



## شبیه‌سازی انتقال حرارت جوشش فیلمی روی سطح تخت و تأثیر مدل‌های مختلف تغییر فاز بر آن

سید امیررضا حسینی<sup>1</sup>، رامین کوهی کامالی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

\* رشت، صندوق پستی 3756، kauhikamali@guilan.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 فروردین 1395

پذیرش: 08 اردیبهشت 1395

ارائه در سایت: 27 اردیبهشت 1395

کلید واژگان:

جوشش فیلمی

شبیه‌سازی عددی

مدل‌های تغییر فاز

ضرایب تجربی

انتقال حرارت و جرم

### چکیده

شبیه‌سازی عددی پدیده جوشش از لحاظ تنوع مدل‌های دو فاز و کارآمدی هر یک، همواره از مسائل چالش بر انگیز بوده است. علاوه بر این انتخاب مدلی که نرخ انتقال جرم و حرارت را به درستی محاسبه کند، بر پیچیدگی‌های مسأله می‌افزاید. در این تحقیق مسأله جوشش فیلمی مایع اشباع توسط روش دو فاز حجم سیال و به همراه بازسازی هندسی مرز مشترک شبیه‌سازی عددی شده است. از سه مدل تغییر فاز مرز تیز، مدل لی و مدل تاناساوا برای محاسبه نرخ تغییر فاز و محاسبه ترم‌های چشمه بطور همزمان در یک مسأله واحد استفاده شده است. برای صحت سنجی حلگر عددی از مسأله نمونه جوشش یک بعدی استفان استفاده شده است. ناسلت پرئودیک، الگوی جریان، شکل حباب و زمان جدایش آن در مدل‌های مختلف تغییر فاز بررسی و همچنین ضرایب تجربی مورد استفاده در دو مدل لی و تاناساوا ارائه شده است. ناسلت بدست آمده از شبیه‌سازی با دو رابطه تجربی برنسون و کلیمنکو مقایسه شده است. نتایج با رابطه ناسلت کلیمنکو تطابق خوبی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که هر چند که مدل لی به ضریبی تجربی وابسته است، اما در مقابل مدل مرز تیز و مدل تاناساوا از دقت بالاتری برای پیش‌بینی جوشش فیلمی روی سطح تخت برخوردار است.

## Simulation of film boiling heat transfer on flat plate and the impact of various phase change models on it

Seyed Amirreza Hosseini, Ramin KouhiKamali\*

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

\* P.O.B. 3756 Rasht, Iran, kauhikamali@guilan.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 03 April 2016  
Accepted 27 April 2016  
Available Online 16 May 2016

**Keywords:**  
Film boiling  
Numerical simulation  
Phase change models  
Empirical coefficients  
Heat and mass transfer

### ABSTRACT

Numerical simulation of boiling has always been a challenging problem in terms of the variety and effectiveness of two-phase models. Moreover, choosing an appropriate heat and mass transfer model increases the complexity of the solution. Problem of film boiling of saturated liquid is numerically simulated in this investigation by use of VOF (volume of fluid) model together with the geo-reconstruction of interface. Three phase change models of sharp interface model, Lee model and Tanasawa model are used at the same time on a single problem in order to calculate the rate of phase change and source terms. One-dimensional Stephan benchmark is solved for verification the numerical solver. The periodic Nusselt, flow pattern, bubble form and its detachment time have been studied in mentioned various phase change models. Also, empirical coefficients used in both models of Lee and Tanasawa are presented. The results of Nusselt number obtained from simulation is compared with two empirical Nusselt correlations of Berenson and Klimenko. The results show good agreement with the Klimenko's Nusselt. The results reveal although the Lee model is dependent on empirical coefficient, it is more accurate than the two other models for prediction of film boiling on flat plate.

### 1- مقدمه

گویای نقش بسزای جوشش در انتقال حرارت توسط این پدیده است. هر چند که جوشش برای نیم قرن مورد مطالعه قرار گرفته است اما همچنان طبیعت فیزیکی آن دارای بحث و عدم قطعیت‌های بسیاری است. بخش عمده این عدم قطعیت‌ها بر پایه فیزیک پیچیده این پدیده در انتقال همزمان جرم، مومنتم و انرژی بر روی سطوح حرارتی است. فرضیه‌های مختلف و گاهی متضادی در خصوص چگونگی تولید بخار و تشکیل حباب ناشی از جوشش، رشد و کنده شدن حباب از سطح و تأثیرات هر یک از این موارد بر انتقال حرارت از سطح وجود دارد که محدود به برخی مطالعات

پدیده جوشش به دلیل انتقال بخش بزرگی از حرارت نهان، مورد توجه ویژه قرار دارد. این پدیده در مقیاس‌های بزرگ مانند مراکز تولید توان تا مقیاس‌های کوچک مانند سینک‌های حرارتی، نقش مهمی را در انتقال حرارت‌های زیاد در بسیاری از کاربردهای صنعتی ایفا می‌کند. امروزه با پیشرفت تکنولوژی یکی از روش‌های موثر در خنک‌سازی قطعات الکترونیکی با ابعاد کوچک استفاده از پدیده جوشش است. تحقیقات انجام شده در بررسی تأثیر خنک‌کاری جوشش فیلمی و هسته‌ای و اسپری‌های سرمایشی [1] هر یک

Please cite this article using:

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*, Vol. 16, No. 5, pp. 169-177, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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*, Vol. 16, No. 5, pp. 169-177, 2016 (in Persian)

تجربی است.

جوشش از لحاظ مکانی و همچنین زمانی، پدیده‌ای بسیار ریزمقیاس است. در نتیجه، آزمایش‌های تجربی نیازمند بکارگیری ابزار آلات بسیار دقیق با ابعاد بسیار کوچک در حدود میکرومتر است که کار را در بررسی‌های تجربی مشکل می‌کند. لذا از دو دهه قبل، استفاده از روش‌های حل عددی که علاوه بر جریان سیال بتوانند مرز متحرک بین گاز و مایع را مدل کنند، مورد توجه ویژه قرار گرفته است. از طرفی پارامترهای زیادی از جمله نوع سطوح، کشش سطحی، تفاوت خواص سیال در دو سوی مرز مشترک دو فاز و پیچیدگی دینامیک مرز مشترک وجود دارند که حل‌های عددی را نیز به چالشی بزرگ بدل کرده‌اند [2]. لذا بکارگیری مدل‌های مناسب جریان دو فاز و تغییر فاز در مطالعه هر چه صحیح‌تر پدیده جوشش حائز اهمیت است.

از میان مدل‌های چندفازی مدل دو سیالی اوپلری-اوپلری که معادله مومنتم را برای هر یک از فازها بطور جداگانه حل می‌کند، 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 غیر دقیق از بخار و مایع را تشکیل می‌دهد که این امر بواسطه افزایش دیفیوژن عددی سبب از دست رفتن جرم سیال در روند حل عددی می‌شود [3].

در مقابل، روش‌های چند فازی که مرز را دنبال می‌کنند<sup>1</sup> بیشتر مورد وثوق هستند. از این روش‌ها می‌توان به روش حجم سیال<sup>2</sup> توسط هیرت و نیکولاس [4] اشاره کرد که بطور گسترده در مسائلی که شامل مرز آزاد می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش معادلات جریان برای یک سیال همگن حل می‌شود. فاز مایع و گاز با حل معادله توزیع کسر حجمی محاسبه شده و توسط مرز مشترک از هم جدا می‌شوند. در این روش نقاط شبکه ثابت هستند و مرز از میان سلول‌ها عبور می‌کند.

روش‌های تکمیلی دیگری وجود دارند که مرز عبوری از هر سلول را دقیقتر و تیزتر مدل می‌کنند. روش تکمیلی<sup>3</sup> SLIC توسط نوح و وودوارد [5] مرز را در هر سلول بصورت خطوط راست افقی و عمودی ساده می‌کند. روش تکمیلی<sup>4</sup> PLIC توسط یانگ [6] و روش<sup>5</sup> LVIRA توسط پاکت [7] مرز را در هر سلول بصورت خطوط راست شیبدار بدست می‌آورد. روش تکمیلی<sup>6</sup> PROST توسط رناردی [8] مرز را بصورت خطوط منحنی چند جمله‌ای محاسبه می‌کند.

علاوه بر روش‌هایی که مرز را دنبال می‌کنند روش‌هایی وجود دارند که مرز را تسخیر<sup>7</sup> می‌کنند. یکی از معروف‌ترین این روش‌ها، روش سطوح هم‌تراز<sup>8</sup> LS توسط اوشر و ستیان [9] است. در این روش تابع فاصله از مرز برای سراسر دامنه حل تعیین می‌شود. فاصله صفر به عنوان مرز گاز و مایع شناخته می‌شود. هر سلولی که دارای فاصله مثبت باشد به عنوان ناحیه پیوسته<sup>9</sup> و هر سلول دارای فاصله منفی به عنوان ناحیه توزیع شده<sup>10</sup> در نظر گرفته می‌شود. نقطه ضعف شدید این روش عدم تضمین بقای جرم مایع است [2]. لذا جهت جبران این ضعف روش ترکیبی حجم سیال و سطوح هم‌تراز<sup>11</sup> مورد توجه

قرار گرفته است. این روش تسخیر مرز توسط ساسمن و پاکت [10] توسعه داده شده است. این روش به دلیل بدست آوردن مرز دقیق و تیز توانایی زیادی در حفظ بقای جرم دارد. در این روش کسر حجمی و تشخیص مناطق مایع و گاز توسط روش حجم سیال محاسبه می‌شود و محاسبات هندسی مرز از جمله انحناها و بردارهای نرمال مرز توسط روش LS انجام می‌شود.

علاوه بر تمامی روش‌های فوق که هر یک جریان دو فازی را مدل می‌کند، استفاده از یک مدل صحیح تغییر فاز نیز تأثیر بسزایی در درستی شبیه‌سازی جوشش دارد. مدل‌های متفاوتی تا کنون برای تغییر فاز ارائه شده‌اند که هر یک ویژگی‌های مخصوص به خود دارند.

یک مدل تغییر فاز در سال 1953 توسط شارگ [11] 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 می‌کند. این مدل در سال 1991 توسط تاناساوا [12] و با فرض دمای اشباع ثابت در دو سوی مرز مشترک ساده شد.

لی [13] در سال 1980 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 است. چن [14] در سال 2014 مدل اصلاح شده لی را ارائه داد که ضریب تجربی متفاوتی از مدل لی داشت.

در مدل تغییر فاز دیگری به نام مدل مرز تیز<sup>12</sup> که از اوایل دهه 90 میلادی مورد توجه قرار گرفت، فرض می‌شود که تمامی انرژی حرارتی در مرز دو فاز صرف تبخیر مایع می‌شود [15]. بعدها این روش توسط سان و همکاران [16] با حذف هدایت حرارتی فاز بخار ساده شد. آنها در مشاهدات خود دریافتند که ضریب هدایت حرارتی بخار تأثیری در رشد حباب در مایع سوپرهییت ندارد.

سه مدل تغییر فاز مرز تیز، تاناساوا و لی مدل‌هایی هستند که عمده تحقیقات انجام شده در زمینه تغییر فاز جوشش و چگالش هر یک از یکی از این مدل‌ها بهره برده‌اند. استفاده از گرادیان دمای روی مرز در محاسبه نرخ انتقال جرم وجه شباهت هر سه مدل ذکر شده است. مدل‌های لی و تاناساوا بر خلاف مدل مرز تیز دارای ضریبی تجربی موسوم به فاکتور شدت انتقال جرم هستند که از این حیث این مدل‌ها را از لحاظ وابستگی حل به نتایج تجربی از مدل مرز تیز متمایز می‌کند. عدم انتخاب صحیح این ضرایب موجب استخراج جواب‌های غیر واقعی خواهد شد. لذا استفاده همزمان از هر سه مدل تغییر فاز در بررسی تشکیل و خیزش حباب در مسأله جوشش فیلمی مایع اشباع توسط روش حجم سیال و ارائه ضرایب تجربی بکار برده شده از اهداف تحقیق حاضر است. مقایسه تأثیر هر یک از مدل‌ها بر میزان انتقال حرارت و جرم در پدیده جوشش فیلمی و مواردی همچون نوع و اندازه حباب جدا شده از لایه بخار، ناسلت متوسط سطح، پرپود زمانی جدایش حباب و الگوی جریان جوشش در این تحقیق مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

## 2- شرح مسأله

در این تحقیق یک مسأله دو بعدی جوشش فیلمی مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور یک لایه از بخار زیر یک لایه از مایع اشباع بگونه‌ای قرار گرفته است که سطح هیتر را بطور کامل پوشانده است. به دلیل تبخیر در مرز و تولید بخار، همواره مایع از تماس با سطح دور نگه داشته می‌شود و بخارات تولید شده مداوماً لایه بخار را بصورت حباب ترک می‌کنند. بدین

<sup>1</sup> Interface Tracking

<sup>2</sup> VOF (Volume of Fluid)

<sup>3</sup> Simple Line Interface Calculation

<sup>4</sup> Piecewise Linear Interface Construction

<sup>5</sup> Least squares Volume-of-fluid Interface Reconstruction Algorithm

<sup>6</sup> Parabolic Reconstruction of Surface Tension

<sup>7</sup> Interface Capturing

<sup>8</sup> Level Set

<sup>9</sup> Continuous Phase

<sup>10</sup> Dispersed Phase

<sup>11</sup> CLSVOF

<sup>12</sup> Sharp Interface Model

### 3- معادلات حاکم

از مدل حجم سیال در معادلات پایستاری جرم برای فاز مایع و بخار و همچنین محاسبه میزان انتقال جرم بین دو فاز استفاده می‌شود. بدین ترتیب یک معادله پیوستگی به ازای هر یک از فازها در روابط (4,3) نوشته شده است [17].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{u}_f) = S_f \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{u}_g) = S_g \quad (4)$$

در این روابط  $\alpha_f$  و  $\alpha_g$  طبق رابطه (5) به یکدیگر مرتبط می‌شوند.

$$\alpha_f + \alpha_g = 1 \quad (5)$$

معادلات مومنتم و انرژی برای سیال همگن -ترکیب فاز مایع و بخار- در روابط (7,6) آورده شده است [17].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_e \quad (7)$$

در این روابط  $E$  انرژی بر واحد جرم سیال با واحد (J/kg) است که از رابطه (8) تعریف می‌شود [17].

$$E = \frac{\alpha_f \rho_f E_f + \alpha_g \rho_g E_g}{\alpha_f \rho_f + \alpha_g \rho_g} \quad (8)$$

در این رابطه  $E_f$  و  $E_g$  به ترتیب انرژی سیال مایع و بخار است که در هر سلول حاصل ضرب دمای سلول در ظرفیت حرارتی سیال محاسبه می‌شود.  $S_f$  و  $S_g$  در معادلات حاکم به ترتیب ترم‌های چشمه جرمی مایع و بخار و ترم چشمه انرژی ناشی از تغییر فاز هستند که در بخش مدل‌های تغییر فاز تعریف شده‌اند.  $k_{eff}$  ضریب هدایت حرارتی موثر سیال همگن است که از رابطه 12 محاسبه می‌شود. تمامی خواص دیگر سیال همگن از جمله چگالی و ویسکوزیته بطور مشابه از روابط (9) محاسبه می‌شوند.

$$\rho = \alpha_f \rho_f + \alpha_g \rho_g, \quad \mu = \alpha_f \mu_f + \alpha_g \mu_g \quad (9)$$

### 4- مدل‌های تغییر فاز

در این بخش سه مدل تغییر فاز رایج در شبیه‌سازی مسائل شامل تغییر فاز جوشش و چگالش معرفی می‌شوند.

#### 4-1- مدل مرز تیز

در این مدل که از نوشتن موازنه انرژی بر روی مرز مایع و بخار حاصل می‌شود فرض می‌شود که تمامی حرارت منتقل شده به مرز، توسط حرارت نهان تبخیر صرف تغییر فاز می‌شود. در این حالت مرز مشترک مایع و بخار در دمای ثابت اشباع  $T_{sat}$  باقی می‌ماند. عبارت چشمه جرمی در رابطه (11) با توجه به پایستاری انرژی در رابطه (10) محاسبه می‌شود [11].

$$q_i'' = -k_{eff} \nabla T_i \cdot \vec{n} = \dot{m}'' h_{fg} \quad (10)$$

$$S_g = -S_f = \dot{m}'' |\nabla \alpha| = \frac{k_{eff} (\nabla \alpha \cdot \nabla T)}{h_{fg}} \quad (11)$$

در این روابط  $\dot{m}''$  نرخ جرمی تغییر فاز بر روی مرز و  $\vec{n} = \nabla \alpha / |\nabla \alpha|$  بردار نرمال سطح مشترک فازهای بخار و مایع است.  $k_{eff}$  ضریب موثر هدایت حرارتی است که با توجه به کسر حجمی هر یک از فازها از طریق رابطه (12) محاسبه می‌شود.

$$k_{eff} = \alpha_g k_g + (1 - \alpha_g) k_f \quad (12)$$

بدین ترتیب عبارت چشمه انرژی از طریق رابطه (13) قابل محاسبه است.

ترتیب یک موازنه جرمی بین تولید بخار و مقدار حبایی که مرز را ترک می‌کند برقرار است.

همان‌طور که در شکل 1 قابل مشاهده است ناپایداری رایلی-تیلور که در حضور جاذبه ایجاد می‌شود سبب ناپایداری در مرز مشترک بخار و مایع و ایجاد موجی متناوب بر روی آن می‌شود.

ضخامت این لایه از بخار توسط رابطه مثلثاتی (1) تعیین می‌شود. در این تحقیق فضای محاسباتی یک چهارضلعی با ابعاد  $\lambda_0$  در  $3\lambda_0/2$  در نظر گرفته شده است.  $\lambda_0$  بزرگترین طول موج تیلور و مقیاس طولی مسأله است که از رابطه (2) محاسبه می‌شود.

$$\delta = \frac{\lambda_0}{64} \left( 4 + \cos \left( \frac{2\pi x}{\lambda_0} \right) \right) \quad (1)$$

$$\lambda_0 = 2\pi \sqrt{\frac{3\sigma}{(\rho_L - \rho_g)g}} \quad (2)$$

به دلیل تقارن موجود، فقط نیمی از این فضا حل می‌شود و به مرزهای عمودی شرط مرزی تقارن نسبت داده شده است. بدین ترتیب فضای محاسباتی بطور متناوب در راستای افقی قابل تعمیم است. مرز انتهایی دارای یک شرط مرزی فشار خروجی است و گردادیان عمودی سایر متغیرها روی این مرز صفر در نظر گرفته شده است. مرز زیرین، دیواره هیتز با شرط عدم لغزش و دما ثابت است که به میزان  $\Delta T$  از دمای اشباع مایع بالاتر است.

مایع و مرز مشترک آن با بخار، در لحظه اولیه شروع حل در دمای اشباع  $T_{sat}$  قرار دارد. در این لحظه دمای لایه بخار از دمای  $T_{sat} + \Delta T$  روی سطح تا دمای  $T_{sat}$  روی مرز مشترک دو فاز بصورت خطی تغییر می‌کند. خواص ترموفیزیکی سیال مورد بررسی در جدول 1 آورده شده است. چگالی بخار  $\rho_g = 5 \text{ kg/m}^3$  و دمای اشباع سیال 500 کلوین و دمای دیواره هیتز 10 کلوین بالاتر از دمای اشباع سیال در نظر گرفته شده است.

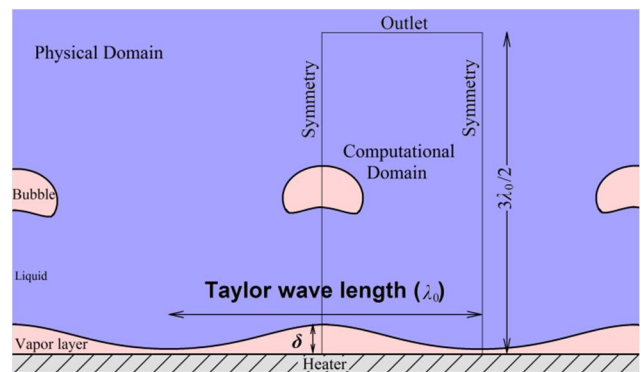


Fig. 1 Geometry and boundary conditions of film boiling

شکل 1 هندسه و شرایط مرزی در جوشش فیلمی

جدول 1 خواص ترموفیزیکی سیال

Table 1 Thermo-physical properties of the fluid

گاز	مایع	خواص مواد
$\rho_L/\rho_g = 10$	$\rho_L = 200$	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_L/\rho_g = 100$		
$\rho_L/\rho_g = 1000$		
$k_g = 1$	$k_L = 40$	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)
$C_{p,g} = 200$	$C_{p,L} = 400$	ظرفیت حرارتی (J/kgK)
$\mu_g = 0.005$	$\mu_L = 0.1$	ویسکوزیته (Pas)
	$\sigma = 0.1$	ضریب کشش سطحی (N/m)
	$h_{L,g} = 10^4$	انتالپی تبخیر (J/kg)

بسته به شرایط و هندسه جریان و همچنین بر اساس اندازه شبکه و گام زمانی تغییر می‌کند [11]. در این شبیه‌سازی از  $\Gamma_v$  به عنوان عبارت چشمه جرمی برای گاز و از  $-\Gamma_v$  به عنوان چشمه جرمی برای فاز مایع استفاده شده است. از حاصلضرب چشمه جرمی در حرارت نهان تبخیر طبق رابطه (19) عبارت چشمه حجمی انرژی با واحد  $W/m^3$  استخراج می‌شود.

$$S_e = -\Gamma_v h_{fg} \quad (19)$$

### 5- شبیه‌سازی عددی

در شبیه‌سازی این مسأله از حلگر عددی فلوئنت انسیس استفاده شده است و تمامی ترم‌های چشمه ناشی از تغییر فاز بصورت کدهای UDF تعریف شده‌اند که برای نمونه، بخشی از کد مدل تغییر فاز مرز تیز در پیوست آورده شده است. در حل عددی حاضر از یک هندسه چهار گوش دو بعدی با شبکه‌بندی با سازمان و ساختار یافته 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 مومنتم و انرژی از روش QUICK<sup>4</sup> استفاده شده است که از لحاظ مکانی دارای دقت مرتبه سوم و از لحاظ زمانی دارای دقت مرتبه اول است. در مسائل دو فازی شامل تغییر فاز، محاسبه دقیق گرادیان‌ها خصوصاً بر روی مرزها و مرز مشترک دو فاز نقش بسزایی در محاسبه صحیح نرخ تغییر فاز دارد و از آنجا که این مسائل دچار دیفیوژن 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>5</sup> که از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است استفاده شده است. گسسته‌سازی ترم فشار در معادله مومنتم به روش PRESTO<sup>6</sup> انجام شده است. از این روش در جریان‌هایی استفاده می‌شود که دارای شیب فشار و یا انحنای زیاد باشند مانند آنچه بر روی مرز حباب وجود دارد. معادله انرژی بصورت مرتبه اول با بدال<sup>7</sup> و ترم‌های زمانی بصورت مرتبه اول ضمنی گسسته‌سازی شده است. گسسته‌سازی متغیر کسر حجمی در معادلات پیوستگی بصورت صریح و به همراه بازسازی هندسی<sup>8</sup> مرز مشترک دو فاز بوده است. در این روش یک درون‌یابی بر روی سلول‌هایی که شامل مرز مشترک دو فاز هستند انجام شده و مرز در این سلول‌ها بصورت تک‌های خطی بدست می‌آید. برای تصحیح میدان فشار از کوپل میدان سرعت و فشار به روش PISO<sup>9</sup> استفاده شده است. این روش مناسب برای جریان‌های گذرا با زمان است. ضرایب تخفیف<sup>10</sup> در شبیه‌سازی عددی به منظور هر چه پایدار کردن روش تکرار بکار می‌رود. این ضرایب که انتخاب صحیح آنها کاملاً به تجربه حل مسائل مختلف مرتبط است در جدول 2 آورده شده است. کوچک بودن ضرایب تخفیف مومنتم و فشار سبب همگرایی بهتر جواب می‌شود.

جدول 2 ضرایب تخفیف

Table 2 Under relaxation factors

فشار	چگالی	نیروی حجمی	مومنتم	انرژی
0.5	1.0	1.0	0.5	1.0

<sup>4</sup> Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics

<sup>5</sup> Least Squares Cell Based

<sup>6</sup> PREssure STaggering Option

<sup>7</sup> Upwind

<sup>8</sup> Geo-Reconstruction

<sup>9</sup> Pressure Implicit Splitting of Operators

<sup>10</sup> Under Relaxation Factor

$$S_e = -S_g h_{fg} \quad (13)$$

با توجه به اینکه محاسبه دقیق شار روی مرز مشترک تأثیر بسزایی بر محاسبه نرخ تغییر فاز دارد لذا این مدل تنها در آن دسته از مدل‌های دو فازی جواب صحیح می‌دهد که مرز به دقت محاسبه شده باشد. بنابراین استفاده از این مدل تغییر فاز در کنار مدل دو فازی حجم سیال به همراه مکانیزم‌های بازسازی هندسی سطح<sup>1</sup> کاملاً کاربردی بوده و می‌توان از دقت نسبی مرز و در اصطلاح تیز بودن مرز اطمینان حاصل کرد.

### 4-2- مدل تاناساوا

این مدل در ابتدا توسط شارگ [13] در سال 1953 و بر پایه تئوری پرش دما و فشار بر روی مرز بخار و مایع ارائه شد. طبق رابطه (14) 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.

$$\dot{m}'' = \frac{2}{2 - \gamma_c} \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \left[ \gamma_c \frac{P_g}{\sqrt{T_g}} - \gamma_e \frac{P_f}{\sqrt{T_f}} \right] \quad (14)$$

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 1991 [14]،  $\gamma_e = \gamma_c = \gamma$  به عنوان ضریب تطابق<sup>2</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 (14) را بصورت رابطه (15) ارائه داد.

$$\dot{m}'' = \frac{2\gamma}{2 - \gamma} \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \frac{\rho_g h_{fg} (T - T_{sat})}{T_{sat}^{3/2}} \quad (15)$$

عبارت چشمه جرم و انرژی به ترتیب در روابط (16) و (17) تعریف می‌شود.

$$S_g = -S_f = \dot{m}'' |\nabla \alpha_g| \quad (16)$$

$$S_e = -S_g h_{fg} \quad (17)$$

### 4-3- مدل لی

این مدل توسط لی در سال 1980 جهت محاسبه نرخ جرم تغییر فاز یافته در تبخیر و چگالش بر روی مرز بخار و مایع ارائه شد [15]. این مدل بر پایه این فرض استوار است که تغییر فاز تحت یک فشار ثابت و در شرایط شبه تعادلی حرارتی روی می‌دهد [11]. عبارت چشمه جرمی تبخیر با واحد  $(kg/m^3s)$  که در طیف وسیعی از مقالات تغییر فاز مورد استفاده قرار گرفته است در رابطه (18) آمده است.

$$\Gamma_v = \begin{cases} \lambda_v \rho_f \alpha_f \frac{(T_f - T_s)}{T_s} & , T_f \geq T_s \\ 0 & , T_f < T_s \end{cases} \quad (18)$$

در رابطه مدل لی  $\lambda_v$  پارامتر تخفیف زمانی با واحد  $s^{-1}$  است که لی در کار خود آن را 0.1 در نظر گرفته است [15]. در مرجع دیگری [12] به این ضریب تحت عنوان یک ضریب کاملاً تجربی به نام فاکتور شدت انتقال جرم<sup>3</sup> اشاره کرده است. محققان مختلف بازه وسیعی از مقادیر مختلف از 0.1 تا  $1.0 \times 10^7$  ( $s^{-1}$ ) را برای این ضریب در نظر گرفته‌اند. این مقدار در جریان‌های مختلف

<sup>1</sup> Geometric Reconstruction Scheme

<sup>2</sup> Accommodation Coefficient

<sup>3</sup> Mass Transfer Intensity Factor

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد مقیاس طولی مسأله از مرتبه  $\lambda_0$  است که از رابطه 2 مقدار 0.078 متر محاسبه می‌شود. از آنالیز ابعادی، مقیاس سرعت از مرتبه  $\sqrt{g\lambda_0}$  و مقیاس زمانی از مرتبه  $\sqrt{\lambda_0/g}$  است که به ترتیب 0.88 متر بر ثانیه و 0.09 ثانیه محاسبه می‌شود. عدد کورانت یکی از مهمترین پارامترهایی است که گام زمانی حل عددی گذرا را تعیین می‌کند و بصورت نسبت سرعت فیزیکی جریان به سرعت عددی تعریف می‌شود. با در نظر گرفتن کورانت بزرگتر از یک، گام زمانی حل عددی کوچکتر از مقیاس زمانی مسأله تعیین خواهد شد که این امر سبب پایداری حل می‌شود. با توجه به رابطه کورانت و در نظر گرفتن مقدار دو برای این عدد بی‌بعد و اندازه شبکه که از بخش استقلال از شبکه 0.0006 متر محاسبه شده است گام زمانی حل عددی  $\Delta t = 0.001$  s محاسبه می‌شود که با اطمینان دو مرتبه از مقیاس زمانی مسأله کوچکتر است.

### 5-1- استقلال از شبکه

در شبیه‌سازی عددی مسأله جوشش فیلمی اشباع از شبکه بندی با سازمان ساختار یافته با 12288 سلول مربعی بهره برده شده است. این تعداد سلول با توجه به آزمون استقلال از شبکه در شکل 2 انتخاب شده است. از آنجا که در مدل مرز تیز هر دو گرادینان دمایی و کسر حجمی در محاسبه نرخ تغییر فاز حضور دارد، همین دلیل می‌تواند عاملی برای وابستگی بیشتر این مدل به سائز شبکه نسبت به سایر مدل‌ها باشد. لذا آزمون استقلال از شبکه بر روی شبیه‌سازی جوشش فیلمی با استفاده از مدل مرز تیز انجام شده است. در این آزمون جدایش اولین حباب بخار ناشی از جوشش فیلمی مدنظر قرار گرفته است. این جدایش در زمان 820 میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد و همان‌گونه که از شکل مشخص است برای دو شبکه آخر تفاوت محسوسی در زمان و نحوه جدایش حباب وجود ندارد. بنابراین شبکه 192x64 به عنوان شبکه مناسب در این بررسی انتخاب شده است.

### 5-2- حل مسأله نمونه

برای اعتبار سنجی نتایج حاصل از این تحقیق، مسأله کلاسیک جوشش یک بعدی استفان [18] حل شده است و نتایج آن با حل تحلیلی دقیق این مسأله مقایسه شده است. مسأله استفان به عنوان یک مسأله نمونه مناسب در مسائل دو فازی شامل تغییر فاز در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته است [2,19].

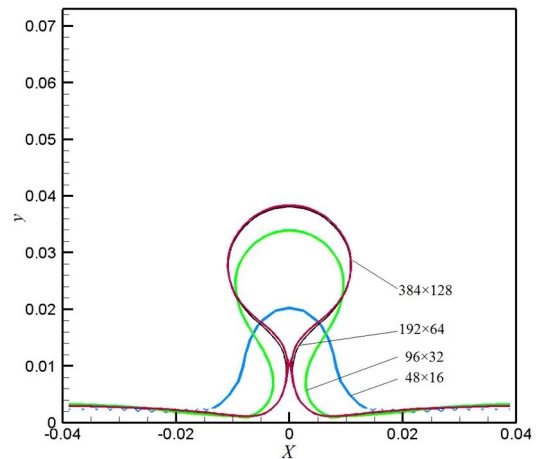


Fig. 2 Mesh independency test

شکل 2 آزمون استقلال از شبکه

مسأله استفان برای سیالی که مشخصات آن در جدول 1 آورده شده است در سه نسبت چگالی مایع به بخار، 10، 100 و 1000 حل شده است. دامنه محاسباتی به طول 0.1 متر و دارای 50 سلول به اندازه 0.002 متر است. دمای سوپرهیتم دیواره همانند مسأله اصلی 10 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. نتایج عددی و مقایسه آنها با نتایج تحلیلی در شکل 4 نمایش داده شده است که بیانگر تطابق خوب و صحت عمل حلگر عددی است.

$$\delta(t) = 2\xi\sqrt{\alpha_g t} \quad (20)$$

$$\xi \cdot \exp(\xi^2) \cdot \text{erf}(\xi) = \frac{c_{p,g}(T_{\text{wall}} - T_{\text{sat}})}{h_{L,g}\sqrt{\pi}} \quad (21)$$

### 6- نتایج

شکل 5- الف اولین حباب تشکیل و جدا شده در جوشش فیلمی را در سه مدل تغییر فاز مرز تیز، تاناساوا و لی با هم مقایسه می‌کند. همان‌طور که در برخی مراجع [20,2] نیز ذکر شده است اولین حباب‌های جوشش جدا شده در مدل مرز تیز بزرگتر از اندازه حالت پایا هستند. اندازه حباب‌های تولیدی

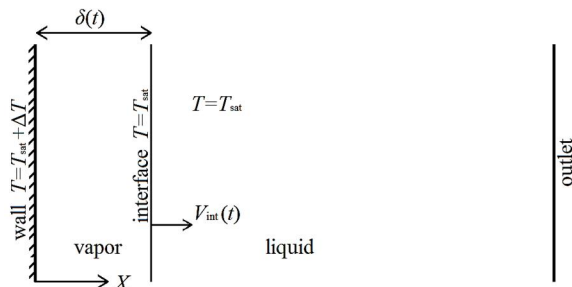


Fig. 3 Geometry of Stefan benchmark

شکل 3 هندسه مسأله نمونه استفان

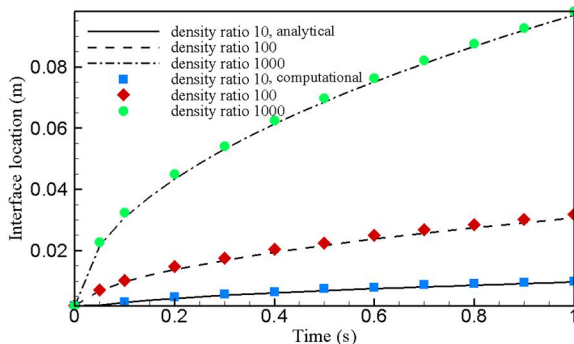


Fig. 4 Results of Stefan benchmark

شکل 4 نتایج مسأله نمونه استفان

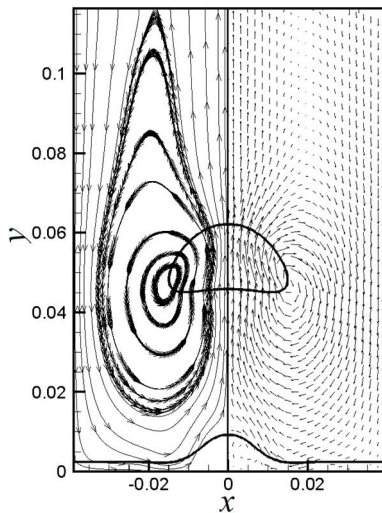
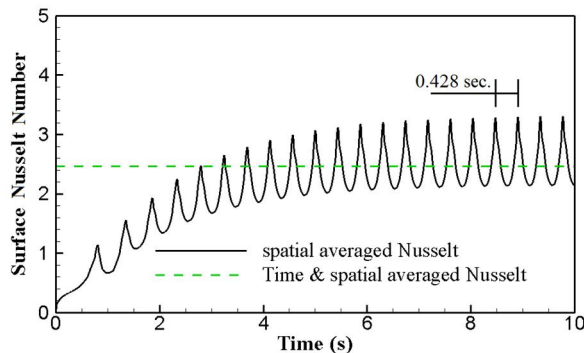


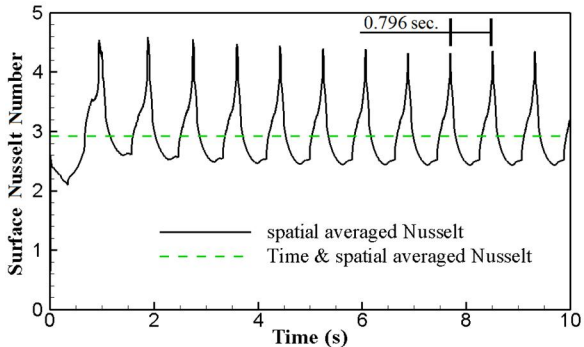
Fig. 6 Velocity vectors and stream lines around the bubble

شکل 6 بردارهای سرعت و خطوط جریان حول حباب



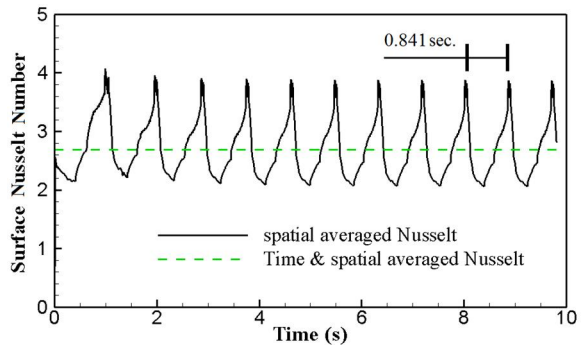
a) sharp interface model

الف) مدل مرز تیز



b) Lee model

ب) مدل لی



c) Tanasawa model

ج) مدل تاناساوا

Fig. 7 Averaged surface Nusselt number

شکل 7 متوسط عدد ناسلت روی سطح

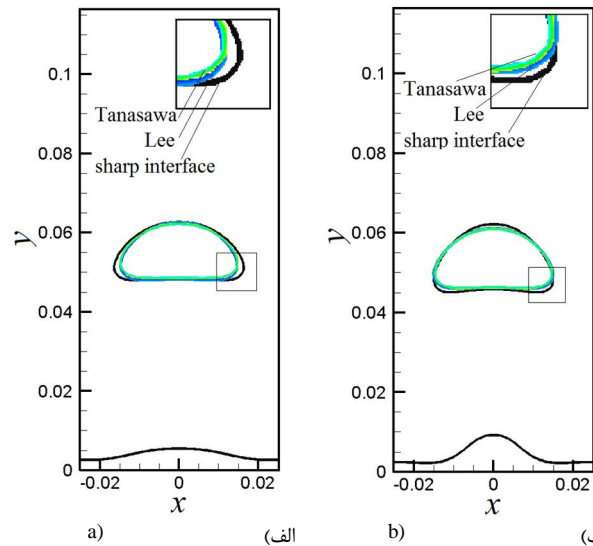


Fig. 5 Detached bubbles from the vapor film in three phase change models, a) The first detached bubble, b) Detached bubble in semi steady state period

شکل 5 حباب‌های جدا شده از فیلم بخار در سه مدل تغییر فاز، الف) اولین حباب جدا شده، ب) حباب جدا شده در حالت شبه پایا

توسط مدل تاناساوا و لی تقریباً با هم یکسان هستند. شکل 5 ب اندازه و شکل حباب‌های جوشش را پس از پایا شدن جواب‌ها در سه مدل مذکور نشان می‌دهد. در حالت پایا نیز همچنان مدل تغییر فاز مرز تیز حباب‌های به نسبت بزرگتری را تولید می‌کند.

همان‌طور که از شکل 5 مشخص است انحنای بخش زیرین حباب در این دو حالت متفاوت با هم است و آن هم به دلیل ایجاد یک جریان رو به بالا و متاثر از کنده شدن و صعود حباب‌های متوالی، مکش در ناحیه دنباله حباب و گردابه‌های ایجاد شده در نقاط نوک تیز حباب است. همین جریان رو به بالا سبب برجستگی بیشتر لایه حباب روی سطح در ناحیه پایا شده است که ضخامت فیلم بخار را تحت تأثیر قرار داده است و توجیه‌کننده تغییرات نرخ انتقال حرارت روی سطح و ناسلت محاسبه شده نسبت به حالت گذرا می‌باشد. این جریان رو به بالا در شکل 6 با بردارهای سرعت و خطوط جریان نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است ناحیه‌های گردابی سبب ایجاد نقاط نوک تیز در حباب شده است. شکل 6 مستخرج از شبیه‌سازی مدل مرز تیز است و برای دو مدل دیگر نیز بطور مشابه است که از بیان آن خودداری می‌شود. در شکل 5 سه حباب ناشی از سه مدل تغییر فاز مختلف، بر مبنای یک ارتفاع معین بر روی هم رسم شده‌اند تا قابل مقایسه باشند. همان‌طور که در شکل 7 و توضیحات مربوط به آن ذکر شده است میزان تغییر فاز محاسبه شده در هر یک از مدل‌ها و در نهایت زمان نرخ جدا شدن حباب‌ها از سطح متفاوت است. لذا شکل 5 مربوط به یک زمان خاص نیست. زمان اولین حباب‌های جدا شده در شکل 5-الف در مدل‌های مرز تیز، تاناساوا و لی به ترتیب 945، 1200 و 1150 میلی‌ثانیه است. حباب‌های شکل 5-ب نیز اولین حباب‌های جدا شده در بازه پایا مسأله است که زمان آنها اندکی پس از زمان پایا شدن هر یک از سه مدل است که در بخش 6 به این زمان‌ها اشاره شده است.

در شکل 7 نمودارهای عدد بی‌بعد ناسلت متوسط روی سطح هیتز برای هر سه مدل تغییر فاز با توجه به تعریف ناسلت طبق رابطه (22) آورده شده است.

6-1- اعتبارسنجی نتایج

روابط تجربی متعددی وجود دارد که مکانیزم جوشش فیلمی را تشریح می‌کند. در این میان نتایج تحقیق حاضر با روابط ناسلت تجربی ارائه شده توسط کلیمکو [25] و برنسون [26] که مقبولیت بیشتری دارند مقایسه شده است. در تحقیق کلیمکو تأثیرات پارامترهایی همچون ضخامت فیلم بخار و سرعت آن بر ناپایداری تیلور مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت رابطه ناسلت تجربی کلیمکو بر روی سطح هیتر از میان تمام داده‌های آزمایشگاهی با بیشینه خطای 25% استخراج شده است. رابطه ناسلت مذکور برای جریان آرام  $Ga[(\rho_L/\rho_g) - 1] < 1 \times 10^8$  و متلاطم  $Ga[(\rho_L/\rho_g) - 1] > 1 \times 10^8$  به ترتیب در روابط (25,23) آورده شده است [25]. قابل ذکر است که جریان جوشش در این تحقیق طبق روابط مذکور آرام است.

$$Nu = 0.19 \left[ Ga \left( \frac{\rho_L}{\rho_g} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{3}} Pr^{\frac{1}{3}} f_1, \quad (23)$$

$$f_1 = \begin{cases} 1 & , \frac{h_{fg}}{c_p \Delta T} \leq 1.4 \\ 0.89 \left( \frac{h_{fg}}{c_p \Delta T} \right)^{\frac{1}{3}} & , \frac{h_{fg}}{c_p \Delta T} > 1.4 \end{cases} \quad (24)$$

$$Nu = 0.0086 \left[ Ga \left( \frac{\rho_L}{\rho_g} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} f_2, \quad (25)$$

$$f_2 = \begin{cases} 1 & , \frac{h_{fg}}{c_p \Delta T} \leq 2.0 \\ 0.71 \left( \frac{h_{fg}}{c_p \Delta T} \right)^{\frac{1}{2}} & , \frac{h_{fg}}{c_p \Delta T} > 2.0 \end{cases} \quad (26)$$

در روابط کلیمکو  $Ga$  عدد بی‌بعد گالیله است که طبق تعریف نسبت نیروهای گرانشی به نیروهای ویسکوزی است که در رابطه (27) تعریف شده است.

$$Ga = Re^2 \cdot Ri = \frac{g \lambda^3}{\nu^2} \quad (27)$$

رابطه کلیمکو بیان می‌کند که در اختلاف دماهای کوچک بین دیواره و دمای اشباع مایع، عدد ناسلت بسته به آرام و یا متلاطم بودن جریان متناسب با  $\Delta T^{-1/2}$  و  $\Delta T^{-1/3}$  تغییر می‌کند در صورتیکه در اختلاف دماهای بالاتر، مقدار ناسلت از دمای سوپرهیت دیواره مستقل است. ناسلت رابطه کلیمکو برای تحقیق حاضر 3.27 محاسبه شده است.

برنسون [26] در تحقیق خود فرض کرد که حباب جوشش در یک منطقه چهارگوش قرار دارد که طول اضلاع آن برابر با بزرگترین طول موج تیلور و لذا چند برابر قطر حباب است. بنابراین می‌توان از تأثیر مرزها بر روی حباب صرفنظر کرد. برنسون با فرضیات فوق رابطه ناسلت دیواره برای جوشش فیلمی را بصورت رابطه (28) ارائه کرد [26].

$$Nu = 0.425 \left[ \frac{\rho_g (\rho_L - \rho_g) g h_{fg}}{k_g \mu_g \Delta T} \right]^{\frac{1}{4}} \lambda^{\frac{3}{4}} \quad (28)$$

در روابط فوق  $\lambda$  طول مشخصه و  $\Delta T$  دمای سوپرهیت دیواره است که به ترتیب در روابط (30,29) آورده شده‌اند.

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_L - \rho_g) g}} \quad (29)$$

$$\Delta T = T_{wall} - T_{sat} \quad (30)$$

ناسلت محاسبه شده توسط رابطه برنسون برای تحقیق حاضر 3.91 بدست آمده است. با توجه به روابط تجربی فوق، ناسلت متوسط بدست آمده از سه مدل تغییر فاز با ناسلت محاسبه شده توسط روابط تجربی برنسون و کلیمکو در جدول 3 مقایسه و درصد خطاها محاسبه شده است. همان‌طور که مشخص است ناسلت محاسبه شده از دو رابطه تجربی مذکور خود در حدود

$$\overline{Nu} = \frac{q'' \cdot \lambda'}{\Delta T \cdot k_g} \quad (22)$$

خطوط توپر، ناسلت متوسط مکانی روی سطح هیتر در هر لحظه از زمان و خطوط منقطع، متوسط‌گیری شده ناسلت در زمان و مکان می‌باشد. ناسلت متوسط در مدل مرز تیز، مدل لی و مدل تاناساوا به ترتیب 2.47، 2.90 و 2.70 محاسبه شده است که در بیشترین حالت اختلاف 15 درصدی نسبت به یکدیگر مشاهده می‌شود.

از مقایسه نمودارهای شکل 7 می‌توان دریافت که در هر سیکل از تشکیل و جدایش حباب، بازه تغییرات ناسلت در مدل مرز تیز یک واحد و در مدل‌های لی و تاناساوا دو برابر این مقدار است. همین امر سبب می‌شود ناسلت مکانی و زمانی پیش‌بینی شده توسط مدل مرز تیز مقدار کوچکتری را نسبت به دو مدل لی و تاناساوا به دست بدهد. قابل ذکر است که در مدل مرز تیز ناسلت در لحظه شروع حل از 0.1 شروع و در دو مدل لی و تاناساوا از 0.6 آغاز می‌شود.

در این تحقیق فاکتور شدت انتقال جرم در محاسبه نرخ تغییر فاز در مدل لی  $100 s^{-1}$  در نظر گرفته شده است. مقادیر بزرگتر و کوچکتر از این مقدار سبب تولید جواب‌های نادرست در این تحقیق شده است. برخی تحقیقات دیگر نیز از جمله مراجع [22,21] در حل مسائل جریان جوشش و مرجع [23] در حل مسأله چگالش این ضریب را 100 در نظر گرفته‌اند. ضریب تطابق در محاسبه نرخ انتقال جرم در مدل تاناساوا برابر 0.01 در نظر گرفته شده است. هر چند که این مدل به گستردگی مدل لی در حل مسائل استفاده نشده است ولی مرجع [24] نیز در حل یک مسأله تغییر فاز این ضریب را 0.01 در نظر گرفته است.

جوشش فیلمی یک پدیده شبه پایا<sup>1</sup> است بطوریکه پس از گذشت زمانی از شروع حل، مسأله بصورت پرودییک پایا می‌شود. همان‌گونه که از نمودارهای شکل 7 مشخص است ناسلت متوسط مکانی در مدل‌های تاناساوا و لی هر یک پس از گذشت زمان 3.24 و 4.79 ثانیه از شروع حل پایا شده‌اند. معیار گزارش زمان، لحظه جدایش حباب در نظر گرفته شده است. روند ناسلت تا پایا شدن اندکی نزولی بوده است بر خلاف آن دو، ناسلت در مدل مرز تیز پس از گذشت 6.1 ثانیه از شروع حل با روندی صعودی پایا شده است. این تفاوت در اختلاف نوع رفتار این مدل‌ها در رسیدن از شرایط اولیه به یک توزیع دمای پایا است. فراز و فرود عدد ناسلت در هر سیکل از جوشش به دلیل تولید بخار و ضخیم شدن فیلم بخار و در نهایت جدا شدن یک حباب از این لایه اتفاق می‌افتد. با کنده شدن یک حباب و کاهش ضخامت لایه بخار، شیب دما در لایه بخار افزایش و سبب افزایش ناسلت می‌شود. با ادامه تبخیر و افزایش ضخامت فیلم بخار، روند ناسلت تا کنده شدن حباب بعدی نزولی خواهد بود.

تفاوت در نحوه محاسبه نرخ انتقال جرم توسط هر یک از مدل‌های تغییر فاز سبب اختلاف در محاسبه پرودییک زمانی جدایش حباب توسط این مدل‌ها شده است. همان‌گونه که در شکل 7 گزارش شده است فاصله زمانی بین جدا شدن یک حباب تا حباب بعدی در مدل مرز تیز 428 میلی‌ثانیه، در مدل لی 796 میلی‌ثانیه و در مدل تاناساوا 841 میلی‌ثانیه می‌باشد که دارای حداکثر اختلاف 50 درصدی نسبت به هم می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در مدل لی و تاناساوا حباب‌ها با پرودییک زمانی بالاتر از مدل مرز تیز از لایه بخار جدا می‌شوند و طبق شکل 5 دارای ابعاد کمی کوچکتر از حباب‌های جدا شده از مدل مرز تیز هستند.

<sup>1</sup> Semi Steady State

ثابت جهانی گازها (J/mole K)	R
عدد بی‌بعد رینولدز	Re
عدد بی‌بعد ریچاردسون	Ri
چشمه جرمی (kg/m <sup>3</sup> s)، چشمه انرژی (W/m <sup>3</sup> )	S
زمان (s)	t
دما (K)	T
بردار سرعت (m/s)	$\vec{u}$
<b>علایم یونانی</b>	
کسر حجمی، ضریب نفوذ حرارتی (m <sup>2</sup> /s)	$\alpha$
ضریب تطابق، کسر مولکولی	$\gamma$
چشمه جرمی در مدل لی (kg/m <sup>3</sup> s)	$\Gamma$
ضخامت فیلم اولیه بخار (m)	$\delta$
تخفیف زمانی، فاکتور شدت انتقال جرم (s <sup>-1</sup> )	$\lambda$
طول موج تیلور (m)	$\lambda_0$
طول مشخصه (m)	$\lambda$
ویسکوزیته دینامیکی (Pas)	$\mu$
ویسکوزیته سینماتیکی (m <sup>2</sup> /s)	$\nu$
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$
کشش سطحی (N/m)	$\sigma$
<b>زیر نویس‌ها</b>	
چگالش	c
انرژی، تبخیر	e
موثر	eff
مایع	f
بخار	g
سطح مشترک دو فاز	i
مایع	L
فشار	p
اشباع	sat, s
بخار	v
دیواره هیتر	wall

**جدول 3** مقایسه ناسلت سه مدل با نتایج ناسلت روابط کلیمنکو و برنسون  
**Table 3** Comparison the Nusselt in three models with the results of Klimentenko and Berenson's Correlations

مدل تغییر فاز	درصد خطا نسبت به ناسلت کلیمنکو		مدل
	درصد خطا نسبت به ناسلت برنسون	درصد خطا نسبت به ناسلت کلیمنکو	
مرز تیز	$\bar{Nu}_{Berenson} = 3.91$	$\bar{Nu}_{Klimentenko} = 3.27$	2.469
لی	37%	24%	2.922
تاناساوا	25%	11%	2.692
	31%	17%	

20 درصد نسبت به هم اختلاف دارند. ناسلت‌های محاسبه شده توسط سه مدل تغییر فاز بیشترین نزدیکی را به ناسلت تجربی کلیمنکو دارند. در این میان مدل تغییر فاز لی دارای دقیقترین ناسلت نسبت به رابطه تجربی کلیمنکو است و مدل مرز تیز بیشترین خطا را تولید کرده است.

### 7- جمع بندی

در این مقاله جوشش فیلمی 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 سه مدل مختلف تغییر فاز مرز تیز، لی و تاناساوا استفاده شده است و نتایج آنها اعم از شکل حباب تولیدی، الگوی جریان، پرورد زمانی جدایش حباب و متوسط ناسلت پروردیک روی سطح با هم مقایسه شده است و همچنین مقادیر فاکتور شدت انتقال جرم در مدل لی و ضریب تطابق در مدل تاناساوا که در این تحقیق استفاده شده‌اند معرفی شده است. صحت عملکرد حلگر عددی توسط مسأله نمونه یک بعدی استفان مورد آزمون قرار گرفته است. نتایج عددی ناسلت به کمک دو رابطه تجربی اعتبار سنجی شده است. نتایج به دست آمده برای ناسلت تطابق خوبی را با ناسلت تجربی کلیمنکو از خود نشان می‌دهند و از بین آنها مدل لی دقیق‌ترین است و مدل مرز تیز بیشترین خطا را ایجاد کرده است. همین دلیل است که دو مدل لی و تاناساوا در تحقیقات مورد اقبال بیشتری واقع می‌شوند. در این میان این دو مدل از لحاظ وابستگی به ضرایب تجربی در مقابل مدل مرز تیز در موضع ضعف قرار دارند.

### 9- پیوست

برای محاسبه میزان تغییر فاز در هر یک از مدل‌ها می‌بایست جملات چشمه معادلات پیوستگی و انرژی بصورت کدهای UDF برای نرم‌افزار فلونت آماده شود. در این پیوست جملات چشمه مورد نیاز برای مدل مرز تیز به‌عنوان نمونه ارائه شده است. جملات چشمه در معادلات پیوستگی (3,4) و معادله انرژی (7) بصورت زیر نوشته می‌شود.

$$C\_UDMI(c,t,0) = (C\_VOF\_G(c,tp)[0]*C\_T\_G(c,t)[0] + C\_VOF\_G(c,tp)[1]*C\_T\_G(c,t)[1]);$$

$$source = (Kl+Kg)*C\_UDMI(cell,tm,0) / L;$$

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

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

در کد فوق جمله  $C\_UDMI(cell, tm, 1)$  چشمه جرمی فاز گاز برای رابطه (4) و همین مقدار با علامت منفی جمله چشمه جرمی فاز مایع برای معادله (3) را تعیین می‌کند. عبارت  $C\_UDMI(cell, tm, 2)$  جمله چشمه انرژی را برای رابطه (7) فراهم می‌سازد.

### 8- فهرست علایم

C	ظرفیت حرارتی (J/kgK)
E	انرژی بر واحد جرم سیال (J/kg)
$\vec{F}$	نیروی حجمی (N/m <sup>3</sup> )
$\vec{g}$	شتاب جاذبه (m/s <sup>2</sup> )
Ga	عدد بی‌بعد گالیه
h	انتالپی (J/kg)
k	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)
M	جرم مولکولی سیال (kg/mole)
$\dot{m}''$	نرخ جرمی تغییر فاز (kg/m <sup>2</sup> s)
$\bar{n}$	بردار عمود بر سطح مشترک دو فاز
Nu	عدد بی‌بعد ناسلت
P	فشار (Pa)
Pr	عدد بی‌بعد پرائتل
q''	شار حرارتی (W/m <sup>2</sup> )



## 10- مراجع

- condensation flow in a rectangular microchannel, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 76, pp. 60–69, 2014.
- [15] H. Lee, C. g. R. Kharangate, N. Mascarenhas, I. Park, I. Mudawar, Experimental and computational investigation of vertical downflow condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 85, pp. 865–879, 2015.
- [16] D. L. Sun, J. L. Xu, L. Wang, Development of a vapor–liquid phase change model for volume-of-fluid method in FLUENT, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, Issue 8, pp. 1101–1106, 2012.
- [17] ANSYS Inc. *PDF Documentation for Release 15.0*, Accessed on November 2013, [http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS Fluent Users Guide.pdf](http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS_Fluent_Users_Guide.pdf)
- [18] V. Alexiades, A. D. Solomon, *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*, Washington, D.C: Hemisphere, 1993.
- [19] S. W. J. Welch, J. Wilson, A Volume of Fluid Based Method for Fluid Flows with Phase Change, *Journal of Computational Physics*, Vol. 160, pp. 662–682, 2000.
- [20] G. Tomar, G. Biswas, A. Sharma, A. Agrawal, Numerical simulation of bubble growth in film boiling using a coupled level-set and volume-of-fluid method, *Physics of Fluids*, Vol. 17, Issue 11, 2005
- [21] Z. Yang, X. F. Peng, P. Ye, Numerical and experimental investigation of two phase flow during boiling in a coiled tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 1003–1016, 2008.
- [22] C. Fang, M. David, A. Rogacs, K. Goodson, Volume of fluid simulation of boiling two-phase flow in a vapor-venting microchannel, *Frontiers Heat and Mass Transfer*, Vol. 1, pp. 1–11, 2010.
- [23] S. Chen, Z. Yang, Y. Duan, Y. Chen, D. Wu, Simulation of condensation flow in arectangular microchannel, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 76, pp. 60–69, 2014.
- [24] O. Kartuzova, M. Kassemi, Modeling interfacial turbulent heat transfer during ventless pressurization of a large scale cryogenic storage tank in microgravity, *Proceedings of The 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, San Diego, USA, 31 July - 03 August, 2011.
- [25] V.V. Klimenko, Film boiling on a horizontal plate — new correlation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 24, Issue 1, pp. 69–79, 1981.
- [26] P. Berenson, Film-boiling heat transfer from a horizontal surface, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 83, No. 3, pp. 351–356, 1961.
- [1] 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*, Vol. 52, Issues 5–6, pp. 1295–1303, 2009.
- [2] 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*, Vol. 59, pp. 857–881, 2011.
- [3] C. Kunkelmann, *Numerical Modeling and Investigation of Boiling Phenomena*, PhD Thesis, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2011.
- [4] C. W. Hirt, B. D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary, *Journal of computational physics*, Vol. 39, Issue 1, pp. 1–250, 1981.
- [5] W. F. Noh, P. Woodward, in *SLIC (Simple Line Interface Calculation)*, A. I. van Dooren, P. J. Zandbergen, *Lecture Notes in Physics*, Vol. 59, pp. 330–340, New York: Springer, 1976.
- [6] D. L. Youngs, *Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion*, K. W. Morton, M. J. Baines, *Numerical Methods for Fluid Dynamics*, pp. 273–285, New York: Academic Press, 1982.
- [7] E. G. Puckett, A. S. Almgren, J. B. Bell, D. L. Marcus, W. J. Rider, A high-order projection method for tracking fluid interfaces in variable density incompressible flows, *Journal of computational physics*, Vol. 130, Issue 2, pp. 269–282, 1997.
- [8] Y. Renardy, M. Renardy, PROST: A parabolic reconstruction of surface tension for the volume of fluid method, *Journal of computational physics*, Vol. 183, Issue 2, pp. 400–421, 2002.
- [9] S. Osher, J. A. Sethian, Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations, *Journal of computational physics*, Vol. 79, Issue 1, pp. 12–49, 1988.
- [10] M. Sussman, E. G. Puckett, A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows, *Journal of computational physics*, Vol. 162, Issue 2, pp. 301–337, 2000.
- [11] R.W. Schrage, *A Theoretical Study of Interphase Mass Transfer*, New York: Columbia University Press, 1953.
- [12] I. Tanasawa, *Advances in condensation heat transfer*, J.P. Hartnett, T.F. Irvine (Eds.), *Advances in Heat Transfer*, pp. 55–139, San Diego: Academic Press, 1991.
- [13] W.H. Lee, *A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling*, T.N. Veziroglu (Eds.), *Multiphase Transport Fundamentals, Reactor Safety, Applications*, Vol. 1, Washington, DC: Hemisphere Publishing, 1980.
- [14] S. Chen, Z. Yang, Y. Duan, Y. Chen, D. Wu, Simulation of