

## بررسی دینامیک لایه بخار بر روی کره های داغ شناور در آب

مجتبی بیگری\*

گروه مهندسی مکانیک - پردیس فنی - دانشگاه سمنان

**Mbiglari87@gmail.com**

(دریافت مقاله: خرداد ۱۳۸۷، پذیرش مقاله: اسفند ۱۳۸۷)

### چکیده

در تحقیق حاضر مکانیزم رشد و محوشدن لایه های بخار تشکیل شده بر روی کره های داغ ضمن اندرکنش آن ها با آب که در موارد زیادی در صنایع مشاهده می شود مورد بررسی قرار گرفته است. مدل سازی ریاضی مسئله با استفاده از مکانیک محیط های پیوسته ضمن در نظر گرفتن اثرات غیر تعادلی بر روی سطح بین فازی مایع - بخار انجام شده است. تغییرات ضخامت لایه بخار، دمای سطح بین فازی مایع-بخار و همچنین فشار درون لایه بخار بر حسب زمان تعیین شده اند و در نهایت نتایج حاصل از حل عددی مدل پیشنهادی با داده های آزمایشی مقایسه شده و تطابق نتایج حاصل از حل عددی و داده های آزمایشی نشان از دقت مدل پیشنهادی است.

**واژگان کلیدی:** لایه بخار، جوشش لایه‌ی، سطح بین فازی مایع- بخار، انتقال حرارت

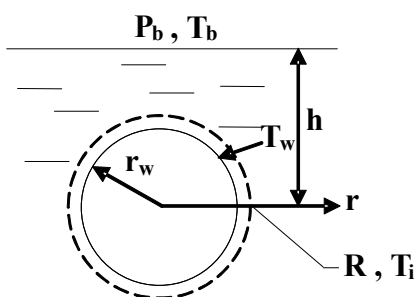
## مقدمه

قرار نگرفته است و ارائه مدل مناسب برای بررسی این پدیده ضروری به نظر می رسد.

## ۱- فرمولاسیون مسئله

فرض می کنیم لایه نازکی از بخار در آغاز فرایند بر روی سطح کره داغ وجود دارد (چگونگی تشکیل این لایه بخار در این جا بررسی نمی شود) همچنین فرض می کنیم جرم بخار درون لایه ثابت است و در طی فرایند تبخیری انجام نمی شود. اگر شار حرارتی بر روی سطح کره بزرگ تر از انتقال حرارت بحرانی جوشش باشد، رشد لایه بخار ادامه می یابد در غیر این صورت بخار به مایع تبدیل می شود و با سطح کره در تماس قرار می گیرد. هر دو فاز مایع و بخار رسانای حرارت و لزج<sup>۱</sup> فرض می شوند و نیز کره در مایع ساکن در نظر گرفته می شود. علاوه بر آن فرض می شود دمای اولیه کره و مایع، قطر کره، فشار و دمای بخار بر روی سطح آزاد مایع و همچنین عمق قرارگیری مرکز کره مشخص هستند. سرانجام فرض می شود مایع تراکم ناپذیر بوده و لایه بخار تشکیل شده بر روی کره در سراسر فرایند شکل کروی دارد.

در حالت کلی به منظور ارزیابی رشد لایه بخار بر حسب زمان لازم است معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی برای مایع حل شود.



شکل ۱ - شمای مسئله مورد بررسی

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

تشکیل حباب یا لایه بخار بر روی سطوح اجسام داغ غوطه ور در مایعات در موارد زیادی مشاهده می شود و حتی در برخی موارد، مورد استفاده مفید واقع می شود به عنوان مثال تشکیل و محوشدن حباب های بخار در اثر تماس اجسام داغ با مایعات در خرد کردن سنگ های کلیه به روش اکوستیک، تمیزکاری مافوق صوت، جراحی لیزری و در چاپگرهای الکترونیکی مورد استفاده قرار می گیرد.

از سوی دیگر در بعضی موارد این پدیده بر عملکرد سیستم اثر منفی می گذارد به عنوان مثال ضمن خنک سازی مغناطیس های ابررسانا توسط هلیوم مایع فوق بحرانی تشکیل لایه بخار بر روی سطح مغناطیس سبب کاهش شدت انتقال حرارت می شود. همچنین در فناوری هسته ای، در فرایند ذوب فلزات، در تولید کاغذ و فرایند مایع سازی گاز طبیعی تشکیل لایه بخار روی سطوح داغ ممکن است به پدیده انفجار بخار منتهی شود و عواقب جبران ناپذیری به بار آورد که از این میان می توان به نابودی نیروگاه اتمی چرنوبیل در اوکراین در سال ۱۹۸۶ میلادی اشاره کرد. انفجار بخار در اثر انتقال حرارت سریع و شدید ناشی از تماس بین یک مایع داغ (مانند فلز مذاب) با یک مایع سرد با فراریت بیشتر (مانند آب) رخ می دهد. در فرایند انفجار بخار، انتقال حرارت آن قدر سریع و شدید رخ می دهد که فشار بزرگ ایجاد شده در لایه بخار تشکیل شده بر روی سطح فلز مذاب، سبب ایجاد موج های ضربه ای سنگین شده که می تواند باعث انهدام محفظه ای که فعل وانفعالات در آن رخ می دهد شود.

در این شرایط فرایندهای ترابری در سطح بین فازی مایع- بخار ممکن است در شرایط غیر تعادلی انجام شوند همچنین تغییر دمای مایع در مجاورت مرز جدایی فاز امکان پذیر است.

تا به حال فرایند تکامل لایه بخار بر روی سطح اجسام داغ شناور در مایعات نسبتاً سردتر با در نظر گرفتن اثرات غیر تعادلی و تغییرات دمای سطح بین فازی مایع - بخار به طور جامع و گسترده مورد بررسی

حرکت ذره مایع واقع بر روی آن می باشد. با انتگرال گیری از معادله ۴ و قرار دادن نتیجه در معادله ۵ خواهیم داشت :

$$\frac{1}{R^2} (\dot{R}R^2 + 2R\dot{R}^2) - 2\frac{\dot{R}^2 R^4}{r^5} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (۸)$$

از دو طرف معادله (۷) در بازه  $R$  تا  $\infty$  انتگرال گیری می کنیم. برای محاسبه انتگرال

$$\int_R^\infty -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$$

لازم است اثر معادله هیدرواستاتیک در مایع و لزجت و کشش سطحی مایع در سطح بین فازی را منظور کرد. بر طبق معادله هیدرواستاتیک :

$$p_\infty = p_b + \rho gh$$

که در آن  $p_\infty$  فشار در نقطه دلخواه داخل سیال در عمق  $h$  است، همچنین برای سطح بین فازی مایع-بخار می توان نوشت [۱]

$$p'' - p' = 4\mu \frac{\dot{R}}{R} + \frac{2\sigma}{R} \quad (۸)$$

که در این جا (۵) و (۶) به ترتیب فزماهی و بخار را مشخص می کند. همچنین  $\mu$  لزجت دینامیکی مایع و  $\sigma$  کشش سطحی آن است. در نهایت پس از انتگرال گیری از معادله (۷) به دست می آید

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + 4v\frac{\dot{R}}{R} = -\frac{1}{\rho} \left[ p_b + \rho gh - p'' + \frac{2\sigma}{R} \right] \quad (۹)$$

$$R(0) = R_0 = r_w + \delta_0 ; \quad \dot{R}(0) = 0$$

(بدون در نظر گرفتن کشش سطحی و لزجت سینماتیکی (۷) در معادله ۹ معادله معروف ریلی [۱] و [۲] به دست می آید).

در معادله ۹ شعاع لحظه ای لایه بخار،  $\dot{R}$  سرعت حرکت سطح بین فازی و  $\ddot{R}$  شتاب حرکت سطح بین فازی،  $\rho$  جرم مخصوص مایع،  $p_b$  فشار بر روی سطح آزاد مایع،  $h$  عمق مرکز کره،  $\sigma$  کشش سطحی و  $v$  لزجت سینماتیکی مایع می باشد.

در به دست آوردن معادله ریلی فرض می شود که فشار درون لایه بخار، یکنواخت است. لین و همکاران [۳] نشان داده اند که غیر یکنواختی فشار درون لایه بخار

$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{u} + \bar{F} \quad (۲)$$

$$\rho \frac{DH}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T_l) + \tilde{q} + \mu \phi \quad (۳)$$

در اینجا عملگر  $\frac{D}{Dt}$  مشتق کلی را مشخص می کند.

$\rho$  جرم حجمی مایع ( $kg/m^3$ )،  $t$  زمان (ثانیه)،  $\bar{u}$  بردار سرعت ( $m/s$ )،  $T_l$  دمای مایع ( $K$ )،  $p$  فشار ( $Pa$ )،  $\bar{F}$  بردار نیروهای کالبدی،  $k$  ضریب هدایت حرارتی سیال ( $\frac{W}{m \cdot K}$ )،  $H$  آنتالپی سیال ( $J$ )،  $\tilde{q}$  شدت تولید انرژی درونی (در این جا برابر صفر است)،  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال ( $Pa \cdot s$ ) و  $\phi$  تابع اتلاف انرژی لزجتی (در اینجا برابر صفر فرض شده است). برای سیال تراکم ناپذیر معادله ۳ را می توان به صورت زیر ساده کرد.

$$\rho c \frac{DT_l}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T_l)$$

که در آن  $c$  ظرفیت حرارتی ویژه سیال ( $\frac{J}{kg \cdot K}$ ) است.

با توجه به هندسه مسئله استفاده از مختصات کروی مناسب است. همچنین به دلیل تقارن در مسئله با دقت کافی می توان فرض کرد که تغییرات پارامترهای مختلف فقط در امتداد شعاع (به صورت شعاعی) رخ می دهد لذا معادلات ۱ تا ۳ را باز هم می توان ساده تر کرد. معادله بقای جرم:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 u) = 0 \quad (۴)$$

معادله بقای اندازه حرکت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (۵)$$

معادله بقای انرژی:

$$\frac{\partial^2 T_l}{\partial r^2} + \left( \frac{2}{r} - \frac{u}{\alpha} \right) \frac{\partial T_l}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_l}{\partial t} \quad (۶)$$

$$\alpha = k / \rho c$$

## ۲- بررسی حرکت سطح بین فازی مایع-بخار

با فرض غیرقابل نفوذ بودن سطح بین فازی مایع-بخار، سرعت حرکت آن برابر سرعت شعاعی

دمای سطح بین فازی به مراتب کمتر از خود بخار است. هر گاه ابعاد جسم داغ در مقایسه با حجم مایع کوچک باشد تغییرات دمای ایجاد شده در مایع در مجموع قابل ملاحظه نمی باشد. بنابراین از یک سو با دقت کافی می توان از تغییرات خواص فیزیکی مایع با دما صرف نظر کرد و از سوی دیگر با توجه به معادله ۱۰ نظر به اهمیت دمای سطح بین فازی در بررسی حرکت آن، منظور نمودن اثر این تغییر دما در مسئله ضروری است.

#### ۵- انتقال حرارت از میان لایه بخار

در حالت کلی انتقال حرارت از جسم داغ از طریق لایه بخار به روش هدایت و جابجایی می تواند انجام شود. در عمل متداول است که به جای محاسبه فرایند پیچیده انتقال حرارت از طریق سطوح آن را به صورت معادل هدایتی بررسی کنیم [۶]. ایساچنکو و همکارانش نشان داده اند که برای پوسته های مسطح عمودی، افقی، حلقوی و کروی که از گاز یا مایع پر شده اند هرگاه  $|GrPr| < 10^3$  آن گاه انتقال حرارت از جسم داغ به خنک از میان پوسته صرفاً به طریق هدایت انجام می شود.

در عبارت فوق  $Gr$  عدد گراشف و  $Pr$  عدد پرانتل است. (عدد گراشف و پرانتل در این جا در دمای متوسط سطوح داغ و خنک محاسبه می شود). در پژوهش آمیتیتوف و همکاران [۷] تاکید شده است که ضمن جوشش لایه ای روی کره های با قطر کوچک هرگاه نیروهای اصطکاک لزجی به طرز قابل ملاحظه ای بر نیروهای اینرسی غلبه نمایند، انتقال حرارت از میان لایه بخار تنها به طریق هدایت انجام می شود. با توجه به موارد ذکر شده، در پژوهش حاضر در لایه بخار فقط هدایت حرارتی در نظر گرفته شده است.

به منظور تعیین  $q_i$  روی سطح بین فازی لازم است دانسیته شار حرارتی روی سطح کره تعیین شود. اگر این دانسیته با  $q_w$  مشخص شود با توجه به ناچیز بودن جرم بخار موجود در لایه با دقت کافی می توان فرض کرد که تمام شار حرارتی از سطح کره به سطح بین

تأثیری بر دقت معادله ریلی حتی در سرعت های بالای سطح بین فازی نمی گذارد.

#### ۳- اثرات غیر تعادلی روی سطح بین فازی مایع - بخار

اندرکنش مایعات نسبتاً سرد با اجسام داغ غوطه در آن ها به تشکیل لایه بخار بر روی اجسام داغ می انجامد. برای تحلیل فرایندهایی که در لایه بخار رخ می دهد استفاده از نظریه جنبش مولکولی که معادله اساسی آن معادله جنبشی بولتزمن است ضروری می باشد. موراتوا و همکاران [۴] با استفاده از نظریه جنبش مولکولی نشان داده اند که در صورت انجام انتقال حرارت و جرم از طریق سطح بین فازی مایع - بخار فشار درون لایه بخار متفاوت با فشار اشباع متناظر با دمای سطح بین فازی است. همچنین پاستربوف و همکاران [۵] با حل مستقیم معادله بولتزمن فرایندهای نرخ انتقال حرارت ناپایدار در لایه بخار را بررسی کرده اند و نشان داده اند که حالت پایدار در لایه بخار در زمان بسیار کوتاهی ایجاد می شود که متناظر با اندازه زمان طی مسیر آزاد متوسط توسط مولکول ها است و نتیجه گرفته اند در حالت پایدار جریان جرم از میان سطح بین فازی برابر صفر است و برای تعیین فشار بخار درون لایه از رابطه زیر می توان استفاده کرد.

$$p'' = p_s(T_i) + \frac{0.44q_i}{\sqrt{2R_\mu T_i}} \quad (10)$$

که در آن  $q_i$  شار حرارتی در سطح بین فازی،  $T_i$  دمای سطح بین فازی،  $p_s(T_i)$  فشار اشباع در دمای  $T_i$ ،  $p''$  فشار درون لایه بخار در مجاورت سطح بین فازی و  $R_\mu$  ثابت ویژه گاز برای بخار آب می باشد.

#### ۴- اثر تغییرات دمای سطح بین فازی مایع - بخار

در اثر انتقال گرما از جسم داغ به آب، بخار موجود در لایه به شدت گرم می شود و دمای سطح بین فازی مایع - بخار افزایش می یابد. با این حال به دلیل ظرفیت گرمایی ویژه نسبتاً زیاد مایع در مقایسه با بخار، افزایش

که در آن  $k_s$  ضریب هدایت حرارتی کره است. اگرچه حل معادله دیفرانسیل ۱۴ امکان پذیر است لیکن در مواردی که کره از جنس ماده ای با ضریب هدایت حرارتی بالا (مانند فلزات) باشد با دقت کافی ضمن فرایند خنک شدن می توان دما در نقاط مختلف را یکسان و برابر با دمای سطح کره ( $T_w$ ) فرض کرد. بنابراین فرایند خنک شدن کره به شکل زیر ساده می شود.

$$\frac{dT_w}{dt} = -\frac{3q_w}{\rho_w r_w c_w} \quad (15)$$

$\rho_w$  جرم مخصوص کره و  $c_w$  ظرفیت گرمایی ویژه کره است. با قرار دادن مقدار  $q_w$  از معادله ۱۲ در معادله ۱۵ معادله فوق به صورت زیر در می آید:

$$\frac{dT_w}{dt} = -\frac{3k''[T_w(t) - T_i(t)]R(t)}{\rho_w r_w^2 c_w [R(t) - r_w]} \quad (16)$$

#### ۶- نرخ انتقال حرارت در مایع

نرخ انتقال حرارت در مایع، با معادله ۶ بیان می شود که در آن سرعت ذره مایع آمده است. در اولین قدم به منظور سادگی حل مسئله از سرعت ذره مایع صرف نظر می کنیم و معادله ۶ به صورت ذیل ساده می شود.

$$\frac{\partial^2 T_l}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_l}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_l} \frac{\partial T_l}{\partial t} \quad (17)$$

شرایط اولیه و مرزی به صورت زیر می باشند:

$$r \rightarrow \infty \Rightarrow T_l(r, t) = T_{i0}$$

$$T_l(r, 0) = T_{i0}$$

$$-k_l \left. \frac{\partial T_l(r, t)}{\partial r} \right|_{r=R} = q_i = k'' \frac{T_w(t) - T_i(t)}{R(t) - r_w} \frac{r_w}{R(t)}$$

#### ۷- سیستم معادلات توصیف کننده مسئله و حل آن

برای تحلیل حرکت سطح بین فاز مایع- بخار و خنک شدن کره ضروری است سیستم معادلات ۹، ۱۰ و ۱۷ را به طور هم زمان حل کرد. از آن جایی که سیستم معادلات فوق شامل یک معادله دیفرانسیل معمولی غیر خطی مرتبه دوم و یک معادله دیفرانسیل جزئی سهموی

فازی منتقل می شود. با توجه به هندسه سیستم می توان نوشت:

$$q_i = q_w \left( \frac{r_w}{R(t)} \right)^2 \quad (11)$$

به دلیل تقارن کروی انتقال حرارت از میان لایه بخار را یک بعدی و فقط در امتداد شعاع فرض می کنیم. با توجه به مدل سیستم، دانسیته شار حرارتی روی سطح کره به صورت زیر به دست می آید:

$$q_w = k'' \frac{T_w(t) - T_i(t)}{R(t) - r_w} \frac{R(t)}{r_w} \quad (12)$$

و شار حرارتی روی سطح بین فاز برابر خواهد بود با:

$$q_i = k'' \frac{T_w(t) - T_i(t)}{R(t) - r_w} \frac{r_w}{R(t)} \quad (13)$$

دمای بخار در امتداد لایه متغیر است و این امر به شدت روی ضریب هدایت حرارتی بخار تاثیر می گذارد. با این حال در اولین تقریب فرض می کنیم که  $k''$  ثابت است و مقدار آن در دمای میانگین

$$T_{av} = \frac{T_w(0) + T_i(0)}{2}$$

را منظور می کنیم. در اینجا  $T_{av}$  دمای متوسط بخار در لایه،  $T_w(0)$  دمای اولیه سطح کره و  $T_i(0)$  دمای مایع است.

ضمن بررسی تکامل لایه بخار روی سطح کره باید خنک شدن کره در اثر انتقال حرارت به مایع را نیز در محاسبات منظور کرد. برای حل چنین مسئله ای باید از معادله هدایت حرارتی گذرا در مختصات کروی با شرایط اولیه و مرزی مربوطه استفاده کرد. در مسئله مورد نظر این معادله به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \left[ \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right] \quad (14)$$

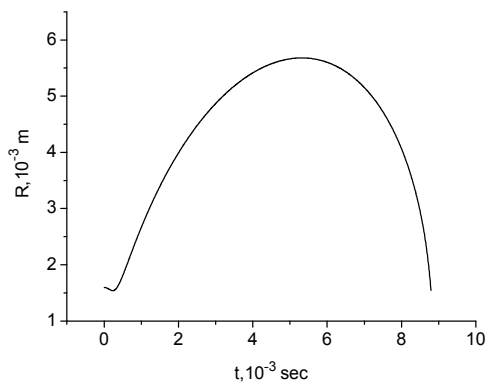
در این جا  $T_s$  دمای نقطه دلخواه درون کره در شعاع  $r$  و در لحظه  $t$  می باشد. شرایط اولیه و مرزی به صورت زیر می باشند:

$$\left. \frac{\partial T_s(r, t)}{\partial r} \right|_{r=r_w} + \frac{q_w}{k_s} = 0$$

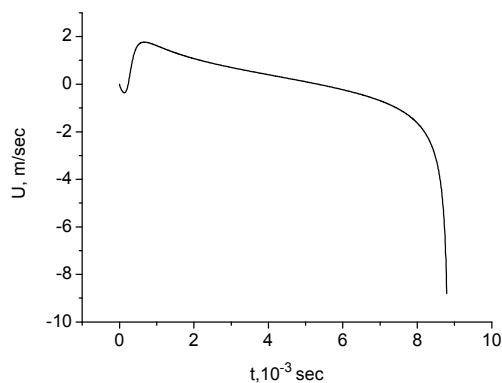
$$\frac{\partial T_s(0, t)}{\partial r} = 0$$

$$T_s(r, 0) = T_w(0)$$

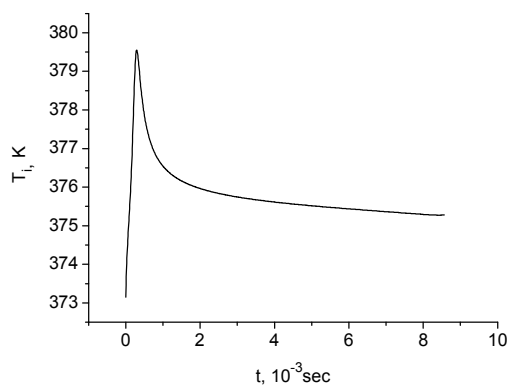
دیده می شود که دمای سطح بین فازی در آغاز فرآیند به دلیل شار حرارتی زیاد عبوری از لایه به طور ناگهانی افزایش یافته، سپس به دلیل رشد لایه بخار و کاهش شار حرارتی مربوطه در سطح بین فازی به تدریج کاهش می یابد.



شکل ۲- تغییرات شعاع لایه بخار با زمان



شکل ۳- تغییرات سرعت سطح بین فازی بر حسب زمان



شکل ۴- تغییرات دمای سطح بین فازی مایع- بخار بر حسب زمان

است حل آن به روش تحلیلی بسیار دشوار است. حل چنین سیستم معادله ای حتی به کمک روش های عددی نیز بسیار مشکل است. ضمن انجام چنین حلی آنالیز خطا نیز بسیار اهمیت دارد. در این جا برای حل هم زمان سیستم معادلات فوق یک برنامه رایانه ای به زبان فرترن ۹۰ نوشته شده است که به طور هم زمان حرکت سطح بین فازی مایع- بخار و انتقال حرارت در کره و مایع را محاسبه می کند. حل معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه دوم غیر خطی بر اساس تبدیل این معادله به دستگاه معادلات خطی مرتبه اول و با استفاده از روش رانگ- کوتا مرتبه چهارم، و حل معادله دیفرانسیل جزئی سهموی با استفاده از نرم افزار معروف NAG انجام شده است. اندازه گام زمانی و مکانی به گونه ای انتخاب شده است که با کوچکتر شدن آن در محدوده زمانی و مکانی تغییری در نتایج حاصل نمی شود که این امر نیز تضمین کننده دقت نتایج است.

#### ۸- نتایج حل عددی سیستم معادلات و بحث

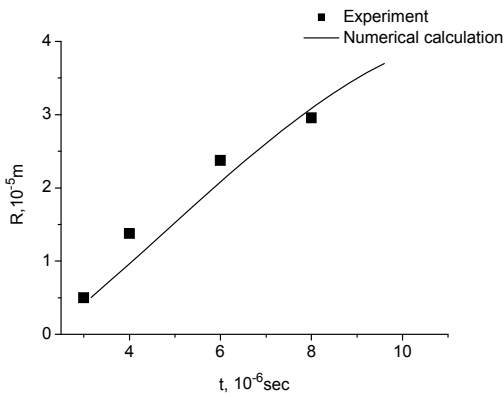
نتایج حل عددی برای کره ای به قطر سه میلیمتر با ضخامت اولیه لایه بخار برابر یک دهم میلیمتر با دمای اولیه  $500^{\circ}C$  درجه سانتیگراد به دست آمده است. دمای اولیه سطح بین فازی مایع- بخار برابر دمای اشباع آب در فشار سطح آزاد مایع (یک اتمسفر) در نظر گرفته شده است. با توجه به این که زمان تشکیل و نابودی لایه بخار بر روی جسم داغ غوطه ور در آب ناچیز است دمای جسم داغ در زمان مربوطه را می توان ثابت فرض کرد (حل عددی نیز چنین چیزی را نشان می دهد).

در شکل ۲ مشاهده می شود لایه بخار ابتدا تا حدی منقبض شده سپس به طور ناگهانی انبساط می یابد تا به یک شعاع ماکزیمم رسیده، پس از آن مجدداً به سرعت منقبض شده بخار موجود در آن مایع می گردد. از شکل ۳ دیده می شود که سرعت سطح بین فازی مایع- بخار به دلیل انقباض اولیه بخار ابتدا منفی بوده سپس تا مقدار بیشینه ای با توجه به شرایط مسئله افزایش می یابد و سپس کاهش یافته به طوریکه در زمان میعان

لایه بخار حدود  $8 \frac{m}{s}$  می باشد. همچنین از شکل ۴

## ۹- مقایسه نتایج با داده های آزمایشی

نتایج حاصل از حل عددی و داده های آزمایشی در شکل ۶ ارائه شده اند.



شکل ۶ - مقایسه نتایج حل عددی با داده های آزمایشی

## ۱۰- نتیجه گیری

در این مقاله فرآیند رشد لایه بخار بر روی اجسام داغ کروی شکل غوطه ور در آب با استفاده از مکانیک محیط های پیوسته و نظریه جنبش مولکولی با به کارگیری فرضیات ساده کننده مورد بررسی قرار گرفته و سیستم معادلات به دست آمده به روش عددی حل شده است. از حل عددی سیستم معادلات مشخص گردیده است که فیلم بخار موجود بر سطح جسم داغ ابتدا به طور ناچیز منقبض شده سپس انبساط یافته به یک شعاع بیشینه می رسد و پس از آن به سرعت متلاشی می شود. دمای سطح بین فازی مایع-بخار و همچنین فشار بخار درون لایه بخار به طور ناگهانی افزایش یافته سپس به آهستگی کاهش می یابد. نتایج به دست آمده از حل عددی با داده های آزمایشی در حد قابل قبول هم خوانی دارند که نشان می دهد فرضیات به کار رفته از دقت کافی در اولین تقریب برخوردارند. بنابراین مدل پیشنهادی را می توان به عنوان اولین تقریب برای بررسی دینامیک لایه بخار بر روی اجسام داغ غوطه ور در مایعات نسبتاً سردتر و همچنین بررسی پدیده انفجار بخار به کار برد.

برای بررسی دقت مدل پیشنهاد شده نتایج حاصل با داده های آزمایشی به دست آمده توسط گولد و همکاران [۸] مقایسه شده است. در مقاله مذکور فرآیند تشکیل بخار انفجاری روی سیم نازک پلاتین در اثر اعمال پالس الکتریکی در مدت زمان بسیار کوتاه به آن بررسی شده است. در مورد پدیده انفجار بخار و تشکیل نابودی لایه بخار بر روی فلزات مذاب غوطه ور در آب مطالعه جامعی توسط نلسون و همکاران [۹] انجام شده است. منتهی هدف در تحقیق حاضر استفاده از منابع جدیدتر می باشد. به منظور انجام مقایسه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با داده های آزمایشی لازم است سیستم معادلات بیان کننده رشد لایه بخار را در مختصات استوانه ای نوشته و سپس نتایج حاصل از حل سیستم معادلات مذکور در مدت زمان مشابه را با داده های آزمایشی مقایسه کنیم. به منظور اختصار از درج معادلات سیستم استوانه ای در این جا خودداری کرده و صرفاً نتایج را ارائه می کنیم.

برای انجام مدل سازی مربوطه کل فرآیند انجام شده روی المنت الکتریکی را به سه مرحله تقسیم می کنیم. در مرحله اول که آغاز فرآیند است المنت الکتریکی با مایع در تماس است و دمای مایع در سراسر آن یکسان است. حال در اثر اعمال پالس الکتریکی، المنت داغ شده و گرما از طریق هدایت به آب منتقل می شود و تا رسیدن دمای آب در مجاورت المنت به نقطه جوش ادامه دارد. در مرحله دوم پس از رسیدن دمای آب به نقطه جوش، لایه بخار بر روی سطح المنت تشکیل می شود و در اثر تداوم شار حرارتی ثابت از سطح المنت لایه بخار شروع به رشد می کند. در این حال بر اثر افزایش ضخامت لایه بخار، شار حرارتی اعمال شده به سطح بین فازی به تدریج کاهش یافته که سبب کاهش دمای سطح بین فازی می شود. مرحله سوم پس از قطع پالس الکتریکی آغاز می شود و در این حال شار حرارتی در لایه بخار در اثر اختلاف دمای بین سطح المنت و سطح بین فازی مایع-بخار تامین می گردد.

11-مراجع

- [1] Labuntsov D.A., Yagov V.V., Mechanics of two phase systems(in Russian), Moscow,2000, 374p.
- [2] Rayleigh O.M., On the pressure developed in liquid during the collapse of spherical cavity, Phy. Mag., Vol.34, No.200 ,pp.94-98, 1917.
- [3] Lin H., Storey B.D., Szeri A.J., Inertially driven inhomogeneities in violently collapsing bubbles: the validity of the Rayleigh-Plesset equation, Journal of Fluid Mechanics, Vol.452, pp.145-162, 2002.
- [4] Muratova T.M., Labuntsov D.A., Teplofyzika visokikh temperature (in Russian),1969,Vol.7,No.5, pp.959-967.
- [5] Yastrebov A.K., Kryukov A.P., Proceedings of Third Russian National conference on Heat Transfer (in Russian), Moscow, 2002, Vol.8, pp.148-151.
- [6] Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S., Heat Transfer (in Russian), Moscow, 1981, 416p.
- [7] Ametitov I.V., Klimenko V.V., Boiling of cryogenic fluids (in Russian), Moscow, 1995, 400p.
- [8] Gold S., Poulidakos D., Zhao Z., Yadigaroglu G., An investigation of microscale explosive vaporization of water on an ultrathin Pt wire, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.45, pp.367-379, 2002.
- [9] Nelson L.S., Duda P.M., Steam Explosion Experiments with single Drops of Iron Oxide Melted with CO<sub>2</sub>-laser, High temperature– High Pressure, 1982,Vol.14, pp.259-281.