

شبیه‌سازی عددی جوشش هسته‌ای روی سطح داغ با استفاده از روش سطح تراز

سید پدram پورنادری
استادیار، دانشگاه یاسوج
sp.pournaderi@yu.ac.ir

سیما شمشیری
کارشناس ارشد، دانشگاه یاسوج
Shamshiri.sima@yahoo.com

چکیده

جوشش هسته‌ای به دلیل میزان انتقال گرمای بالا در کنار اختلاف دمایی کوچک، از اهمیت زیادی در فرآیندهای صنعتی برخوردار است. با وجود اهمیت جوشش هسته‌ای، مکانیزم‌های اساسی فیزیکی حاکم بر آن به خوبی قابل درک نمی‌باشند. مطالعه حاضر، به شبیه‌سازی عددی پدیده جوشش هسته‌ای روی سطح داغ به منظور مطالعه پارامترهای جوشش هسته‌ای نظیر تشکیل حباب، رشد حباب، جدا شدن حباب و بالا رفتن حباب می‌پردازد. معادلات حاکم بر این پدیده شامل معادله پیوستگی، معادلات مومنتوم و معادله انرژی در حالت تراکم ناپذیر می‌باشند. سطح مشترک مایع-بخار با استفاده از روش سطح تراز ردیابی می‌شود. برای در نظر گرفتن پرش خواص فیزیکی از تکنیک سیال مجازی استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی پدیده جوشش هسته‌ای با نتایج عددی موجود مقایسه گردید و تطابق خوبی بین نتایج مشاهده شد. بر اساس این نتایج، در ابتدا حباب به سرعت رشد می‌کند و سپس نرخ رشد آن کم می‌شود تا در نهایت جدا شود. انتقال حرارت در سطح مشترک حباب نیز با رشد حباب، زیاد می‌شود تا به مقدار حداکثر برسد سپس تا جدا شدن حباب کم می‌شود. همچنین اثر عدد ژاکوب بر قطر جدایش حباب بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل، با افزایش عدد ژاکوب قطر جدایش حباب افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: جوشش هسته‌ای، روش سطح تراز، روش سیال مجازی

۱- مقدمه

جوشش هسته‌ای^۱ فرآیندی کارآمد از انتقال گرما می‌باشد. این رژیم که مورد مطالعه بسیاری از محققان قرار گرفته است، زمانی رخ می‌دهد که در فرآیند جوشش اختلاف دمایی سطح با دمایی اشباع بین ۵ تا ۳۰ درجه باشد. به دلیل دامنه کاربرد و اهمیت زیادی که در فرآیندهای صنعتی دارد، شناخت درستی از فرآیند جوشش هسته‌ای ضروری به نظر می‌رسد. سان و همکاران [۱] جوشش هسته‌ای را به صورت عددی و تجربی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها سطح مشترک مایع-بخار را از روش سطح تراز^۲ ردیابی کردند. در شبیه‌سازی آن‌ها دامنه محاسباتی به دو منطقه میکرو و ماکرو تقسیم شد که منطقه میکرو شامل میکرو لایه^۳ و منطقه ماکرو شامل حباب بخار و مایع اطرافش بود. آن‌ها مشاهده کردند که محلی که سطح مشترک مایع-بخار به دیوار تماس دارد ابتدا به سمت بیرون و سپس به سمت درون حرکت می‌کند. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش زاویه تماس و دمایی فوق گرم دیوار، حباب بزرگتر و در زمان کمتر از سطح جدا می‌شود. موخرجی و همکاران [۲] با بررسی زاویه تماس به صورت دینامیکی، رشد حباب‌های منفرد در طول جوشش هسته‌ای را به طور عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای بدست آوردن موقعیت سطح مشترک از روش سطح تراز استفاده کردند. همچنین از تبخیر میکرو لایه صرف نظر کردند. آن‌ها مشاهده کردند که در فرآیند رشد حباب، زمانی که قطر حباب کم است از آن‌جا که نیروی کشش سطحی غالب است، زاویه تماس به زاویه پیشروی میل می‌کند. و با افزایش زاویه تماس کشش سطحی کم می‌شود و این موجب انقباض پایه حباب می‌شود. در این صورت زاویه تماس به زاویه پسروی میل می‌کند. بسان و همکاران [۳] برای بررسی تاثیر دمایی فوق گرم دیوار

¹. Nucleate boiling

². Level-set

³. Microlayer

بر روی دینامیک حباب و انتقال حرارت، جوشش هسته‌ای را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. در مطالعه‌ی آن‌ها سطح مشترک دو فاز از روش سطح تراز ردیابی شد. همچنین در مطالعه‌ی آن‌ها اثر تبخیر میکروولایه در نظر گرفته شد و زاویه تماس را به صورت استاتیکی در نظر گرفتند. آن‌ها مشاهده کردند که در سطح با دمای فوق‌گرم کم، حباب‌های بخار به صورت مجزا از سطح داغ آزاد می‌شود و ادغام حباب به طور مداوم اتفاق نمی‌افتد. و با افزایش دمای فوق‌گرم دیوار ادغام حباب به صورت مداوم هم در جهت عمودی و هم در جهت افقی اتفاق می‌افتد که منجر به تشکیل ستون بخار قارچی شکل بزرگی می‌شود. چن و همکاران [۴] برای بررسی انتقال حرارت حباب منفرد، جوشش استخری هسته‌ای را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. در مطالعه‌ی آن‌ها اثر میکروولایه در نظر گرفته شد. سطح مشترک دو فاز از روش حجم سیال ردیابی شد. بر طبق نتایج آن‌ها رشد حباب تحت تاثیر توزیع دما در مایع فوق‌گرم است به طوری که گرادیان دما در نزدیکی سطح مشترک مایع-بخار که به سطح انتقال حرارت نزدیکتر است، زیاد می‌باشد. هابر و همکاران [۵] شبیه‌سازی مستقیم عددی حباب منفرد در رژیم جوشش هسته‌ای را ارائه دادند. در مطالعه‌ی آن‌ها سطح مشترک دو فاز با استفاده از روش سطح تراز ردیابی شد. زاویه تماس به صورت استاتیکی در نظر گرفته شد. همچنین شبیه‌سازی خود را با در نظر گرفتن میکروولایه و بدون میکروولایه انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در نظر گرفتن مدل میکروولایه برای مایعاتی که سطح را به طور کامل تر می‌کند، زمانی که زاویه تماس و عدد ژاکوب زیاد است، تاثیر کمی بر رشد حباب دارد. وانگ و همکاران [۶] با استفاده از روش سطح مشترک نفوذی^۱ برای ردیابی سطح مشترک در طول جوشش هسته‌ای، برای بررسی تاثیر ترشوندگی بر دوره‌ی رشد، قطر خروج و توزیع دما در سطح دیوار را با در نظر گرفتن زاویه تماس استاتیکی متفاوت را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که در حالتی که سطح بدون ترشوندگی است، زمانی که زاویه تماس کوچک است، رشد حباب در ابتدای دوره رشد، سریع‌تر از حالتی که زاویه تماس بزرگتر است، اتفاق می‌افتد. با این حال شعاع خروج از سطح کمتر از زمانی است که زاویه تماس بزرگتر است. همچنین در صورتی که ترشوندگی زیاد باشد، شعاع خروج حباب با افزایش زاویه به صورت نمایی افزایش می‌یابد.

در مطالعه‌ی حاضر، به منظور بررسی دینامیک حباب شامل تشکیل حباب، رشد حباب، جداسدن حباب و بالا رفتن حباب و نیز انتقال حرارت در مراحل مختلف جوشش هسته‌ای، شبیه‌سازی عددی پدیده جوشش هسته‌ای روی سطح داغ انجام می‌گردد. موقعیت سطح مشترک با استفاده از روش سطح تراز بدست می‌آید. از اثر میکروولایه بر جوشش هسته‌ای صرف‌نظر می‌گردد.

۲- معادلات حاکم

معادلات اساسی شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و معادله انرژی در حالت تراکم‌ناپذیر می‌باشند. معادلات پیوستگی و مومنتوم برای جریان تراکم‌ناپذیر به ترتیب به صورت زیر می‌باشد:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \frac{\nabla p}{\rho} = \frac{(\nabla \cdot \boldsymbol{\tau})^T}{\rho} + \mathbf{g} \quad (۲)$$

تانسور تنش لزج از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \begin{pmatrix} \nabla u \\ \nabla v \\ \nabla w \end{pmatrix} + \mu \begin{pmatrix} \nabla u \\ \nabla v \\ \nabla w \end{pmatrix}^T \quad (۳)$$

معادله انرژی نیز به شکل زیر است:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \frac{\nabla \cdot (k \nabla T)}{\rho C_p} \quad (۴)$$

^۱. Diffuse interface method

در این مطالعه برای اعمال ناپیوستگی‌ها در سطح مشترک، از روش سیال مجازی استفاده می‌شود. در این روش، سلول‌های مجازی در هر طرف سطح مشترک در نظر گرفته می‌شوند، سپس با استفاده از شرایط پرش، مشتقات به نحو مناسبی در سطح مشترک محاسبه می‌گردند. با فرض اینکه ناحیه محاسباتی Ω از طریق سطح مشترک Γ به دو ناحیه Ω^+ و Ω^- تقسیم شود، پرش یک کمیت مانند A در جهت عمود بر سطح مشترک به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$[A]_{\Gamma} = A^+ - A^- \quad (5)$$

که در آن A^+ مقدار کمیت در ناحیه Ω^+ و A^- مقدار کمیت در ناحیه Ω^- است. در این صورت، شرط پرش سرعت در سطح مشترک به صورت زیر می‌باشد [۷]:

$$[\mathbf{u}]_{\Gamma} = \dot{m} \left[\frac{1}{\rho} \right]_{\Gamma} \mathbf{n} \quad (6)$$

با اعمال بقاء مومنتوم در سطح مشترک شرط پرش برای فشار به صورت زیر حاصل می‌شود [۸]:

$$[p]_{\Gamma} = \sigma k - \dot{m}^2 \left[\frac{1}{\rho} \right]_{\Gamma} + 2\mu_{\Gamma} \mathbf{n} \cdot \nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \quad (7)$$

کنگ و همکاران [۸] با استفاده از پیوستگی مومنتوم در طول سطح مشترک، شرط پرش لزجت را به صورت زیر بدست آوردند:

$$\begin{pmatrix} [\mu u_x]_{\Gamma} & [\mu u_y]_{\Gamma} \\ [\mu v_x]_{\Gamma} & [\mu v_y]_{\Gamma} \end{pmatrix} = [\mu]_{\Gamma} \begin{pmatrix} \nabla u \\ \nabla v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{t} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{t} \end{pmatrix} + [\mu]_{\Gamma} \mathbf{n}^T \mathbf{n} \begin{pmatrix} \nabla u \\ \nabla v \end{pmatrix} \mathbf{n}^T \mathbf{n} - [\mu]_{\Gamma} \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{t} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nabla u \\ \nabla v \end{pmatrix}^T \mathbf{n}^T \mathbf{n} \quad (8)$$

با اعمال معادله انرژی در سطح مشترک شرط پرش شار حرارتی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$h_{lv} \dot{m} = [k \cdot \nabla T \cdot \mathbf{n}]_{\Gamma} \quad (9)$$

۳- روش‌های عددی

گسسته‌سازی معادلات حاکم بر جریان با استفاده از روش تفاضل محدود انجام می‌شود. جملات جابجایی در معادلات، با استفاده از روش وینو مرتبه پنج [۸] گسسته‌سازی می‌گردند. برای گسسته‌سازی جملات پخش، از تقریب مرکزی مرتبه دو استفاده می‌شود. مشتقات زمانی با استفاده از روش رانگ کوتا با دقت مرتبه سوم [۸] گسسته‌سازی می‌شوند.

۳-۱- حل معادلات جریان

برای حل معادلات حاکم بر جریان، از روش تصویرسازی استفاده می‌شود. در این روش معادلات جریان با استفاده از شبه سرعت $\mathbf{u}^* = (u^*, v^*, w^*)$ به دو قسمت به صورت زیر تفکیک می‌شوند [۸]:

$$\frac{\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^n}{\Delta t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \frac{\nabla p}{\rho} = \frac{(\nabla \cdot \boldsymbol{\tau})^T}{\rho} + \mathbf{g} \quad (10)$$

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^*}{\Delta t} + \frac{\nabla p}{\rho} = 0 \quad (11)$$

$\mathbf{u}^{n+1} = (u^{n+1}, v^{n+1}, w^{n+1})$ میدان سرعت در گام زمانی بعدی می‌باشد. مزیت روش تصویرسازی این است که محاسبات سرعت و فشار به طور مجزا حل می‌شوند. در این روش لازم است که زمانی که از سطح مشترک می‌گذریم، از مقادیرهای مجازی در گره‌های فاز دیگر استفاده کنیم. با استفاده از این مقادیر که به صورت زیر تعریف می‌شوند، میدان‌های سرعت مایع و گاز به کل دامنه تعمیم داده می‌شوند:

$$\mathbf{u}_l^{ghost} = \mathbf{u}_v - \dot{m} \left[\frac{1}{\rho} \right]_{\Gamma} \mathbf{n} \quad (12)$$

$$\mathbf{u}_v^{ghost} = \mathbf{u}_l + m \left[\frac{1}{\rho} \right]_{\Gamma} \mathbf{n} \quad (13)$$

بنابراین شبه سرعت‌ها برای دو فاز با استفاده از میدان تعمیم یافته سرعت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mathbf{u}_l^* = \mathbf{u}_l^n - \Delta t \left((\mathbf{u}_l^n \cdot \nabla) \mathbf{u}_l^n - \frac{\mu_l \Delta \mathbf{u}_l^n}{\rho_l} - \mathbf{g} \right) \quad (14)$$

$$\mathbf{u}_v^* = \mathbf{u}_v^n - \Delta t \left((\mathbf{u}_v^n \cdot \nabla) \mathbf{u}_v^n - \frac{\mu_g \Delta \mathbf{u}_v^n}{\rho_v} - \mathbf{g} \right) \quad (15)$$

با اعمال اپراتور دیورژانس روی معادله (۱۵) و با قرار دادن $\nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1}$ برابر صفر با توجه به پیوستگی رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\nabla \cdot \left(\frac{\nabla p^{n+1}}{\rho} \right) = \frac{\nabla \cdot \mathbf{u}^*}{\Delta t} \quad (16)$$

سپس سرعت‌ها در گام جدید به دست می‌آیند:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_l^{n+1} = \mathbf{u}_l^* - \Delta t \frac{\nabla p^{n+1}}{\rho^{n+1}} & \text{if } \Phi > 0 \\ \mathbf{u}_v^{n+1} = \mathbf{u}_v^* - \Delta t \frac{\nabla p^{n+1}}{\rho^{n+1}} & \text{if } \Phi < 0 \end{cases} \quad (17)$$

۳-۲- حل معادله انرژی

برای معادله انتقال حرارت، جملات جابجایی به صورت صریح و جملات پخش به صورت ضمنی گسسته سازی می‌شوند:

$$\rho C_p T^{n+1} - \Delta t \nabla \cdot (k \nabla T^{n+1}) = \rho C_p (T^n - \Delta t (\mathbf{u} \cdot \nabla) T^n) \quad (18)$$

در جریان‌های همراه با تبخیر، میدان دما در سطح مشترک پیوسته است، اما طبق معادله (۹) تبخیر موجب ناپیوستگی در شار حرارتی می‌گردد. در اینصورت گرادیان دما در جهت عمود بر سطح مشترک ناپیوسته می‌باشد. بنابراین برای محاسبه جمله جابجایی در نقاط نزدیک سطح مشترک به مقادیر دمای مجازی در فاز دیگر نیاز است. این مقادیر مجازی می‌توانند از برون‌یابی خطی در جهت عمود بر سطح مشترک محاسبه شوند. اسلام [۹] برای این منظور، یک روش برون‌یابی معرفی کرد که اساس آن حل معادلات دیفرانسیل جزئی زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial T_{nn}}{\partial \tau} \pm (\mathbf{n} \cdot \nabla) T_{nn} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial T_n}{\partial \tau} \pm (\mathbf{n} \cdot \nabla) T_n - T_{nn} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \pm (\mathbf{n} \cdot \nabla) T - T_n = 0 \quad (21)$$

در این معادلات $T_n = (\vec{n} \cdot \nabla) T$ است. این معادلات تا حالت دائم حل می‌شوند. با استفاده از این روش، میدان دمایی فاز مایع از فاز گاز برون‌یابی می‌شود (با علامت مثبت) و میدان دمایی فاز گاز از فاز مایع برون‌یابی می‌شود (با علامت منفی).

۳-۳- روش سطح تراز

در پژوهش حاضر، از روش سطح تراز [۱۰] برای مطالعه مرز مشترک دو فاز استفاده می‌شود. تابع سطح تراز، به صورت تابع اسکالر Φ ، تعریف می‌شود، این تابع فضای محاسباتی را به سه قسمت تقسیم می‌کند. این تابع در فاز داخل دارای علامت منفی، در فاز بیرون دارای علامت مثبت و روی سطح مشترک دارای مقدار صفر است. تابع سطح تراز در هر نقطه با استفاده از معادله دیفرانسیل زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + (\mathbf{u}_{\Gamma} \cdot \nabla) \Phi = 0 \quad (22)$$

سرعت سطح مشترک به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\mathbf{u}_\Gamma = \mathbf{u}_l + \frac{\dot{m}}{\rho_l} \mathbf{n} \quad (23)$$

از آنجایی که تابع سطح تراز به صورت تابع فاصله تعریف می‌گردد، با پیشروی در زمان و حل معادلات به صورت تابع فاصله باقی نمی‌ماند. و این امر موجب می‌شود که در مطالعه جریان‌های دوفازی، مشکل عدم حفظ جرم در فرآیند حل عددی به وجود آید. برای رفع این مشکل از معادله مقاردهی مجدد تابع سطح تراز استفاده می‌شود [۱۰].

۳-۴- روش سیال مجازی

این روش نخستین بار توسط فدکیو و همکاران [۸] برای بررسی ناپیوستگی‌ها در معادله‌ی اوایلر توسعه داده شده است. در روش سیال مجازی در ابتدای هر گام زمانی میدان حل به چند میدان حل مستقل تفکیک می‌شود. سپس با در نظر گرفتن سلول‌های مجازی در هر طرف سطح مشترک، شرایط پرش توسط تابع فاصله اعمال می‌شود. سپس هر میدان به طور جداگانه حل می‌گردد و در پایان هر گام زمانی نتایج ترکیب می‌شوند. بدین ترتیب با استفاده از این روش و استفاده از شرایط پرش، توابع ناپیوسته به صورت پیوسته گسترش می‌یابند.

۴- نتایج عددی

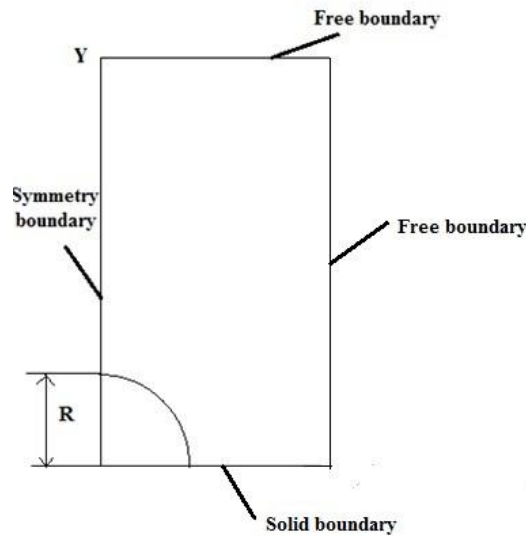
در این قسمت، نتایج رشد حباب منفرد در رژیم جوشش هسته‌ای مورد ارائه می‌گردد. بعضی از مطالعات نشان داده‌اند که یک لایه مایع بسیار نازک زیر حباب بخار در طول جوشش هسته‌ای شکل می‌گیرد، که به آن میکرو لایه می‌گویند [۱]. در این مطالعه از اثر آن صرف نظر شده است. در پژوهش حاضر برای اعتبار سنجی از نتایج مطالعه هابر و همکاران [۵] استفاده شده است. دامنه محاسباتی $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ می‌باشد، که به علت تقارن در یک جهت، دامنه $4\text{mm} \times 8\text{mm}$ در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۱) هندسه و شرایط مرزی مسئله حاکم ارائه شده است. مطابق شکل مرز پایین به صورت جامد، مرز سمت چپ به صورت مرز تقارن و مرز سمت راست و بالا به صورت مرز آزاد در نظر گرفته می‌شود. شعاع اولیه حباب به اندازه‌ای کوچک در نظر گرفته می‌شود که تاثیری بر حل نداشته باشد. در این مطالعه حباب اولیه به صورت نیم‌کره‌ای با شعاع $60\mu\text{m}$ در نظر گرفته می‌شود. زاویه تماس استاتیکی 50 درجه می‌باشد. اختلاف دمای سطح با دمای اشباع 8.5 درجه است. سطح مشترک حباب و مایع اطراف در دمای $T_B = 373\text{K}$ می‌باشد و سطح در دمای $T_W = 381.5\text{K}$ قرار دارد. دما در فاصله دیوار تا لایه مرزی حرارتی به طور خطی تغییر می‌کند. ضخامت لایه مرزی حرارتی مطابق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta = 7.14 \left(\frac{\mu_l \alpha_l}{g \beta_T \Delta T} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

شعاع معادل حباب طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$R = \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (25)$$

پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی جوشش هسته‌ای در جدول (۱) ارائه شده است. برای مطالعه‌ی شبکه مناسب برای شبیه‌سازی جوشش هسته‌ای، چهار شبکه مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، دامنه‌ی محاسباتی در نظر گرفته شده، $3\text{mm} \times 4\text{mm}$ می‌باشد که برای مش با اندازه $5\mu\text{m}$ ، $10\mu\text{m}$ ، $20\mu\text{m}$ ، $40\mu\text{m}$ تعداد نقاط شبکه‌ها به ترتیب 76×101 ، 151×201 ، 301×401 ، 601×801 می‌باشد. همچنین حباب اولیه در نظر گرفته شده، نیم‌کره‌ای به شعاع 1.765×10^{-4} می‌باشد. در شکل (۲) با رسم شعاع معادل حباب بر حسب زمان، استقلال نتایج از شبکه مورد بررسی قرار گرفته شده است. مطابق این شکل چون اختلاف بین دو منحنی شعاع حباب در شبکه با فاصله

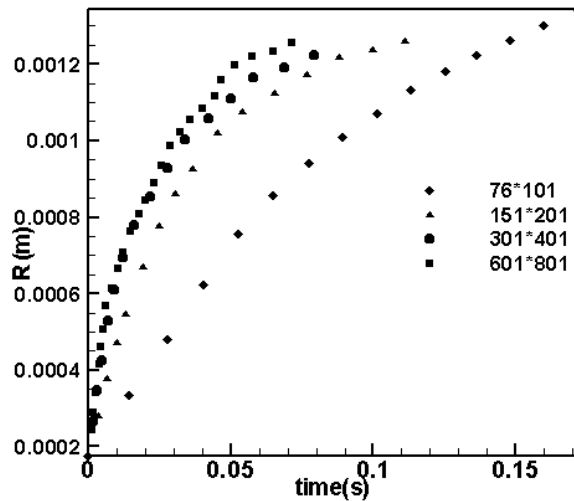


شکل ۱: هندسه و شرایط مرزی جوشش هسته‌ای

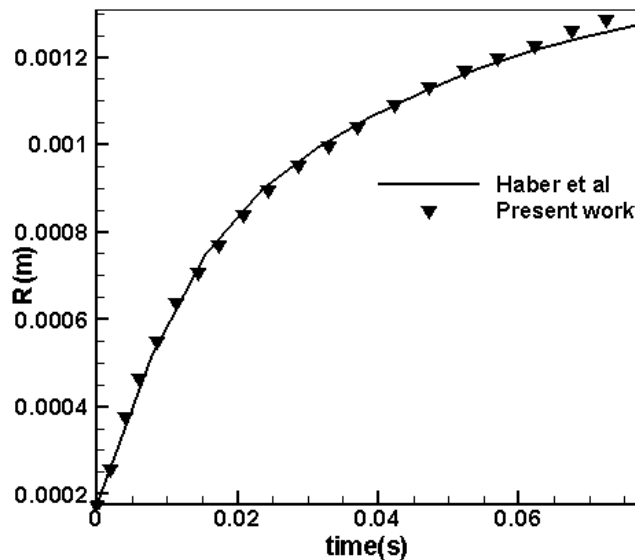
جدول ۱: پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی فرآیند جوشش هسته‌ای

خواص مواد	مایع	حباب
لزجت ($Nm^{-2}s$)	$2.82E-4$	$1.22E-5$
چگالی (kgm^{-3})	958	0.5974
کشش سطحی (Nm^{-1})	0.058	---
ضریب هدایت حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)	0.677	0.024
ظرفیت حرارتی ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	4216	2034
گرمای نهان تبخیر (Jkg^{-1})	$2.256E6$	---

نقاط $10\mu m$ و $5\mu m$ بسیار کم است، مش مناسب، مش با اندازه $10\mu m$ می‌باشد. در این شکل علت اختلاف پیشروی نمودارها، تاثیر شبکه بر زمان جدایش حباب است. به طوری که مش با سایز کمتر، زمان جدایش کمتری دارد. در شکل (۳) نمودار تغییرات رشد حباب بر حسب زمان را برای حباب با اندازه‌ی اولیه $1.765mm$ ارائه شده است. در آن اختلاف دمای سطح و دمای اشباع برابر 7 درجه کلونین و زاویه تماس استاتیکی برابر 50 درجه است. در این شکل نتایج کار حاضر با نتایج عددی هابر و همکاران [۵] مقایسه شده است، تطابق خوبی بین نتایج مشاهده می‌گردد. مطابق شکل، رشد حباب در ابتدا با شیب زیادی صورت می‌گیرد و سپس شیب رشد حباب کم می‌شود تا در نهایت حباب اول جدا شود.

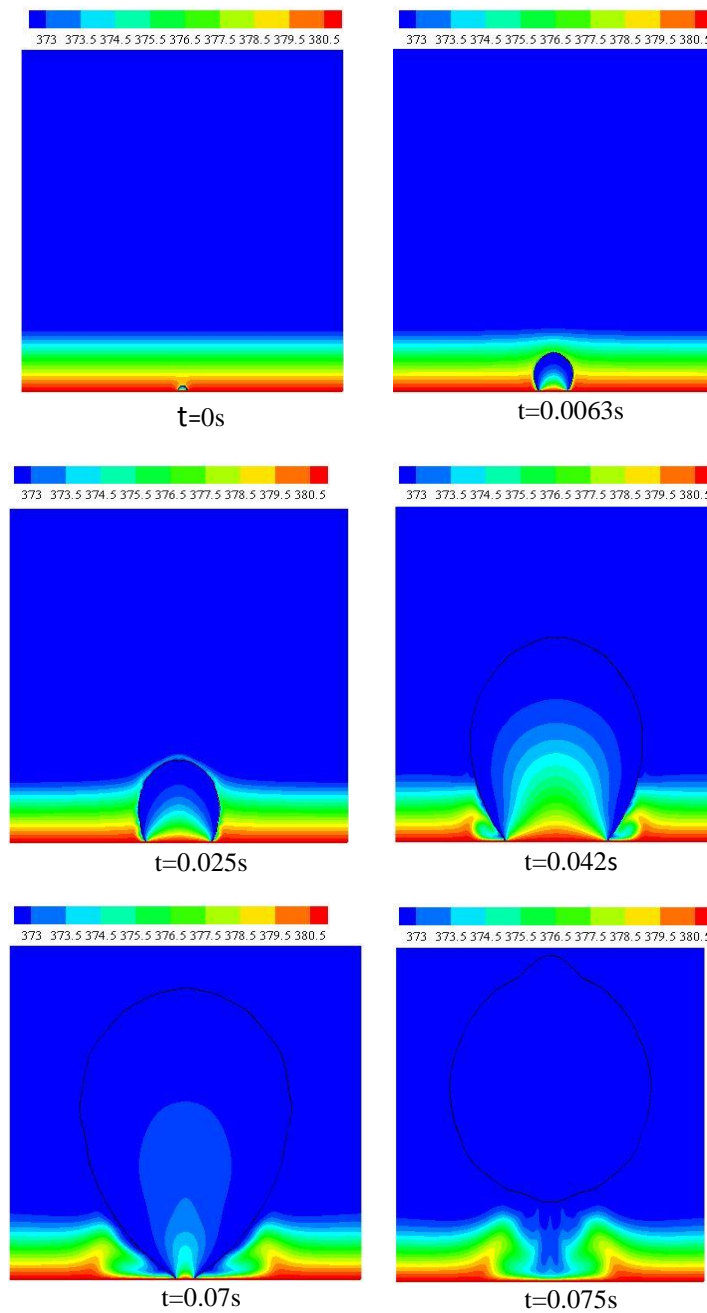


شکل ۲: محاسبه شعاع حباب برای سلول‌ها با اندازه مختلف



شکل ۳: مقایسه شعاع حباب حاصل از نتایج شبیه‌سازی با نتایج عددی موجود برای $\Delta T = 7K$

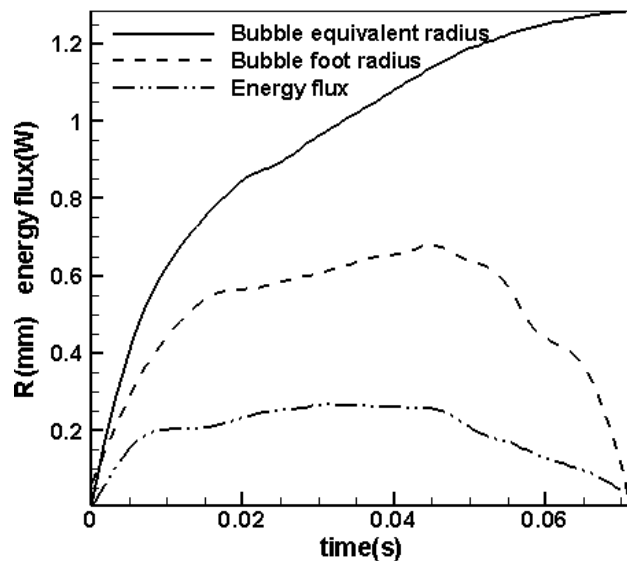
شکل (۴) توزیع دمای اطراف حباب در جوشش هسته‌ای را نشان می‌دهد. مطابق این شکل حرارت به درون حباب نفوذ می‌کند و این امر موجب رشد حباب می‌گردد. سرانجام با گذشت زمان بیشتر، حباب جدا شده و به سمت بالا حرکت می‌کند. شکل (۵) تغییرات شعاع حباب، شعاع پایه‌ی حباب و انتقال حرارت در سطح مشترک حباب را بر حسب زمان نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش شعاع حباب، انتقال حرارت در سطح مشترک افزایش می‌یابد. و با رسیدن شعاع حباب به مقدار حداکثر، انتقال حرارت بیشترین مقدار خود را دارد. با افزایش بیشتر شعاع حباب، انتقال حرارت به تدریج کم می‌شود. با جدا شدن حباب از سطح، انتقال حرارت در سطح مشترک حباب تقریباً صفر است. شکل (۶) تاثیر عدد ژاکوب بر شعاع جدایش حباب را نشان می‌دهد. مطابق شکل، با افزایش عدد ژاکوب شعاع جدایش حباب از سطح افزایش می‌یابد.



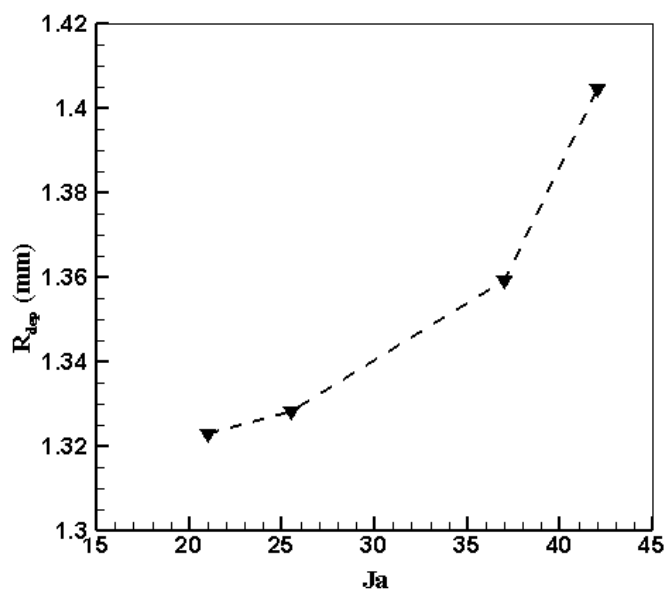
شکل ۴: توزیع دمای حباب در زمان‌های مختلف دوره رشد $\Delta T = 8.5K$

۵- نتیجه‌گیری

به منظور مطالعه دینامیک حباب و انتقال حرارت مربوط به آن، جوشش هسته‌ای به طور عددی شبیه‌سازی گردید. برای این منظور معادلات حاکم بر جوشش هسته‌ای، شامل معادلات مومنتوم، پیوستگی و معادله انرژی در حالت تراکم ناپذیر می‌باشند. برای حل معادلات جریان از روش تصویرسازی استفاده می‌شود. میدان دما از حل معادله انرژی محاسبه می‌شود. برای گسسته‌سازی معادلات حاکم، از روش تفاضل محدود استفاده می‌شود. برای ردیابی سطح مشترک از روش تراز استفاده می‌شود. برای اعمال ناپیوستگی‌ها در سطح مشترک، از روش سیال مجازی استفاده می‌شود. بدین ترتیب پرش کمیت‌هایی چون چگالی، لزجت، فشار و سرعت در سطح مشترک در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵: تغییرات انتقال حرارت در سطح حباب $\Delta T = 8.5K$



شکل ۶: تغییرات شعاع جدایش بر حسب عدد ژاکوب

به منظور مطالعه‌ی انتقال حرارت و دینامیک حباب شامل تشکیل حباب، رشد حباب، جدایش حباب و بالا رفتن حباب، پدیده‌ی جوشش هسته‌ای روی سطح داغ با موفقیت شبیه‌سازی گردید. برای این منظور حباب با شعاع اولیه کوچک بر روی سطح داغ در نظر گرفته شد. با بررسی نرخ رشد حباب، مشاهده گردید که، شعاع حباب در ابتدا رشد زیادی دارد. سپس رشد آن کمتر می‌گردد. همچنین پایه‌ی حباب، در ابتدا منبسط می‌شود. سپس در زمان کوتاهی ثابت می‌ماند. و در نهایت منقبض می‌شود تا جدا شود. افزایش شعاع حباب در ابتدای فرآیند رشد، موجب می‌شود که انتقال حرارت در سطح مشترک به طور مداوم افزایش یابد تا به مقدار حداکثر برسد. سپس با کم شدن رشد حباب، انتقال حرارت کم می‌شود تا زمانی که حباب جدا می‌شود. و انتقال حرارت در سطح حباب اتفاق نمی‌افتد. همچنین نمودار قطر جدایش بر حسب عدد ژاکوب ارائه گردید. بر اساس این منحنی، با افزایش عدد ژاکوب، قطر جدایش نیز افزایش می‌یابد.

۶-مراجع

- [1] Son G., Dhir V. K. and Ramanujapu N., 1999, Dynamics and heat transfer associated with a Single bubble during nucleate boiling on a horizontal surface, *Journal of Heat Transfer*, Vol. **121**, pp 623-631.
- [2] Mukherjee A. and Kandlikar S. G., 2007, Numerical study of single bubbles with dynamic contact angle during nucleate pool boiling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. **50**, pp 127-138.
- [3] Son G. and Dhir V. K., 2008, Numerical simulation of nucleate boiling on a horizontal surface at high heat fluxes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. **51**, pp 2566–2582.
- [4] Chen Z. and Utaka Y., 2015, On heat transfer and evaporation characteristics in the growth process of a bubble with microlayer structure during nucleate boiling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. **81**, pp 750–759.
- [5] Huber G., Tanguy S., Sagan M. and Colin C., 2017, Direct numerical simulation of nucleate pool boiling at large microscopic contact angle and moderate Jakob number, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. **113**, pp 662–682.
- [6] Wang Y. and Cai J., 2017, Numerical investigation on bubble evolution during nucleate boiling using diffuse interface method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. **112**, pp 28–38.
- [7] Nguyen D., Fedkiw R. and Kang M., 2001, A Boundary Condition Capturing Method for Incompressible Flame Discontinuities, *Journal of Computational Physics*, Vol. **172**, pp 71-98.
- [8] Kang M., Fedkiw R. P. and Liu X. D., 2000, A boundary condition capturing method for multiphase incompressible flow, *Journal of Scientific Computing*, Vol. **15**, pp 323-360.
- [9] Aslam T., 2003, A partial differential equation approach to multidimensional extrapolation, *Journal of Computational Physics*, Vol. **193**, pp 349–355.
- [10] Osher S. and Fedkiw R. P., 2003, *Level set methods and dynamic implicit surfaces*, New York, Springer-Verlag.