

## مدل سازی رشد فیلم بخار ایجاد شده بر اثر تماس کره داغ فلزی با آب در مخازن تحت فشار

مجتبی بیگری<sup>۱</sup> و علی جهانگیری<sup>۲\*</sup>

### چکیده

تماس یک جسم داغ (مانند ذرات فلز مذاب) با یک سیال خنک و نسبتاً فرارتر (مانند آب) در صنایع ریخته‌گری فلزات، کاغذسازی و در رآکتورهای هسته ای محتمل می باشد. انتقال حرارت بسیار شدید و سریع ناشی از این تماس می‌تواند فشار داخل فیلم بخار تشکیل شده بر روی ذره داغ را در مدت زمان اندکی افزایش دهد و منجر به رخداد پدیده انفجار بخار همراه با ایجاد موج فشاری شدیدی داخل مخزن حاوی ماده فرارتر گردد. در این مقاله ابتدا مدل ریاضی مسئله برخورد کره داغ فلزی کوچک از جنس مس با آب به‌دست آمده و سپس آثار تغییر فشار مخزن نگهدارنده آب بر روی تغییرات شعاع فیلم بخار، فشار درون فیلم بخار و دمای اشباع و مرز بین فازی، انتقال حرارت سریع. نتایج رشد فیلم بخار و فشار درون این فیلم برای رخداد چنین پدیده‌ای در نیروگاه‌های هسته ای که فشار سیال خنک‌کن میله‌های سوخت آن بین ۶۰ تا ۱۵۰ بار می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج به‌دست آمده در فشارهای خیلی بالای مخازن، پالس فشار درون فیلم بخار در زمان کوتاهی به‌شدت افزایش می‌یابد و احتمال رخداد پدیده انفجار بخار را بالا می‌برد.

دریافت مقاله: اسفند ۱۳۹۱

پذیرش مقاله:

### واژگان کلیدی:

ذره کروی داغ،  
فیلم بخار،  
فشار درون فیلم بخار،  
دمای اشباع،  
مرز بین فازی،  
انتقال حرارت سریع.

### ۱- مقدمه<sup>۱</sup>

فاجعه انگیزی بوجود آورد. تماس مواد مذاب درون رآکتور نیروگاه با آب خنک کن رآکتور می‌تواند منجر به رخداد پدیده انفجار بخار (Vapor Explosion) شود. مانند حادثه نیروگاه اتمی چرنوبیل اوکراین که در سال ۱۹۸۶ به‌وقوع پیوست [۳-۵]. پدیده انفجار بخار در اثر انتقال حرارت بسیار شدید ناشی از تماس یک مایع داغ (مانند قطرات فلز مذاب) و یک ماده خنک و نسبتاً فرارتر (مانند آب) ایجاد می‌شود. تاثیرگذاری قطرات داغ مذاب روی سیال خنک کن که با سرعت بالایی رخ می‌دهد، منجر به انتقال حرارت شدید و سریع همراه با تبخیر مایع خنک‌کننده می‌شود. تولید سریع بخار در محدوده سطح مشترک دو سیال باعث تولید موج فشاری شدید در فضای

مطالعه رشد حباب یا فیلم بخار تشکیل شده بر اثر تماس یک ماده داغ با مایعات نسبتاً فرارتر که با تغییر ناگهانی فشار و دما همراه است، اهمیت به‌سزایی دارد. احتمال بروز این پدیده در صنایعی مانند انرژی هسته‌ای، ذوب و لعاب فلزات و همچنین در پدیده‌های طبیعی مانند ریزش گدازه‌های آتشفشانی در آب دریا، وجود دارد [۱ و ۲]. گاهی تغییرات ناگهانی این فیلم بخار می‌تواند حوادث

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: a\_jahangiri@sun.semnan.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

تشکیل شده بر روی یک کره داغ از جنس مس پرداختند و تغییرات بدون بعد شعاع حباب کروی را با استفاده از دو مدل محاسباتی در مختصات کروی متقارن و با در نظر گرفتن ضریب انتقال حرارت هدایت درون فیلم بخار به صورت تابع خطی از دمای فیلم به دست آوردند.

مطالعه ادبیات موجود نشان می دهد که تاکنون فرآیند تکامل فیلم بخار بر روی سطح اجسام غوطه ور در مایعات فرارتر (مانند برخورد ذره مسی داغ با آب) با در نظر گرفتن اثرات غیرتعادلی و تغییرات دمای سطح بین فازی مایع - بخار به طور جامع و گسترده مورد بررسی قرار نگرفته است و ارائه مدل مناسب برای بررسی این پدیده ضروری به نظر می رسد.

### ۳- مدل سازی مسئله

به منظور بررسی مسئله فرض می شود کره داغ از جنس مس در عمق معین داخل آب غوطه ور است و فیلم نازکی از بخار آب از ابتدا بر روی سطح کره مسی وجود دارد. برای محاسبه ضخامت اولیه فیلم بخار، در لحظه شروع فرآیند، می توان از رابطه (۱) که توسط میکیک ارائه شده است؛ استفاده نمود [۱۳].

$$\text{for } t^+ = t \frac{A^2}{B^2} = 1 \Rightarrow R(t) \square At$$

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

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

$$b = \frac{\pi}{7}, Ja = \frac{(T_w - T_{sat}) \rho_f C_{p_f}}{\rho_v h_{fg}} \quad (1)$$

براین اساس در لحظه زمانی اولیه  $t_1 = 1 \times 10^{-6}$  s شعاع محاسبه شده از رابطه میکیک از مرتبه  $4/5 \times 10^{-4}$  m می باشد و بنابراین انتخاب شعاع فیلم بخار اولیه معادل  $0/0001$  m مناسب است.

به منظور تحلیل رشد فیلم بخار بر حسب زمان حل معادلات بقاء جرم، اندازه حرکت و انرژی که به ترتیب در

اطراف خواهد شد که این موج می تواند به انهدام مخزن (سازه) نگهدارنده مواد مربوطه منجر شود [۱]. در مقاله حاضر انتقال حرارت و رشد فیلم ناشی از تماس کره فلزی داغ و آب بررسی می گردد.

### ۲- پیشینه تحقیق

نلسون و دودا [۶] به مطالعه پدیده انفجار بخار و تشکیل و تخریب فیلم بخار بر روی مذاب اکسید آهن غوطه ور در آب پرداختند. آن ها، وجود شرایط تقارن در هندسه کروی را در تحلیل این پدیده به اثبات رساندند.

کاوو و همکارانش [۷]، در مطالعه موردی خود به بررسی اندرکنش وجود یک قطره مذاب داغ فلزی درون یک سیال خنک و اثر اعمال پالس فشار خارجی بر تخریب فیلم بخار پرداخته اند و نشان دادند که پس از تخریب حباب بخار ناشی از اعمال این پالس فشار و برقراری تماس مایع خنک کن با فلز مذاب یک موج سطحی کوچک روی قطره مذاب بوجود می آید و حباب های جدیدی با رشد سریع روی سطح مذاب شروع به بزرگ شدن خواهند کرد و در انتها این حباب ها هم از بین میروند.

و در نهایت نتایج کار خود را با نتایج آزمایشگاهی کورادینی [۸]، مقایسه نمودند.

آب و همکارانش [۹ و ۱۰]، در مطالعات آزمایشگاهی خود به بررسی فاز تحریک پدیده انفجار بخار با هدف مقایسه با پدیده ای که امکان رخداد آن در رآکتورهای هسته ای محتمل است، پرداختند. ایشان یک قطره مذاب از چند جنس مانند قلع، سرب، آلومینیوم، روی و در نهایت دی اکسید اورانیم با دمای معین را به درون آب رها کردند. پس از تماس آب و مذاب با تصویربرداری توسط دوربین سرعت بالا (۴۰۵۰۰ فریم در ثانیه) تغییرات فشار و رشد و تخریب فیلم بخار با زمان را ثبت نمودند. گوبایدالین و سانیکوف [۱۱] و همچنین خابیف و گانیف [۱۲]، به بررسی رفتار دینامیکی، انتقال جرم و حرارت در فیلم بخار

هندسه مسأله معادله پیوستگی (معادله ۲) در مختصات کروی و در امتداد شعاع به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr}(r^2 u) = 0 \quad (۵)$$

فرض می‌شود که شکل کروی حباب در کل فرایند حفظ گردد.

معادله اندازه حرکت (رابطه ۳) در مختصات کروی که در آن از نیروهای جسمی صرف نظر شده باشد، به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (۶)$$

با فرض غیرقابل نفوذ بودن سطح بین فازی مایع - بخار، سرعت حرکت آن برابر سرعت شعاعی حرکت ذره مایع واقع بر روی آن می‌باشد. با انتگرال‌گیری از معادله (۵)، شرط مرزی سرعت روی دیواره پیوسته حباب  $(u(r=R) = u_R = \dot{R})$  اعمال می‌گردد. نتیجه حاصل در معادله (۶) جای‌گذاری شده و از طرفین معادله اخیر، از شعاع  $r$  تا  $\infty$  انتگرال‌گیری می‌شود. سپس رابطه هیدرواستاتیک  $P(\infty) = P_0 + \rho gh$  و تنش سطحی نیز در معادله اعمال می‌گردد. نهایتاً معادله رشد حباب بخار به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + 4v\frac{\dot{R}}{R} = -\frac{1}{\rho} \left[ P_0 + \rho gh - P^{(G)} + \frac{2\sigma}{R} \right] \quad (۷)$$

که در آن  $\dot{R} = \frac{dR}{dt}$  در واقع شتاب ذره واقع بر سطح حباب،  $\sigma$  تنش سطحی،  $g$  شتاب گرانش و  $v$  لزجت سینماتیکی است.

در معادله فوق اگر از آثار لزجت و کشش سطحی صرف نظر گردد به همان معادله ریلی (Rayleigh) [۱۴-۱۶]، منتهی خواهد شد.

لازم به ذکر است که فشار درون گاز معمولاً معادل فشار اشباع گاز در دمای متناظر می‌باشد ولی به طور دقیق‌تر اگر آثار سینتیک مولکولی گازها را در نظر گرفته شود برای محاسبه دقیق فشار گاز درون حباب می‌توان از رابطه لایونتسلف استفاده نمود [۱۷ و ۱۸]:

روابط (۲) الی (۴) ارائه شده‌اند، برای فاز مایع ضروری است.

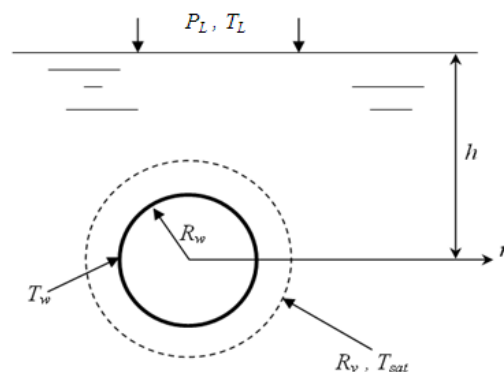
$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (۲)$$

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \quad (۳)$$

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q''' + \mu \phi \quad (۴)$$

در روابط (۱) الی (۴)،  $\rho$  جرم حجمی،  $u$  سرعت،  $p$  فشار،  $\mu$  لزجت،  $F$  نیروهای جسمی،  $T$  دما،  $k$  ضریب هدایت حرارتی،  $q'''$  شدت تولید انرژی داخلی،  $\phi$  تابع اتلاف انرژی لزجی می‌باشد.

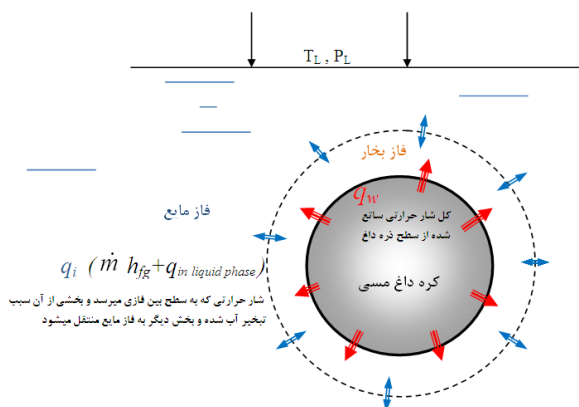
شکل ۱ هندسه یک ذره کروی از جنس مس به شعاع  $R_w$  و دمای سطح  $T_w$  که در عمق معین  $h$  از آب فرو رفته است را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن هندسه شکل ۱ و فرضیات اشاره شده، معادلات حاکم به شکل ساده‌تر بازنویسی می‌شود.



شکل ۱- نمای کلی هندسه مساله

اگر شار حرارتی ناشی از دمای سطح کره داغ مسی بیشتر از شار حرارتی بحرانی مورد نیاز برای جوشش باشد، رشد فیلم بخار ادامه می‌یابد و درغیراین صورت بخار تقطیر شده یا فیلم بخار تخریب می‌گردد [۱۳]. دمای اولیه ذره مسی داغ، قطر، فشار و دمای روی سطح آزاد آب و همچنین عمق قرارگیری مرکز کره مسی، مشخص فرض می‌شود. همچنین فرض می‌شود هر دو فاز مایع و بخار آب 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 تقارن در مسأله مورد نظر و

مایع را می توان با استفاده یک ضریب انتقال حرارت مناسب محاسبه نمود).



شکل ۳- شماتیک انتقال انرژی روی مرزها

برای بررسی مناسب می توان مساله انتقال حرارت را مطابق شکل های ۲ و ۳ به دو بخش انتقال حرارت درون فاز بخار و انتقال حرارت در فاز مایع تقسیم نمود [۱۱] و [۱۲]. در حالت کلی انتقال حرارت در فیلم بخار به طور همزمان به صورت هدایت و جابه جایی صورت می گیرد. البته متداول است با تعریف یک ضریب هدایت معادل (\$k\_{eq}\$) تبادل حرارت صرفاً هدایت فرض شود [۳ و ۲۰]:

$$q_{in \text{ vapor film}} = \frac{k_{eq}}{\delta} (T_w - T_v) \quad (10)$$

که در آن \$\delta\$ ضخامت فیلم بخار است. نشان داده شده است که هرگاه \$[GrPr < 10^3]\$ باشد، می توان مقدار ضریب هدایت معادل (\$k\_{eq}\$) را با دقت کافی برابر با ضریب هدایت بخار (\$k\_v\$) در نظر گرفت. اعداد \$Gr\$ و \$Pr\$ بایستی در دمای متوسط سطوح داغ و خنک محاسبه شوند [۳ و ۲۰].

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 می توان شار موجود روی سطح بین فازی را به شکل رابطه (۱۱) به دست آورد.

$$q_i'' = k_v \frac{T_w(t) - T_{i(sat)}(t)}{R(t) - R_w} \frac{R_w}{R(t)} \quad (11)$$

$$P^{(G)} = P_s(T_{sat}) + \frac{0.44q_i''}{\sqrt{2R_{H_2O}T_{sat}}} \quad (8)$$

و در آن \$T\_{sat}\$ دمای اشباع سیال، \$q\_i''\$ شار حرارتی روی سطح بین فازی، \$P\_s\$ فشار اشباع متناظر با دمای اشباع و \$R\_{H\_2O}\$ ثابت ویژه بخار آب است.

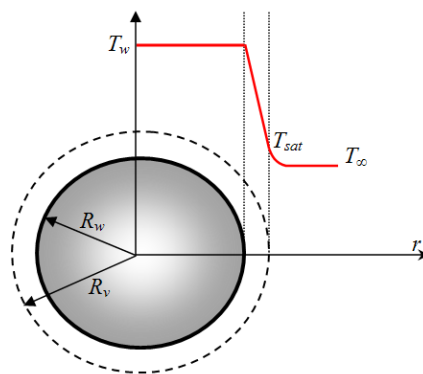
همچنین ارتباط بین فشار اشباع \$P\_s\$ با دمای اشباع متناظر نیز توسط رابطه کلاسیوس کلاپیرون به صورت زیر بیان می گردد [۱۹].

$$\frac{dP_s}{dT_{sat}} = \frac{h_{fg}}{\left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l}\right)T_{sat}}, \quad P_s = \rho_v R_{H_2O} T \quad (9)$$

در رابطه اخیر \$h\_{fg}\$ گرمای نهان تبخیر و \$\rho\_l\$ و \$\rho\_v\$ به ترتیب جرم حجمی فاز مایع و فاز بخار می باشد.

### ۳-۱- انتقال حرارت از میان فیلم بخار

بعد از بررسی معادله رشد حباب لازم است در مورد انتقال حرارت و توزیع دما در مسأله پیش رو به بحث پرداخته شود.



شکل ۲- توزیع دما در دامنه حل

اگر جرم درون فیلم بخار ناچیز فرض شود از تغییرات انرژی آن می توان صرف نظر کرد و فرض کرد که کل شار ساطع شده از کره داغ روی سطح بین فازی ظاهر می شود. در روی مرز بین فازی بخشی از شار سبب تبخیر مقداری از آب شده و بخش باقیمانده آن در فاز مایع منتقل می شود (در حالت ساده فرض می شود ترابری انرژی در فاز

وضعیت وجود تبخیر می‌باشد، به صورت متغیر با زمان محاسبه شده است.

$$h(w/m^2 K) = 1.95(q''(w/m^2))^{0.72} (P(bar))^{0.24} \quad (16)$$

$$10^4 w/m^2 \leq q'' \leq 10^6 w/m^2$$

$$0.5bar \leq P \leq 20bar$$

لازم به ذکر است که در سطح بین فازی، چگالی فاز بخار و گرمای نهان تبخیر آب به شدت متغیر بوده و تابعی از دمای اشباع در مرز می‌باشد، بنابراین برای محاسبه چگالی فاز بخار اشباع از معادله (۱۷) و نیز برای محاسبه گرمای نهان تبخیر آب از معادله (۱۸) استفاده شده است تا تغییرات این پارامترها در محاسبات لحاظ گردد [۲۸] و [۲۹].

$$Ln\left(\frac{\rho_v}{\rho_{crit}}\right) = c_1 \tau^{2/6} + c_2 \tau^{4/6} + c_3 \tau^{8/6} + c_4 \tau^{18/6} + c_5 \tau^{37/6} + c_6 \tau^{71/6}$$

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

$$c_1 = -2.02957, c_2 = -2.68781$$

$$c_3 = -5.38107, c_4 = -17.3151$$

$$c_5 = -44.6384, c_6 = -64.3486 \quad [28] \quad (17)$$

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

$$T_r = \frac{T_{sat}}{T_{crit}} \quad [29] \quad (18)$$

در رابطه (۱۶)،  $h'_{fg}$  و  $T'_r$  در یک دمای مرجع که خواص ترموفیزیکی آن در دسترس باشد، لحاظ می‌شوند. همچنین قابل اشاره است که با توجه به اختلاف دمای بین سطح کره داغ و مرز بین فازی، شار حرارتی تشعشعی سانس شده از سطح کره داغ که به سطح بین فازی می‌رسد، و با استفاده از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود؛ قابل صرف نظر نمی‌باشد چرا که براساس محاسبه انجام گرفته، مقدار این شار نسبت به کل شار حرارتی رسیده به سطح بین فازی حدود ۲۰ درصد است (۰.۲  $\square$   $\frac{q''_{rad}}{q''_{initial}}$ ). در این

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  $\frac{T_w + T_{i(sat)}}{2}$  در نظر گرفته می‌شوند.

با توجه به سرعت بالای فرآیند (کوچک بودن زمان رخداد پدیده)، کوچک بودن ابعاد هندسی کره داغ و بزرگ بودن ضریب انتقال حرارت هدایت، توزیع دمای کره داغ را می‌توان با روش ظرفیت فشرده<sup>۱</sup> مدل‌سازی نمود و به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$q''_w A_w = -m_w C_w \frac{dT_w}{dt} \quad (12)$$

$$q''_w (4\pi R_w^2) = -\rho_w \left(\frac{4}{3}\pi R_w^3\right) C_w \frac{dT_w}{dt} \quad (13)$$

$$\Rightarrow \frac{dT_w}{dt} = -\frac{3q''_w}{\rho_w R_w C_w}$$

و با جای‌گذاری شار حرارتی موجود روی سطح کره داغ در معادله اخیر خواهیم داشت:

$$\frac{dT_w}{dt} = -\frac{3k_v [T_w(t) - T_i(t)] R(t)}{\rho_w R_w^2 C_w [R(t) - R_w]} \quad (14)$$

حل معادله دیفرانسیل اخیر با اعمال شرط اولیه  $T_w(t=0) = T_{w0}$  با استفاده از روش‌های عددی رایج [۲۱] توزیع زمانمند خنک شدن سطح کره داغ را ارائه خواهد داد.

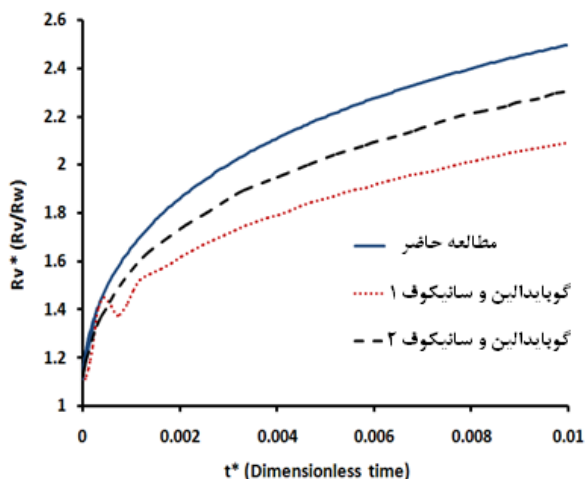
در ادامه لازم است ترابری انرژی درون فاز مایع بررسی شود بدین منظور در صورت یافتن ضریب انتقال حرارت کلی مناسب این انتقال انرژی را با در نظر گرفتن تبخیر روی مرز بین فازی می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$q''_{in \text{ liquid phase}} (4\pi R_v^2) = Q_i - \dot{m} h_{fg} \quad (15)$$

$$q''_{in \text{ liquid phase}} = \bar{h} (T_{i(sat)} - T_\infty)$$

که در رابطه (۱۵)،  $Q_i$  کل حرارت رسیده به مرز بین فازی می‌باشد. در مساله حاضر، مقدار ضریب انتقال حرارت معادل با استفاده از رابطه (۱۶) که توسط فریتز [۲۲] ارائه شده و مربوط به ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در

به مطالعه پیشین بزرگتر به دست آمده است و در صورت حذف انتقال حرارت تشعشی از مدل سازی حاضر نتایج تغییرات شعاع بدون بعد بسیار نزدیک به مطالعه مذکور به دست خواهد آمد.



شکل ۴- مقایسه تغییرات شعاع بدون بعد فیلم بخار نسبت به زمان بی بعد با استفاده از روش حل متفاوت

#### ۴- نتایج

نتایج به دست آمده از حل عددی سیستم معادلات مذکور با در نظر گرفتن فشارهای مختلف مخزن نگهدارنده آب، و پارامترهایی مانند رشد فیلم بخار، فشار درون فیلم بخار و دمای اشباع مرز بین فازی بررسی شده است. لازم به ذکر است که مسئله مذکور برای برخورد ذره کروی از جنس مس با آب می باشد و خواص ترموفیزیکی این دو ماده در شرایط حل مسئله وارد شده اند.

##### ۴-۱- اثر تغییر فشار مخزن در دماهای مختلف

برای بررسی اثر تغییر فشار مخزن، تماس ذره کروی مسی (شعاع ۱mm و دمای ۱۳۵۶K) با آب در دماهای مختلفی که از دمای اشباع آب در فشار متناظر آن پائین تر باشد؛ در عمق یک سانتی متر پایین تر از سطح آزاد مایع در نظر گرفته شده است.

محاسبه مقدار ضریب صدور سطح کره داغ مسی ۰/۱۵ لحاظ شده است [۳۰].

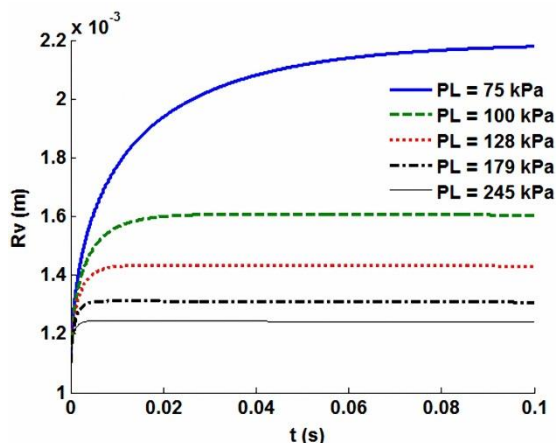
$$q_{rad}'' = \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_{sat}^4) \quad (19)$$

بنابراین کل شار حرارتی موجود روی سطح بین فازی که در رابطه (۱۵) منظور شده است، در واقع مجموع شار حرارتی هدایتی محاسبه شده در معادله (۱۱) و شار حرارتی تشعشی اخیر می باشد.

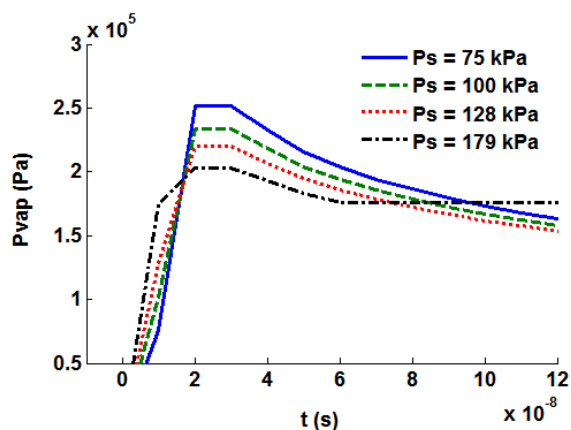
##### ۳-۲- اعتبارسنجی حل

برای حل همزمان سیستم معادلات ۷، ۱۴ و ۱۵ از یک برنامه رایانه ای استفاده شده است و اندازه گامها به گونه ای کوچک انتخاب شده است ( $\Delta t = 10^{-9} sec$ ) که کوچکتر کردن بیشتر آن تاثیری در نتایج به دست آمده نداشته باشد و در آن مرتبه خطاهای قابل پیش بینی، از مرتبه  $O(\Delta t^4)$  می باشد. همچنین جهت تایید و اعتبار بیشتر؛ نتایج به دست آمده از برنامه نوشته شده برای برخورد یک جسم کروی داغ از جنس مس با آب، با نتایج محاسباتی گوبایدالین و سانیکوف [۱۱] مقایسه شده است که با توجه به نمودار شکل ۴ نزدیک بودن جوابها و روند تغییرات شعاع فیلم بخار آن را تایید می کند. این نتایج برای برخورد کره داغ از جنس مس با دمای ۱۳۵۶K با آب مایع در دمای ۳۶۸K به دست آمده است. این گروه با استفاده از دو روش که در پژوهش مذکور آمده است تغییرات شعاع بدون بعد حباب بخار را بر حسب زمان بدون بعد رسم نموده اند که نتایج کار ایشان در شکل ۴، با مدل ریاضی پژوهش حاضر مقایسه شده است. همان طور که از آن بر می آید تطابق روند تغییرات شعاع حباب بخار تضمین می گردد.

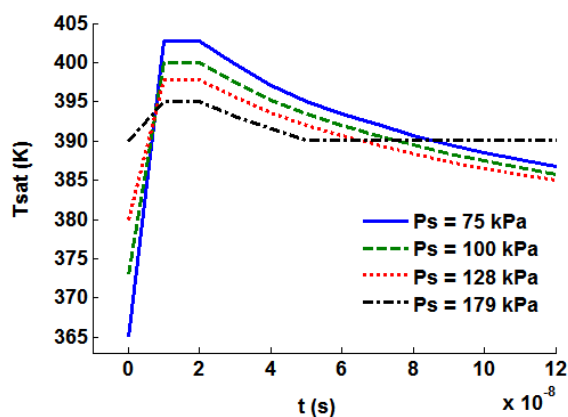
شایان توجه است که در مطالعه گوبایدالین و سانیکوف اثر انتقال حرارت تشعشع در نظر گرفته نشده است و این در حالی است که میزان شار حرارتی تشعشی در شرایط این مطالعه قابل صرف نظر نبوده و حدود ۲۰٪ کل شار حرارتی روی مرز بین فازی است. لذا نتایج محاسباتی حاضر نسبت



شکل ۵- تغییرات شعاع فیلم بخار نسبت به زمان با افزایش فشار مخزن در دمای ۳۶۰ K



شکل ۶- تغییرات فشار درون فیلم بخار نسبت به زمان با افزایش فشار مخزن در دمای ۳۶۰ K



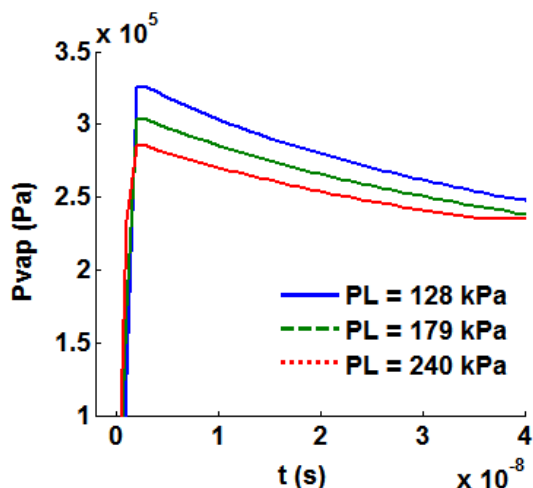
شکل ۷- تغییرات دمای اشباع مرز بین فازهای بخار نسبت به زمان با افزایش فشار مخزن در دمای ۳۶۰ K

#### ۴-۱-۱- اثر تغییر فشار مخزن در دمای ۳۶۰ K

در این بخش اثر تغییر فشار مخزن که آب محتوی آن دارای دمای ۳۶۰ K باشد، بررسی می‌گردد. این دما نسبت به دمای اشباع آب در فشار ۷۵ kPa، حدود ۵°C کمتر می‌باشد. بنابراین در فشار ۷۵ kPa، اختلاف دمای اشباع آب با دمای فاز مایع آن ( $\Delta T_{\text{sub}} = T_{\text{sat}} - T_L$ ) که همان میزان زیر اشباع بودن دمای سیال است،  $\Delta T_{\text{sub}} = 5^\circ\text{C}$  می‌باشد. برای فشارهای بالاتر از این مقدار، دمای اشباع متناظر بیشتر بوده و بنابراین اختلاف دمای  $\Delta T_{\text{sub}}$  نیز بالاتر خواهد رفت. در نمودار شکل ۵ رشد فیلم بخار تشکیل شده بر سطح ذره کروی داغ، در فشارهای مختلف مشاهده می‌شود. همان‌طور که قابل انتظار است در یک دمای ثابت برای آب موجود در مخزن، هرچه فشار مخزن کمتر باشد، در واقع فشار روی سطح بیرونی پوسته فیلم بخار کمتر بوده و امکان رشد فیلم بخار بیشتر می‌شود.

در نمودار شکل‌های ۶ و ۷ رفتار پالسی شکل فشار بخار و دمای اشباع نظیر آن روی مرز بین فازهای در بازه زمانی به تعادل رسیدن فشار درون فیلم بخار با فشار مخزن ترسیم شده است. با توجه به شدت انتقال حرارت در زمان آغاز فرآیند، فشار درون فیلم بخار در زمان بسیار کوتاهی بالا رفته و سپس در اثر رشد فیلم بخار فشار درون آن به سرعت کاهش یافته و فرآیند به شکل موج فشاری در مایع توسعه می‌یابد. همچنین براساس نمودار شکل‌های ۶ و ۷، هرچه فشار مخزن کمتر باشد، انرژی کمتری برای رسیدن به شرایط اشباع مورد نیاز می‌باشد و در نتیجه فشار بخار درون فیلم و دمای اشباع روی مرز بین فازهای امکان افزایش بیشتری می‌یابند. بر این اساس پالس فشار ایجاد شده در فشارهای کمتر، شدیدتر می‌باشد.

فشارهای پائین تر می باشد. در واقع در فشارهای بالاتر، انرژی بیشتری صرف رساندن دمای آب به شرایط اشباع می شود و در نتیجه انرژی باقی مانده جهت رشد فیلم بخار و تبخیر کمتر می شود.



شکل ۹- تغییرات فشار درون فیلم بخار نسبت به زمان با افزایش فشار مخزن در دمای ۳۷۵K

#### ۲-۴- اثر تغییر دمای آب در فشارهای مختلف

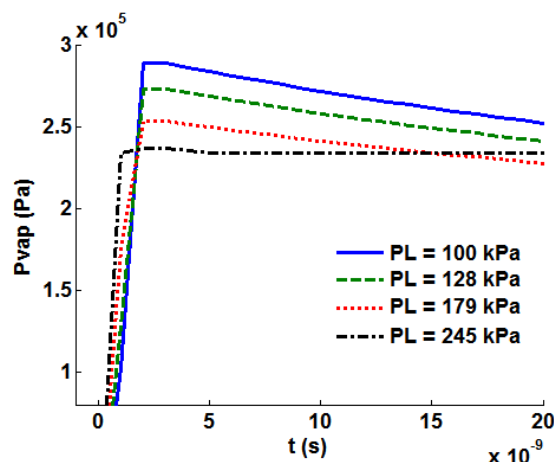
برای بررسی اثر تغییر دمای آب، تماس ذره کروی مسی (شعاع ۱mm و دمای ۱۳۵۶K) با آب در فشارهای مختلف در عمق ۱cm پایین تر از سطح آزاد مایع در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۴-۱- اثر تغییر دمای آب در فشار ۷۵kPa

در این بخش اثر تغییر دمای آب درون مخزن در فشار ۷۵kPa، بررسی می گردد. دمای اشباع آب در این فشار، حدود ۳۶۵K می باشد. مسئله برای ۴ دمای مختلف آب درون مخزن در نظر گرفته می شود. نمودار شکل ۱۰ تغییرات شعاع فیلم بخار را در دماهای مختلف نشان می دهد. هر چه دمای آب درون مخزن بیشتر باشد یعنی به عبارت دیگر شرایط آب به حالت اشباع نزدیک تر باشد ( $\Delta T_{sub}$  کمتر)، به دلیل صرف انرژی کم تر برای رسیدن به شرایط اشباع و باقی ماندن انرژی بیشتر برای فاز تبخیر، میزان رشد فیلم بخار بیشتر خواهد بود. همچنین مطابق شکل های ۱۱ و ۱۲، هر چه دمای آب درون مخزن

#### ۲-۱-۴- اثر تغییر فشار مخزن در دمای ۳۶۸K

دمای اشباع آب در فشار ۱۰۰kPa، حدود ۳۷۳K می باشد، که در این شرایط با انتخاب دمای ۳۶۸K برای آب موجود در مخزن، مقدار  $\Delta T_{sub} = 5^\circ C$ ، لحاظ می گردد. دمای ۳۶۸K، از دمای اشباع متناظر با فشار ۷۵kPa، بیشتر می باشد و بنابراین در این بخش فشارهای بالاتر از ۱۰۰kPa، بررسی می گردد. مطابق شکل ۸ باز هم در فشارهای پائین تر، پالس فشار ایجاد شده درون فیلم بخار شدیدتر خواهد بود چرا که در شرایط یکسان و دریافت انرژی مشابه، هر چه فشار بیرون پوسته فیلم بخار کمتر باشد، امکان غلبه بر آن راحت تر بوده و پالس فشار درون فیلم بخار، شدیدتر می شود.

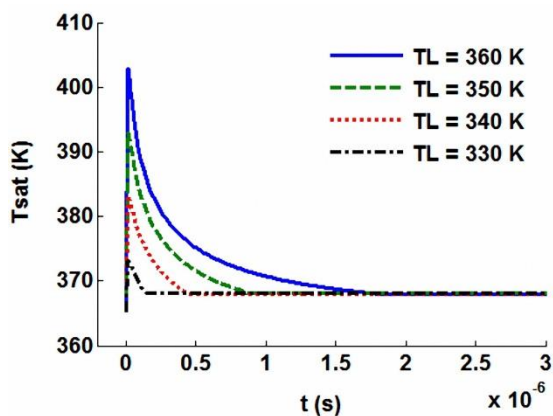


شکل ۸- تغییرات فشار درون فیلم بخار نسبت به زمان با افزایش فشار مخزن در دمای ۳۶۸K

#### ۳-۱-۴- اثر تغییر فشار مخزن در دمای ۳۷۵K

دمای اشباع آب در فشار ۱۲۸kPa، حدود ۳۸۰K می باشد، که در این شرایط با انتخاب دمای ۳۷۵K برای آب موجود در مخزن، مقدار  $\Delta T_{sub} = 5^\circ C$ ، لحاظ می گردد. دمای ۳۷۵K، از دمای اشباع متناظر با فشار ۱۰۰kPa، بیشتر می باشد و بنابراین در این بخش فشارهای بالاتر از ۱۲۸kPa، بررسی می گردد. همان طور که از شکل ۹ بر می آید باز هم در فشارهای کم تر، میزان پالس فشار بخار درون فیلم، دارای مقدار حداکثر بیشتری می باشد که ناشی از بیشتر بودن انرژی صرف شده (نزدیک بودن دمای آب به شرایط اشباع در فشارهای کمتر) جهت تبخیر در

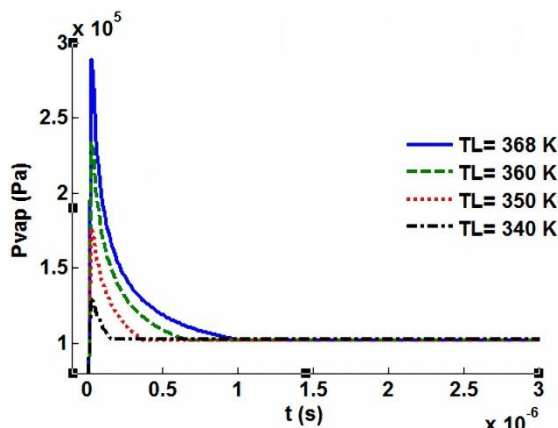




شکل ۱۲- تغییرات دمای اشباع مرز بین فازهای نسبت به زمان با افزایش دمای آب موجود در مخزن در فشار ۷۵kPa

۴-۲-۲- اثر تغییر دمای آب در فشار ۱۰۰kPa

دمای اشباع آب در فشار ۱۰۰kPa، حدود ۳۷۳K می‌باشد، که در این شرایط با انتخاب ۴ دمای مختلف برای آب مخزن، مطابق شکل ۱۳، باز هم مقدار بیشینه فشار درون فیلم بخار، در دماهای بالاتر و نزدیک‌تر به شرایط اشباع، بیشتر خواهد بود. در واقع در دماهای بالاتر، باتوجه به نزدیک بودن به شرایط اشباع، انرژی بیشتری جهت رشد فیلم بخار و تبخیر باقی می‌ماند.

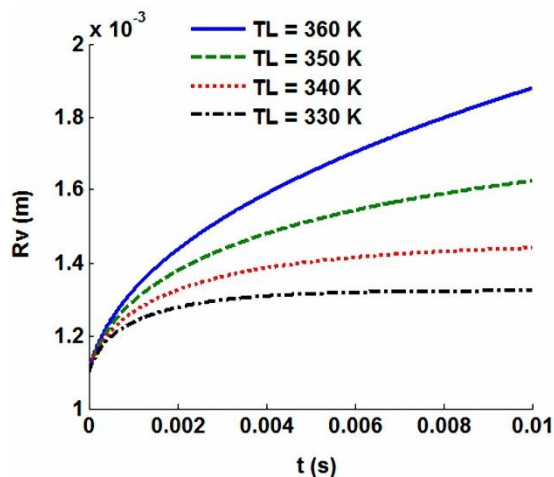


شکل ۱۳- تغییرات فشار درون فیلم بخار نسبت به زمان با افزایش دمای آب موجود در مخزن در فشار ۱۰۰kPa

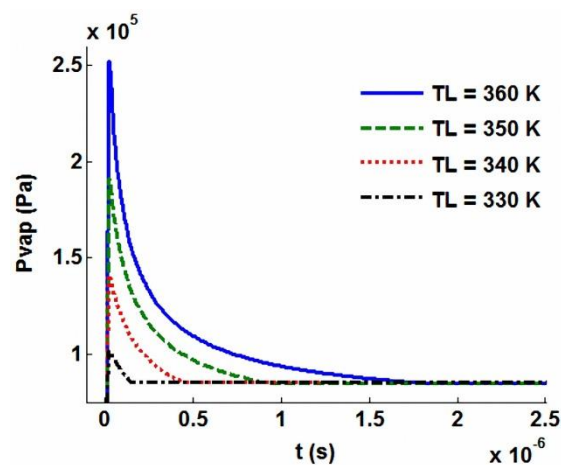
۴-۲-۳- اثر تغییر دمای آب در فشار ۱۲۸kPa

در این بخش با توجه به این که دمای اشباع آب در فشار ۱۲۸kPa، حدود ۳۸۰K می‌باشد؛ ۴ دمای مختلف کوچک‌تر از این دمای اشباع، برای آب مخزن در نظر گرفته

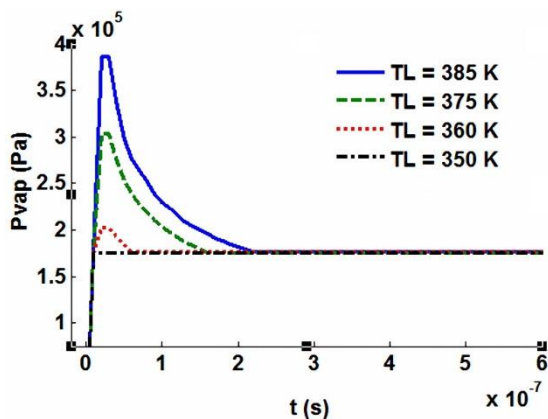
بیشتر باشد، انرژی کم‌تری برای رسیدن به شرایط اشباع مورد نیاز می‌باشد و بر این اساس پالس فشار ایجاد شده و دمای اشباع روی مرز بین فازهای بالاتر، به مقدار بیشینه بالاتری می‌رسد.



شکل ۱۰- تغییرات شعاع فیلم بخار نسبت به زمان با افزایش دمای آب موجود در مخزن در فشار ۷۵kPa



شکل ۱۱- تغییرات فشار درون فیلم بخار نسبت به زمان با افزایش دمای آب موجود در مخزن در فشار ۷۵kPa

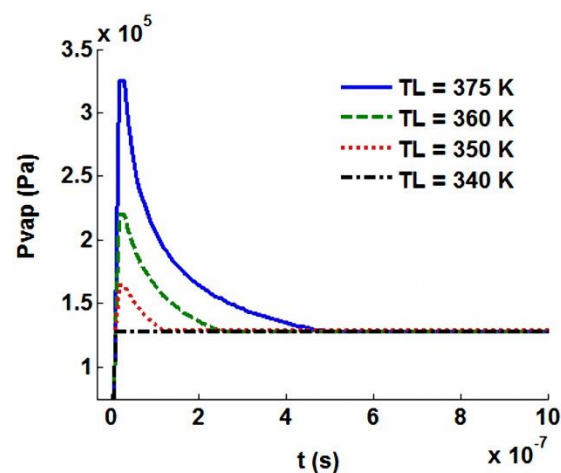


شکل ۱۵- تغییرات فشار درون فیلم بخار نسبت به زمان با افزایش دمای آب موجود در مخزن در فشار ۱۷۹kPa

#### ۴-۳- اثر تغییر فشار در $\Delta T_{sub} = 5^\circ C$

در این بخش اثر تغییر فشار مخزن در شرایطی بررسی می‌شود که در تمامی حالات اختلاف دمای آب مخزن با دمای اشباع متناظر با فشار مخزن یکسان و معادل  $\Delta T_{sub} = 5^\circ C$  باشد. در این شرایط با توجه به برابر بودن اختلاف دما در تمامی حالات، انرژی دریافتی جهت رسیدن به شرایط اشباع یکسان شده و عامل تعیین کننده همان فشار اولیه مخزن می‌باشد. بر این اساس مطابق شکل ۱۶، در فشارهای بالاتر در واقع فشار موجود روی پوسته خارجی فیلم بخار بیشتر بوده و امکان رشد فیلم بخار محدود می‌گردد و بنابراین با افزایش فشار مخزن، رشد شعاع فیلم بخار کاهش می‌یابد. ولی براساس شکل‌های ۱۷ و ۱۸ با توجه به اختلاف دمای یکسان در تمامی حالات، هرچه فشار اولیه مخزن بیشتر باشد به همان میزان پالس فشار بخار درون فیلم و دمای اشباع روی مرز بین فازی، به مقادیر بیشینه بیشتری دست می‌یابد.

می‌شود. مطابق شکل ۱۴، که تغییرات فشار درون فیلم بخار را در دماهای مختلف نشان می‌دهد، همان‌طور که قابل پیش‌بینی است مقدار بیشینه فشار درون فیلم بخار، در دماهای بالاتر و نزدیک‌تر به شرایط اشباع، بیشتر خواهد بود که مؤید نتایج قبلی می‌باشد. براساس شکل ۱۴، فشار درون فیلم بخار در بازه زمانی کوتاهی بالا رفته و سپس در اثر رشد فیلم بخار، فشار درون آن کاهش می‌یابد. از آن‌جا که در دماهای بالاتر، امکان رشد فیلم بخار بیشتر است، با افزایش دمای آب درون مخزن و نزدیک تر شدن به شرایط اشباع مربوطه، پالس تغییر فشار در بازه زمانی بزرگ‌تری به تعادل با فشار مخزن میرسد.



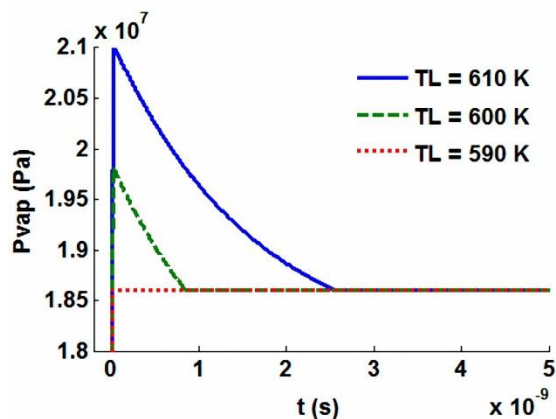
شکل ۱۴- تغییرات فشار درون فیلم بخار نسبت به زمان با افزایش دمای آب موجود در مخزن در فشار ۱۲۸kPa

#### ۴-۲-۴- اثر تغییر دمای آب در فشار ۱۷۹kPa

دمای اشباع آب در فشار ۱۷۹kPa، حدود  $390 K$  می‌باشد، که در این شرایط ۴ دمای مختلف، که اختلاف آن‌ها با دمای اشباع متناظر، ۵، ۱۵، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتیگراد باشد، در نظر گرفته شده است. براساس شکل ۱۵، باز هم مقدار بیشینه فشار درون فیلم بخار، در دماهای بالاتر و نزدیک‌تر به شرایط اشباع، بیشتر خواهد بود.

#### ۴-۴- ایجاد پالس فشار در مخزن با فشار بسیار بالا

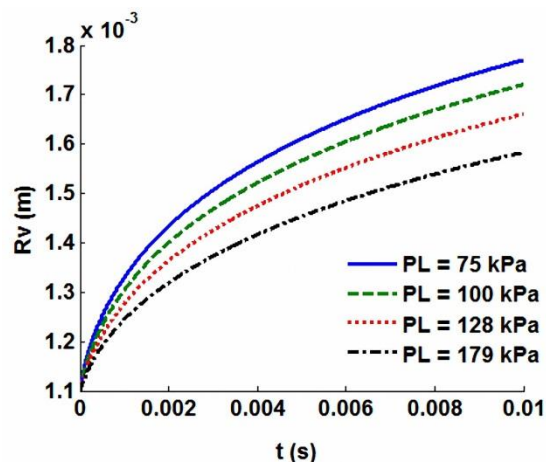
با توجه به این که برخی از مخازن مانند مخازنی که در رآکتورهای اتمی مورد استفاده قرار می‌گیرند، با فشارهای بسیار بالا سر و کار دارند در این بخش تغییرات فشار درون فیلم بخار در مخازن با فشار و دمای بالا بررسی می‌گردد. فشار مخزن مورد بررسی  $14820 \text{ kPa}$  و دمای اشباع متناظر آن  $615 \text{ K}$ ، در نظر گرفته شده است. این مقادیر در حدود شرایط سیستم آب خنک کن رآکتورهای اتمی می‌باشد. مطابق شکل ۱۹ هر چه دمای آب بیشتر بوده و به شرایط اشباع نزدیک‌تر باشد پالس فشار درون فیلم بخار شدیدتر خواهد شد. به طوری که در  $\Delta T_{\text{sub}} = 5^\circ \text{C}$ ، پالس فشار ایجاد شده در یک لحظه زمانی کوچک حدود  $6 \text{ MPa}$  از فشار اولیه مخزن ( $14/82 \text{ MPa}$ ) بالاتر است و می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیری ایجاد نماید.



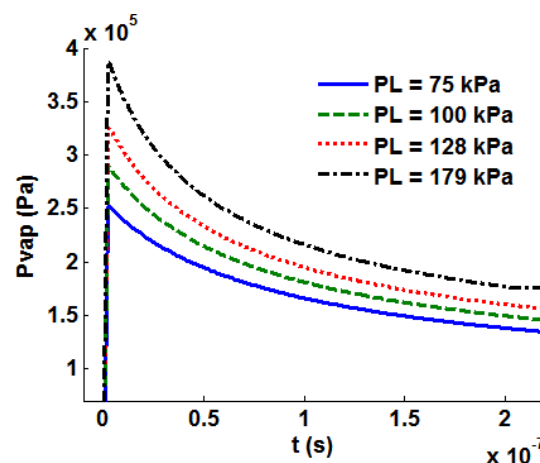
شکل ۱۹- تغییرات فشار درون فیلم بخار نسبت به زمان در فشارهای بسیار بالا

#### ۵- نتیجه‌گیری

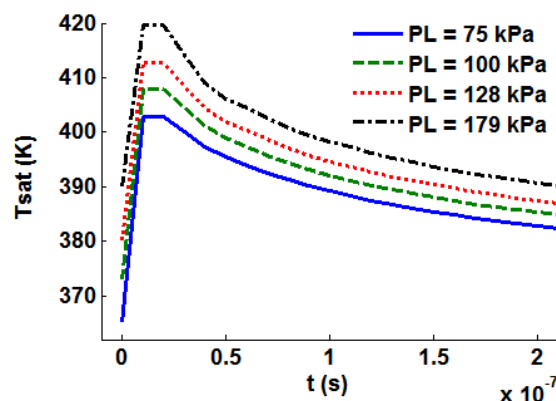
در این مقاله تاثیر فشارهای مختلف بر رشد فیلم بخار تشکیل شده روی سطح کروی یک ذره داغ از جنس مس در تماس با آب بررسی گردید. پارامترهایی نظیر فشار مخزن نگهدارنده آب، دمای آب و اختلاف دمای آب با دمای اشباع نظیر و اثرات آن‌ها بر تغییرات شعاع فیلم بخار، دمای مرز اشباع و تغییرات فشار درون فیلم بخار، مورد تحقیق قرار گرفت.



شکل ۱۶- تغییرات شعاع فیلم بخار نسبت به زمان در فشارهای مختلف مخزن و  $\Delta T_{\text{sub}} = 5^\circ \text{C}$



شکل ۱۷- تغییرات فشار درون فیلم بخار نسبت به زمان در فشارهای مختلف مخزن و  $\Delta T_{\text{sub}} = 5^\circ \text{C}$



شکل ۱۸- تغییرات دمای سطح بین فازی نسبت به زمان در فشارهای مختلف مخزن و  $\Delta T_{\text{sub}} = 5^\circ \text{C}$

می‌شود که می‌تواند در مواردی تا حدود ۳ برابر فشار اولیه افزایش یابد و خطر رخداد پدیده انفجار بخار را افزایش دهد.

- در شرایطی که  $\Delta T_{sub}$  در تمام حالات تغییر فشار ثابت در نظر گرفته شود، هر چه فشار داخل مخزن بیشتر باشد امکان رشد فیلم بخار را محدود خواهد کرد و رشد فیلم کاهش می‌یابد. ولی از طرف دیگر در فشارهای بالاتر، شدت پالس فشار ایجاد شده، افزایش می‌یابد. بنابراین در این شرایط هر چه فشار درون مخزن بیشتر باشد و دمای اشباع متناظر نیز بزرگتر باشد، پالس فشار شدیدتری ایجاد شده و احتمال رخداد پدیده انفجار بخار را افزایش می‌دهد.

- در مخازن با فشارهای بسیار بالا نیز نتایج مشابهی به دست آمده است به طوری که هر چه فشار بالاتر بوده و دما به حالت اشباع نظیر نزدیک‌تر باشد؛ شرایط برای رخداد انفجار بخار آماده‌تر است و پالس‌های فشار درون فیلم بخار به شدت افزایش می‌یابد.

با توجه به نمودارها و نتایج به دست آمده از حل عددی مسئله در فشارهای مختلف نتایج کلی زیر به دست آمده است:

- براساس نمودارها مشاهده می‌گردد که در دمای ثابت آب درون مخزن هر چه فشار مخزن کمتر باشد، امکان رشد شعاع فیلم بخار بیشتر می‌گردد و پالس فشار بخار درون فیلم نیز شدیدتر می‌شود. در مواردی که دمای ثابت آب بزرگ‌تر باشد؛ این پالس فشار می‌تواند حتی تا ۳/۵ برابر بزرگ‌تر از فشار اولیه شود. در چنین شرایطی احتمال بروز پدیده انفجار بخار، بسیار بالا خواهد رفت مخصوصاً اگر به طور هم‌زمان چند تماس بین چند کره داغ مسی و آب بوجود آمده باشد و پالس‌های فشار یکدیگر را تقویت نموده و یک انفجار فشاری شدید ایجاد نمایند (مطابق تعریف پدیده انفجار بخار).

- افزایش دمای آب درون مخزن در یک فشار ثابت نیز منجر به افزایش رشد فیلم بخار و شدت پالس فشار درون فیلم می‌گردد. بطوریکه هر چه دمای آب به شرایط اشباع در همان فشار نزدیک تر باشد، پالس فشار قوی‌تری ایجاد

## مراجع

- [1] Berthoud, G. (2000). "Vapor Explosions". *Annu.Rev. Fluid Mech.* pp. 573-586.
- [2] Naoyuki F. (1994). "Mechanism of steam explosion of magma approach from comparative planetary volcanology of eruption". Japan Aerospace Exploration Agency Institute of Space and Astronautical Science.
- [3] Ametitov, I.V., Klimenko, V.V. (1995). "Boiling of Cryogenic Fluids(in Russian)". Moscow, pp. 400.
- [4] Cronenberg, A.W., Benz, R. (1978). "Vapor Explosion Phenomenon with Respect to Nuclear safety Assessment". US Nuclear Regulatory Commission.
- [5] Ragheb, M. (2010). "Chernobyl accident". The history of Chernobyl nuclear power generation accident, Ukraine.
- [6] Nelson, L.S., Duda, P.M. (1982). "Steam explosion experiments with single drops of iron oxide melted with CO<sub>2</sub>-laser". *High temperature-high pressure*, Vol.14, pp.259-281.
- [7] Cao, X., Hajima, R., Furuta, K., Kondo, S. (2000). "A Numerical analysis of Molten Drop and Coolant Intaction". *Journal of Nuclear Science and Technology*. vol. 37, No. 12, pp. 1049-1055.
- [8] Corradini, M. (1997). "Vapor explosions: a review of experiments for accident analysis". *Nucl. Safety*, vol. 32, pp. 337-362.
- [9] Abe, J., Narai, H. (2002). "Microscopic Film Collapse Behavior at Trigger for Vapor Explosion". *12th Int. Heat Transfer Conf. Grenoble*, vol. 3, p. 551.
- [10] Abe, J., Narai, H., Hamada, Y. (2002). "A Trigger Mechanism of Vapor Explosion". *Journal of Nuclear Science and Technology*. vol. 39, No. 8, pp. 845-853.

- [11] Gubaidullin, A.A., Sannikov, I.N. (2005). "Dynamics and heat and mass exchange of a vapor bubble containing a hot particle". High Temperature. vol. 43, No. 6, pp. 922-929.
- [12] Khabeev, N.S., Ganiev, O.R. (2007). "Dynamics of a vapor shell around a heated particle in a liquid". Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. vol. 48, No. 4, pp. 525-533.
- [13] Collier, J.G., Thome, J.R. (1996). "Convective boiling and condensation". New York: Oxford University Press.
- [14] Plesset M.S. (1949). "The dynamics of cavitation bubbles". J. Appl. Mech. Vol. 16.
- [15] Plesset, M.S., Zwick, S.A. (1954). "The growth of vapour bubble in superheated liquid". J. Appl. Phys. Vol. 25.
- [16] Rayleigh, L. (1917). "On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity". Philos. Mag. Vol. 34, pp. 94-98.
- [17] Muratova, T.M., Labuntsov, D.A. (1969). "Kinetic analysis of evaporation and condensation(in Russian)". High temperature, Vol.7, No.5, pp.959-967.
- [18] Yastrebov, A.K., Kryukov, A.P. (2002). "Solution of boltzman equation for heat transfer problems in vapor film(in Russian)". Proceeding at third national Russian conference on heat transfer, Moscow, MPEI publication, Vol.8, pp.148-151.
- [19] Borgnakke, C., Sonntag, R.E. (2009). "Fundamentals of Thermodynamics". 7th edition, John Wiley & Sons, Inc. University of Michigan, 2009.
- [20] Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukorrel, A.S. (1981). "Heat transfer(in Russian)". Moscow, Energo atomized publication, pp. 416.
- [21] Jaluria, Y., Torrance, K.E. (2003). "Computational Heat Transfer". New York: Taylor & Francis.
- [22] Fritz, W. (1963), In VDI-Wärmeatlas, Düsseldorf Hb2.
- [28] Wagner, W., Prub, A. (2002). "The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use". J. Phys. Chem. Ref. Data 31.
- [29] Rebas, O., Zait, H., Skander, N., Chitour, E.C. (2011). "Prediction of the enthalpy of vaporization according to the temperature far from the critical point by the group contribution method with interactions of pure hydrocarbons, simple mixtures and oil fractions". Journal of Petroleum and Gas Engineering 2 132-145.
- [30] Bejan A., Kraus A. D. (2003). "Heat Transfer Hand Book". New York, John Wiley & Sons.