

# Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(9) (2020) 623-626 DOI: 10.22060/mej.2019.15192.6055

# The Effect of Surface Types on Bubble Dynamic Formation During Nucleate Pool Boiling by Use of Lee and Tanasawa Phase Change Models

### S. A. Hosseini, R. KouhiKamali\*

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

### **Review History:**

Received: 27 Oct. 2018 Revised: 16 Jan. 2019 Accepted: 11 Mar. 2019 Available Online: 14 Mar. 2019

#### **Keywords:**

Nuclear boiling Numerical simulation Surface contact angle Phase change models Heat and mass transfer

variety and effectiveness of two-phase models. Boiling is one of the efficient methods in high heat transfer. In the boiling simulation, in addition to choosing an appropriate heat and mass transfer model, it will be important to evaluate the surfaces in which boiling occurs on it. A problem of nucleate boiling of saturated liquid is numerically simulated in this investigation by use of volume of fluid model together with the geo-reconstruction of the interface. One-dimensional Stephan problem as sucking interface problem is solved for verification the numerical solver. Two-phase change models of the Lee model and the Tanasawa model are used in order to calculate the rate of phase change and source terms. The results of nuclear boiling are investigated on the hydrophilic surface, hydrophobic surface, and the surface with contact angle 90 degrees. The results show that boiling on hydrophobic surfaces causes the detachment of larger bubbles with a larger heat transfer rate. Besides, bubble merging depending on the density of nucleation sites leads the nuclear boiling on the hydrophobic surface to film boiling.

ABSTRACT: Numerical simulation of boiling has always been a challenging problem in terms of the

### 1. Introduction

The aim of this paper was to numerically simulate the boiling phenomenon. The heat transfer rate during boiling is more than high enough to be used in many industrial applications, including power plants and cooling of different electronic devices [1]. Over the past few decades, advances and breakthroughs in the field of boiling heat transfer, its related parameters, and the associated limitations in optimizing different applications of boiling heat transfer have led to a widespread study of boiling heat transfer fundamentals. Despite these efforts, due to a number of uncertainties, several aspects of this phenomenon are still not fully understood.

Among the multi-phase models in the Euler-Euler approach, the Eulerian two-phase flow model solves a set of n-momentum and continuity equations for each phase separately. This model has little success in boiling simulation, especially in accurate interface capturing, bubble generation and detachment. In contrast, the numerical methods that track the interface are more reliable. The Volume of Fluid (VOF) is a surface tracking method of the Euler-Euler approach, applied to a fixed mesh. So far, different models with their own special properties are presented for phase change. Tanasawa [2] presented a model by assuming the constant saturation temperature at both sides of the interface. Lee [3] also presented a phase change model which assumes that the

boiling mass transfer occurs under constant pressure across the interface. Most researches have benefited one of the two above-mentioned phase change models to study boiling and condensation problems. While they have been less used to simulate the single-bubble nucleate boiling, as discussed in this paper.

In the present study, the effects of the surface type and fluid contact angle were assessed in each of the phase change models as an important parameter in the boiling process. The purpose of this study was to examine the effects of different types of surfaces on the bubble formation dynamics in the pool boiling phenomenon. This was achieved using Lee and Tanasawa phase change models on the hydrophilic, hydrophobic and 90-degree contact angle surfaces. The amount of vapor, and also the size of the bubble formed due to the boiling was evaluated in each of these conditions. Moreover, parameters such as the size and shape of the residual vapor on the surface, as well as the frequency and radius of bubble detachment were also investigated. Bubble merging and the effect of three distinct nucleate sites on the hydrophilic, hydrophobic and normal surfaces in our described phase change models were studied and the associated results were analyzed. A one-dimensional sucking interface problem, proposed by Stephan, was solved and the results were compared to the analytical solution in order to ensure the validity of the User-Defined Function (UDF) codes and the numerical solver. The numerical and

\*Corresponding author's email: kouhikamali@guilan.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

analytical results were in a good agreement which verified the acceptable performance of the solver. Nevertheless, the authors of this paper have already verified the performance of this code and its solver in different ways in another article [4].

#### 2. Methodology

In the present study, a 2-D nucleate boiling has been investigated numerically. A flat surface possessing the characteristics of a heater with a no-slip condition and constant temperature was considered as the geometry of our study. The temperature is  $\Delta T$  higher than the fluid saturation temperature. An initially a 2-mm diameter bubble was placed at the surface center of the heater in order to initiate the boiling phenomenon.

Two continuity equations were utilized to determine the mass conservation of the liquid and vapor phase, and also the mass transfer rate between these two phases. The momentum and energy equations for the homogeneous fluid are applied for fluid flow and heat transfer simulation. Two widespread models of Tanasawa and Lee used in simulating the phase change problem are given in Eq. (1) and (2), respectively.

$$\dot{m}'' = \frac{2\gamma}{2-\gamma} \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \frac{\rho_{\rm g} h_{\rm fg} \left(T - T_{\rm sat}\right)}{T_{\rm sat}^{3/2}} \tag{1}$$

$$\Gamma_{v} = \begin{cases} \lambda_{v} \rho_{f} \alpha_{f} \frac{\left(T_{f} - T_{s}\right)}{T_{s}} & , T_{f} \ge T_{s} \\ 0 & , T_{f} < T_{s} \end{cases}$$
(Y)

In the present study, the problem is simulated by Fluent software. All the source terms of the phase change process are defined separately as a UDF code. The Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics (QUICK) scheme is applied for discretizing the convection terms of momentum and energy equations. The PREssure STaggering Option (PRESTO) is employed for discretizing the pressure term of the momentum equation. This discretization method is usually applied for the flows involving steep pressure gradients or in strongly curved domains just like what exists at the bubble interface. The pressure-velocity coupling algorithm of the Pressure Implicit Splitting of Operators (PISO) is considered for pressure correction which is useful for unsteady flow problems. In the present numerical simulation of boiling, a structural uniform grid with 12288 quadrilateral cells is used. The number of cells is chosen according to the mesh independence study.

#### 3. Results and Discussion

Fig.1 depicts the single-bubble formation dynamics on a flat surface in the pool boiling phenomenon. This figure essentially shows the numerical simulation output in the form of the volume fraction contours of vapor in equal time intervals.

The amount of remaining vapor on the surface during bubble detachment, as well as the contact angle between the vapor and the solid surface, determines the size and frequency



Fig. 1. . Contours of the volume fraction of a single bubble in nucleate boiling on the normal surface in Lee model

of vapor bubble generation in subsequent cycles of boiling. Therefore, the bubble root at the time of detachment from the surface, the amount of remaining vapor, and the angles between the vapor and the surface in Lee model are presented in Fig. 2.



Fig. 2. . The root of separating bubble in the Lee model

The bubble formation dynamics of the boiling phenomenon while planting three nucleation sites are presented in Fig.3. This type of simulation was applied in order to study the effects of 1) bubbles on each other, 2) interference and bubble merging on different types of surfaces, and 3) two-phase change models of Lee and Tanasawa.

#### 4. Conclusion

The results obtained from the boiling simulation on the three surfaces indicated that the surface type, in terms of the contact angle, directly affects the amount of vapor generation, and consequently the rate of heat transfer, the



Fig. 3. Contour of the volume fraction of the triple bubble in nucleate boiling on the normal surface in Tanasawa model

bubble formation dynamics, and the bubble detachment radius and frequency. Thus, a change from the hydrophilic to the hydrophobic surface would increase the bubble radius and decrease its frequency at the time of the detachment from the surface. Findings suggest that the merging bubbles which were formed in closely-spaced nucleation sites on the hydrophobic surface lead to the formation of a vapor layer on the surface and a change of boiling toward a film boiling. The results also proposed that the Lee model, while generating larger bubbles, was a more appropriate model in the boiling simulation. Since in addition to a continuous boiling simulation, this model also doesn't generate small bubbles in regions far from the heater, where the temperature gradient is lower than the heater surface. However, the Tanasawa model, while generating extra unnecessary bubbles, stops the boiling process on the hydrophilic surface.

#### References

- C. Kunkelmann, Numerical Modeling and Investigation of Boiling Phenomena, Technische Universität Darmstadt, 2011.
- [2] I. Tanasawa, in: Advances in Heat Transfer, Academic Press, San Diego, 1991, pp. 55-139.
- [3] W.H. Lee, in: Multiphase Transport Fundamentals, Hemisphere Publishing, Washington, DC, 1980.
- [4] S.A. Hosseini, R. KouhiKamali, Simulation of film boiling heat transfer on flat plate and the impact of various phase change models on it, Modares Mechanical Engineering, 16(5) (2016) 169-177 (in Persian).

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۹، سال ۱۳۹۹، صفحات ۲۵۲۱ تا ۲۵۳۶ DOI: 10.22060/mej.2019.15192.6055

# تاثیر انواع سطوح بر دینامیک تشکیل حباب در جوشش هستهای توسط مدلهای تغییر فاز لی و تاناساوا

سیدامیررضا حسینی، رامین کوهی کمالی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

تاریخچه داوری: دریافت: ۵۰/۸/۷۹۷ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۲۶ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۰ ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۱۲/۲۳

> کلمات کلیدی: جوشش هستهای شبیهسازی عددی زاویه تماس سطوح مدلهای تغییر فاز انتقال حرارت و جرم

**خلاصه:** شبیهسازی عددی پدیده جوشش از لحاظ تنوع مدلهای دوفازی و کارآمدی هر یک همواره جز مسائل چالش برانگیز است. جوشش یکی از روشهای کارآمد انتقال حرارت با نرخهای زیاد میباشد. در شبیهسازی این پدیده انتخاب مدل مناسب برای تغییر فاز و همچنین بررسی سطوحی که بر روی آن جوشش اتفاق میافتد، حائز اهمیت است. در این تحقیق مسئله جوشش هستهای توسط روش دوفازی حجم سیال بهصورت عددی شبیهسازی شده است. از روش بازسازی هندسی مرز مشترک برای بهبود کیفیت مرز مشترک بهره گرفته شده است. جهت صحتسنجی حلگر عددی از مسئله یک بعدی مرز مشترک برای بهبود کیفیت مرز مشترک بهره گرفته شده است. جهت صحتسنجی حلگر عددی محاسبه ترمهای چشمه استفاده شده است. از دو مدل تغییر فاز لی و تاناساوا برای محاسبه نرخ تغییر فاز و محاسبه ترمهای چشمه استفاده شده است. نتایج جوشش هستهای بر روی سه سطح آب دوست، آب گریز و با زاویه تماس ۹۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان میدهد که جوشش بر روی سه سطح آب وست، آب گریز و با زاویه تماس با شعاع بزرگتر و انتقال حرارت بیشتر شده و در همآمیختگی حبابها در هستههای جوانهزایی متفاوت، جوشش بر روی

### ۱- مقدمه

موضوع مقاله پیش رو شبیه سازی عددی پدیده جوشش است. نرخ حرارتی که در هنگام جوشش منتقل می شود بسیار زیادتر از روش های انتقال حرارت معمول است. همین امر سبب می گردد که در بسیاری از کاربردهای صنعتی از جمله در خنک کردن قطعات الکترونیکی خاص از این پدیده استفاده شود [۱]. تحقیقات انجام شده در بررسی تاثیر خنک کاری جوشش فیلمی و هسته ای و اسپری های سرمایشی [۲] هر یک گویای نقش بسزای جوشش در انتقال حرارت توسط این پدیده است. گستردگی موارد مصرف جوشش و تلاش جهت بهینه کردن آن مبب شده است تا مبانی انتقال حرارت جوششی از چند دهه قبل تا همچنان وجوهی از این پدیده به دلیل وجود عدم قطعیت هایی نیازمند بررسی و تحقیق فراوان است. بخش عمده این عدم قطعیت های نیازمند فیزیک پیچیده این پدیده در انتقال همزمان جرم، مومنتوم و انرژی

\* نویسنده عهدهدار مکاتباتkouhikamali@guilan.ac.ir

کو کی حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) کو کی کی در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس bttps://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode

در خصوص چگونگی تولید بخار و تشکیل حباب ناشی از جوشش، رشد و کنده شدن حباب از سطح و تاثیرات هر یک از این موارد بر انتقال حرارت از سطح وجود دارد که محدود به برخی مطالعات تجربی است. پیچیدگی کار در کوچک بودن مقیاسهای زمانی و مکانی این پدیده است که در برخی موارد راه را بر آزمایشات تجربی نیز میبندد. بدین ترتیب با گسترش روشهای محاسبات عددی، دینامیک سیالات محاسباتی یکی از روشهایی است که در سالهای اخیر به کمک بررسی پدیده جوشش آمده است. با این حال هر یک از مناسب نیستند. از طرفی پارامترهای زیادی از جمله نوع سطوح، مناسب نیستند. از طرفی پارامترهای زیادی از جمله نوع سطوح، نیز به چالشی بزرگ بدل کردهاند [۳]. لذا بکارگیری مدلهای مناسب نیز به چالشی بزرگ بدل کردهاند [۳]. لذا بکارگیری مدلهای مناسب حریان دو فازی و تغییر فاز در مطالعه هر چه صحیحتر پدیده جوشش حائز اهمیت است.

از میان مدلهای چندفازی مدل دو سیالی اویلری-اویلری که

معادله مومنتوم را برای هر یک از فازها بطور جداگانه حل می کند موفقیت چندانی در مدل کردن پدیده جوشش خصوصاً در تسخیر صحیح مرز حباب و تشکیل و جدایش حبابها از سطح ندارد. این روش، مرزی پهن و غیردقیق از بخار و مایع را تشکیل می دهد که این امر بهواسطه افزایش نفوذ عددی سبب از دست رفتن جرم سیال در روند حل عددی می شود [۴].

در مقابل، روش های چند فازی که مرز را دنبال می کنند بیشتر مورد وثوق هستند. از این روش ها می توان به روش حجم سیال توسط هیرت و نیکولاس [۵] اشاره کرد که امروزه بطور گسترده در مسائلی که شامل مرز آزاد می شود مورد استفاده قرار می گیرد [۶]. در این روش معادلات جریان برای یک سیال همگن حل می شود. فاز مایع و گاز با حل معادله توزیع کسر حجمی محاسبه شده و توسط مرز مشترک از هم جدا می شوند. در این روش نقاط شبکه ثابت هستند و مرز از میان سلول ها عبور می کند.

روشهای تکمیلی دیگری وجود دارند که مرز عبوری از هر سلول را دقیق تر و تیز تر مدل می کنند. روش تکمیلی پی ال آی سی<sup>۱</sup> توسط یانگ [۷] مرز را در هر سلول به صورت خطوط راست شیب دار محاسبه می کند. این روش تحت عنوان بازسازی هندسی مرز مشتر ک دو سیال در حلگر فلوئنت مورد استفاده قرار گرفته است [۸]. علاوه بر انتخاب روش مناسب برای مدل سازی جریان دو فاز، استفاده از یک مدل صحیح تغییر فاز نیز تاثیر به سزایی در درستی شبیه سازی جوشش دارد. مدل های متفاوتی تاکنون برای تغییر فاز ارائه شدهاند که هر یک ویژگی های مخصوص به خود دارند.

یک مدل تغییر فاز در سال ۱۹۵۳ توسط شارگ [۹] و بر اساس تفاوت فشار دو سوی مرز مشترک دو فاز و در نهایت تفاوت در دمای اشباع دو سمت مرز مشترک بنا شد. این روش، شار جرمی تغییر فاز را از موازنه جرم روی مرز مشترک محاسبه می کند. این مدل در سال ۱۹۹۱ توسط تاناساوا [۱۰] و با فرض دمای اشباع ثابت در دو سوی مرز مشترک ساده شد.

لی [۱۱] در سال ۱۹۸۰ مدل تغییر فاز معروف خود را با این فرض ارائه داد که انتقال جرم در جوشش تحت یک فشار ثابت روی مرز مشترک رخ میدهد. این مدل یکی از رایجترین مدلهای تغییر فاز استفاده شده در بسیاری از تحقیقات روز [۱۲] در خصوص تغییر

فاز جوشش است. علاوه بر این، چن [۱۳] در سال ۲۰۱۴ مدل اصلاح شده لی را ارائه داد که ضریب تجربی متفاوتی از مدل لی داشت. دو مدل تغییر فاز لی و تاناساوا مدلهایی هستند که عمده تحقیقات انجام شده در زمینه تغییر فاز جوشش و چگالش از آنها بهره بردهاند ولی تا کنون در خصوص شبیهسازی جوشش هستهای تکحباب، آنچه مورد بحث در این مقاله است، کمتر مورد استفاده قرار گرفتهاند. استفاده از گرادیان دما روی مرز در محاسبه نرخ انتقال جرم، وجه شباهت دو مدل مذکور است.

در این مقاله جوشش هستهای بر روی یک سطح تخت بهصورت عددی و بر پایه مدل دو فازی حجم سیال و بر بستر حلگر عددی فلوئنت مورد بررسی قرار گرفته است. در محاسبه نرخ تغییر فاز ناشی از جوشش و محاسبه نرخ انتقال جرم و حرارت در آن از دو مدل پر کاربرد لی و تاناساوا استفاده شده است که به صورت کد یو دی اف<sup>۲</sup>، که بخش اصلی آن در پیوست آورده شده است، به حلگر اضافه شده است. علاوه بر این، دو مدل تغییر فاز مذکور به صورت جزء به جزء تشریح شده و تاثیرات هر یک بر پدیده جوشش هستهای مورد مطالعه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر تاثیرات زاویه تماس سطح و سیال به عنوان پارامتری مهم و تاثیرگذار بر روند جوشش، در هر یک از مدلهای تغییر فاز مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق اثرات نوع سطوح بر دینامیک تشکیل حباب در پدیده جوشش استخری توسط دو مدل تغییر فاز لی و تاناساوا بر روی سه سطح آبدوست و آبگریز و سطح معمولی با زاویه تماس ۹۰ درجه بررسی میکند. این در حالی است که بررسی جنس سطح و اثرات آن بر جوشش در مقالات اندکی نه بهطور کامل و آن هم بهصورت تجربی مطالعه شده است [16-16].

در هر یک از بررسیها نحوه و میزان بخار و در نهایت اندازه حباب تشکیل شده ناشی از تغییر فاز جوشش تحقیق شده است. مواردی همچون اندازه و شکل بخار باقیمانده بر روی سطح، فرکانس جدایش حباب، شعاع جدایش حباب نیز مورد بررسی قرار گرفتهاند. در همآمیختگی و تاثیرگذاری سه هسته جوانهزایی مجزا بر روی سطوح آبدوست، آبگریز و معمولی در دو مدل تغییر فاز ذکر شده نیز بررسی و تحلیل نتایج ارائه شده است. برای اطمینان از صحت عملکرد کد یو.دی.اف و همچنین حلگر عددی، مساله نمونه یک.بعدی

<sup>1</sup> Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC)

<sup>2</sup> User Defined Function (UDF)

استفان (مرز مکشی) حل و نتایج آن با حل تحلیلی مقایسه شده است. تطابق خوب بین نتایج عددی و تحلیلی بیانگر صحت عملکرد حلگر است، هر چند که صحتسنجی این کد و حلگر آن پیش تر نیز در مقالهای از نویسندگان مقاله حاضر [۴] به طرق مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. لذا نوآوری این مقاله بررسی همزمان اثرات نوع سطوح حرارتی بر دینامیک تشکیل و جدایش حباب در پدیده جوشش استخری توسط دو مدل تغییر فاز پرکاربرد و بررسی چگونگی درهمآمیختگی حبابهای تولید شده در هستههای جوانهزا نزدیک به هم و تاثیر آن بر پدیده جوشش میباشد. این موضوع علی رغم این که موضوع روز دنیاست ولی در مقالات داخلی بطور جامع و عددی بررسی نشده است.

## ۲- شرح مساله

در این تحقیق یک مساله دوبعدی جوشش هستهای مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه مورد بررسی یک سطح تخت به عنوان هیتر با شرط عدم لغزش و دما ثابت است که به میزان  $\Delta T$  از دمای اشباع مایع بالاتر است. برای شروع پدیده جوشش، یک حباب به قطر اولیه دو میلیمتر در مرکز سطح هیتر قرار داده میشود. فضای محاسباتی همانطور که در شکل ۱ دیده میشود یک فضای دوبعدی مستطیلی است. بهدلیل تقارن موجود، فقط نیمی از این فضا حل میشود و به مرزهای عمودی شرط مرزی متقارن نسبت داده شده است. بدین ترتیب فضای محاسباتی بطور متناوب در راستای افقی قابل تعمیم



است.

ابعاد این فضا  $\lambda'$  در عرض و  $\lambda'$  ۱۵۸ در ارتفاع است.  $\lambda'$  طول مشخصه مساله موجود است که از رابطه (۱) بدست میآید [۱۷]. عرض و ارتفاع فضای محاسباتی موجود، چندین برابر طول مشخصه در نظر گرفته شده است تا از تاثیر مرزها بر حباب جلوگیری شود.

$$\lambda' = \sqrt{\frac{\sigma}{\left(\rho_{\rm L} - \rho_{\rm g}\right)g}} \tag{1}$$

مرز انتهایی دارای یک شرط مرزی فشار خروجی است و گرادیان عمودی سایر متغیرها روی این مرز صفر در نظر گرفته شده است. مایع و مرز مشترک آن با بخار، در لحظه اولیه شروع حل در دمای  $T_{\rm sat} + \Delta T$  مایع و مرز مشترک از دمای  $T_{\rm sat} + \Delta r$ روی سطح تا دمای  $T_{\rm sat}$  روی مرز مشترک دو فاز به صورت خطی تغییر می کند. خواص ترموفیزیکی سیال مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. دمای اشباع سیال در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال Table 1. Thermo-physical properties of the fluid

خواص مواد	مايع	گاز
چگالی ( kg/m <sup>3</sup> )	$ ho_{\rm L}$ = $\tau \cdots$	$ ho_{\rm g}$ = ۵
ضریب هدایت حرارتی ( W/mK )	$k_{\rm L}={\rm f}{\boldsymbol \cdot}$	$k_{\rm g} = 1$
ظرفیت حرارتی ( J/kgK )	$C_{\mathrm{P,L}} = \mathbf{f} \cdot \cdot$	$C_{\mathrm{P,g}} = \mathbf{r} \cdots$
ويسكوزيته ( Pas )	$\mu_{\rm L}$ = • / ١	$\mu_{ m g} = \cdot / \cdot \cdot \Delta$
ضریب کشش سطحی ( N/m )	$\sigma$ = • / ١	
انتالپی تبخیر ( J/kg)	$h_{L,g} = 1.4$	

#### ۳- معادلات حاکم

از دو معادله پیوستگی برای پایستاری جرم فاز مایع و فاز بخار و همچنین محاسبه میزان تبادل جرم بین دو فاز استفاده میشود. بدین ترتیب یک معادله پیوستگی به ازای هر یک از فازها در روابط (۲) و (۳) نوشته شده است [۸].

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \alpha_{\rm f} \rho_{\rm f} \right) + \nabla \cdot \left( \alpha_{\rm f} \rho_{\rm f} \, \overline{u_{\rm f}} \right) = S_{\rm f} \tag{7}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \alpha_g \rho_g \right) + \nabla \cdot \left( \alpha_g \rho_g \overrightarrow{u_g} \right) = S_g \tag{7}$$

رابطه (۹) و (۱۰) محاسبه می شوند

$$k_{\rm eff} = \alpha_{\rm g} k_{\rm g} + \left(1 - \alpha_{\rm g}\right) k_{\rm f} \tag{A}$$

$$\rho = \alpha_{\rm f} \rho_{\rm f} + \alpha_{\rm g} \rho_{\rm g} \tag{9}$$

$$\mu = \alpha_{\rm f} \mu_{\rm f} + \alpha_{\rm g} \mu_{\rm g} \tag{(1)}$$

۳-۱-.زاویه تماس و کشش سطحی

همان گونه که در شکل ۲ آورده شده است، زاویه تماس زاویهای است که خط مماس بر سطح مشترک مایع-گاز با سطح جامد می سازد. این زاویه وابسته به نوع و جنس سطح است و میزان ترشوندگی سطح را تعیین می کند. زاویه تماس تاثیر مستقیم بر دینامیک تشکیل حباب و قطره دارد. هر چه زاویه تماس به صفر نزدیک تر باشد قابلیت ترشوندگی سطح بیشتر و سطح آب دوست<sup>۱</sup> است. هرچه زاویه تماس به ۱۸۰ درجه نزدیک تر باشد سطح آب گریز<sup>۲</sup> است. سطح مورد بررسی در این تحقیق یک سطح ایدهآل است. سطح ایدهآل سطحی است که یک قطره، بر روی آن دارای تنها یک زاویه تماس پایدار باشد یعنی زاویه پیشروی<sup>۳</sup> و زاویه پسروی<sup>۹</sup> آن با هم برابر و یا به عبارتی دیگر پسماند زاویه تماس<sup>۵</sup> آن صفر باشد.

در رابطه (۵)،  $F_{\sigma}$  نیروی کشش سطحی است. کشش سطحی در سطح سطح مشترک مایع-گاز یک گرادیان فشار اضافی و درنتیجه یک

در این روابط  $\alpha_{\rm f}$  و  $\alpha_{\rm g}$  به ترتیب کسر حجمی فاز مایع و فاز بخار هستند که طبق رابطه (۴) به یکدیگر مرتبط میشوند.  $S_{\rm f}$  و  $S_{\rm g}$  در معادلات فوق به ترتیب ترمهای چشمه جرمی مایع و بخار و ناشی از تغییر فاز هستند که در بخش مدلهای تغییر فاز تعریف میشوند.

$$\alpha_{\rm f} + \alpha_{\rm g} = 1 \tag{(f)}$$

معادلات مومنتوم و انرژی برای سیال همگن، ترکیب فاز مایع و بخار، در روابط (۵) و (۶) آورده شده است [۸].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \left[ \mu (\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^{\mathrm{T}}) \right] + \rho \vec{g} + F_{\sigma} \qquad (\Delta)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot \left(\vec{u}(\rho E + P)\right) = \nabla \cdot \left(k_{\text{eff}} \nabla T\right) + S_{\text{e}} \tag{9}$$

در این روابط E انرژی بر واحد جرم سیال با واحد J/kg است که از رابطه (۷) تعریف میشود [۸].

$$E = \frac{\alpha_{\rm f} \rho_{\rm f} E_{\rm f} + \alpha_{\rm g} \rho_{\rm g} E_{\rm g}}{\alpha_{\rm f} \rho_{\rm f} + \alpha_{\rm g} \rho_{\rm g}} \tag{Y}$$

در این رابطه  $E_{\rm f}$  و  $E_{\rm g}$  به ترتیب انرژی سیال مایع و بخار است که در هر سلول از حاصل ضرب دمای سلول در ظرفیت حرارتی سیال محاسبه میشود.  $S_{\rm e}$  ترم چشمه انرژی ناشی از تغییر فاز است که در بخش مدل های تغییر فاز تعریف میشود.  $k_{\rm eff}$  ضریب هدایت حرارتی موثر سیال همگن است که از رابطه (۸) محاسبه میشود. تمامی خواص دیگر سیال همگن از جمله چگالی و ویسکوزیته بطور مشابه از





1 Hydrophilic

- 4 Receding Angle
- 5 Contact Angle Hysteresis

<sup>2</sup> Hydrophobic

<sup>3</sup> Advancing Angle

نیرو، ایجاد می کند که با استفاده از مدل نیروی سطح پیوسته ٔ بر واحد حجم ارزیابی می گردند:

$$F_{\sigma} = \sigma \kappa \nabla \gamma \tag{(11)}$$

که در آن K انحنای فصل مشترک است.

$$\kappa = -\nabla \cdot \left( \frac{\nabla \gamma}{|\nabla \gamma|} \right) \tag{11}$$

برای سلولهای مجاور دیواره، انحنای فصل مشترک با استفاده از بردار نرمال بهبود یافته ۲ تعریف می گردد. بردار نرمال بهبود یافته در رابطه (۱۳) تعیین می گردد [۱۸] که در آن heta زاویه تماس است که در شکل ۲ نمایش داده شده است.

$$\gamma = n_{\text{wall}} \cos\theta + t_{\text{wall}} \sin\theta \tag{17}$$

در این رابطه  $n_{wall}$ ، مطابق شکل ۳، بردار نرمال سطح دیواره (در جهت داخل دیواره) و  $t_{wall}$  بردار نرمال فصل مشترک و مماس بر دیواره است. نوع تشکیل حباب بخار بر روی این سطوح و دینامیک متفاوت رشد حبابها بر روی سطوح با زوایای تماس متفاوت تاثیر مستقیم بر میزان تولید بخار، نرخ جوشش و عدد ناسلت خواهد داشت. در این تحقیق، رفتار مدلهای مختلف جوشش بر روی سه سطح آبدوست و آبگریز و سطح معمولی بررسی شده است.



شکل ۳. بردارهای نرمال و مماسی فصل مشترک (چپ)، بردارهای نرمال و مماسی سطح دیواره و خط تماس (راست) [۱۸] Fig. 3. Normal and tangential vectors on interface (left), and on surface & contact line (right)

# <sup>۴</sup>- مدلهای تغییر فاز در این بخش دو مدل تغییر فاز رایج در شبیهسازی مسائل شامل تغییر فاز جوشش و چگالش معرفی میشوند.

1 Continuum Surface Force (CSF)

### ۴–۱– مدل تاناساوا

این مدل در ابتدا توسط شارگ [۹] در سال ۱۹۵۳ و بر پایه تئوری پرش دما و فشار بر روی مرز بخار و مایع ارائه شد. طبق رابطه (۱۴) شار جرمی بر روی مرز از موازنه جرم منتقل شده از بخار به مایع و مایع به بخار محاسبه میشود. این در حالی است که به دلیل وجود فشارهای نابرابر در سیالهای دو سوی مرز، دمای اشباع مرز در سمت مایع با دمای اشباع در سمت بخار متفاوت است.

$$\dot{m}'' = \frac{2}{2 - \gamma_{\rm c}} \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \left[ \gamma_{\rm c} \frac{P_{\rm g}}{\sqrt{T_{\rm g}}} - \gamma_{\rm e} \frac{P_{\rm f}}{\sqrt{T_{\rm f}}} \right] \tag{14}$$

در این رابطه  $\gamma$  کسری از مولکولها است که طی تغییر فاز از یک فاز به فاز دیگر منتقل میشود. لذا  $\gamma_c$  کسر مولکولهای بخار است که طی چگالش به فاز مایع تبدیل میشوند و  $\gamma_e$  کسری از مولکولهای مایع تغییر فاز یافته در حین تبخیر است. در بسیاری از پژوهشها از جمله در کتاب تاناساوا در سال ۱۹۹۱ [۱۰]،  $\gamma = \gamma_c = \gamma$  به عنوان ضریب تطابق<sup>7</sup> و مقداری بین صفر و یک معرفی میشود. تاناساوا با فرض دمای ثابت اشباع  $T_{sat}$  برای کل مرز مایع و بخار و همچنین با فرض تغییرات خطی دما در سمت بخار، عبارت شار جرمی در رابطه فرض آر به مورت رابطه (۱۵) ارائه داد.

$$\dot{m}'' = \frac{2\gamma}{2-\gamma} \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \frac{\rho_{\rm g} h_{\rm fg} \left(T - T_{\rm sat}\right)}{T_{\rm sat}^{3/2}} \tag{10}$$

عبارات چشمه جرم و انرژی به ترتیب در روابط (۱۶) و (۱۷) تعریف میشود.

$$S_{\rm g} = -S_{\rm f} = \dot{m}'' \left| \nabla \alpha_{\rm g} \right| \tag{19}$$

$$S_{\rm e} = -S_{\rm g} h_{\rm fg} \tag{11}$$

### ۲-۴- مدل لی

این مدل توسط لی در سال ۱۹۸۰ جهت محاسبه نرخ جرم تغییر فاز یافته در تبخیر و چگالش بر روی مرز بخار و مایع ارائه شد [۱۱]. این مدل بر پایه این فرض استوار است که تغییر فاز تحت یک فشار

<sup>2</sup> Accommodation Coefficient

ثابت و در شرایط شبهتعادلی حرارتی روی میدهد [۱۳]. عبارت چشمه جرمی تبخیر با واحد kg/m<sup>3</sup>s که در طیف وسیعی از مقالات تغییر فاز مورد استفاده قرار گرفته است در رابطه (۱۸) آمده است.

$$\Gamma_{v} = \begin{cases} \lambda_{v} \rho_{f} \alpha_{f} \frac{\left(T_{f} - T_{s}\right)}{T_{s}} , T_{f} \ge T_{s} \\ 0 , T_{f} < T_{s} \end{cases}$$
(1A)

در رابطه مدل لی  $\lambda_v$  پارامتر تخفیف زمانی با واحد <sup>1-</sup> s است که لی در کار خود آن را ۱/۰در نظر گرفته است [۱۱]. در مرجع دیگری [۱۹] به این ضریب تحت عنوان یک ضریب کاملاً تجربی به نام فاکتور شدت انتقال جرم<sup>۱</sup> اشاره کرده است. محققان مختلف بازه وسیعی از مقادیر مختلف از <sup>1-</sup> s ۱/۰ تا <sup>1-</sup> s<sup>-</sup> ۱/۰× ۱/۰ را برای این ضریب در نظر گرفتهاند. این مقدار در جریانهای مختلف بسته به شرایط و هندسه جریان و همچنین بر اساس اندازه شبکه و گام زمانی تغییر می کند [۱۳]. در این شبیهسازی از  $\sqrt{1}$  به عنوان عبارت چشمه جرمی برای گاز و از  $\sqrt{1}$  به عنوان چشمه جرمی برای فاز مایع استفاده شده است. از حاصل خرب چشمه جرمی در حرارت نهان تبخیر طبق رابطه (۱۹) عبارت چشمه حجمی انرژی با واحد  $W/m^3$  استخراج می شود.

$$S_{\rm e} = -\Gamma_{\rm v} h_{\rm fg} \tag{19}$$

### ۵- شبیهسازی عددی

در شبیهسازی این مسأله از حلگر عددی فلوئنت انسیس استفاده شده است و تمامی ترمهای چشمه ناشی از تغییر فاز بهصورت کدهای یو.دی.اف تعریف شدهاند که برای نمونه، بخشی از کد مدل تغییر فاز لی در پیوست آورده شده است. در حل عددی حاضر از یک هندسه چهارگوش دوبعدی با شبکهبندی با سازمان و ساختاریافته توسط سلولهای مربعی استفاده شده است. انتخاب تعداد سلولهای مناسب در شبیهسازی در بخش استقلال از شبکه توضیح داده شده است. در گسستهسازی ترمهای معادلات مومنتوم و انرژی از روش کوئیک<sup>۲</sup> استفاده شده است. در مسائل دو فازی

شامل تغییر فاز، محاسبه دقیق گرادیانها خصوصا بر روی مرزها و مرز مشترک دو فاز نقش بهسزایی در محاسبه صحیح نرخ تغییر فاز دارد و از آنجا که این مسائل دچار نفوذ عددی و در نتیجه از دست رفتن جرم هستند استفاده از روشهای گسستهسازی با دقت مرتبه بالا بسیار حائز اهمیت است. در گسستهسازی گرادیانها از روش حداقل مربعات<sup>۳</sup> که از دقت بالاتری نسبت به سایر روشها برخوردار است استفاده شده است. گسستهسازی ترم فشار در معادله مومنتوم به روش پرستو<sup><sup>†</sup> انجام شده است. از این روش در جریانهایی استفاده</sup> می شود که دارای شیب فشار و یا انحنای زیاد باشند مانند آنچه بر روى مرز حباب وجود دارد. معادله انرژى بهصورت مرتبه اول بادبالا<sup>ه</sup> و ترمهای زمانی بصورت مرتبه اول ضمنی گسستهسازی شده است. گسستهسازی متغیر کسر حجمی در معادلات پیوستگی بهصورت صریح و به همراه بازسازی هندسی<sup>۶</sup> مرز مشترک دو فاز بوده است. در این روش یک درونیابی بر روی سلول هایی که شامل مرز مشترک دو فاز هستند انجام شده و مرز در این سلولها بهصورت تکهای-خطی بدست می آید. برای تصحیح میدان فشار از کوپل میدان سرعت و فشار به روش پیزو<sup>۷</sup> استفاده شده است. این روش مناسب برای جریان های گذرا با زمان است. ضرایب تخفیف ۸ در شبیه سازی عددی به منظور هر چه پایدار کردن روش تکرار به کار می ود. این ضرایب که انتخاب صحيح آنها كاملاً به تجربه حل مسائل مختلف مرتبط است در جدول ۲ آورده شده است. کوچک بودن ضرایب تخفیف ممنتوم و فشار سبب همگرایی بهتر جواب می شود.

جدول ۲. ضرایب تخفیف Table 2. Under relaxation factors of the current problem فشار چگالی نیروی حجمی ممنتوم انرژی

١/•	•/۵	۱/۰	١/•	•/۵	ضرايب تخفيف

همانطور که پیش تر نیز اشاره شد مقیاس طولی مساله از مرتبه  $\lambda'$  است که از رابطه ۱ مقدار ۰/۰۰۷۲۲ متر محاسبه می شود. از آنالیز ابعادی، مقیاس سرعت از مرتبه  $\sqrt{g\lambda}$  و مقیاس زمانی از مرتبه  $\sqrt{\lambda'/g}$  است که به ترتیب ۰/۲۶۶ متر بر ثانیه و ۰/۰۲۷۱ ثانیه محاسبه می شود. عدد کورانت یکی از مهم ترین پارامترهایی است

- 7 Pressure Implicit Splitting of Operators (PISO)
- 8 Under Relaxation Factor

<sup>1</sup> Mass Transfer Intensity Factor

<sup>2</sup> Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics (OUICK)

<sup>3</sup> least Squares Cell Based

<sup>4</sup> PREssure STaggering Option (PRESTO)

<sup>5</sup> Upwind

<sup>6</sup> Geo-Reconstruction

 $\begin{array}{c|c} & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ &$ 

شكل ۴. هندسه مسأله نمونه استفان Fig. 4. Geometry of the Stefan benchmark

حرارت دیواره به طریق هدایت از بخار به مرز مشتر ک دو فاز رسیده و سبب تبخیر مایع می شود. از آنجا که بخار دارای حجم مخصوص به مراتب بالاتر از مایع است، سبب راندن مایع و مرز مشتر ک به سوی مرز خروجی می شود. لذا مکان مرز مشتر ک هر لحظه با زمان تغییر می کند که طبق حل دقیق از رابطه (۲۰) بدست می آید [۲۱]. در این رابطه  $\alpha_{\rm g}$  ضریب نفوذ حرارتی بخار و کم ضریبی است که از معادله (۲۱) مقدار ۳۰۶۴۳ / ۰۰ = کم بدست آمده است.

$$\delta(t) = 2\xi \sqrt{\alpha_{\rm g} t} \tag{(1)}$$

$$\xi \cdot \exp(\xi^2) \cdot \operatorname{erf}(\xi) = \frac{C_{p,g}(T_{wall} - T_{sat})}{h_{L,g}\sqrt{\pi}}$$
(71)

مسأله استفان برای سیالی که مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است، در سه نسبت چگالی مایع به بخار، ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ حل شده است. دامنه محاسباتی به طول ۱/۱ متر و دارای ۵۰ سلول به اندازه ۰/۰۰۲ متر است. دمای سوپرهیت دیواره همانند مسأله اصلی ۱۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است. نتایج عددی و مقایسه



که گام زمانی حل عددی گذرا را تعیین میکند و به صورت نسبت سرعت عددی به سرعت فیزیکی جریان تعریف می شود. با توجه به عدد کورانت برابر ۲۵/۵ و مقدار ۲۰۰۰۶ متر برای اندازه شبکه که از طریق استقلال از شبکه محاسبه شده است، گام زمانی حل عددی  $\Delta t = 0.000$  محاسبه می شود. بدین ترتیب گام زمانی با اطمینان بیش از ۱۰ برابر از مقیاس زمانی فیزیکی مسأله کوچک تر است.

در بررسی آزمون استقلال از شبکه از مقایسه شعاع حباب در حال جدایش از روی سطح نرمال در جوشش توسط مدل تغییر فاز لی استفاده شده است. همانگونه که از جدول ۳ مشخص است تفاوت بین شعاع حباب در دو شبکه انتهایی بسیار ناچیز بوده و لذا شبکه بین شعاع حباب در دو شبکه انتهایی بسیار ناچیز بوده و مالا شبکه بین شعاع مباب در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. آزمون استقلال از شبکه از طریق مقایسه شعاع حباب در حال جدایش از سطح نرمال در مدل لی

Table 3. Mesh independence study by comparing the radius of the detached bubble from the normal surface in the Lee model

درصد اختلاف با شبکه درشت تر (٪)	شعاع حباب در لحظه جدایش (mm)	تعداد نقاط شبكه
	٨/٩	۴۸×۱۶
۴/۴	٩/٣	٩۶×٣٢
۲/۱	۹/۵	197×84
• / ۵ Y	۹/۵۵	٣٨۴×١٢٨

### ۵–۱– حل مساله نمونه

جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل از این تحقیق، مسأله کلاسیک جوشش یکبعدی استفان [۱۵] حل شده است و نتایج آن با حل تحلیلی دقیق این مسأله مقایسه شده است. مسأله استفان بهعنوان یک مسأله نمونه مناسب در مسائل دوفازی شامل تغییر فاز در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته است [۳، ۲۱، ۲۲].

مسأله استفان مطابق شکل ۴ شامل یک دیواره دما ثابت است که در لحظه  $t = 0 ext{ s}$  دارای دمایی به اندازه  $\Delta T$  بیشتر از دمای اشباع سیال است. لایه ناز کی از بخار در مجاورت دیوار داغ قرار دارد. دمای بخار بصورت خطی از دمای دیواره تا دمای اشباع کاهش مییابد. مابقی فضای محاسباتی از مایع اشباع پر شده است و هر یک از دو فاز توسط مرز مشتر کی که در دمای اشباع قرار دارد از هم جدا شدهاند.

آنها با نتایج تحلیلی در شکل ۵ نمایش داده شده است که بیانگر تطابق خوب و صحت عمل حلگر عددی است.

### ۴- نتایج

دینامیک تشکیل یک تکحباب از روی سطح تخت طی پدیده جوشش استخری در شکل ۶ آورده شده است. این شکل خروجی شبیهسازی عددی را در قالب کانتور کسر حجمی بخار در فواصل

زمانی برابر نمایش میدهد.

جوشش بر روی هر سه سطح آبدوست، آبگریز و معمولی توسط دو مدل جوشش لی و تاناساوا مورد بررسی قرار گفته است. همانگونه که از کانتورهای ردیف اول مشخص است سطح آبدوست اجازه باقی ماندن حباب ناشی از جوشش را برای مدت زمان طولانی بر روی خود نداده و در مقایسه با سطح آبگریز (کانتورهای ردیف سوم) حبابهای جدا شده از سطح هیتر کوچکتر هستند. نکته قابل



شكل ۶. نكانتور كسر حجمي در جوشش هستهاي تكحباب

Fig. 6. Contours of the volume fraction of a single bubble in the nucleate boiling, from top to bottom: Hydrophilic Surface–Lee model, Normal Surface–Lee model, Hydrophilic Surface–Lee model, Hydrophilic Surface–Tanasawa model, Normal Surface–Tanasawa model, Hydrophobic Surface-Tanasawa model

توجه میزان باقیماندهای از بخار بر روی سطح است که جوشش حباب بعدی از آن آغاز میشود. حجم این بخار باقیمانده بر روی سطح، در سطح آبدوست بسیار کوچک تر از سطح آب گریز است. ضمناً زوایای تماس تشکیل شده در مرز حباب بخار باقیمانده با سطح در هر سه سطح مذکور قابل توجه است.

سه ردیف آخر شبیه سازی های جوشش بر روی سطوح مذکور را توسط مدل تاناساوا نمایش می دهد. از آنجا که مدل تاناساوا، تغییر فاز را از لبه مرزهای حباب باقی مانده بر روی سطح آغاز می کند و یا به عبارتی دیگر برای تغییر فاز هم به گرادیان دما و هم به گرادیان فاز به طور همزمان نیاز دارد، شبیه سازی جوشش در این مدل بر روی سطح آب دوست پس از جدایش اولین حباب متوقف می گردد. چرا که در اولین جدایش، به دلیل آب دوست بودن سطح، بخار بر روی سطح باقی نمی ماند و ترم چشمه تغییر فاز را در معادلات برابر صفر می کند.

مدل تاناساوا در شبیه سازی جوشش بر روی سطح آب گریز، حباب های کوچک بیشتری را نه بر روی سطح بلکه در منطقه با گرادیان دمای بالا (نزدیک به هیتر) ایجاد میکند که تا انتهای شبیه سازی جوشش ادامه دارد. این مورد خود نمونه ای است که گاها شبیه سازی توسط مدل تاناساوا را زیر سوال می برد و مدل لی را مدلی مناسب، دقیق تر و محبوب تر می داند. صحت عملکرد مدل لی در مقابل مدل تاناساوا در پژوهشی دیگر از مولفان همین مقاله به طور گسترده مورد بحث قرار گرفته است [۴]. لازم به ذکر است کانتورهای آورده شده در شکل ۶ تنها بخشی از خروجی های شبیه سازی شده تا جدایش اولین حباب از سطح را نماش می دهد.

جدول ۴ میزان انتقال حرارت از جوشش یک تکحباب مربوط به کانتورهای جوشش در شکل ۶ را نمایش میدهد. همانگونه که از مقادیر انتقال حرارت مشخص است سطح آب گریز نرخ قابل توجهی از انتقال حرارت بوسیله جوشش را در مقابل دو سطح دیگر به خود اختصاص داده است. علاوه بر این جدول ۴ نشان میدهد که مدل

جدول ۴. انتقال حرارت از جوشش یک حباب بر روی سطوح آبدوست، نرمال و آبگریز در دو مدل لی و تاناساوا

Table 4. Boiling heat transfer on hydrophilic, normal andhydrophobic surfaces in both Lee and Tanasawa models

1	انتقال حر	انتقال حرارت (W)	
نوع سطح	مدل لی	مدل تاناساوا	دو مدل تغيير فاز (٪)
آبدوست	r/rv	۲/۱۸	٣٣
نرمال	٣/٨۴	۲/۸۴	78
آبگريز	٧/۶۶	$\Delta/\Upsilon\Upsilon$	٣٢

تاناساوا انتقال حرارت را نسبت به مدل لی به طور متوسط ۳۰ درصد کمتر محاسبه مینماید.

میزان بخار باقیمانده بر روی سطح در هنگام جدایش حباب و همچنین زاویه تماسی که بخار با سطح جامد می سازد تعیین کننده اندازه و تناوب تولید حباب بخار در سیکلهای بعدی جوشش است. لذا ریشه حباب در هنگام جدایش از سطح، میزان بخار باقیمانده و زوایای تشکیل دهنده آن با سطح در دو مدل لی و تاناساوا به ترتیب در دو شکل ۷ و ۸ آورده شده است.



شکل ۲. ریشه حباب در حال جدایش در مدل لی Fig. 7. The root of Separating bubble in the Lee model



شکل ۸: ریشه حباب در حال جدایش در مدل تاناساوا Fig. 8. The root of the separating bubble in Tanasawa model



Fig. 9. Detachment frequency and bubbles radius in Lee model–single bubble

همانطور که در این شکلها مشخص است، بیشترین بخاری که بر روی سطح باقی میماند متعلق به سطح آب گریز، سپس معمولی و میزان ناچیزی در سطح آب دوست میباشد. به همین ترتیب شکل و نحوه جدایش حبابها در این سه سطح نیز با هم متفاوت است. مقایسه این دو شکل نشان میدهد که مدل لی حبابهای جدا شده بزرگتری را نسبت به مدل تاناساوا محاسبه میکند. این مورد از کانتورهای شکل ۶ نیز برداشت میشود. در هر دو مدل حبابهای جدا شده در سطح آب گریز دارای بزرگترین شعاع و حبابهای جدا شده از سطح آب دوست کوچکترین حبابها هستند.

یکی از بزرگترین اثراتی که تفاوت در نوع سطوح بر پدیده جوشش میگذارد، تاثیر بر سایز حباب کنده شده از سطح و فرکانس جدایش آن است که این موارد خود تاثیرات حرارتی بر روی سطح و عدد ناسلت خواهد داشت. فرکانس و شعاع جدایش حبابها از روی هر سه سطح آبدوست و آبگریز و معمولی در مدل تغییر فاز لی در شکل

۹ و برای مدل تاناساوا در شکل ۱۰ آورده شده است. می توان مشاهده کرد که فرکانس جدایش و شعاع حباب همواره روندی معکوس نسبت به هم دارند بطوری که کاهش یکی سبب افزایش دیگری می شود. در شرایط حرارتی برابر، بزرگترین حبابها (با شعاع ۲۰/۰۱ متر) و با کمترین فرکانس (۱/۷ حباب بر ثانیه) توسط مدل لی و از روی سطح آب گریز جدا شده است و کوچکترین حبابها (با شعاع ۲۰۰۷ متر) و با بزرگترین فرکانس (۵ حباب بر ثانیه) توسط مدل تاناساوا و از روی سطح آب دوست جدا شده است. با این تفسیر میزان بخاری که در هر ثانیه به شکل حباب از روی سطح آب گریز جدا می شود در مقایسه با سایر سطوح بیشترین مقدار است.

در شکل ۱۱، دینامیک تشکیل حباب در پدیده جوشش و از طریق کاشت سه هسته جوانهزا ارائه شده است. در هر ردیف روند تشکیل، رشد و جدایش حبابها در فواصل زمانی برابر نمایش داده شده است. هدف از این نوع شبیه سازی، بررسی نحوه تاثیر گذاری



Fig. 10. Detachment frequency and bubbles radius in Tanasawa model-single bubble



Fig. 11. Contour of the volume fraction of the triple bubble in nucleate boiling, from top to bottom: Hydrophilic Surface–Lee model, Normal Surface–Lee model, Hydrophilic Surface–Lee model, Hydrophilic Surface–Tanasawa model, Normal Surface–Tanasawa model, hydrophobic Surface-Tanasawa model

حبابها بر هم، تداخل و یکی شدن حبابها در شرایط مختلف سطوح و در دو مدل تغییر فاز لی و تاناساوا است. در کانتورهای ردیف اول، سطح هیتر، آبدوست است. سطح آبدوست اجازه باقی ماندن مقداری بخار در هستههای کناری را پس از جدایش اول نداده و ضمناً جدایش اولین حباب، گرادیانهایی را بوجود میآورد که اجازه تغییر فاز بعدی را به این مکانها نمیدهد و

در ادامه جوشش فقط در هسته وسطی ادامه مییابد. جوشش بر روی سطح معمولی با زاویه تماس ۹۰ درجه با جدا شدن حبابها ابتدا از هستههای طرفین و سپس از هسته وسطی آغاز و این روند بطور متناوب بین هستههای کناری و وسطی ادامه مییابد.

کانتورهای ردیف سوم، جوشش بر روی یک سطح آبگریز در مدل لی را نشان میدهد. این سطح حباب را به خوبی بر روی خود

نگه میدارد. این امر سبب میشود سه حباب بر روی سطح به صورت افقی رشد کرده و به یکدیگر پیوسته و لایهای از بخار را تشکیل دهد. این لایه تا پایان فرآیند جوشش باقی میماند و این فرآیند را به سمت جوشش فیلمی سوق میدهد. در این بخش نیز همانند نتایج پیشین، در شرایط برابر دمایی، حباب جدا شده از سطح آب گریز بزرگتر از حباب جدا شده از سطح آبدوست است. کانتورهای ردیف چهارم متعلق به جوشش بر روی یک سطح آبدوست در مدل تاناساوا است. همانطور که در ردیف چهارم در کانتورهای شکل ۶ نیز مشاهده شد سطح که حبابهای بعدی از روی مرز آن تشکیل شود، پس از چهار مرحله تولید حباب و در حین نزدیک شدن هستههای جوانهزا به هم و حرکت به سمت مرکز سطح جوشش متوقف می گردد. چرا که گرادیان فاز مورد نیاز برای شروع تغییر فاز بر روی سطح وجود ندارد.

کانتورهای ردیف پنجم متعلق به یک سطح معمولی است. جوشش در این حالت پس از سیکلهای طولانی بهصورت پریودیک پایا میشود. در حالت پایا دو منطقه به نام گره و ضد گره تشکیل میشود که حبابها بصورت متناوب از این دو منطقه تولید و متناوباً ادامه مییابد. با توجه به تعریف موجود در مراجع [۱ و ۳]، مرکز سطح هیتر را گره و دو گوشه کناری آن را ضدگره مینامند. کانتورهای ردیف آخر متعلق به یک سطح آبگریز است که بخار به خوبی بر روی آن باقی میماند و پس از به هم پیوستن جوشش فیلمی را رقم میزند. همانند شبیه سازیهای متعلق به جوشش تک حباب، مدل تاناساوا میزانی جوشش و تولید بخار را در فضای دارای گرادیان دما و نه بر روی سطح ایجاد می کند. از مقایسه کانتورها می توان نتیجه گرفت حبابهای تولیدی از سطح آبگریز بزرگتر از حبابهای تولیدی از



Fig. 12. Detachment frequency and bubbles radius in Lee model-triple bubble



شكل ١٣. فركانس و شعاع جدايش حباب در مدل تاناساوا-سهحباب Fig. 13. Detachment frequency and bubbles radius in Tanasawa model-triple bubble

در دو شکل ۱۲ و ۱۳، فرکانس و شعاع حبابهای جدا شده از سطح برای حالت جوشش از سه هسته جوانهزا نمایش داده شدهاند. شعاع و فرکانس جدایش حبابها در نقاط گره به صورت خط پر و در ضد گرهها به صورت نقطه نمایش داده شده است. مدل لی فرکانس جدایش در ضد گره را برابر فرکانس در گره و حباب جدا شده از ضد گره را بزرگتر از حباب کنده شده از گره پیشبینی میکند. با تغییر زاویه تماس از سطح آبدوست به سطح آب گریز شعاع حباب جدا شده افزایش مییابد و فرکانس جدایش با رابطهای عکس، نزولی میگردد. این مورد در خصوص شعاع حبابهای جدا شده از ضد گره مر مدل تاناساوا نیز صادق است. با توجه به نمودارهای ۱۱ تا ۱۳، رفتار مدل لی و تاناساوا در خصوص جوشش فیلمی یکسان است و فرکانس و شعاعهای یکسانی را در هنگام جدایش حباب پیشبینی میکند با این تفاوت که تعداد جدایش حبابها از ضد گره در مدل تاناساوا

### ۷- جمعبندی

در این مقاله جوشش هستهای مایع اشباع توسط روش دو فازی حجم سیال شبیهسازی شده است. از روش بازسازی هندسی مرز مشترک دو فاز برای هر چه دقیقتر محاسبه کردن مرز مشترک استفاده شده است که سبب حفظ هر چه بیشتر بقای جرم فازها میشود.

برای محاسبه نرخ تغییر فاز از دو مدل مختلف تغییر فاز لی و تاناساوا استفاده شده است و نتایج آنها اعم از شکل حباب تولیدی، پریود زمانی جدایش حباب و شعاع جدایش و میزان انتقال حرارت ناشی از جوشش تکحباب با هم مقایسه شده است. کلیه نتایج برای

یک و سه هسته جوانهزا و بر روی سه سطح آبدوست و آبگریز و سطح نرمال ارائه شده است. صحت عملکرد حلگر عددی توسط مسأله نمونه یکبعدی استفان مورد آزمون قرار گرفته است.

نتایج جوشش بر روی سه سطح نشان میدهد که نوع سطح از لحاظ زاویه تماسی که سیال با سطح تشکیل میدهد در میزان تولید بخار و در نتیجه میزان انتقال حرارت، دینامیک تشکیل، شعاع و فرکانس جدایش حبابها تاثیر مستقیم میگذارد. بطوری که تغییر در نوع سطح از آبدوست به آبگریز سبب افزایش شعاع حباب و کاهش فرکانس حباب جدا شده از سطح و افزایش نرخ انتقال حرارت می گردد. یافتهها حاکی از آن است که ادغام حبابهایی که در هستههای جوانهزای نزدیک به هم بر روی سطح آب گریز تشکیل شدهاند سبب تشکیل لایهای از بخار بر روی سطح و سوق جوشش به سمت جوشش فیلمی می شوند.

نتایج نشان میدهد که مدل لی ضمن تولید حبابهای بزرگتر، مدل مناسبتری برای مدلسازی جوشش میباشد چرا که علاوه بر شبیهسازی جوشش بهصورت مداوم، سبب تولید حبابهای ریز در منطقه دور از هیتر، مکانی که گرادیان دمای پایینتری نسبت به سطح هیتر دارد نمیشود. این در حالی است که مدل تاناساوا علاوه بر تولید حبابهای اضافی، روند جوشش بر روی سطح آبدوست را نیز متوقف می سازد.

### فهرست علائم

	علائم انگلیسی
ظرفیت حرارتی ( J/kgK)	С
انرژی بر واحد جرم سیال ( J/kg )	E
نیروی حجمی ( N/m <sup>3</sup> )	$ec{F}$
( ${ m m/s}^2$ ) شتاب جاذبه (	$\vec{g}$
انتالپی ( J/kg )	h
ضریب هدایت حرارتی ( W/mK )	k
جرم مولکولی سیال ( kg/mole )	M
نرخ جرمی تغییر فاز ( $\mathrm{kg}/\mathrm{m}^2\mathrm{s}$ )	<i>m</i> ″
بردار عمود بر سطح مشترک دو فاز	$\vec{n}$
فشار ( Pa )	р
ثابت جهانی گازها ( J/mole K )	R
چشمه جرمی ( $\mathrm{kg}/\mathrm{m}^3\mathrm{s}$ )، چشمه انرژی ( $\mathrm{W}/\mathrm{m}^3\mathrm{s}$ )	S
زمان ( S )	t
بردار سرعت ( m/s )	$\vec{u}$
	علائم يونانى
کسر حجمے، ضریب نفوذ حرار تے ( m²/s )	α

ضريب تطابق، كسر مولكولى	γ
چشمه جرمی در مدل لی ( ${ m kg/m^3s}$ )	Г
ضخامت فيلم اوليه بخار ( m )	$\delta$
تخفيف زماني، فاكتور شدت انتقال جرم ( s <sup>-1</sup> )	λ
طول مشخصه ( m )	λ'
ویسکوزیته دینامیکی ( Pas )	μ
ویسکوزیته سینماتیکی ( ${ m m}^2/{ m s}$ )	ν
( $\mathrm{kg}/\mathrm{m}^3$ ) چگالی (	ρ
کشش سطحی ( N/m )	$\sigma$
	زيرنويسها
چگالش	С
انرژی، تبخیر	E
موثر	Eff
مايع	F
بخار	G
سطح مشترک دو فاز	Ι
مايع	L
فشار	Р
اشباع	Sat, s
بخار	V

### پيوست

برای محاسبه میزان تغییر فاز در هر یک از مدلها میبایست جملات چشمه معادلات پیوستگی و انرژی بصورت کدهای یو.دی.اف برای نرمافزار فلوئنت آماده شود. در این پیوست جملات چشمه مورد نیاز برای مدل لی بهعنوان نمونه ارائه شده است. جملات چشمه در معادلات پیوستگی و معادله انرژی بهصورت زیر نوشته میشود. C\_UDMI(c,t,0) = sqrt(pow(C\_VOF\_G(c,tp)[0],2)+ pow(C\_VOF\_G(c,tp)[1],2)); if (C\_T(c,t)>Tsat && C\_UDMI(c,t,0)=0. C\_VOF(c,tp)>0.1) {C\_UDMI(c,t,1)=(C\_T(c,t)-Tsat)\*(1-C

VOF(c,tp))\*rhof\*ri/Tsat ; }

### else

```
\{C\_UDMI(c,t,1) = 0.; \}
```

#endif

source = C\_UDMI(cell,tm,1);

C\_UDMI(cell, tm, 2) = -source\*L;

در کد فوق جمله (C\_UDMI(cell, tm, ۱) چشمه جرمی فاز

Academic Press, San Diego, 1991, pp. 55-139.

- [11] W.H. Lee, in: Multiphase Transport Fundamentals, Hemisphere Publishing, Washington, DC, 1980.
- [12] X. Wang, Y. Wang, H. Chen, Y. Zhu, A combined CFD/visualization investigation of heat transfer behaviors during geyser boiling in two-phase closed thermosyphon, International Journal of Heat and Mass Transfer, 121 (2018) 703-714.
- [13] S. Chen, Z. Yang, Y. Duan, Y. Chen, D. Wu, Simulation of condensation flow in a rectangular microchannel, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 76 (2014) 60–69.
- [14] 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, 17(12) (2018) 531-541, (in Persian).
- [15] R. Ahmadi, T. Okawa, Observation of Bubble Dynamics during Subcooled Flow Boiling on Different Surface Wettability in Atmospheric Pressure, Modares Mechanical Engineering, 15(7) (2015) 313-320, (in Persian).
- [16] Nasiri. S, Talebi. S, Salimpor. M, The experimental analyse of grooved surface and magnetic field effects on γ-Fe2O3/water nanofluid pool boiling, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2019), (in Persian).
- [17] A. Mukherjee, S. Kandlikar, Numerical study of single bubbles with dynamic contact angle during nucleate pool boiling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50(1) (2007) 127-138.
- [18] Q.X. Wang, The Evolution of a Gas Bubble Near an Inclined Wall, Theoret.Comput.Fluid Dynamics 12 (1998) 29-51.
- [19] H. Lee, C.g.R. Kharangate, N. Mascarenhas,I. Park, I. Mudawar, Experimental and computational investigation of vertical downflow condensation, International Journal

گاز و همین مقدار با علامت منفی جمله چشمه جرمی فاز مایع را تعیین می کند. عبارت C\_UDMI(cell, tm, ۲) جمله چشمه انرژی را فراهم می سازد.

مراجع

- C. Kunkelmann, Numerical Modeling and Investigation of Boiling Phenomena, Technische Universität Darmstadt, 2011.
- [2] S. Moghaddam, K. Kiger, Physical mechanisms of heat transfer during single bubble nucleate boiling of FC-72 under saturation conditions.
  II: Theoretical analysis, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52(5–6) (2009) 1295–1303.
- [3] D.Z. Guo, D.L. Sun, Z.Y. Li, W.Q. Tao, Phase Change Heat Transfer Simulation for Boiling Bubbles Arising from a Vapor Film by the VOSET Method, Numerical Heat Transfer, 59 (2011) 857–881.
- [4] S.A. Hosseini, R. KouhiKamali, Simulation of film boiling heat transfer on flat plate and the impact of various phase change models on it, Modares Mechanical Engineering, 16(5) (2016) 169-177, (in Persian).
- [5] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary, Journal of computational physics, 39(1) (1981) 1-250.
- [6] J. Bi, D.M. Christopher, J.X. Dawei Zhao, Y. Huang, Numerical study of bubble growth and merger characteristics during nucleate boiling, Progress in Nuclear Energy, 112 (2019).
- [7] D.L. Youngs, in: Numerical Methods for Fluid Dynamics, Academic Press, New York, 1982, pp. 273-285.
- [8] ANSYS, ANSYS Inc. PDF Documentation for Release 15.0, in, 2013.
- [9] R.W. Schrage, A Theoretical Study of Interphase Mass Transfer, in, Columbia University Press, New York, 1953.
- [10] I. Tanasawa, in: Advances in Heat Transfer,

[22] D.G. Kim, C.H. Jeon, I.S. Park, Comparison of numerical phase-change models through Stefan vaporizing problem, International Communications in Heat and Mass Transfer, 87 (2017) 228-236. of Heat and Mass Transfer, 85 (2019) 865-879.

- [20] V. Alexiades, A.D. Solomon, Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes, Hemisphere, Washington, D.C, 1993.
- [21] S.W.J. Welch, J. Wilson, A Volume of Fluid Based Method for Fluid Flows with Phase Change, Journal of Computational Physics, 160 (2000) 662–682.

بی موجعه محمد ا