



مروری بر شبیه سازی عددی انتقال حرارت جوشش استخری با تمرکز بر مشخصه های ساختاری سطح در نرم افزار تجاری انسیس فلونت

ارمیا زرغام^۱، محمد حسن نوبختی^{۲*}، مرتضی خیاط^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۵۱۵/۷۷۵، m.Nobakhti@srbiau.ac.ir

چکیده

جریان های چند فازی نظیر جوشش استخری، مسائلی چند فیزیکی - چند مقیاسی پیچیده ای هستند و نیازمند انبوهی از تکنیک های عددی برای فیزیک های مختلف حل اند که برای مجموعه خاصی از پارامترهای جریان و رژیم های مختلف با هم ترکیب شده اند. به همین دلیل هنوز یک راه حل عددی کاملاً تثبیت شده برای انجام شبیه سازی های پیش بینی کننده و به خوبی معتبر شده به طور شفاف تعریف نشده است. هدف اصلی از انجام این پژوهش، جمع بندی روش ها و اصول اساسی شبیه سازی عددی جوشش استخری و تبیین کلیه مراحل اجراء و پیاده سازی آن در نرم افزار انسیس فلونت به گونه ای صریح و شفاف است. در این پژوهش، جزئیات مدل های عددی و نتایج بدست آمده برای ناحیه جوشش هسته ای جهت تحلیل دینامیک تک حباب و محاسبه شار حرارتی بحرانی ارائه شده است و تأثیر پارامترهایی مانند سوپر هیت دیواره، زیر سردی مایع، زاویه تماس، تأثیر گرانش و مشخصه های ساختاری سطح بر ضریب انتقال حرارت و شار حرارتی را نیز شامل می شود. نتایج این پژوهش نشان می دهد که شبیه سازی های عددی تطابق نسبتاً خوبی با داده های آزمایشگاهی و تجربی دارد.

اطلاعات مقاله

مقاله مروری

دریافت: ۳۱ تیر ۱۳۹۹

پذیرش: ۲۵ آبان ۱۳۹۹

ارائه در سایت: ۲۵ آبان ۱۳۹۹

کلیدواژگان

شبیه سازی عددی

انتقال حرارت جوشش استخری

دینامیک حباب

سطوح اصلاح شده

مدل حجم سیال

Numerical Simulation of Pool Boiling Heat Transfer, Focusing On Surface Structural Characteristics In ANSYS Fluent: A review

Ermia Zargham¹, Mohammad Hasan Nobakhti^{2*}, Morteza Khayat³

1- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1477893855 Tehran, Iran, m.Nobakhti@srbiau.ac.ir

Article Information

Review Paper

Received 20 July 2020

Accepted 15 November 2020

Available Online 15 November 2020

Keywords

Numerical Simulation

Pool Boiling Heat Transfer

Bubble Dynamics

Modified Surfaces

Volume of Fluid (VOF) Model

ABSTRACT

Multiphase flows, such as pool boiling, are complex multiphysical-multiscale problems and require a multitude of numerical techniques to solve different physics combined for a specific set of flow parameters and different regimes. For this reason, a well-established numerical solution for performing well-validated predictive simulations has not yet been clearly defined. The main purpose of this study is to summarize the methods and basic principles of numerical simulation of pool boiling and explain all the steps of its implementation in Ansys Fluent software in a clear and transparent manner. In this research, the details of numerical models and the results obtained for the nucleate boiling region are presented to analyze the single bubble dynamics and calculate the critical heat flux. The effect of parameters such as wall superheat, liquid subcooling, contact angle, level gravity and surface structural characteristics on heat transfer coefficient and heat flux are also included. The results of this study show that numerical simulations have a relatively good agreement with laboratory and experimental data.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Ermia Zargham, Mohammad Hasan Nobakhti, Morteza Khayat, Numerical Simulation of Pool Boiling Heat Transfer, Focusing On Surface Structural Characteristics In ANSYS Fluent: A review, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 11, No. 3, pp. 56-73, 2020 (In Persian)

۱- مقدمه

علیرغم نوسانات اقتصادی، تقاضای انرژی در جهان در حال افزایش است. یکی از مؤثرترین روش های انتقال حرارت برای خنک کردن دستگاه های شار حرارتی بالا و دستیابی به بازده انرژی بالا به طور همزمان، پدیده ی جوشش استخری است که بیشترین کاربرد را در صنعت و مهندسی دارد. روند کوچک سازی تجهیزات مهندسی نظیر قطعات الکترونیکی، تجهیزات تهویه مطبوع و سیستم های کنترلی نیز اهمیت استفاده از فرآیند انتقال حرارت همراه با تغییر فاز جوشش را به خصوص در کاربردهای خنک کاری بیشتر نمایان می کند.

قبل از رواج گسترده استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۱ برای تحلیل عددی مسائل مکانیک سیالاتی و انتقال حرارتی، ابزارهای تجربی در اندازه گیری دما و فشار به خصوص در سیستم هایی با مقیاس های کوچک دچار مشکل بودند. یکی از برتری های مهم CFD نسبت به آزمایش های تجربی نیز همین است که می تواند پدیده های جریان را در مقیاس های بسیار کوچک و در زمان های بسیار کوتاه بررسی کند و تحلیل عددی آن ها روشی امیدوار کننده برای محاسبه ی شار حرارتی و انتقال حرارت است؛ زیرا با پیشرفت های اخیر در تکنیک های CFD چند فاز، ابزارهای ابتکاری موثری برای بررسی جریان های دو یا چند فازی ارائه شده اند. جریان های دوفازی نظیر جوشش استخری، مسائلی چند فیزیکی-چند مقیاسی بسیار پیچیده ای هستند و نیازمند انبوهی از تکنیک های عددی برای فیزیک های مختلف حل اند که برای مجموعه خاصی از پارامترهای جریان و رژیم های مختلف با هم ترکیب شده اند. به همین دلیل هنوز یک راه حل عددی کاملاً تثبیت شده برای انجام شبیه سازی های پیش بینی کننده و به خوبی حل شده به طور شفاف تعریف نشده است.

روش های عددی مرسوم برای مدل سازی فرآیند جوشش و حل معادلات حاکم بر آن عبارتند از: روش تنظیم سطح^۲ [۲،۱]، روش حجم سیال^۳ [۳]، روش های ترکیبی مبتنی بر کوپل روش های تنظیم سطح و حجم سیال^۴ [۴]، روش بولتزمن^۵ [۵] و روش ردیابی جلو^۶ [۶،۷]. کلیه ی این روش ها توسط محققان مختلف گسترش یافته و در حالت های خاصی بررسی گردیده اند

و با توجه به شرایط مسئله، نوع جریان و رژیم جوشش مورد نظر به کار می روند. تحلیل عددی جریان های چندفازی با استفاده از شبیه سازی عددی مستقیم^۷ [۸] نیز صورت می پذیرد. شبیه سازی عددی مستقیم جوشش هسته ای، با حل معادلات بقای حاصل از اصول اولیه بقای جرم، تعادل مومنتوم، بقای انرژی و قانون دوم ترمودینامیک انجام می شود. دیر [۹] استفاده از شبیه سازی های عددی کامل را به عنوان یک روش جایگزین مناسب برای پیش بینی منحنی جوشش پیشنهاد کرده است. تلاش ها برای مدل سازی عددی جوشش استخری به شروع رژیم جوشش هسته ای، چگالی سایت های هسته زایی، دینامیک حباب (شامل رشد، به هم پیوستن و جدایش حباب) و فرآیندهای انتقال حرارتی مرتبط با آن اختصاص می یابد. سان و همکاران [۱۰]، رشد تک حباب را بر روی یک سطح گرمادیده افقی بررسی و نتایج جالب و مهمی را در زمینه شبیه سازی های عددی مستقیم جوشش هسته ای گزارش کردند. آن ها تأثیر افزایش زاویه تماس و دمای سوپر هیت دیواره را بر قطر جدایش حباب بررسی کردند. در پژوهش آن ها، سطح مشترک مایع-بخار با استفاده از روش LS ضبط^۸ شد. این روش تنظیم سطح قبلاً توسط ساسمن و همکاران [۱۱] برای جریان دو فازی تراکم ناپذیر آدیاباتیکی اعمال شده بود. هسو و همکاران [۱۲] اثر ترشوندگی سطح را با آب و بخار اصلاح شده بررسی کردند و اثر زاویه تماس بر روی منحنی جوشش کامل را با شبیه سازی عددی مبتنی بر روش VOF و مدل زاویه تماس استاتیکی بدست آوردند. با در نظر گرفتن تأثیر خواص سیال کاری با استفاده از آب و PF5060 به عنوان دو سیال کاری مختلف، ابرجیت و دیر [۱۳] تأثیر زاویه تماس را بر روی رشد و جدایش تک حباب تحت گرانش طبیعی در جوشش استخری با استفاده از روش LS بررسی کردند. چنگ و همکاران [۱۴] برای شبیه سازی عددی منحنی جوشش تحت دمای کنترل شده ی دیواره برای هیترهای افقی با اندازه ی محدود، مدل تغییر فاز مایع - بخار LB را به کار بردند. با این حال، منحنی های جوشش شبیه سازی شده، افت زیادی در شار حرارتی در طی یک رژیم جوشش استخری انتقالی را نشان نمی دهند. اخیراً این نقیصه توسط ما و چنگ [۱۵] از طریق اعمال شرط مرزی حرارتی مزدوج مطرح شده توسط لی [۱۶] بر روی سطح مشترک جامد - مایع و استفاده از آخرین نسخه روش شبه پتانسیلی تغییر فاز مایع - بخار بولتزمن اصلاح شد.

¹ Computational Fluid Dynamics (CFD)

² Level Set (LS) Method

³ Volume of Fluid (VOF) Model

⁴ Coupled Level Set and Volume of Fluid (CLSVOF) Method

⁵ Lattice Boltzmann (LB) Method

⁶ Front Tracking (FT) Method

⁷ Direct Numerical Simulation (DNS)

⁸ Capture

جوشش نوکیاما چهار رژیم مختلف جوشش استخری وجود دارد: جوشش جابجایی آزاد یا طبیعی، جوشش هسته ای، جوشش انتقالی و جوشش فیلمی. ناحیه جوشش هسته ای به دلیل آغاز حباب زایی و وجود دو نوع تجسم متمایز برای رشد حباب ها و همچنین لزوم بررسی CHF در این ناحیه از اهمیت ویژه ای برخوردار است و تحلیل عددی آن نیز به مراتب دشوارتر است. بنابراین بررسی دینامیک تک حباب و شناسایی مکانیزم های مختلف انتقال حرارت دخیل در طی فرآیند جوشش استخری هسته ای و بررسی تأثیر آن ها بر یکدیگر از ملزومات اساسی مدل سازی این پدیده است.

۱-۲- دینامیک حباب

فرآیند رشد یک حباب از لحظه ی تشکیل شدن تا جدایش از سطح جوشش را دینامیک حباب می گویند. بنکاف [۲۱] اولین کسی بود که نشان داد خلل و فرج گوه ای شکل روی یک سطح گرمادیده، بخارها را به دام می اندازد و این تا زمانی که زاویه تماس مایع در حال پیشروی بیشتر از زاویه گوه باشد، ادامه دارد. شرط تعیین شده توسط وی برای این که بخار در خلل و فرج محبوس بماند، این بود که زاویه ی تماس مایع در حال پیشروی روی سطح جوشش بزرگتر از دو برابر زاویه ی دهانه ی گوه باشد. پس از آن وانگ و دیر [۲۲] معیار دیگری برای به دام انداختن بخار در حفره ها ایجاد کردند. مطابق معیار آن ها، حفره های موجود در سطح تنها در صورتی که زاویه تماس بیشتر از زاویه دهانه ی حفره باشد، بخار سیال کاری را به دام می اندازند. هسو [۲۳] اولین فردی بود که معیارهای شروع جوشش را فرض نمود. طبق معیارهای وی، برای تکامل و رشد حباب در مراحل اولیه و تبدیل به حباب کامل، حداقل دمای اطراف حباب (دما در روی حباب) باید حداقل برابر با دمای اشباع در فشار داخل حباب باشد. دمای اشباع متناظر با فشار داخل حباب را می توان به طور تقریبی با استفاده از معادله ی کلایوس - کلایپرون بدست آورد.

$$T - T_{sat} = \frac{2\sigma T_{sat}}{r_b \rho_v h_{fg}} \quad (1)$$

برای یک سوپرهیت دیواره مشخص با اعمال معیار هسو، گستره ای از شعاع حفره های هسته زایی به صورت زیر ارائه می شود:

$$\{r_{c.min} \cdot r_{c.max}\} = \frac{\delta_t C_2}{2C_1} \frac{\Delta T_w}{\Delta T_w + \Delta T_{sub}} \times \left[1 \mp \sqrt{1 - \frac{8C_1 \sigma T_{sat}(P_l)(\Delta T_w + \Delta T_{sub})}{\rho_v h_{fg} \delta_t (\Delta T_w)^2}} \right]$$

جنورجولاس و مارنگو [۱۷] انتقال حرارت و تغییر فاز به دلیل تبخیر و یا تراکم را با یک مدل قبلاً بهبود یافته و معتبر مبتنی بر روش VOF جهت تحلیل دینامیک حباب ادیاباتیک برای شبیه سازی عددی سه بعدی فرآیند پیچیده جوشش در میکروکانال ها بررسی کردند و ویژگی های رشد و جدایش حباب و انسجام حباب های جدا شده از سایت های هسته زایی مختلف در جوشش استخری مایع را با درجه بالای همگرایی اعتبارسنجی کردند.

روش های عددی جهت شبیه سازی عددی جوشش استخری تنها منحصر به روش های متداول نمی شود و روش های ابتکاری مورد استفاده محققان مختلف را نیز شامل می شود. زانگ و همکاران [۱۸] با استفاده از مدل RPI^۱، شبیه سازی CFD را برای جوشش استخری هسته ای نیتروژن مایع انجام دادند. یانگ و همکاران [۱۹] مدل جدیدی برای شبیه سازی عددی انتقال حرارت جوشش استخری آب تحت شرایط مختلف مبتنی بر تکنیک اتوماسیون سلولی (ادغام تکنیک CA با الگوریتم سنتی CFD) که مدل CAS نامیده می شود، ارائه دادند. آزمایشات و نتایج محاسباتی آن ها نشان داد که مدل CAS می تواند بسیاری از ویژگی های اساسی پدیده ی جوشش را بازتولید و ضبط کند.

در این پژوهش، مروری بر شبیه سازی عددی جوشش استخری با تمرکز بر تأثیر مشخصه های ساختاری سطح بر سهم مکانیزم های مختلف انتقال حرارت دخیل در جوشش استخری صورت می گیرد. جزئیات مدل های عددی و نتایج بدست آمده برای ناحیه جوشش هسته ای جهت تحلیل دینامیک تک حباب و محاسبه شار حرارتی بحرانی^۲ ارائه شده است و تأثیر پارامترهایی مانند سوپرهیت دیواره، زیرسردی مایع، زاویه تماس، میزان گرانش و مشخصه های ساختاری سطح بر ضریب انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی را نیز شامل می شود. نتایج شبیه سازی های عددی با داده های حاصل از آزمایش های به خوبی طراحی شده اعتبارسنجی و صحت سنجی می شوند.

۲- جوشش استخری و زیرفرآیندهای دخیل در آن

نوکیاما [۲۰] یکی از پرستندترین مقالات در تحقیقات مرتبط با جوشش را منتشر کرد. وی با استفاده از یک سیم افقی از جنس نیکل-کروم به عنوان منبع حرارتی، رابطه ی بین شار حرارتی و دمای سوپرهیت دیواره را در فرآیند جوشش استخری مطالعه کرد و سپس برای اولین بار منحنی جوشش را که تا به امروز نیز استفاده می شود، بدست آورد. مطابق با منحنی

^۱ Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) Model
^۲ Critical Heat Flux (CHF) (۲)

شکل ۱ دامنه محاسباتی به کار رفته در شبیه سازی های عددی روزنو [۳۰] یکی از اولین روابط جوشش هسته ای را براساس مکانیزم دینامیک حباب پیشنهاد کرد. وی بدون در نظر گرفتن تفاوت های ماهوی موجود بین جوشش هسته ای جزئی و جوشش هسته ای کاملاً توسعه یافته، رابطه ای را پیشنهاد داد که برای هر دو نوع رژیم حباب گسسته و رژیم حباب های بهم پیوسته قابل استفاده است. گرچه این رابطه مبتنی بر فیزیک صحیح مفهومی که بعداً توسط میکیچ و روزنو [۳۱] تشخیص داده شد، نبود. اما از این رابطه به طور گسترده ای استفاده شده است. این رابطه مختص به ناحیه ی جوشش هسته ای و به صورت زیر است:

$$q'' = \left(\frac{C_{p,f} \Delta T_e}{h_{f,g} p r_f^n C_{s,f}} \right)^3 h_{f,g} \mu_f \sqrt{\frac{g(\rho_f - \rho_v)}{\sigma}} \quad (4)$$

استفان و عبدالسلام [۳۲] یک رابطه ی جامع برای جوشش استخری هسته ای اشباع مایعات مختلف ایجاد کردند. در این رابطه ضرایب انتقال حرارت بدون بعد (اعداد نوسلت) برحسب چندین پارامتر بی بعد که وابسته به خواص سیال و جامد هستند، بیان می شوند. در این روابط، گروه هایی از خواص مهم سیال از طریق تجزیه و تحلیل رگرسیون شناسایی شدند و مقادیر مؤلفه های این گروه ها با تطبیق مقادیر پیش بینی شده با داده های موجود بدست آمدند. در توسعه ی این روابط، از داده های هندسه های مختلف سطح هیتز (از قبیل صفحه تخت، استوانه های افقی، استوانه های عمودی و غیره) استفاده شد. میانگین زبری سطح هیتز یک میکرومتر فرض شد. رابطه ی آن ها برای سیال کاری آب و به ازای زاویه تماس $\phi = 45^\circ$ عبارتست از:

که X_1, X_2, X_3 و X_4 ، پارامترهایی بی بعد هستند که به صورت زیر تعریف می شوند:

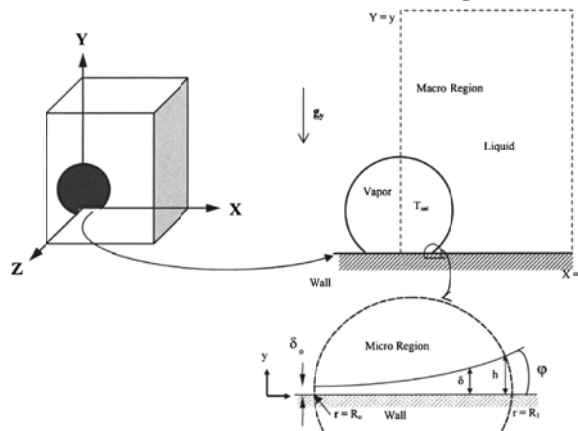
$$X_1 = \frac{q D_a}{k_l \cdot T_{sat}}, X_2 = \frac{h_{f,g} D_a^2}{\alpha_l^2}$$

یکی از گسترده ترین روابط به کار رفته جهت محاسبه ضرایب انتقال حرارت جوشش استخری توسط کوپر [۳۴،۳۳] ارائه شده است که در آن از حدود ۶۰۰۰ داده ی مختلف از نقاط مستخرج از منابع منتشر شده مربوط به بیش از ۱۰۰ آزمایش برای جوشش استخری استفاده شده است. این رابطه مبتنی بر فشار کاهیده است و از فشار کاهیده، وزن مولکولی و زبری سطح به عنوان پارامترهای مرتبط استفاده می کند. این رابطه که

که در این رابطه $C_1 = 1 + \cos \phi$ و $C_2 = \sin \phi$ می باشند. برگلس و روزنو [۲۴] یک رابطه تجربی برای محاسبه ی مقدار شار حرارتی در نقطه ی ONB بر حسب فشار سیستم به صورت زیر بدست آوردند:

$$q_{w,ONB} = 15.6 P^{1.156} \Delta T_w^{p^{2.3/0.0234}} \quad (3)$$

یکی از اولین تلاش ها برای مدل سازی عددی رشد و جدایش حباب از سطح جوشش توسط لی و نیدال [۲۵] صورت گرفت. در مدل سان و همکاران [۱۰]، دامنه محاسباتی به دو ناحیه به نام های ماکرولایه و میکرو لایه تقسیم بندی شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. ناحیه میکرو یک فیلم مایع فوق نازک است که بین سطح جامد و سطح مشترک مایع - بخار در حال رشد تشکیل می شود. می و همکاران [۲۶] در مطالعه رشد و جدایش حباب با استفاده از شبیه سازی عددی، فرض کردند که یک میکرو لایه گوه ای شکل در زیر پایه حباب وجود دارد و انتقال حرارت به حباب فقط از طریق این میکرو لایه صورت می گیرد. یک مدل عددی [۲۷] شعاع حباب، حجم حباب در هنگام جدایش از سطح گرمادیده و انتقال حرارت حباب در حال رشد را در جوشش هسته ای با در نظر گرفتن تبخیر در میکرو لایه پیش بینی می کند. یک مطالعه تحلیلی [۲۸] تأثیر میکرو لایه و شکل حباب را بر مکانیزم انتقال حرارت در طول رشد و جدایش حباب در نظر می گیرد. هی و همکاران [۲۹] یک مدل جدید مدل میکرو لایه بر مبتنی استخری شبیه سازی عددی جوشش بحرانی بررسی شار حرارتی مقدار پیش بینی جهت را عددی اندازه با عددی به صورت جوشش منحنی مدل این کردند. در (شکل ۱) آن ها از $2.46 \times 10^{-4} \times X_1^{0.73} X_2^{1.26} X_3^{1.26} X_4^{1.26}$ برای تعیین $h_{f,g}$ شار با را اصلی از رشد ستون بخار ارتباط تبخیر ناشی که داد حرارتی کل دارد. این مطالعات، همگی بر اهمیت میکرو لایه در بررسی دینامیک حباب در جوشش استخری تأکید دارند.



مکانیزم هایی وجود دارند که در نرخ انتقال حرارت کل از سطح هیتر مشارکت دارند. این مکانیزم ها عبارتند از: هدایت حرارتی گذرا به مایع در فضای خالی به وجود آمده توسط حباب در حال جدایش از سطح، تبخیر از میکرو لایه و انتقال حرارت جابه جایی طبیعی در نواحی از هیتر که هیچ گونه فعالیت حبابی وجود ندارد. تلاش برای پیش بینی شار حرارتی جوشش هسته ای با ترکیب سهم مشارکت این مکانیزم ها یعنی هدایت (رسانش) گذرا بر روی سایت های هسته زایی و اطراف آنها، تبخیر از میکرو لایه در زیر حباب های چسبیده به سطح هیتر و انتقال حرارت جابه جایی طبیعی در نواحی غیر فعال از سطح هیتر به صورت زیر بیان شده است:

$$q = \frac{k_1^2}{2} \sqrt{\pi(k\rho c_p)_l f D_a^2 N_a \Delta T} + \left(1 - \frac{k_1^2}{2} \pi D_a^2 N_a\right) \bar{h}_{Nc} \Delta T + \frac{\pi}{4} \bar{h}_{Ev} \Delta T D_a^2 N_a \quad (15)$$

تنها دو ترم اول در معادله ی بالا در مدل اصلی ارائه شده توسط میکیچ و روزنو [۳۱] گنجانده شده بودند و آنها با استفاده از روابط تجربی برای چندین مورد از این پارامترها، اعتبار این معادله را توجیه کردند. ترم اول در معادله ی بالا، تبخیر در مرز حباب را شامل می شود که بیانگر هدایت گذرا در مایع است. اضافه شدن آخرین ترم در سمت راست معادله (۱۵) توسط جاد و هوانگ [۴۱] پیشنهاد شد. این ترم تبخیر در میکرو لایه را در پایه حباب ها در نظر می گیرد. نرخ انتقال حرارت از دیواره و همچنین سهم مکانیزم های مختلف انتقال حرارت طی چرخه رشد و جدایش حباب از نظر مکانی و زمانی متفاوت هستند. شکل ۲ شار حرارتی متوسط دیواره و سهم هریک از مکانیزم های دخیل را برحسب تابعی از زمان نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، سهم تبخیر در میکرو لایه بیش تر از ۲۰٪ است.

ساده تر از روابط قبلی است، برای جوشش استخری هسته ای اشباع بر روی صفحه تخت به صورت زیر است:

$$\frac{q''^{1/3}}{\Delta T} = 55 \left(\frac{P}{P_c}\right)^{0.12-0.21 \log_{10} \epsilon} \left(-\log_{10} \frac{P}{P_c}\right)^{-0.55} M^{-0.50} \quad (7)$$

در این رابطه، $10^{-4} \leq P/P_c \leq 0.886$ است. این رابطه به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$h_{Pool} = 55 P_r^{(0.12-0.2 \log \epsilon)} (-\log P_r)^{-0.55} M^{-0.5} q''^{0.67} \quad (8)$$

اگرچه این رابطه زبری سطح هیتر را به حساب می آورد ولی اثر ترشوندگی سطح را شامل نمی شود. کوپر پیشنهاد می کند که برای استفاده از این رابطه برای استوانه های افقی، ثابت سرب در سمت راست معادله باید از ۵۵ به ۹۵ افزایش یابد. فریتز [۳۵] فرمولی برای پیش بینی جدایش حباب ارائه کرد که از آن زمان تاکنون به طور گسترده در مطالعات و پژوهش های متعدد مورد استفاده قرار گرفته است. وی جدایش حباب را به عنوان تعادل نیرو بین نیروی شناوری و کشش سطحی، یعنی جایی که شناوری حباب را در جهت معکوس چگالی برمی دارد و کشش سطحی آن را بر روی سطح گرمادیده نگه می دارد، مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. رابطه ی مدل فریتز از این قرار است:

$$D_a = 0.0208 \varphi \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (9)$$

تعدادی از روابط متداول بین قطر و فرکانس جدایش حباب به صورت زیر می باشند:

$$f D_a = \left[\frac{\sigma_{lv} g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_l^2}\right]^{1/4} \quad [36] \quad (10)$$

$$f D_a = \left(\frac{1.18}{2}\right) \left[\frac{\sigma_{lv} g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_l^2}\right]^{1/4} \quad [37] \quad (11)$$

$$f D_a^{0.5} = 1.75 \quad [38] \quad (12)$$

$$f D_a^{0.5} = \left[\frac{4g(\rho_l - \rho_v)}{3\rho_l}\right]^{1/4} \quad [39] \quad (13)$$

$$f D_a^{0.5} = 0.9g^{1/2} \quad [40] \quad (14)$$

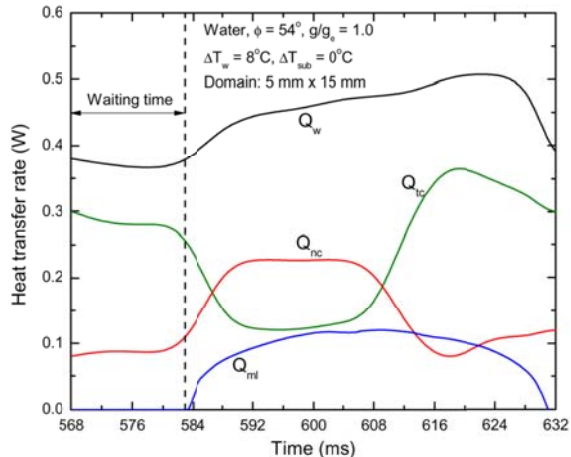
همانطور که از توضیحات قبلی مشهود است، این روابط جامع و کلی نیستند و هنگامی که شرایطی که روابط در آن استفاده شده با شرایط پیش فرض یکسان نباشند، انحراف زیادی بین داده های واقعی و داده های پیش بینی شده با این روابط می تواند وجود داشته باشد.

۲-۲- مکانیزم های انتقال حرارت

اندازه، شکل و تراکم حفره های موجود بر ویژگی های هسته زایی یک سطح توسط سینگ و همکاران [۴۷] بررسی شد. پژوه و استوانویچ [۴۸،۴۹] به صورت عددی انتقال حرارت جوشش استخری را مطالعه کردند. مشخص شد که هر دو عامل زبری سطح و چگالی سایت های هسته زایی، پارامترهایی حیاتی در جوشش استخری هستند و شار حرارتی بحرانی با افزایش چگالی سایت های هسته زایی افزایش می یابد. خیاط و محمدی [۵۰] در مطالعه ای تجربی به بررسی انتقال حرارت جوشش استخری بر روی چهار سطح با جهت گیری های مختلف پرداختند. نتایج بدست آمده از مطالعه ای آن ها این بود که فاکتور زبری سطح باعث به تعویق افتادن بهم پیوستن حباب ها شده و شار حرارتی اندکی افزایش می یابد. همچنین آن ها دریافتند که علاوه بر فاکتور زبری سطح، دو فاکتور تفکیک حباب از سیال در فرآیند دفع گرما و تغذیه بیشتر سایت های هسته زایی و میکرو لایه زیرین حباب می توانند با اهمیت تر از زبری سطح باشند. در مطالعه ای آن ها نشان داده شد که با ایجاد یک سطح میکرو کانال که ترکیبی از روش های تفکیک سیال حباب و تغذیه بیشتر میکرو لایه زیرین حباب بوده است، می توان بدون اضافه کردن هیچ گونه ذرات اضافی به سیال پایه، شار حرارتی را تا 131% و ضریب انتقال حرارت را تا 211% افزایش داد.

۴- مدل سازی فیزیکی و ریاضیاتی

برای شبیه سازی عددی پدیده های مختلف در مکانیک سیالات و انتقال حرارت، ابتدا باید مدل واقعی به مدل فیزیکی و سپس مدل فیزیکی به مدل ریاضیاتی تبدیل گردد. همواره در انجام مدل سازی فیزیکی، فرضیات و ساده سازی هایی صورت می گیرد. فرض تراکم ناپذیری جریان و نیوتونی بودن سیال، تقریب بوزینسک برای نیروی شناوری، فاصله ی بهینه بین مراکز هسته زایی، نسبت چگالی کم^۱ بین فازها، چشم پوشی از انتقال حرارت هدایتی (رسانش) در یکی از فازها، عدم انتقال حرارت تابشی، فرض جریان آرام (لایه ای)، صرف نظر از اختلاف پتانسیل و انرژی جنبشی، فرض خطی بودن نسبت شار حرارتی با اختلاف دما تا شروع جوشش هسته ای و اعمال شار حرارتی ثابت و یکنواخت بر روی سطح گرمادیده، همگی می توانند از فرضیات مدل سازی فیزیکی مسئله انتقال حرارت جوشش استخری باشند. پس از مدل سازی فیزیکی، نوبت به انتخاب مدل های ریاضیاتی بر مبنای مدل فیزیکی می رسد. طی مدل سازی ریاضیاتی، ضمن استفاده



شکل ۲ مشارکت مکانیزم های مختلف انتقال حرارت دخیل در جوشش استخری [۴۲،۱۳]

مدل های تحلیلی متعددی برای پیش بینی شار حرارتی بحرانی به دلیل اهمیت آن برای ایمنی سیستم ها و تجهیزات حرارتی پیشنهاد شده است. مدل کلاسیک شار حرارتی بحرانی جوشش استخری بر پایه ی کارهای کوتانلا دزه [۴۳،۴۴] و زوبر [۴۵] استخراج شد. بر اساس این مدل رابطه ی محاسبه CHF به صورت زیر ارائه گردید:

$$q_{cr.} = q_{max} = q_{CHF} = Ch_{fg} \rho_v \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \quad (16)$$

مقدار ثابت C با توجه به هندسه هیتر تعیین می شود. با در نظر گرفتن اثر زاویه ی تماس (ϕ) بر شار حرارتی بحرانی، مدل پیش بینی CHF دیگری موسوم به مدل کندلیکار [۴۶] به فرم زیر ارائه شده است:

$$q_{max} = K^{-1/2} \rho_v^{1/2} h_{lg} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \quad (17)$$

که در این رابطه K به صورت زیر محاسبه می شود و تابعی از زاویه ی تماس و زاویه ی بین سطح هیتر و افق (θ) می باشد.

$$K = \frac{(1 + \cos \phi)^{-2}}{16} \left(\frac{2}{\pi} + \frac{\pi}{4} (1 + \cos \phi) \cos \theta \right)^{-1} \quad (18)$$

۳- ساختار سطوح اصلاح شده

در میان پارامترهای کلیدی مربوط به سطح گرمادیده، دو مورد اهمیت عمده ای دارند: (۱) شاخصه های توپوگرافیکی سطح و (۲) ترشوندگی سطح. اصلاح سطح جامد برای مطالعه ی جوشش در نتیجه ی اصلاح این دو پارامتر است و به همین دلیل، تاکنون بحث های زیادی در مورد نحوه عملکرد این دو پارامتر به طور مستقل از یکدیگر با نگاهی به توپوگرافی سطح وجود دارد. اثرات

¹ Low - density ratio

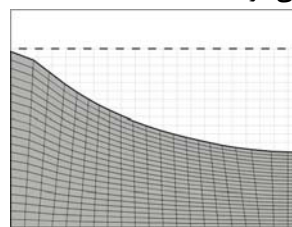
۲-۴- مدل حجم سیال

جریان های چندفازی نظیر جوشش استخری را می توان به صورت عددی با استفاده از رویکرد اویلری - اویلری یا رویکرد اویلری-لاگرانژی محاسبه نمود. به طور کلی برای استفاده از دیدگاه اویلر - اویلری در نرم افزار انسیس فلونت، سه مدل مختلف شبیه سازی جریان چند فازی وجود دارد که عبارتند از: مدل حجم سیال^۳، مدل مخلوط^۴ و مدل اویلر^۵. مدل VOF که نوعی رویکرد اویلری-اویلری است، اساساً یک تکنیک مسیریابی (ردیابی) مبتنی بر کسر حجمی هریک از فازهای موجود در سلول های عددی در شبکه بندی میدان حل است. استفاده از این روش، نیازمند اعمال یک مدل تغییر فاز است. این روش تنها یک مجموعه معادلات مومنتم دارد که برای کلیه سیالات در هر فاز حل می شود و کسر حجمی هر یک از سیالات در هر سلول محاسباتی ردیابی می شود. معمولاً در صورت وجود بیش از دو سیال غیر قابل امتزاج و در جایی که موقعیت سطح مشترک مهم و تأثیرگذار است، از این تکنیک استفاده می شود. بنابراین این روش در مدل سازی عددی فرآیند جوشش کاربرد بیشتری دارد. این مدل تکنیک ردگیری سطح مشترک فازها برای مش اویلری ثابت طراحی شده است. مدل VOF تاکنون به ندرت برای شبیه سازی جوشش جریانیه مورد استفاده قرار گرفته است ولی این مدل برای شبیه سازی جوشش استخری استفاده می شود. آوس درویش [۵۲] از روش VOF برای شبیه سازی جوشش استخری هسته ای آب استفاده کرد. کانکلن و استفان [۵۳] مسئله ی مکش سطح مشترک و رشد یک حباب کروی را بر اساس روش VOF با موفقیت شبیه سازی کردند و به منظور اعتبارسنجی مدل خط تماس سه فاز و انتقال حرارت مزدوج، رشد حباب را از یک ورقه ی فولادی گرمادیده محاسبه نمودند. ولش و ویلسون [۵۴] مدلی را برای تغییر فاز در روش VOF پیاده سازی کرده و نمونه های آزمایشی یک بعدی و جوشش فیلمی را شبیه سازی کردند. ولش و راشیدی [۵۵] این مدل را با در نظر گرفتن هدایت حرارتی گذرا در دیواره جامد گسترش دادند و جوشش فیلمی را شبیه سازی کردند. هاردت و واندر [۵۶] روشی برای پیاده سازی تغییر فاز در یک روش VOF یا LS ارائه کردند و شبیه سازی های جوشش فیلمی و تبخیر قطرات مایع را با استفاده از روش VOF انجام دادند. لازم به ذکر است که هیچ یک از مدل های ذکر شده مبتنی بر روش VOF شامل

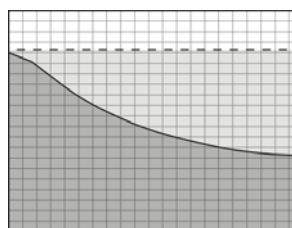
از مدل جریان چند فازی VOF برای ردیابی و ضبط سطوح مشترک با اعمال یک مدل تغییر فاز؛ شرایط اولیه، شرایط مرزی و معادلات حاکم با توجه به فیزیک مسئله و شرایط حاکم بر آن انتخاب می شوند. در نهایت معادلات حاکم بر مسئله با استفاده از الگوهای گسسته سازی و با توجه به این مدل های ریاضیاتی با انتخاب استراتژی عددی مناسب در نرم افزار انسیس فلونت حل می شوند. در ادامه، مراحل یک شبیه سازی عددی مبتنی بر مدل حجم سیال در نرم افزار تجاری انسیس فلونت تشریح و روابط متداول بیان می شود.

۱-۴- بازسازی سطوح مشترک

بازسازی سطح مشترک یک چالش اساسی در شبیه سازی های عددی جریان های چند فازی است و به طور کلی می توان آن را به دو گروه اصلی تقسیم بندی کرد: ضبط سطح مشترک^۱ و ردیابی سطح مشترک^۲. الگوهای مختلف ردیابی سطح مشترک شامل ردیابی رو به رو [۵۱] و روش های لاگرانژی می باشند که معمولاً سطح مشترک را به طور صریح ردیابی می کنند. در حالی که روش های ضبط سطح مشترک از قبیل روش تنظیم سطح و روش VOF، به طور ضمنی سطح مشترک را ضبط می کنند. همان طور که در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است، در روش های ردیابی سطح مشترک مش معمولاً تغییر می کند در حالی که شبکه بندی در روش های ضبط سطح مشترک معمولاً با سازمان باقی می ماند. با توجه به سادگی در اجراء روش های ضبط سطح مشترک، معمولاً این روش برای بازسازی سطح مشترک توصیه می شود.



شکل ۳ ردیابی سطح مشترک



شکل ۴ ضبط سطح مشترک

³ Volume of Fluid (VOF) Model

⁴ Mixture Model

⁵ Eulerian Model

¹ Interface Capturing

² Interface Tracking

یک رابطه ی کامل برای مدل CSF به صورت زیر تعریف می-

شود:

$$F_{VOL} = \sum_{i < j} \sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i k_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (20)$$

این عبارت امکان جمع آثار نیروها را در نزدیکی سلول هایی که بیش از دو فاز در آنها وجود دارد، فراهم می کند. اگر دوفاز در یک سلول وجود داشته باشد، آن گاه $k_i = -k_j$ و $\nabla \alpha_i = -\nabla \alpha_j$ می باشد و در این حالت معادله ی (20) به صورت زیر ساده سازی می شود:

$$F_{VOL} = \sigma_{ij} \frac{\rho k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (21)$$

اگر n بردار نرمال وارد بر سطح باشد، مقدار عددی k (انحنای در این معادله به صورت زیر تعریف می شود:

$$k = \nabla \cdot \hat{n} \quad (22)$$

که در این رابطه $\hat{n} = \frac{n}{|n|}$ دیورژانس بردار نرمال یکه است.

گزینه های نیز برای تعیین زاویه چسبندگی دیواره همراه با مدل کشش سطحی در مدل VOF موجود است. این مدل نیز از کارهای انجام شده توسط برکبل و همکاران [57] بدست آمده است. به جای اعمال این شرط مرزی در خود دیواره، از زاویه تماسی که سیال با دیواره می سازد برای اصلاح بردار نرمال وارد بر سطح سلول های نزدیک دیواره استفاده می شود. این به اصطلاح شرط مرزی دینامیکی، منجر به اصلاح انحنای سطح نزدیک دیواره می شود. اگر θ_w زاویه تماس در دیواره باشد، آنگاه بردار نرمال وارد بر سطح سلول مجاور دیواره عبارتست از:

$$\hat{n} = \hat{n}_w \cos \theta_w + \hat{t}_w \sin \theta_w \quad (23)$$

که در این رابطه \hat{n}_w و \hat{t}_w ، به ترتیب بردارهای یکه نرمال و مماسی وارد بر دیواره هستند. تلفیق این زاویه تماس با بردار نرمال وارد بر سطح یک سلول دور از دیواره که به صورت عادی محاسبه شده است، انحنای محلی یا موضعی سطح را تعیین می کند و از این انحنای برای اصلاح ترم نیروی حجمی در محاسبه کشش سطحی استفاده می شود. در نرم افزار فلوئنت، فرمولی از مدل CSF استفاده می شود که انحنای سطح از شیب های محلی در سطح نرمال وارد بر سطح مشترک محاسبه می شود.

4-4- مدل انتقال جرم

معمولاً مدل تبخیر-تراکم لی موسوم به مدل تغییر فاز لی [58]، برای بیان فرایند انتقال جرم و حرارت در سطح مشترک حباب استفاده شده است. براساس مدل لی، ترم های چشمه جرمی \dot{m}_{lv} و \dot{m}_{vl} و همچنین ترم چشمه انرژی (S_H) ، به ترتیب با

هیچ مدل فرعی برای مدل سازی تبخیر در خط تماس سه فاز نمی شوند.

در مدل VOF با محاسبه ی کسر حجمی در هر سلول در کل دامنه حل، سطح مشترک بین فازهای مختلف موجود در فرآیند مسیریابی و ضبط می شود. برای فاز i ام، کسر حجمی سلول سه شرط اصلی دارد. به عنوان مثال برای فاز بخار ($i = v$) در جریان دوفازی مایع - بخار داریم:

هیچ فاز بخاری درون سلول نیست : $\alpha_v = 0$

تنها فاز بخار درون سلول هست : $\alpha_v = 1$

هر دو فاز مایع و بخار درون سلول وجود دارند : $0 < \alpha_v < 1$

اگر $\alpha_v = 1$ یا $\alpha_l = 0$ باشد، این بیانگر ناحیه ی فاز بخار است که به عنوان فاز اولیه یا فاز گسسته شناخته می شود.

در استفاده از مدل VOF در نرم افزار انسیس فلوئنت، حتما باید از حلگر مبتنی بر فشار استفاده شود و مدل VOF با حلگر مبتنی بر چگالی موجود نیست.

3-4- مدل کشش سطحی

کشش سطحی در نتیجه نیروهای جاذب بین مولکول ها در یک سیال ایجاد می شود. با در نظر گرفتن یک حباب هوا در آب، می توان بیان کرد که نیروی خالص وارد بر یک مولکول درون حباب، به دلیل خنثی شدن نیروها با یکدیگر صفر است. کشش سطحی عامل مهمی است که بر رشد و جدایش حباب تأثیر می گذارد. در مقیاس های کوچک، نیروهای کشش سطحی نسبت به نیروهای حجمی غالب می شوند. در نرم افزار انسیس فلوئنت، دو مدل کشش سطحی موجود است: نیروی سطحی پیوسته (CSF) و تنش سطحی پیوسته (CSS). مدل نیروی سطحی پیوسته (CSF) که توسط برکبل و همکاران [57] ارائه شده است، برای انتقال نیروی کشش سطحی به نیروی حجمی استفاده می شود. این مدل به گونه ای اجرا شده است که افزودن کشش سطحی به محاسبه VOF منجر به یک ترم چشمه¹ در معادله مومنتوم می شود. برای درک منشأ ترم چشمه، فرض کنید که کشش سطحی در طول سطح ثابت باشد و فقط در جایی که نیروهای عمود بر سطح مشترک اعمال می شوند، در نظر گرفته می شود. می توان نشان داد که افت فشار در سطح به ضریب کشش سطحی به صورت زیر بستگی دارد:

$$P_2 - P_1 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (19)$$

¹ Source term

در روش VOF، دوفاز موجود در فرآیند جوشش استخری با کسرهای حجمی هر فاز نشان داده می شوند.

$$\alpha_l + \alpha_v = 1 \quad (33)$$

ردیابی سطوح مشترک بین فازها با حل یک معادله پیوستگی برای کسر حجمی یک یا بیش از یکی از فازها انجام می شود. برای فاز q، این معادله به شکل زیر است:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (34)$$

بنابراین معادلات حاکم برای حل مسئله جوشش استخری، شامل معادله پیوستگی برای هر دو فاز و یک مدل تک سیالی برای معادلات بقایی مومنتوم و انرژی است. با اعمال آنچه که در زیربخش های (۳-۴) و (۴-۴) به آن اشاره شد، این معادلات را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\text{پیوستگی فاز بخار: } \frac{\partial(\alpha_v \rho_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{u}) = \dot{m}_{lv} \quad (35)$$

$$\text{پیوستگی فاز مایع: } \frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{u}) = -\dot{m}_{lv} \quad (36)$$

$$\text{مومنتوم: } \frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \cdot \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + \rho \vec{g} + \vec{f} \quad (37)$$

$$\text{انرژی: } \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} C_p T) = -\nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + S_h \quad (38)$$

ترم \vec{f} در معادله (۳۷) همان نیروی کشش سطحی بین دوفاز است که در زیر بخش (۳-۴) بیان گردید. همان طور که از سمت راست معادلات بالا نیز پیداست، به منظور شبیه سازی جوشش هسته ای، باید ترم های چشمه حجمی در معادلات حاکم برای ناحیه ی ماکرو گنجانده شوند. به عبارتی معادلات اصلی حاکم باید با افزوده شدن ترم های چشمه در هر دوفاز مایع و بخار به طور جداگانه حل شوند. ترم های چشمه جرمی در معادله پیوستگی نشان دهنده انتقال جرم از مایع به بخار است، در حالی که ترم چشمه انرژی در معادله انرژی، انتقال حرارتی که ترم های چشمه جرمی در طی تبدیلیشان از مایع به بخار تولید می کنند را متوازن می کند.

۵-۲- معادلات کوپل سرعت-فشار و معادله خط تماس سه فاز

ترم فشار در معادله مومنتوم به یک الگوریتم تکراری ویژه برای کوپل شدن با میدان سرعت نیاز دارد. نرم افزار تجاری انسیس فلوئنت، الگوریتم های مختلفی برای حل معادلات کوپل شده سرعت-فشار دارد. یکی از متداول ترین این الگوریتم ها، موسوم

معادلات (۲۴-۲۵) و (۲۶-۲۷) تعریف می شوند. این مدل فرض می کند که جرم در فشار ثابت و در حالت شبه تعادلی ترمودینامیکی [۵۹] مطابق با روابط زیر منتقل می شود:

$$\dot{m}_{lv} = r \alpha_l \rho_l \frac{(T - T_{sat.})}{T_{sat.}} \quad \text{برای تبخیر} \quad (T > T_{sat.}) \quad (24)$$

$$\dot{m}_{vl} = r \alpha_v \rho_v \frac{(T_{sat.} - T)}{T_{sat.}} \quad \text{برای میعان} \quad (T < T_{sat.}) \quad (25)$$

ترم چشمه انرژی متناظر نیز به صورت زیر تعریف می شود:

$$S_h = -\dot{m}_{lv} h_{fg} \quad \text{برای تبخیر} \quad (T > T_{sat.}) \quad (26)$$

$$S_h = \dot{m}_{vl} h_{fg} \quad \text{برای میعان} \quad (T < T_{sat.}) \quad (27)$$

ضریب r در معادلات (۲۴) و (۲۵)، یک ضریب تجربی به نام شدت انتقال جرم با واحد (S^{-1}) است و می تواند مقادیر بین ۰/۱ تا 10^7 را اختیار کند.

نرم افزار تجاری انسیس فلوئنت بسته به مدل های انتقال حرارت چند فازی و چند سطحی مورد استفاده، از مدل لی یا مدل تغییر فاز حرارتی برای انتقال جرم بین فازها از طریق تبخیر یا چگالش استفاده می کند. در رابطه با مدل تغییر فاز حرارتی، حرارت منتقل شده از فازهای مایع و بخار با استفاده از روابط زیر محاسبه می شوند:

از سطح مشترک به فاز مایع:

$$Q_l = h_l A_i (T_s - T_l) - \dot{m}_{lv} H_{ls} \quad (28)$$

از سطح مشترک به فاز بخار:

$$Q_v = h_v A_i (T_s - T_v) - \dot{m}_{lv} H_{vs} \quad (29)$$

به استثناء مواردی که از مدل چند فازی اوپلر همراه با مدل دو مقاومتی برای انتقال حرارت بین سطحی استفاده می شود، در اکثر موارد از مدل لی برای مدل سازی انتقال جرم استفاده می شود.

۵- معادلات حاکم

۵-۱- معادلات اصلی حاکم

معادلات اساسی که برای شبیه سازی عددی جوشش باید حل شوند، شامل معادله ی پیوستگی (اصل بقای جرم)، معادلات حرکت (اصل بقای مومنتوم)، معادله ی انرژی و معادله ی کسر حجمی هستند.

$$\text{پیوستگی: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (30)$$

$$\text{مومنتوم: } \frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \cdot \vec{u}) = \nabla \cdot \tau + \vec{f} \quad (31)$$

$$\text{انرژی: } \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \vec{u}) = \nabla \cdot (\tau \cdot \vec{u}) - \nabla \cdot \vec{q} + \vec{f} \cdot \vec{u} \quad (32)$$

باشد یا به عبارت دیگر میدان کمیات مختلف سیال با گذر زمان تغییر کند، نیاز است علاوه بر گسسته سازی متغیرهای مکانی، متغیر زمانی نیز گسسته سازی شود. همه ی الگوهای گسسته سازی بر پایه ی بسط سری تیلور استوار است. در قسمت روش های حل معادلات در نرم افزار انسیس فلونت، کلیه ی معادلات حاکم مبتنی بر دو الگوی صریح و ضمنی گسسته سازی می شوند. متداول ترین الگوهای موجود در این نرم افزار برای گسسته سازی متغیرهای مکانی در معادلات حاکم عبارتند از: (۱) الگوی مرتبه دوم رو به بالا^۳ که مبتنی بر تقریب تفاضل محدود پیشرو است. فلسفه ی این الگو، تخمین مقدار صفحه با استفاده از حجم سلول بالادستی آن است. (۲) الگوی کوئیک^۴ که به دلیل دقت مرتبه بالا، یک روش گسسته سازی مؤثر و مطمئن است. نام "QUICK" مخفف درونیابی بالادست درجه دوم برای سینماتیک انتقال حرارت جابه جایی است. این الگو از سه نقطه سلول برای محاسبه مقدار صفحه استفاده می کند که دو نقطه از آن ها در بالادست قرار دارند. (۳) الگو MUSCL که مخفف الگوی بالادست-مرکزی یکنواخت برای قوانین بقایی^۵ است و می تواند مرتبه بالایی از دقت را برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی فراهم کند. یکی از مزایای اصلی این الگو، توانایی غلبه بر مشکلات ناشی از شوک در سطح مشترک در شبیه سازی های جریان دو فاز است. این روش برای ترم انتقال حرارت جابه جایی در معادله ی پیوستگی، معادله ی مومنوم و معادله ی انرژی به کار می رود. (۴) الگوی گرادیان: ترم انتشار در معادله مومنوم (نیروی برشی) و ترم انتشار در معادله انرژی (هدایت حرارتی)، همچنان پس از ادغام بر روی حجم محدود نیز دارای گرادیان هستند. با استفاده از قضیه گاوس، سرعت در سلول i ام می تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$\nabla \cdot u_i = \frac{\oint_A u_{i,f}}{V} = \frac{\oint_{i+\frac{1}{2}} u_{i+\frac{1}{2}} + \oint_{i-\frac{1}{2}} u_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta x_i} \quad (41)$$

علاوه بر فرضیات متداول گفته شده برای حل عددی مسئله جوشش استخری، فرض می شود که بخار در دمای اشباع متناظر با فشار حباب باقی می ماند. به این ترتیب، معادله انرژی در داخل حباب بخار حل نمی شود و حرارت منتقل شده از دیواره به بخار نادیده گرفته می شود. برای گسسته سازی معادلات حاکم از یک

به روش نیمه ضمنی برای معادلات کوپل شده فشار^۱ می باشد. اصل این الگوریتم استفاده از یک میدان سرعت بدون واگرایی برای اصلاح معادله مومنوم است. با فرض جریان پتانسیل و برای فشار حدس زده شده P^* ، میدان سرعت u^* را می توان با استفاده از معادله مومنوم (با صرف نظر از کشش سطحی) به فرم زیر بدست آورد:

$$\frac{u^* - u^n}{\Delta t} + u^*(\nabla \cdot u^*) + \mu \nabla^2 \cdot u^* = \nabla p^* \quad (39)$$

میدان سرعت و فشار حدس زده شده ممکن است معادله ی پیوستگی را ارضاء نکنند، در این صورت لازم است که هر دو ترم تصحیح شوند. ترم تصحیح فشار از معادله زیر بدست می آید:

$$-\nabla \cdot u^* + \nabla \cdot (u^* \nabla \cdot u^*) + \mu \nabla^3 \cdot u^* = \nabla^2 p' \quad (40)$$

با جایگذاری ترم تصحیح فشار بدست آمده در معادله (۳۹)، ترم تصحیح سرعت نیز بدست می آید. اگرچه الگوریتم SIMPLE به طور کلی دقیق تر از روش های صریح است، روند حل تکراری آن هزینه ی محاسبات وابسته به زمان را بالا می برد. با توجه به این، یک رویه غیر تکراری موسوم به فشار ضمنی با تقسیم عملگر^۲ توسط عیسی [۶۰] برای غلبه بر این نقیصه پیشنهاد شد.

یک ناحیه با مقیاس میکروسکوپی در خط تماس سه فاز که محل تماس سطح مشترک مایع-بخار با دیواره جامد است، از اهمیت فوق العاده ای در انتقال حرارت در طی جوشش برخوردار است. در کنار یک بررسی بسیار جامع توسط واینر [۶۱] پیرامون انتقال حرارت در خط تماس سه فاز، اطلاعات مهم و اساسی در مورد اثرات میکرومقیاس در خط تماس سه فاز توسط ترونک و واینر [۶۲] ارائه شده است.

بسته به تعریف مسئله و شرایط حاکم بر آن، ممکن است معادلات اضافی اسکالر نیز در حل دخیل شوند. در مورد کمیت های توربولانسی، یک مجموعه واحد از معادلات انتقالی حل می شود و متغیرهای توربولانسی (مانند k ، ϵ یا تنش های رینولدز) میان فازها در سراسر میدان حل به اشتراک گذاشته می شوند.

۶- الگوهای گسسته سازی و استراتژی های حل عددی

با شبکه بندی دامنه محاسباتی در حقیقت شبیه سازی از فضای پیوسته به فضای گسسته تبدیل می شود و کلیه معادلات حاکم در هر کدام از این سلول ها حل می شوند. پس بنابراین نیاز به گسسته سازی معادلات حاکم است. در صورتی که مسئله ناپایا

³ Second order upwind

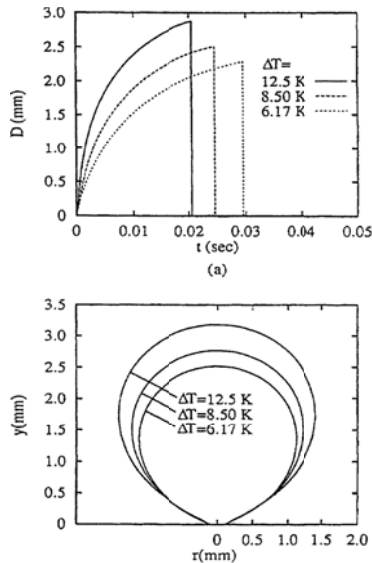
⁴ Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics (QUICK)

⁵ Monotonic Upstream-Centered Scheme for Conservative Laws (MUSCL)

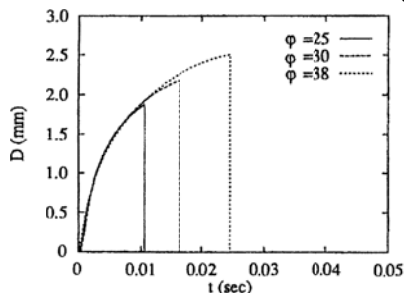
¹ Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation (SIMPLE)

² Pressure Implicit with Splitting of Operator (PISO)

در شکل ۶ اثر سوپرهِیت های مختلف دیواره بر رشد حباب برای آب اشباع در زاویه تماس $\phi = 38^\circ$ بررسی گردیده است. این نشان می دهد که برای یک زاویه تماس ثابت، قطر حباب در هنگام جدایش وابسته به نرخ رشد است که با افزایش سوپرهِیت دیواره افزایش می یابد.



شکل ۶ اثر سوپرهِیت دیواره (ΔT) بر رشد حباب: الف) قطر حباب در طی زمان ب) شکل حباب در هنگام جدایش برای آب اشباع [۴۲، ۱۰] اشکال ۷ و ۸، تأثیر زاویه تماس بر رشد حباب را در سوپرهِیت دیواره $\Delta T = 8.5 \text{ K}$ نشان می دهند. محاسبات برای زوایای تماس استاتیکی 25° ، 30° و 38° به ترتیب متناظر با ثابت های هاماکر $A = -3 \times 10^{-21} \text{ J}$ ، $A = -5 \times 10^{-21} \text{ J}$ و $A = -8.5 \times 10^{-21} \text{ J}$ می باشند. مشاهده می شود که هرچه زاویه تماس افزایش می یابد، دوره ی رشد حباب و نیز قطر حباب در هنگام جدایش افزایش می یابد.



شکل ۷ اثر زاویه ی تماس بر تغییرات قطر حباب در طی زمان [۶۳]

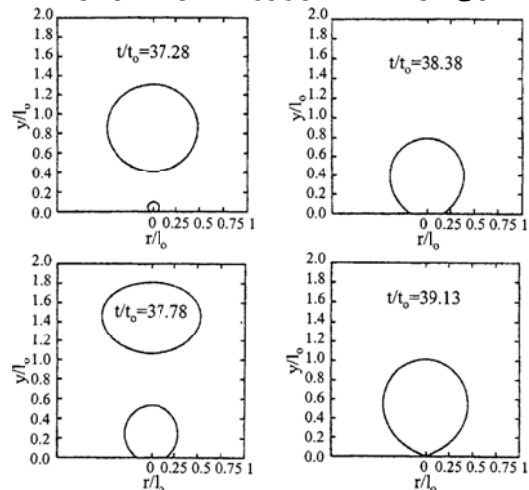
الگو تفاضل محدود استفاده می شود. تمام ترم های انتشار به طور ضمنی حل می شوند، در حالی که ترم های جابه جایی به طور صریح حل می شوند. به منظور افزایش نرخ همگرایی معادله پواسون برای فشار، از روش چند شبکه ای استفاده می شود. جهت همگرایی بیش تر حل، گام زمانی با تعریف عدد کورانت تعیین می شود. عدد کورانت رابطه ی بین گام زمانی و اندازه سلول را بیان می کند.

$$Co = \frac{\bar{u} \Delta t}{\Delta x} \quad (42)$$

به طور کلی، عدد کورانت نباید بزرگتر از ۱ باشد زیرا اعداد کورانت بزرگ پایداری محاسبات را کاهش می دهد حتی اگر بتواند سرعت محاسبات را به طور موثری افزایش دهد. مقدار عدد کورانت به منظور بهبود همگرایی در حل های گذرا با زمان $0/1$ انتخاب می شود.

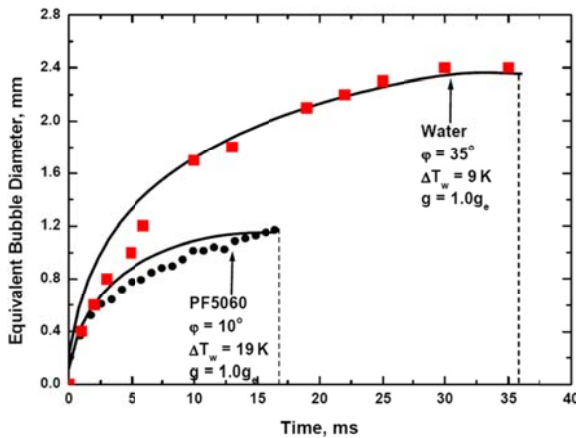
۷- نتایج شبیه سازی های عددی

دیر [۶۳] طی یک مطالعه ی عددی به بازنگری روابط کامل شبیه سازی عددی جوشش استخری روی یک دیسک افقی پرداخت و فیزیک های مختلف جوشش استخری هسته ای و جوشش استخری فیلمی را هر یک به طور جداگانه تشریح نمود. وی الگوی رشد تک حباب را برای سوپرهِیت دیواره $\Delta T = 6.2 \text{ K}$ و ثابت هاماکر $A = -8.5 \times 10^{-21} \text{ J}$ پیش بینی کرد. در بدست آوردن الگوی رشد حباب که در شکل ۵ مشاهده می شود، حل برای ناحیه ی ماکرو با حل ناحیه ی میکرو کوپل شده است و یک رابطه تجربی بین ثابت هاماکر و زاویه تماس حاصل گردید.

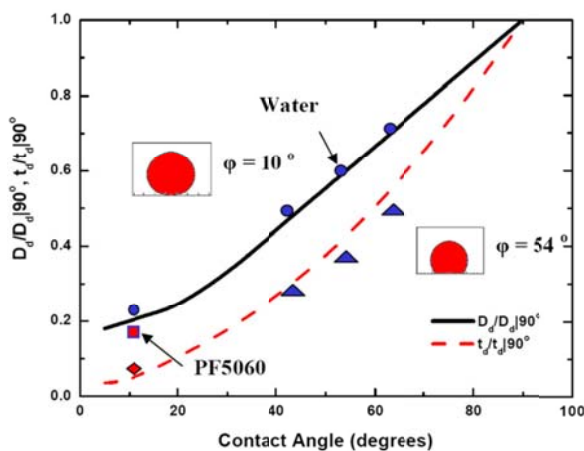


شکل ۵ الگوی رشد حباب مبتنی بر پارامترهای بی بعد سازی شده برای $\Delta T = 6.2 \text{ K}$ و $A = -8.5 \times 10^{-21} \text{ J}$ [۶۳]

¹ transient solutions

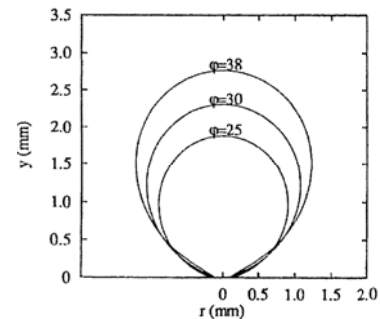


شکل ۱۰ نرخ های رشد حباب برای آب و PF-5060 [۱۳،۴۲]



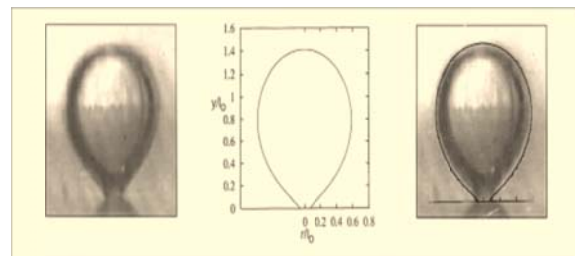
شکل ۱۱ زمان رشد و قطر جدایش بی بعد سازی شده برحسب زاویه تماس ($\Delta T_{Sub} = 0^\circ C$, $\Delta T_w = 8^\circ C$) و $(g/g_e = 1)$ [۱۳،۴۲]

شکل ۱۲، پیش بینی های عددی برای دوره رشد و قطر جدایش حباب را برحسب تابعی از سطح گرانش برای سیال کاری آب با زاویه تماس $\phi = 54^\circ$ متصل به سطح جامد و برای سیال کاری PF-5060 با زاویه ی تماس $\phi = 50^\circ$ متصل به سطح جامد نشان می دهد. داده های تجربی موجود نیز در آن گنجانده شده است.



شکل ۸ اثر زاویه ی تماس بر شکل حباب در هنگام جدایش [۶۳]

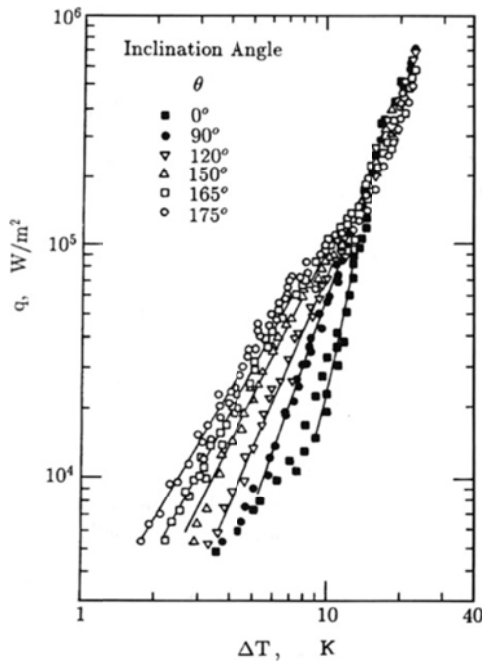
در شکل ۹، شکل حباب درست قبل از جدایش از سطح برای سوپرهیت دیواره $\Delta T = 8.5 K$ و زاویه تماس $\phi = 50^\circ$ نشان داده شده است.



شکل ۹ پیش بینی شکل حباب در هنگام جدایش به ازای $\Delta T = 8.5 K$ و $\phi = 50^\circ$ [۶۳]

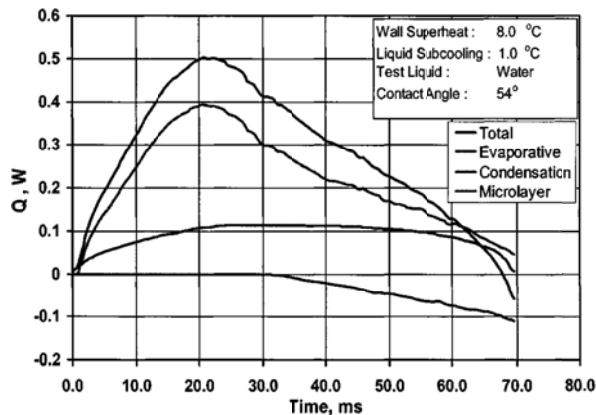
شکل حباب بدست آمده از مشاهدات بصری در سمت چپ و شکل حباب بدست آمده از شبیه سازی عددی در وسط شکل ۹ آمده است. در سمت راست، اشکال محاسبه شده و مشاهده شده جهت مقایسه روی هم قرار گرفته اند. با وجود برخی تفاوت ها تطابق نسبتاً خوبی بین هردو شکل دیده می شود.

ابراجیت و دیر [۱۳] تأثیر خواص سیال، ترشوندگی سطح و زاویه تماس بر دینامیک حباب و انتقال حرارت را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که هر دو متغیر قطر جدایش حباب و دوره رشد برای PF5060 در مقایسه با آب بسیار کوچکتر است. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، پیش بینی های عددی با داده های تجربی برای هر دو سیال مطابقت خوبی دارند. شکل ۱۱ نیز نتایج شبیه سازی های عددی را نشان می دهد که با تغییر پارامتریک زاویه تماس دو مایع انجام شده است.



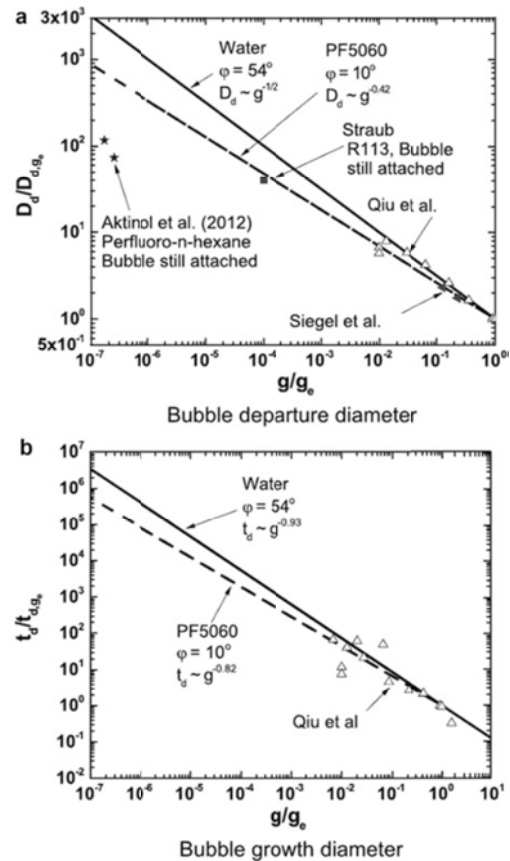
شکل ۱۴ داده های جوشش هسته ای توسط نیشیکاوا و همکاران [۶۹] بر روی سطوح افقی با جهت گیری های مختلف

نرخ کل انتقال حرارت از دیواره و سهم مشارکت میکرو لایه، تبخیر در اطراف حباب و چگالش در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



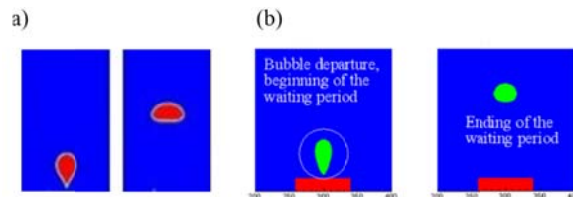
شکل ۱۵ توزیع نرخ انتقال حرارت کل میان مکانیزم های مختلف دخیل در فرآیند به ازای ($\Delta T_{Sub} = 1 K$ و $\Delta T = 8 K$)

پارتیشن بندی انرژی حرارتی منتقل شده از سطح به فازهای مایع و بخار که از شبیه سازی های عددی تعیین شده است، در شکل ۱۶ برای یک چرخه رشد و جدایش حباب نشان داده شده است. مشاهده می شود که هنگامی که قطر پایه حباب بخار تقریباً در حداکثر مقدار خود باشد، نرخ انرژی مصرف شده برای تولید بخار بیشترین است. مقادیر یکپارچه زمانی نشان می دهد که



شکل ۱۲ الف) وابستگی قطر جدایش بی بعد حباب و ب) وابستگی دوره رشد بی بعد حباب به سطح جاذبه [۶۴-۶۷]

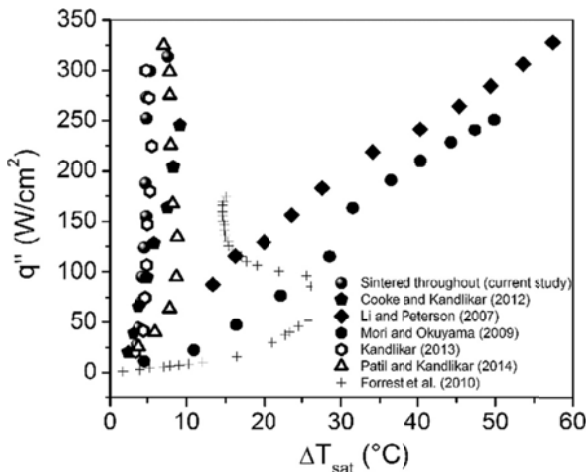
شکل ۱۳ رشد و جدایش حباب را برای یک نمونه سطح آب دوست نشان می دهد. هر دو روش VOF و LB نشان می دهند که کل حباب از سطح گرمایده خارج شده و هیچ بخاری در مرز جامد انباشته نشده است.



شکل ۱۳ رشد و جدایش حباب برای سطح آب دوست با استفاده از الف) روش VOF ب) روش LB [۶۸]

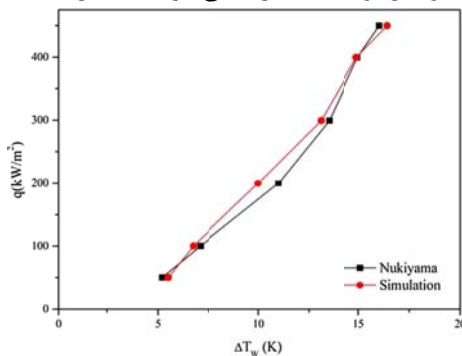
نیشیکاوا و همکاران [۶۹] جوشش هسته ای را بر روی صفحات افقی با زاویه های انحراف مختلف نسبت به راستای افق (شکل ۱۴) برای آب اشباع در فشار یک اتمسفر به عنوان سیال کاری مطالعه نمودند. مشخص شد که در جوشش هسته ای جزئی، نرخ انتقال حرارت با افزایش زاویه شیب سطح گرمایده افزایش می یابد.

مقادیر سوپرهیت های دیواره آن ها فراتر از 50° بود، که نامطلوب است.



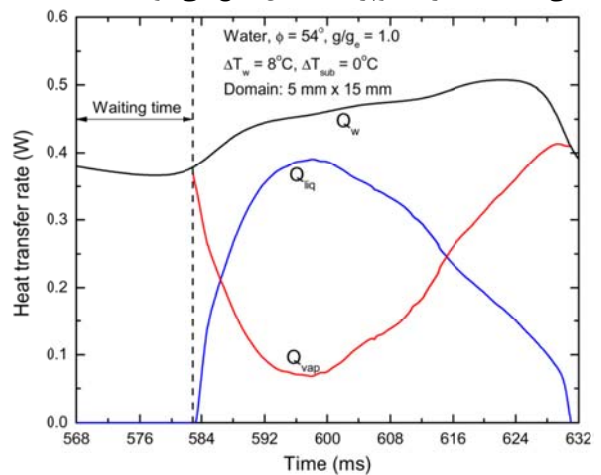
شکل ۱۸ مقایسه ی منحنی جوشش استخری با آزمایش های تجربی مشابه موجود در ادبیات کار [۷۱-۷۵]

۸- اعتبارسنجی و صحت سنجی نتایج حل عددی
 نتایج حاصل از شبیه سازی های عددی معمولاً دقت کمتری در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دقیق دارند زیرا این خطاها در روش های عددی غیرقابل حذف هستند. از این رو باید اعتبار و صحت آن ها با مطالعات تجربی مشابه مورد بررسی قرار گیرد. منحنی جوشش نوکیاما هرگز مورد اختلاف نبوده است، اما این شکل با توجه به شرایط گذرا یا حالت پایدار موضوع بحث بوده است. بنابراین سنگ محک مهمی جهت اعتبارسنجی و صحت سنجی داده های حاصل از شبیه سازی عددی است. جیانسنگ و همکاران [۷۶] نتایج عددی حاصل از شبیه سازی جوشش استخری در فشار محیط عادی بر روی سطوح گرمادیده و سطوح گرمادیده ی اصلاح شده با ۳۶ نیم کره در جهات مختلف را با منحنی جوشش نوکیاما اعتبارسنجی کردند. (شکل ۱۹)



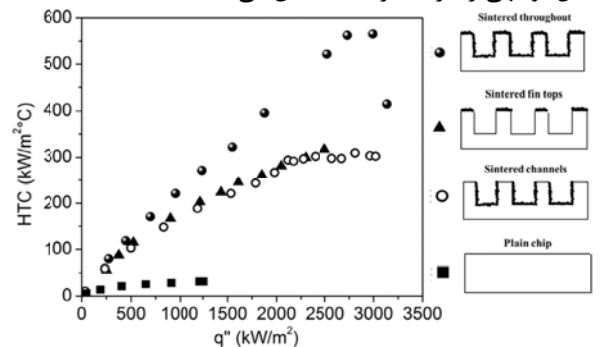
شکل ۱۹ اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی عددی [۷۶] با منحنی نوکیاما

حدود ۳۰٪ از انرژی دیواره در تولید بخار استفاده می شود، در حالی که ۷۰٪ صرف سوپرهیت شدن مایع می شود.



شکل ۱۶ تغییرات نرخ انتقال حرارت از دیواره به فاز مایع و بخار برحسب زمان [۴۲، ۱۳]

در راستای بررسی تأثیر سطوح اصلاح شده بر ضریب انتقال حرارت^۱ و شار حرارتی، تغییرات HTC برحسب شار حرارتی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. روند کلی نشان می دهد که HTC با افزایش شارهای حرارتی افزایش می یابد. اگرچه نشانگر آخرین داده ی مربوط به سطح سراسر متخلخل در نمودار، افت قابل توجهی را در مقدار HTC نشان می دهد.

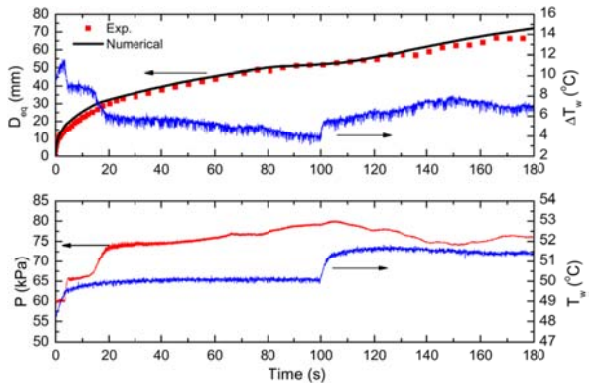


شکل ۱۷ عملکرد انتقال حرارت سطوح متخلخل انتخابی با استفاده از دمای بالای پره [۷۰]

نمودارهای جوشش استخری برای تراشه با ساختار سراسر متخلخل، با نمودارهای مشابه برای تکنیک های موجود در ادبیات کار در شکل ۱۸ مقایسه شده است. مقدار CHF در مقایسه با مقادیر گزارش شده توسط کندلیکار [۷۱] و پاتیل و کندلیکار [۷۲] نسبتاً نزدیک بود. لی و پترسون [۷۳] و موری و اوکیوما [۷۴] مقادیر CHF بالاتری را گزارش کرده اند. هرچند

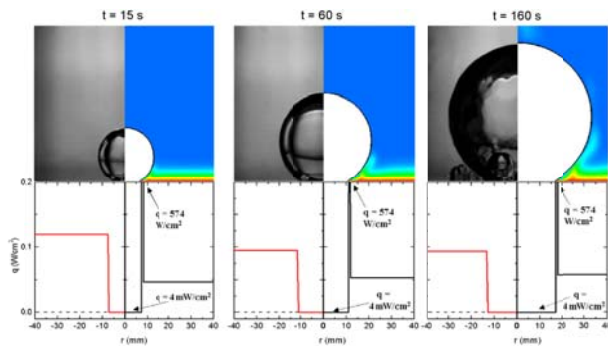
^۱ Heat Transfer Coefficient (HTC)

شبیه سازی کردند. در شکل ۲۲-الف، داده های کمی از قطر معادل حباب برحسب تابعی از زمان و همچنین تغییرات سوپرهیت دیواره برحسب زمان ترسیم شده است و در شکل ۲۲-ب، تغییرات فشار سیستم و دمای دیواره در طی رشد حباب برحسب زمان نشان داده شده است.



شکل ۲۲ مقایسه داده های رشد تک حباب برحسب زمان با نتایج حاصل از شبیه سازی های عددی [۴۲،۷۸]

شکل ۲۳، در زمان های مختلف شکل حباب و شار حرارتی در زیر حباب و ناحیه اطراف آن را که با شبیه سازی های عددی پیش بینی شده با آنچه در آزمایش ها مشاهده شده مقایسه می کند.

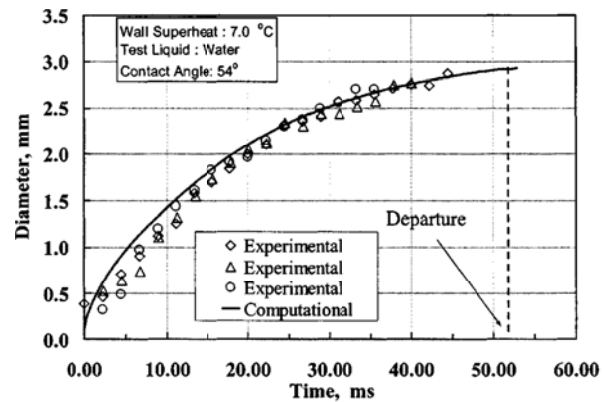


شکل ۲۳ مقایسه داده های تجربی با نتایج حاصل از شبیه سازی های عددی [۷۸،۴۲]

به منظور امکان مقایسه ی نتایج شبیه سازی با مدل های موجود و آزمایش های انجام شده پیرامون CHF [۷۹-۸۱]، داده های CHF بی بعد سازی شده در شکل ۲۴ ترسیم شده است و روندهای کیفی CHF برحسب زاویه تماس با استفاده از داده های حاصل از شبیه سازی ها، مدل ها و آزمایش ها مقایسه می شوند. برای سطوح آب دوست همان طور که در این شکل نیز مشاهده می شود، تطابق بین مدل و شبیه سازی های عددی مطلوب نیست و داده های عددی به دلیل نوسانات قابل توجه در شار حرارتی

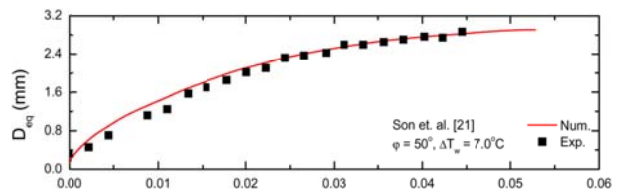
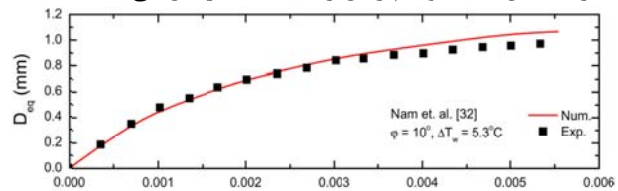
آن ها نتیجه گرفتند که سطوح گرمادیده با ساختارهای اصلاح شده در مقایسه با سطح گرمادیده ی ساده عملکرد انتقال حرارتی بهتری دارند و می توانند سایت های هسته زا بی بیشتری فراهم کنند.

در شکل ۲۰، قطر حباب پیش بینی شده از شبیه سازی های عددی برحسب تابعی از زمان با قطر معادل بدست آمده از آزمایش ها مقایسه می شود. پیش بینی ها برای آب اشباع در فشار یک اتمسفر با زاویه تماس استاتیکی $\phi = 54^\circ$ بر روی یک ویفر سیلیکونی و برای سوپرهیت دیواره $\Delta T = 7\text{ K}$ صورت گرفت.



شکل ۲۰ مقایسه قطر حباب پیش بینی شده توسط شبیه سازی های عددی با داده های تجربی برای $\Delta T = 7\text{ K}$ و $\phi = 54^\circ$

شکل ۲۱ مقایسه ی بین پیش بینی های عددی و داده های تجربی برای رشد حباب آب در فشار اتمسفریک در دو زاویه تماس مختلف ($\phi = 10^\circ$ و $\phi = 50^\circ$) و سطح جاذبه $g/g_e = 1$ را نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش زاویه تماس، هم قطر جدایش حباب و هم زمان رشد حباب افزایش می یابد.



شکل ۲۱ مقایسه ی رشد حباب پیش بینی شده به صورت عددی با داده های تجربی برای آب به ازای دو زاویه تماس مختلف [۱۰،۷۷]

اخیراً دیر و همکاران [۷۸] رشد تک حباب را برای C6F14 به عنوان سیال کاری تحت شرایط میکرو جاذبه ($g/g_e \sim 10^{-7}$)

جانبی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد در حالی که ارتفاع همواره در حال افزایش است. درون حباب، بخار در مرکز بالا می رود و در امتداد سطح حباب به سمت پایین جریان می یابد. سرعت سیال در سطح مشترک تغییر جهت می دهد و دو گردابه در سمت چپ و راست در قسمت وسط حباب وجود دارد.

با افزایش زاویه تماس، تنش سطحی و نیز حجم بخار مورد نیاز برای جدایش حباب افزایش می یابد. بنابراین قطر جدایش حباب با افزایش زاویه تماس افزایش می یابد. همچنین قطر حباب های جدا شده از سطح جوشش با افزایش دمای هیتر کاهش می یابد در حالی که فرکانس جدایش حباب ها افزایش می یابد. زاویه تماس میزان ترشوندگی سطح را تعیین می کند و تأثیر مستقیم بر دینامیک تشکیل حباب دارد. هرچه این زاویه کوچکتر و به صفر نزدیکتر باشد، قابلیت ترشوندگی سطح بیشتر و هرچه زاویه تماس به ۱۸۰ نزدیکتر باشد، قابلیت ترشوندگی سطح کم تر است. همچنین جدایش حباب ها از سطح با بهبود ترشوندگی سطح شتاب می گیرد.

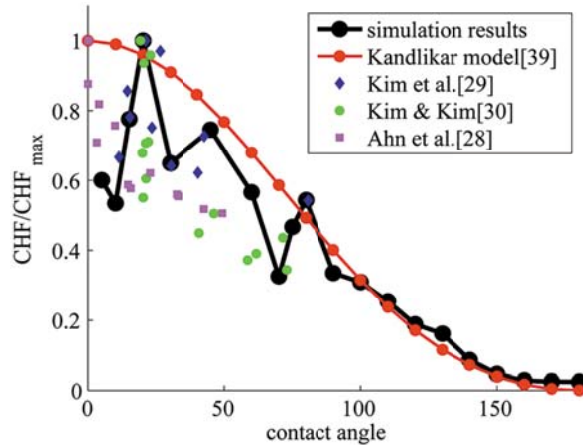
با افزایش دمای سوپر هیت دیواره، نرخ تولید بخار یا نرخ رشد حباب افزایش می یابد و در نتیجه دوره ی رشد کاهش می یابد. با توجه به نمودار شار حرارتی بر حسب سوپر هیت دیواره، با افزایش دمای سوپر هیت دیواره قطر جدایش حباب و مقدار شار حرارتی افزایش می یابد.

از شبیه سازی های عددی می توان به عنوان ابزاری مؤثر برای مطالعه ی تأثیر متغیرهای مختلف سیستم استفاده کرد. با این حال، آن ها جایگزینی برای آزمایش های دقیق نیستند و نتایج تجربی برای اعتبار سنجی شبیه سازی ها مورد نیاز است. لازم به ذکر است که فرض دوبعدی در نظر گرفتن مسئله ی جوشش استخری، باعث کاهش میزان تطابق با نتایج تجربی می شود و شبیه سازی های سه بعدی در عین حال که از پیچیدگی های بسیار زیادی برخوردارند ولی دقت حل بالاتری دارند.

۱۰- فهرست علائم و اختصارات

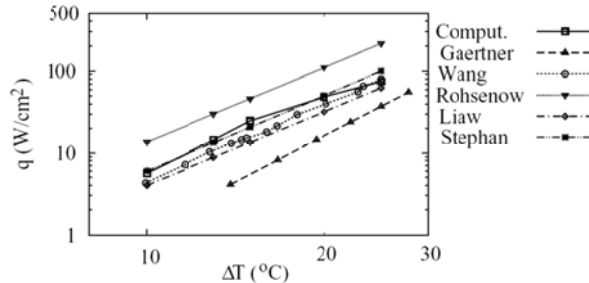
A	ثابت هاماکر (J)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)
Co	عدد کورانت
D_{ds}	قطر جدایش تک حباب (m)
D_0	قطر مشخصه
ΔT_e	اختلاف دمای بین سطح و سیال (K یا °C)
f	فرکانس جدایش حباب (Number/s)
\bar{f}	ترم چشمه در معادله ی مومنوم (N/m ³)

گذرا پراکنده هستند. در واقع، داده های غیریکنواخت مشابهی از آزمایش های تجربی برای سطوح آب دوست بدست می آید.



شکل ۲۴ CHF بی بعد سازی شده با حداکثر مقدار CHF در شبیه سازی، مدل و داده های تجربی بر حسب زاویه تماس

شکل ۲۵ مقایسه ی منحنی جوشش هسته ای پیش بینی شده با شبیه سازی عددی در حالت دوبعدی را با نتایج تجربی موجود در ادبیات کار نشان می دهد. شارهای حرارتی به دست آمده از تجزیه و تحلیل عددی دو بعدی در حدود ۲۵ درصد با موارد پیش بینی شده توسط استفان و عبدالسلام [۳۲] در محاسبه اتلاف حرارتی اختلاف دارند. داده های بدست آمده توسط گرتنر [۸۲] بالاتر از مقادیر واقعی پیش بینی شده است که این انتظار نیز می رود زیرا زاویه ی تماس در آزمایش های گرتنر بسیار کوچکتر از مقادیر استفاده شده در شبیه سازی های عددی بود.



شکل ۲۵ مقایسه نتایج عددی با داده ها و روابط تجربی [۳۰،۳۲،۸۲]

۹- نتیجه گیری و جمع بندی

با بررسی پژوهش ها و مطالعات عددی مختلف پیرامون مبحث جوشش استخری بر روی سطوح مختلف ساده و اصلاح شده از شروع جوشش هسته زایی تا شار حرارتی بحرانی، می توان نتیجه گیری های کلی را به صورت زیر خلاصه نمود:

در طی فرایند رشد حباب، شکل حباب از نیمکره به بیضی تبدیل می شود و در نهایت به صورت گلابی شکل در می آید. قطر

- [8] T. Kunugi, "Brief review of latest direct numerical simulation on pool and film boiling," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 44, no. 8, pp. 847-854, 2012.
- [9] Dhir, V. K., "Mechanistic Prediction of Nucleate Boiling Heat Transfer—Achievable or a Hopeless Task?," *ASME J. Heat Transfer*, 128(1), pp.1-12, 2006.
- [10] Son, G., Dhir, V. K., and Ramanujapu, N., "Dynamics and Heat Transfer Associated With a Single Bubble During Nucleate Boiling on a Horizontal Surface," *ASME J. Heat Transfer*, 121(3), pp. 623-632, 1999.
- [11] Sussman, M., Smereka, P., and Osher, S., "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow," *J. Comput. Phys.*, 114, pp. 146-159, 1994.
- [12] Hsu H-Y, Lin M-C, Popovic B, Lin C-R, Patankar NA (2017) A numerical investigation of the effect of surface wettability on the boiling curve. *PLoS ONE* 12(11): e0187175.
- [13] Abarajith, H. S., and Dhir, V. K., 2002, "Effect of Contact Angle on the Dynamics of a Single Bubble During Pool Boiling Using Numerical Simulations," Proceedings of IMECE2002 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, New Orleans, LA, Paper IMECE2002-33876, pp. 467-475.
- [14] P. CHENG, C. ZHANG, S. GONG, "Lattice Boltzmann Simulations of Interfacial Effects on Saturated Pool Boiling Curves for Horizontal Heated Surfaces", *J. Heat Transfer*, 139, 11, 110801 (2017).
- [15] X.J. Ma, P. Cheng, Numerical simulation of complete pool boiling curves: from nucleation to critical heat flux through transition boiling to film boiling, *Nucl. Sci. Eng.* (2019).
- [16] L. Li et al., "Conjugate Heat and Mass Transfer in the Lattice Boltzmann Equation Method", *Phys. Rev. E*, 89, 4, 043308 (2014).
- [17] A.N. Georgoulas, M. Marengo, "Numerical Simulation of Pool Boiling: The Effects of Initial Thermal Boundary Layer, Contact Angle and Wall Superheat", Conference: 14th UK Heat Transfer Conference, At Edinburgh, United Kingdom, (2015).
- [18] X. B. Zhang, X. Wei, J. Chen, Y. Wang, K. Tang, "CFD simulations and experimental verification on nucleate pool boiling of liquid nitrogen," *Physics Procedia*, vol. 67, pp. 569-575, 2015.
- [19] Jing Yang, Liejin Guo, Ximin Zhang, "A numerical simulation of pool boiling using CAS model", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003) 4789 - 4797.
- [20] S. Nukiyama, The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure, *J. Jap. Soc. Mech. Eng.* 37 (1934) 367-374.
- [21] Bankoff, S. G., "Entrapment of Gas in the Spreading of Liquid over a Rough Surface," *AIChE J.*, 4, 24, 1958.
- [22] Wang, C. H., and V. K. Dhir, "On the Gas Entrapment and Nucleation Site Density During Pool Boiling of Saturated Water," *J. Heat Transfer*, 115, 670 (1993a).
- [23] Hsu, Y. Y., 1962, "On the Size Range of Active Nucleation Cavities on a Heating Surface," *ASME J. Heat Transfer*, 84, pp. 207-216.
- [24] Bergles, A. E., and Rohsenow, W. M., "The Determination of Forced-Convection Surface-Boiling Heat Transfer," *ASME J. Heat Transfer*, 1, pp. 365-372, 1964.
- [25] Lee, R. C., and Nyadhil, J. E., "Numerical Calculation of Bubble Growth in Nucleate Boiling From Inception to Departure," *ASME J. Heat Transfer*, 111(2), pp. 474-479, 1989.
- [26] Mei, R., Chen, W., and Klausner, J. F., 1995, "Vapor Bubble Growth in Eterogeneous Boiling—1. Growth Rate and Thermal Fields," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 38, pp. 921-934.
- [27] N.S. Srinivas, R. Kumar, "Prediction of bubble growth rates and departure volumes in nucleate boiling at isolated sites", *Int. J. Heat Mass Trans.* 27 (1984) 1403-1409.
- [28] A. Das, P. Das, P. Saha, Heat transfer during pool boiling based on evaporation from micro and macrolayer, *Int. J. Heat Mass Trans.* 49 (2006) 34 87-34 99.
- [29] Ying He, Masahiro Shoji, Shigeo Maruyama, "Numerical study of high heat flux pool boiling heat transfer", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44 (2001) 2357 - 2373.
- [30] W.M. Rohsenow, "A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids", M.I.T. Division of Industrial Cooperation, 1951.
- [31] B.B. Mikic and W.M. Rohsenow, "A New Correlation of Pool Boiling Data Including the Effect of Heating Surface Characteristics," *J. Heat Transfer*, 9, 245-250 (1969).
- [32] Stephan K, Adbelsalam M., "Heat transfer correlation for natural convection boiling," *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 23:73-87, 1980.
- [33] Cooper, M. G., "Heat Flow Rates in Saturated Nucleate Pool Boiling: A Wide Ranging Examination Using Reduced Properties," *Adv. Heat Transfer*, 16, 155 (1984a).
- [34] Cooper, M. G., "Saturation Nucleate Boiling: A Simple Correlation," *Int. Chem. Engineering Symp. Ser.*, 86, 276 (1984b).
- [35] W. Fritz, Berechnung des maximalen Volumen von Dampfblasen, *Physikalische Zeitschrift* 36 (1935) 379-384.
- [36] M. JAKOB and W. LINKE, *Heat Transfer*, Vol. 1, p. 642. John Wiley, New York (1949).

h_{fg}	آنتالپی تبخیر (J/Kg)
\dot{m}_{pq}	شار جرمی از فاز p به فاز q (Kg/s)
M	جرم مولکولی
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
p'	ترم تصحیح فشار
P_r	فشار کاهیده
Pr	عدد پرنتل
q''	شار حرارتی ($\frac{W}{m^2}$)
R	شعاع حباب (m)
r_c	شعاع حفره های هسته زایی (m)
T	دما (K)
t_0	زمان مشخصه (s)
\vec{u}	میدان سرعت سیال ($m.s^{-1}$)
علائم یونانی	
α	کسر حجمی فازی
ε	زبری سطح
μ	لزجت دینامیکی ($kg.m^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ_{lv}	کشش سطحی ($N.m^{-1}$)
τ	تنش برشی دیواره
زیر نویس ها	
0	شرایط اولیه
Cr.	شرایط بحرانی
d.	جدایش
l	فاز مایع
Sat.	حالت اشباع
Sub.	حالت زیر سرد
v	فاز بخار
w	دیواره

۱-۱- مراجع و مآخذ

- [1] S. Osher and J. A. Sethian. Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithms base on Hamilton-Jacobi formulations. *Journal of Computational Physics*, 79:12-49, 1988.
- [2] A. Mukherjee and S. G. Kandlikar. Numerical study of single bubbles with dynamic contact angle during nucleate pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50:127-138, 2007.
- [3] C. W. Hirt and B. D. Nichols. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39:201-225, 1981.
- [4] B. Shu. *Numerische Simulation des Blasensiedens mit Volume-Of Fluid-und Level-Set-Methode*. PhD thesis, Technische Universität Darmstadt, 2009.
- [5] G. Hazi and A. Markus, "On the bubble departure diameter and release frequency based on numerical simulation results," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 5-6, pp. 1472-1480, 2009.
- [6] S. O. Unverdi and G. Tryggvason. A front-tracking method for viscous, incompressible, multi-fluid flows. *Journal of Computational Physics*, 100:25-37, 1992.
- [7] A. Esmaeeli and G. Tryggvason. A front tracking method for computations of boiling in complex geometries. *International Journal of Multiphase Flow*, 30:1037-1050, 2004.

- [67] Aktinol E, Warriar GR, Dhir VK (2014) Single bubble dynamics under microgravity conditions in presence of dissolved gas in the Liquid. *Int J Heat Mass Transf* 79:251-268.
- [68] Gong S, Cheng P. Lattice Boltzmann simulations for surface wettability effects in saturated pool boiling heat transfer. *Int J Heat Mass Transfer*. 2015; 85:635±646.
- [69] Nishikawa K, Fujita Y, Ohta H (1984) Effect of surface configuration on nucleate boiling heat transfer. *Int J Heat Mass Transf* 7:620-624.
- [70] A. Jaikumar, S.G. Kandlikar, Enhanced pool boiling heat transfer mechanisms for selectively sintered open microchannels, *Int. J. Heat Mass Transf*. 88 (2015) 652-661.
- [71] S.G. Kandlikar, Controlling bubble motion over heated surface through evaporation momentum force to enhance pool boiling heat transfer, *Appl. Phys. Lett.* 102 (5) (2013) 051611 (5pp).
- [72] C.M. Patil, S.G. Kandlikar, Pool boiling enhancement through microporous coatings selectively electrodeposited on fin tops of open microchannels, *Int. J. Heat Mass Transfer* 79 (2014) 816-828.
- [73] C. Li, G.P. Peterson, Parametric study of pool boiling on horizontal highly conductive microporous coated surfaces, *J. Heat Transfer* 129 (11) (2007) 1465.
- [74] S. Mori, K. Okuyama, Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media, *Int. J. Multiphase Flow* 35 (10) (2009) 946-951.
- [75] D. Cooke, S.G. Kandlikar, Effect of open microchannel geometry on pool boiling enhancement, *Int. J. Heat Mass Transfer* 55 (4) (2012) 1004-1013.
- [76] W. Jiansheng, D. Mengzhen, L. Xueling, "Numerical simulation of pool boiling with special heated surfaces", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 130 (2019) 460 - 468.
- [77] Nam, Y., Aktinol, A., Dhir, V. K., and Ju, Y. S., 2011, "Single Bubble Dynamics on a Superhydrophilic Surface With Artificial Sites," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 54, pp. 1572-1577.
- [78] Dhir, V. K., Warriar, G. R., Aktinol, E., Chao, D., Eggers, J., Sheredy, W., and Booth, W., "Nucleate Pool Boiling Experiments (NPBX) on the International Space Station," *Microgravity Sci. Technol.*, 24, pp. 307-325, 2011.
- [79] Kim HD, Kim MH. Effect of nanoparticle deposition on capillary wicking that influences the critical heat flux in nanofluids. *Applied Physics Letters*. 2007; 91:014104.
- [80] Ahn HS, Lee C, Kim J, Kim MH. The effect of capillary wicking action of micro/nano structures on pool boiling critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012; 55:89±92.
- [81] Kim SJ, Bang IC, Buongiorno J, Hu LW. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007; 50:4105±4116.
- [82] Gaertner RF (1965) Photographic study of nucleate pool boiling on a horizontal surface. *ASME J Heat Transf* 87:17-29
- [37] N. Zuber. Nucleate boiling. The region of isolated bubbles and the similarity with natural convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 6:53-78, 1963.
- [38] P. W. McFADDEN and P. Grassmann, The relation between bubble frequency and diameter during nucleate pool boiling, *Int. J. Heat Moss Transfer* 5, 169 (1962).
- [39] R. Cole. Bubble frequencies and departure volumes at subatmospheric pressures. *AIChE Journal*, 13:779-783, 1967.
- [40] H. J. IVEY, "Relationships Between Bubble Frequency, Departure Diameter And Rise Velocity In Nucleate Boiling", *Int. J. Heat And Mass Transfer*, Vol. 10, pp. 1023-1040, 1967.
- [41] Judd RL, Hwang KS, "A comprehensive model for nucleate boiling heat transfer including microlayer evaporation," *J Heat Transf* 98:623-629, 1976.
- [42] Dhir V.K., Warriar G.R., Aktinol E.. Numerical simulation of pool boiling: A review, *J Heat Transfer*. 2013; 135:061502±1.
- [43] Kutateladze SS (1952) Heat transfer in condensation and boiling. *US AEC Report AECU-3770*
- [44] S.S. Kutateladze, On the transition to film boiling under natural convection, *Kotloturbostrenie 3 (1994) 10*.
- [45] N. Zuber, "On the stability of boiling heat transfer", *ASME J. Heat Transfer* 80 (1958) 711-720.
- [46] Kandlikar S.G., "A Theoretical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation. *J. Heat Transf.* 2001;123:1071-1079.
- [47] A. Singh, B.B. Mikic, W.M. Rohsenow, Active sites in boiling, *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, 1976,98,401-406.
- [48] M. Pezo, V. Stevanovic, Numerical prediction of critical heat flux in pool boiling with the two-fluid model, *Int. J. Heat Mass Transfer* 54 (15-16) (2011) 3296-3303.
- [49] M.L. Pezo, V.D. Stevanovic' , Numerical prediction of nucleate pool boiling heat transfer coefficient under high heat fluxes, *Therm. Sci.* 20 (01) (2016), 138-138.
- [50] M. Mohammadi, M. Khayat, Experimental investigation of the effect of roughness orientation of surface on motion of bubbles and critical heat flux, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 531-541, (2018).
- [51] G. Tryggvason, B. Bunner, A. Esmaeeli, D. Juric, N. Al-Rawahi, W. Tauber, J. Han, S. Nas, and Y.-J. Jan. A front-tracking method for the computations of multiphase flow. *Journal of Computational Physics*, 169:708-759, 2001.
- [52] S. aus der Wiesche. Bubble growth and departure during nucleate boiling: The occurrence of heat flux reversal. In *Proceedings of the 4th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer*, 2005.
- [53] Christian Kunkelmann, Peter Stephan, CFD simulation of boiling flows using the volume-of-fluid method within OpenFOAM, *Numer. Heat Transfer Part A Appl.* 56 (8), 631-646, 2009.
- [54] S. W. J. Welch and J. Wilson. A volume of fluid based method for fluid flows with phase change. *Journal of Computational Physics*, 160:662-682, 2000.
- [55] S. W. J. Welch and T. Radichi. Numerical computation of film boiling including conjugate heat transfer. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 42:35-53, 2002.
- [56] S. Hardt and F. Wondra. Evaporation model for interfacial flows based on a continuum-field representation of the source terms. *Journal of Computational Physics*, 227:5871-5895, 2008.
- [57] J.U. Brackbill, D.B. Kothe, and C. Zemach, "A continuum method for modeling surface tension," *J. Comput. Phys.*, vol. 100, pp. 335-354, 1992.
- [58] W.H. Lee, A pressure iteration scheme for two phase flow modeling, in: T.N. Veziroglu (Ed.), *Multiphase Transport Fundamentals, Reactor Safety, Applications*, vol. 1, Hemisphere Publishing, Washington, DC, 1980.
- [59] C.R. Kharangate, I. Mudawar, "Review of computational studies on boiling and condensation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 108, pp. 1164-1196, 2017.
- [60] R. I. Issa, A. D. Gosman, and A. P. Watkins. The computation of compressible and incompressible recirculating flows by a non-iterative implicit scheme. *Journal of Computational Physics*, 62:66-82, 1986.
- [61] J. G. Truong and P. C. Wayner. Effects of capillary and van der Waals dispersion forces on the equilibrium profile of a wetting liquid: Theory and experiment. *Journal of Chemical Physics*, 87:4180-4188, 1987.
- [62] P. C. Wayner. Intermolecular forces in phase-change heat transfer: 1998 Kern Award Review. *AIChE Journal*, 45:2055-2068, 1999.
- [63] V. K. Dhir. Numerical simulations of pool-boiling heat transfer. *AIChE Journal*, 47:813-834, 2001.
- [64] Qiu, D. M., Dhir, V. K., Hasan, M. M., and Chao, D., 2000, "Single and Multiple Bubble Dynamics During Nucleate Boiling Under Low Gravity Conditions," *Proceedings of the National Heat Transfer Conference*, Pittsburgh, PA.
- [65] Straub, J., 2001, "Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity," *Adv. Heat Transfer*, 35, pp. 58-172.
- [66] Siegel R, Keshock EG (1964) Effect of reduced gravity on nucleate boiling bubble dynamics in saturated water. *AIChE J* 10:509-517.