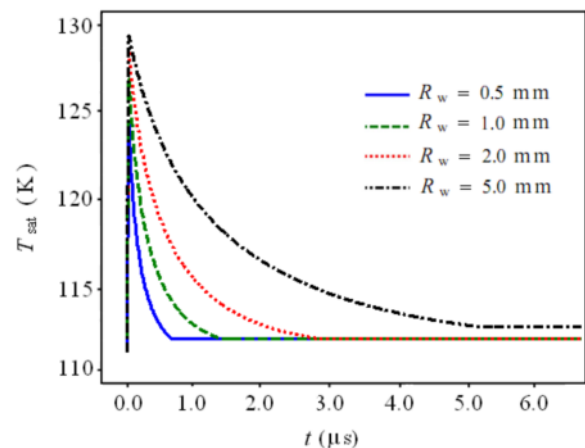
در این بخش اثر کاهش دمای گاز طبیعی مایع که تاکنون °C ۱۶۷- در نظر گرفته شده بود بررسی شده است. بنابراین تماس قطره کروی آب (شعاع ۱mm و دمای °C) با متان مایع در دماهای مختلف و عمق ۱cm پایین‌تر از سطح آزاد مایع در نظر گرفته شده است.



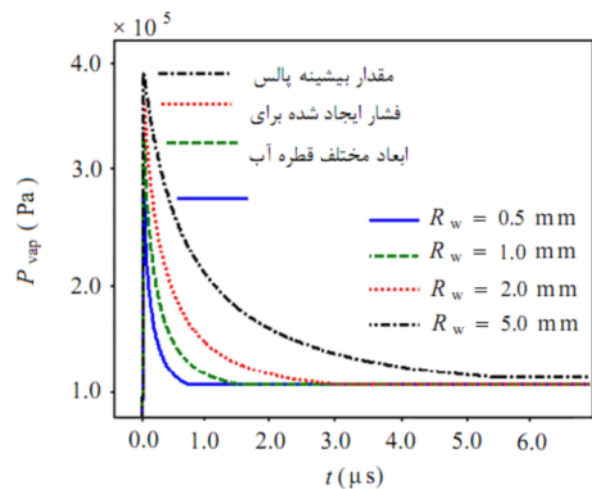
شکل ۱۰ تغییرات شعاع فیلم بخار نسبت به زمان با افزایش عمق مرکز قطره آب



شکل ۷ تغییرات شعاع فیلم بخار نسبت به زمان با افزایش شعاع قطره آب

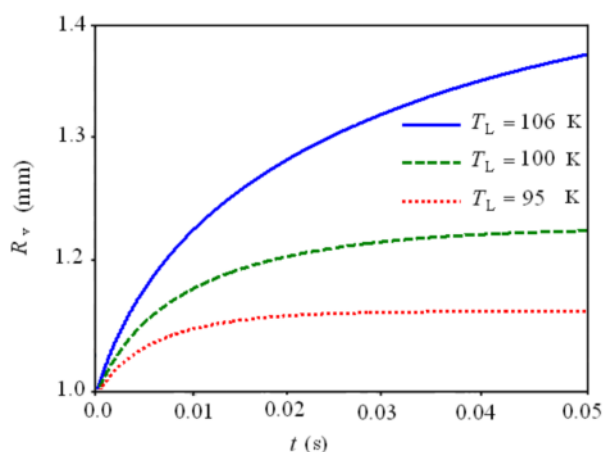


شکل ۸ تغییرات دمای سطح بین فازی نسبت به زمان با افزایش شعاع قطره آب

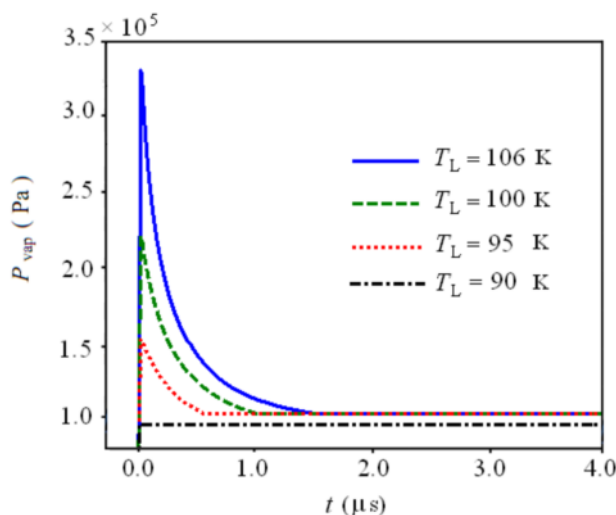


شکل ۹ تغییرات فشار بخار درون فیلم نسبت به زمان با افزایش شعاع قطره آب

پیشین هدف اصلی، بررسی تغییرات شعاع فیلم بخار بوده است در حالی که در این مقاله پارامترهایی نظیر ضخامت اولیه فیلم بخار، شعاع قطره آب، عمق مرکز قطره آب درون متان مایع و دمای متان مایع و اثرات آنها بر تغییرات شعاع فیلم بخار، دمای مرز اشباع و تغییرات فشار درون فیلم بخار، مورد تحقیق قرار گرفت. بطور کلی وابستگی کیفی و کمی نتایج به تغییرات اعمال شده در شرایط مرزی و اولیه بررسی گردید.

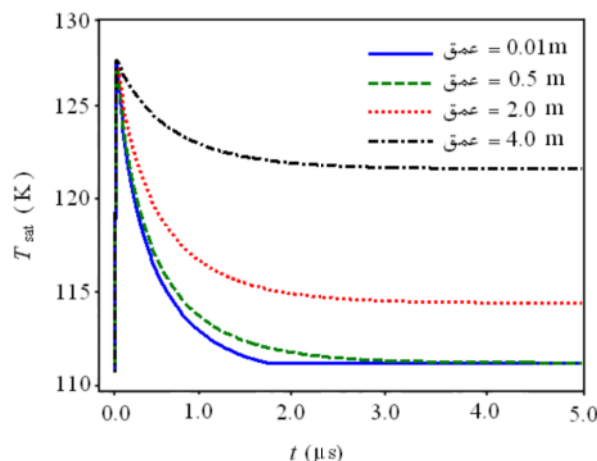


شکل ۱۳ تغییرات شعاع فیلم بخار نسبت به زمان با کاهش دمای گاز طبیعی مایع

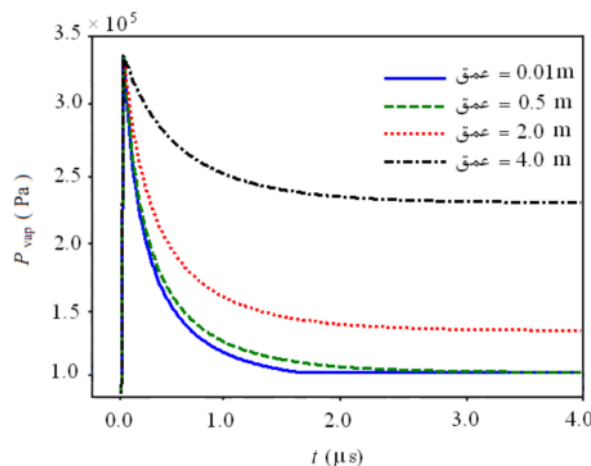


شکل ۱۴ تغییرات فشار بخار درون فیلم نسبت به زمان با کاهش دمای گاز طبیعی مایع

همچنین در این مقاله در مورد نحوه محاسبه ضخامت اولیه فیلم بخار بحث شد و تغییرات پارامترهایی مانند چگالی بخار، گرمای نهان تبخیر در محاسبات لحاظ گردید.



شکل ۱۱ تغییرات دمای سطح بین فازی نسبت به زمان با افزایش عمق مرکز قطره آب



شکل ۱۲ تغییرات فشار بخار درون فیلم نسبت به زمان با افزایش عمق مرکز قطره آب

مطابق شکل ۱۳ با کاهش دمای گاز طبیعی مایع، از میزان رشد فیلم بخار کاسته شده و همچنین بر اساس شکل ۱۴ پالس فشار بخار ایجاد شده درون فیلم بخار، کوچک تر می شود که این به دلیل افزایش اختلاف دمای اشباع با دمای گاز طبیعی مایع ($\Delta T_{\text{sub}} = T_{\text{sat}} - T_L$) و نیاز به انرژی بیشتر جهت جبران این اختلاف دما می باشد که خود منجر به کاهش رشد فیلم بخار خواهد شد.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله رشد فیلم بخار تشکیل شده بر روی یک قطره کروی آب در تماس با متان مایع بررسی گردید. در تحقیقات

با توجه به نمودارها و نتایج بدست آمده از حل عددی مسأله تماس قطره کروی آب با متان مایع نتایج کلی زیر بدست آمده است:

- بر اساس نمودارها مشاهده می‌شود که اگر ضخامت فیلم بخار اولیه بیش از ماکزیمم رشد شعاع حباب در نظر گرفته شود، شعاع حباب دچار کاهش می‌گردد که مؤید انتخاب مناسب ضخامت اولیه بر اساس رابطه میکیک برای این مسأله می‌باشد.

- بیشترین تأثیری که تغییر ابعاد قطره آب دارد در افزایش دمای اشباع بر اثر بزرگ شدن سطح جانبی قطره و بالطبع ایجاد انرژی ساطع شده بیشتر از این سطح می‌باشد. همچنین در صورت افزایش ابعاد قطره آب، پالس فشار بخار درون فیلم می‌تواند حتی تا ۴ برابر بزرگ‌تر از فشار اولیه شود. در چنین شرایطی احتمال بروز پدیده انفجار بخار، بسیار بالا خواهد رفت مخصوصاً اگر بطور هم‌زمان چند تماس بین قطرات آب و متان بوجود آمده باشد و پالس‌های فشار یکدیگر را تقویت نموده و یک انفجار فشاری شدید ایجاد نمایند (مطابق تعریف پدیده انفجار بخار).

- مهم‌ترین اثر افزایش عمق فرو روی قطره آب بدرون متان مایع کاهش شیب تغییرات و کاهش مقدار شعاع فیلم بخار در اثر افزایش فشار هیدرواستاتیک می‌باشد. افزایش فشار هیدرواستاتیک، فشار اعمال شده روی پوسته بیرونی حباب بخار تشکیل شده را بیشتر نموده و از رشد و شدت آن می‌کاهد. همچنین افزایش عمق فرو روی قطره آب، تأثیری میزان در بروز انفجار بخار ندارد چرا که با افزایش عمق، بیشینه پالس فشار ایجاد شده درون فیلم بخار تغییری نمی‌کند.

- افزایش اختلاف دمای اشباع با دمای گاز طبیعی مایع نیز منجر به کاهش رشد فیلم بخار خواهد شد. چرا که تا رسیدن به شرایط اشباع و فراهم آمدن شرایط رشد فیلم بخار نیاز به صرف انرژی بیشتری خواهد بود. بنابراین با کاهش دمای متان مایع، پالس‌های فشار ایجاد شده درون فیلم بخار، ضعیف‌تر شده و از احتمال بروز انفجار بخار کاسته می‌شود.

۶- فهرست علائم

A	مساحت سطح (m^2)
C_p	گرمای ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
G	شتاب گرانش (ms^{-2})
Gr	عدد گراشف

h	عمق فرو روی قطره آب درون متان مایع (m)
$\bar{h}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی کلی ($Wm^{-2}K^{-1}$)
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر (Jkg^{-1})
h_{if}	گرمای نهان انجماد (Jkg^{-1})
Ja	عدد ژاکوب
k	ضریب هدایت حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
m	جرم (kg)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kgs^{-1})
P	فشار (Pa)
Pr	عدد پرانتل
q_i''	شار حرارتی روی مرز بین فازی (Wm^{-2})
q_w''	شار حرارتی روی سطح قطره کروی (Wm^{-2})
R	شعاع (m)
$\dot{R}$	سرعت مرز بین فازی (ms^{-1})
$\ddot{R}$	شتاب حرکت مرز بین فازی (ms^{-2})
R_{meth}	ثابت گاز متان ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
Ste	عدد استفان
t	زمان (s)
t^*	زمان بدون بعد
T	دما (K)
U	سرعت (ms^{-1})

علائم یونانی:

δ	ضخامت فیلم بخار (m)
ρ	دانسیته (kgm^{-3})
α	ضریب پخش حرارتی (m^2s^{-1})
σ	ضریب تنش سطحی (Nm^{-1})
v	ویسکوزیته سینماتیکی (m^2s^{-1})

زیرنویس‌ها:

$crit$	بحرانی
eq	معادل
f, L	مایع
fr	انجماد
rad	تشعشع
sat	اشباع
sub	زیر اشباع
v	فاز بخار
w	سطح قطره آب

۷- مراجع

- [10] Plesset M.S., Zwick S.A., "The growth of vapour bubble in superheated liquid", *Journal of Applied Physics*, Vol. 25, 1954.
- [11] Rayleigh, L., "On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity", *Philosophy Magazine*, Vol. 34, 1917, pp. 94-98.
- [12] Peng D. Y., Robinson D. B., "A New Two-Constant Equation of State", *Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals*, Vol. 15, 1976, pp. 59-64.
- [13] U.S. Geological Survey., *Methane Gas Volume Expansion Ratios and Ideal Gas Deviation Factors for the Deep-Water Bering Sea Basins*, Open-File Report, 2005.
- [14] Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukorrel, A. S., *Heat transfer* (In Russian), Moscow, Energoatomizdat publication, 1981, pp. 416.
- [15] Gorenflo, D., Pool Boiling, *VDI-heat Atlas*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [16] Setzmann U., Wagner W., "A New Equation of State and Tables of Thermodynamic Properties for Methane Covering the Range from the Melting Line to 625 K at Pressures up to 1000 MPa", *Journal of Physical and Chemistry Reference Data*, Vol. 20, No. 6, 1991.
- [17] Watson K. M., "Thermodynamics of the Liquid States, Generalized Prediction of Properties", *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 35, 1943, pp. 398-406.
- [18] Hoffman J. D., *Numerical Methods for Engineering and Scientists*, New York, Marcel Dekker, 2001.
- [19] Gubaidullin A. A., Sannikov I. N., "Dynamics and heat and mass exchange of a vapor bubble containing a hot particle", *High Temperature*, Vol. 43, No. 6, 2005, pp. 922-929.
- [1] Naoyuki F., "Mechanism of steam explosion of magma approach from comparative planetary volcanology of eruption", *Japan Aerospace Exploration Agency Institute of Space and Astronautical Science*, 1994.
- [2] Khabeev N. S., "Simulation of vapour explosions", *Applied Energy*, Vol. 64, 1999, pp. 317-321.
- [3] Dimopoulos G. G., Frangopoulos C. A., "A Dynamic Model for Liquefied Natural Gas Evaporation during Marine Transportation", *International Journal of Thermodynamics*, Vol. 11, No. 3, 2008, pp. 123-131.
- [4] Io Mosaic Corporation., 2007, *Modeling LNG Pool spreading and Vaporization*, Whitepaper Copyright, <http://www.iomosaic.com>. Accessed 17 June 2012.
- [5] McGill J. M., *Simulation of vaporization and combustion of a large-scale cryogenic liquid methane pool*, Master of Science Thesis, University of Maryland, College Park, 2006.
- [6] Bejan A., Kraus A. D., *Heat Transfer Hand Book*, New York, John Wiley & Sons, 2003.
- [7] Collier J. G., Thome, J. R., *Convective boiling and condensation*, New York, Oxford University Press, 1996.
- [8] Bejan A., *Convection Heat transfer*, New York, John Wiley & Sons, 1984.
- [9] Mirjalili S. A. M., Karimi A. A., Hadi S., "Investigation of the effect of bubbles formed due to underwater explosion on ship structure" *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 41-52, 2006. (In Persian)