



تأثیر 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: ۱۳۹۷/۰۸/۰۵
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 یک‌بعدی مرز مکشی استفان 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 آب‌دوست، آب‌گریز و با زاویه تماس ۹۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که جوشش بر روی سطوح آب‌گریز سبب جدایی حباب‌های با شعاع بزرگتر و انتقال حرارت بیشتر شده و در هم‌آمیختگی حباب‌ها در هسته‌های جوانه‌زایی متفاوت، جوشش بر روی سطوح آب‌گریز را به سمت جوشش فیلمی سوق می‌دهد.

۱- مقدمه

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 روش‌ها و مدل‌ها، محدودیت‌های خاص خود را دارند و در هر کاربردی مناسب نیستند. 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 [۳]. لذا بکارگیری مدل‌های مناسب جریان دو فازی و تغییر فاز در مطالعه هر چه صحیح‌تر پدیده جوشش حائز اهمیت است.

موضوع مقاله پیش‌رو شبیه‌سازی عددی پدیده جوشش است. نرخ حرارتی که در هنگام جوشش منتقل می‌شود بسیار زیادتر از روش‌های انتقال حرارت معمول است. همین امر سبب می‌گردد 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 خنک‌کاری جوشش فیلمی و هسته‌ای و اسپری‌های 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 سبب شده است تا مبانی انتقال حرارت جوششی از چند دهه قبل تا کنون بطور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار بگیرد. علی‌رغم این تلاش‌ها، همچنان وجوهی از این پدیده به‌دلیل وجود عدم قطعیت‌هایی نیازمند بررسی و تحقیق فراوان است. بخش عمده این عدم قطعیت‌ها بر پایه فیزیک پیچیده این پدیده در انتقال همزمان جرم، مومنتوم و انرژی بر روی سطوح حرارتی است. فرضیه‌های مختلف و گاهاً متضادی

از میان مدل‌های چندفازی مدل دو سیالی اویلری-اویلری که

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kouhikamali@guilan.ac.ir



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 به صورت عددی و بر پایه مدل دو فاز لی 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 پرکاربرد لی و تاناساوا استفاده شده است که به صورت کد یو دی اف^۱، 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 [۱۴-۱۶].

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 یک‌بعدی

معادله مومنتوم را برای هر یک از فازها بطور جداگانه حل می‌کند موفقیت چندانانی 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 می‌دهد که این امر به‌واسطه افزایش نفوذ عددی سبب از دست رفتن جرم سیال در روند حل عددی می‌شود [۴].

در مقابل، روش‌های چند فاز لی که مرز را دنبال می‌کنند بیشتر مورد وثوق هستند. از این روش‌ها می‌توان به روش حجم سیال توسط هیرت و نیکولاس [۵] اشاره کرد که امروزه بطور گسترده در مسائلی که شامل مرز آزاد می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. 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 پی ال آی سی^۱ توسط یانگ [۷] مرز را در هر سلول به‌صورت خطوط راست شیب‌دار محاسبه می‌کند. این روش تحت عنوان بازسازی هندسی مرز مشترک دو سیال در حلگر فلوئنت مورد استفاده قرار گرفته است [۸]. علاوه بر انتخاب روش مناسب برای مدل‌سازی جریان دو فاز، استفاده از یک مدل صحیح تغییر فاز نیز تاثیر به‌سزایی در درستی شبیه‌سازی جوشش دارد. مدل‌های متفاوتی تاکنون برای تغییر فاز ارائه شده‌اند که هر یک ویژگی‌های 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 می‌کند. 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

2 User Defined Function (UDF)

1 Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC)

است.

ابعاد این فضا $5\lambda'$ در عرض و $15\lambda'$ در ارتفاع است. λ' 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 حساب جلوگیری شود.

$$\lambda' = \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_L - \rho_g)g}} \quad (1)$$

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 اشباع T_{sat} قرار دارد. در این لحظه دمای بخار از دمای $T_{sat} + \Delta T$ روی سطح تا دمای T_{sat} روی مرز مشترک دو فاز به صورت خطی تغییر می‌کند. خواص ترموفیزیکی سیال مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. دمای اشباع سیال ۵۰۰ کلوین و دمای دیواره هیتر ۱۰ کلوین بالاتر از دمای اشباع سیال در نظر گرفته شده است.

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

گاز	مایع	خواص مواد
$\rho_g = 5$	$\rho_L = 200$	چگالی (kg/m^3)
$k_g = 1$	$k_L = 40$	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)

۳- معادلات حاکم

از دو معادله پیوستگی برای پایداری 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].

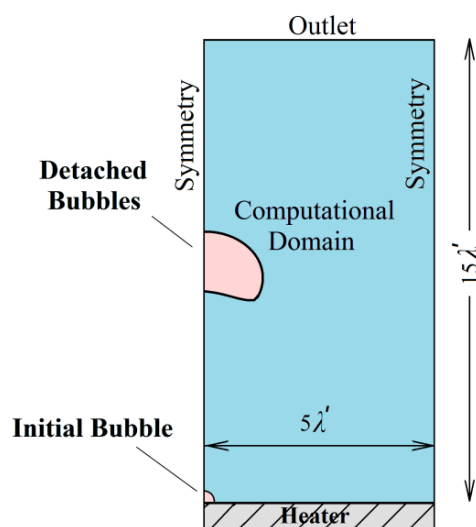
$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{u}_f) = S_f \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{u}_g) = S_g \quad (3)$$

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 پیش‌تر 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 علی‌رغم این‌که 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 ΔT 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. به دلیل 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



شکل ۱- هندسه و شرایط مرزی در جوشش هسته‌ای
Fig. 1. Geometry and boundary conditions of the nucleate boiling

رابطه (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شوند

$$k_{\text{eff}} = \alpha_g k_g + (1 - \alpha_g) k_f \quad (۸)$$

$$\rho = \alpha_f \rho_f + \alpha_g \rho_g \quad (۹)$$

$$\mu = \alpha_f \mu_f + \alpha_g \mu_g \quad (۱۰)$$

در این روابط α_f و α_g به ترتیب کسر حجمی فاز مایع و فاز بخار هستند که طبق رابطه (۴) به یکدیگر مرتبط می‌شوند. S_g و S_f 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.

$$\alpha_f + \alpha_g = 1 \quad (۴)$$

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

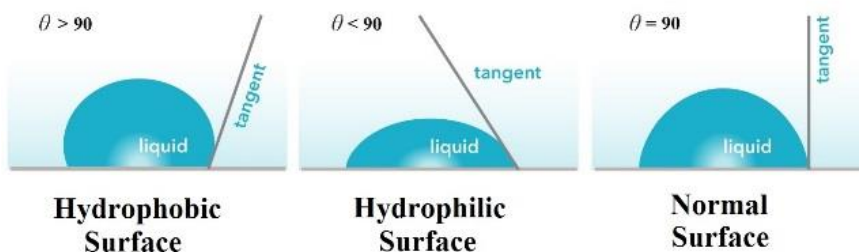
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T)] + \rho \bar{g} + F_\sigma \quad (۵)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\bar{u}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_e \quad (۶)$$

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

$$E = \frac{\alpha_f \rho_f E_f + \alpha_g \rho_g E_g}{\alpha_f \rho_f + \alpha_g \rho_g} \quad (۷)$$

در این رابطه E_f و E_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_e ترم چشمه انرژی ناشی از تغییر فاز است که در بخش مدل‌های تغییر فاز تعریف می‌شود. k_{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



شکل ۲. سطوح آب‌گریز، آب‌دوست و نرمال
Fig. 2. Hydrophobic, Hydrophilic and normal surfaces

- 1 Hydrophilic
- 2 Hydrophobic
- 3 Advancing Angle
- 4 Receding Angle
- 5 Contact Angle Hysteresis

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 گرمی 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.

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

در این رابطه γ کسری از مولکول‌ها است که طی تغییر فاز از یک فاز به فاز دیگر منتقل می‌شود. لذا γ_c کسر مولکول‌های بخار است که طی چگالش به فاز مایع تبدیل می‌شوند و γ_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]، $\gamma_e = \gamma_c = \gamma$ به عنوان ضریب تطابق^۲ 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 گرمی در رابطه (۱۴) را به صورت رابطه (۱۵) ارائه داد.

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

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

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

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

۴-۲- 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

نیرو، ایجاد می‌کند که با استفاده از مدل نیروی سطح پیوسته^۱ بر واحد حجم ارزیابی می‌گردند:

$$F_\sigma = \sigma \kappa \nabla \gamma \quad (11)$$

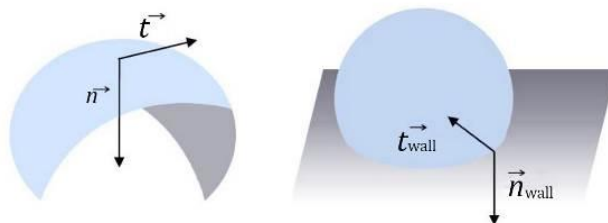
که در آن κ انحنای فصل مشترک است.

$$\kappa = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \gamma}{|\nabla \gamma|} \right) \quad (12)$$

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

$$\gamma = n_{wall} \cos \theta + t_{wall} \sin \theta \quad (13)$$

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)

۴- مدل‌های تغییر فاز

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

شامل تغییر فاز، محاسبه دقیق گرادیان‌ها خصوصاً 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^۲ که از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است استفاده شده است. گسسته‌سازی ترم فشار در معادله مومنوم به روش پرستو^۳ 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 به صورت مرتبه اول بادبالا^۴ و ترم‌های زمانی بصورت مرتبه اول ضمنی گسسته‌سازی شده است. گسسته‌سازی متغیر کسر حجمی در معادلات پیوستگی به صورت صریح و به همراه بازسازی هندسی^۵ 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 به صورت تکه‌ای-خطی بدست می‌آید. برای تصحیح میدان فشار از کوپل میدان سرعت و فشار به روش پیرو^۶ استفاده شده است. این روش مناسب برای جریان‌های گذرا با زمان است. ضرایب تخفیف^۸ در شبیه‌سازی عددی به منظور هر چه پایدار کردن روش تکرار به کار می‌رود. این ضرایب که انتخاب صحیح آن‌ها کاملاً به تجربه حل مسائل مختلف مرتبط است در جدول ۲ آورده شده است. کوچک بودن ضرایب تخفیف مومنوم و فشار سبب همگرایی بهتر جواب می‌شود.

جدول ۲. ضرایب تخفیف

Table 2. Under relaxation factors of the current problem

ضرایب تخفیف	فشار	چگالی	نیروی حجمی	مومنوم انرژی
۰/۵	۱/۰	۱/۰	۰/۵	۱/۰

همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد مقیاس طولی مساله از مرتبه λ' است که از رابطه ۱ مقدار $۰/۰۰۷۲۲$ متر محاسبه می‌شود. 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 می‌شود. عدد کورانت یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است

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

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

در رابطه مدل لی λ_v پارامتر تخفیف زمانی با واحد s^{-1} است که لی در کار خود آن را $۰/۱$ در نظر گرفته است [۱۱]. در مرجع دیگری [۱۹] به این ضریب تحت عنوان یک ضریب کاملاً تجربی به نام فاکتور شدت انتقال جرم^۱ اشاره کرده است. محققان مختلف بازه وسیعی از مقادیر مختلف از $۰/۱ \text{ s}^{-1}$ تا $۱/۰ \times ۱۰^۷ \text{ s}^{-1}$ 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 می‌کند [۱۳]. در این شبیه‌سازی از Γ_v به عنوان عبارت چشمه جرمی برای گاز و از $-\Gamma_v$ به عنوان چشمه جرمی برای فاز مایع استفاده شده است. از حاصل ضرب چشمه جرمی در حرارت نهان تبخیر طبق رابطه (۱۹) عبارت چشمه حجمی انرژی با واحد W/m^3 استخراج می‌شود.

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

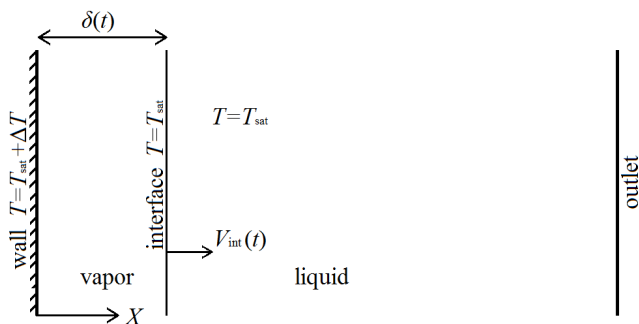
۵- شبیه‌سازی عددی

در شبیه‌سازی این مساله از حلگر عددی فلوئنت انسیس استفاده شده است و تمامی ترم‌های چشمه ناشی از تغییر فاز به صورت 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 مومنوم و انرژی از روش کوئیک^۲ استفاده شده است که از لحاظ مکانی دارای دقت مرتبه سوم و از لحاظ زمانی دارای دقت مرتبه اول است. در مسائل دو فازی

1 Mass Transfer Intensity Factor

2 Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics (QUICK)

3 least Squares Cell Based
4 PREssure STaggering Option (PRESTO)
5 Upwind
6 Geo-Reconstruction
7 Pressure Implicit Splitting of Operators (PISO)
8 Under Relaxation Factor



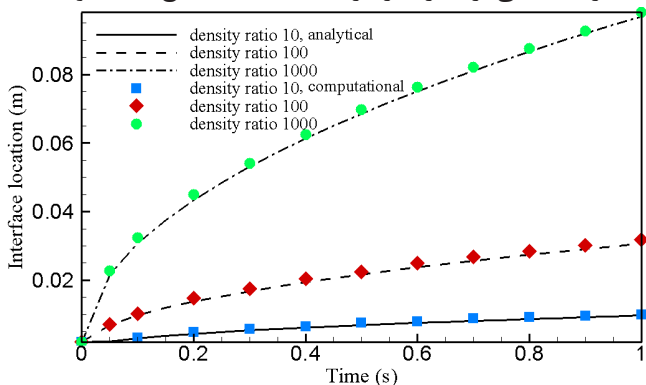
شکل ۴. هندسه مسأله نمونه استفان
Fig. 4. Geometry of the Stefan benchmark

حرارت دیواره به طریق هدایت از بخار به مرز مشترک دو فاز رسیده و سبب تبخیر مایع می‌شود. از آنجا که بخار دارای حجم مخصوص به مراتب بالاتر از مایع است، سبب راندن مایع و مرز مشترک به سوی مرز خروجی می‌شود. لذا مکان مرز مشترک هر لحظه با زمان تغییر می‌کند که طبق حل دقیق از رابطه (۲۰) بدست می‌آید [۲۱]. در این رابطه α_g ضریب نفوذ حرارتی بخار و ξ ضریبی است که از معادله (۲۱) مقدار $\xi = 0.30643$ بدست آمده است.

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

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

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 ۰/۱ متر و دارای ۵۰ سلول به اندازه ۰/۰۰۲ متر است. دمای سوپرهدیت دیواره همانند مسأله اصلی ۱۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. نتایج عددی و مقایسه



شکل ۵. نتایج مسأله نمونه استفان
Fig. 5. Results of the Stefan problem

که گام زمانی حل عددی گذرا را تعیین می‌کند و به صورت نسبت سرعت عددی به سرعت فیزیکی جریان تعریف می‌شود. با توجه به عدد کورانت برابر ۰/۵ و مقدار ۰/۰۰۰۶ متر برای اندازه شبکه که از طریق استقلال از شبکه محاسبه شده است، گام زمانی حل عددی $\Delta t = 0.001$ s محاسبه می‌شود. بدین ترتیب گام زمانی با اطمینان بیش از ۱۰ برابر از مقیاس زمانی فیزیکی مسأله کوچک‌تر 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 192×64 با تعداد ۱۲۲۸۸ سلول با سازمان و ساختاریافته مربعی به عنوان شبکه مناسب 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 درشت‌تر (%)	شعاع حباب در لحظه جدایش (mm)	تعداد نقاط شبکه
---	۸/۹	۴۸×۱۶
۴/۴	۹/۳	۹۶×۳۲
۲/۱	۹/۵	۱۹۲×۶۴
۰/۵۲	۹/۵۵	۳۸۴×۱۲۸

۵-۱- حل مسأله 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 به عنوان یک مسأله نمونه مناسب در مسائل دوفازی شامل تغییر فاز در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته است [۳، ۲۱، ۲۲].

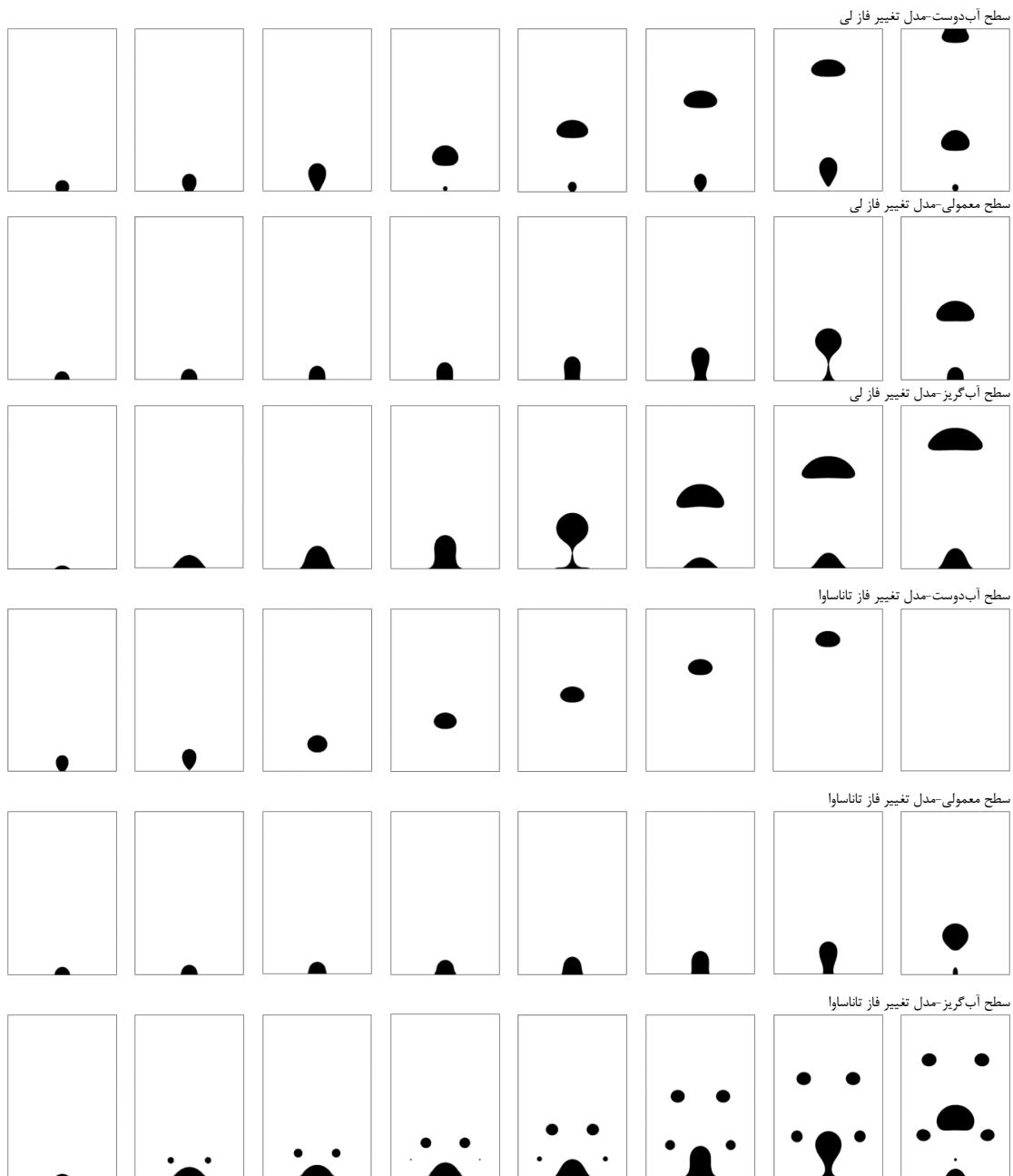
مسأله استفان مطابق شکل ۴ شامل یک دیواره دما ثابت است که در لحظه $t = 0$ s دارای دمایی به اندازه ΔT بیشتر از دمای اشباع سیال است. لایه نازکی از بخار در مجاورت دیواره داغ قرار دارد. بخار بصورت خطی از دمای دیواره تا دمای اشباع کاهش می‌یابد. مابقی فضای محاسباتی از مایع اشباع پر شده است و هر یک از دو فاز توسط مرز مشترکی 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.

۶- 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 گرفته است. همان‌گونه که از کانتورهای ردیف اول مشخص است سطح آب‌دوست اجازه باقی ماندن حباب ناشی از جوشش را برای مدت طولانی بر روی خود نداده و در مقایسه با سطح آب‌گریز (کانتورهای ردیف سوم) حباب‌های جدا شده از سطح هیتر کوچکتر هستند. نکته قابل

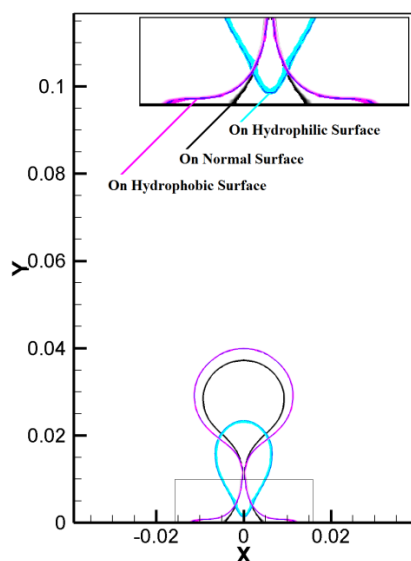


شکل ۶. نکانتور کسر حجمی در جوشش هسته‌ای تک‌حباب

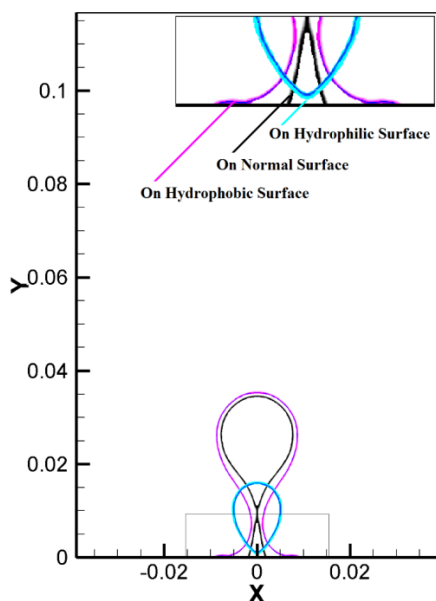
Fig. 6. Contours of the volume fraction of a single bubble in the nucleate boiling, from top to bottom: Hydrophilic Surface–Lee model, Normal Surface–Lee model, Hydrophobic Surface–Lee model, Hydrophilic Surface–Tanasawa model, Normal Surface–Tanasawa model, Hydrophobic Surface-Tanasawa model

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 می‌سازد تعیین‌کننده اندازه و تناوب تولید حباب بخار در سیکل‌های بعدی جوشش است. لذا ریشه حباب در هنگام جدایش از سطح، میزان بخار باقی‌مانده و زوایای تشکیل‌دهنده آن با سطح در دو مدل لی و تاناساوا به ترتیب در دو شکل ۷ و ۸ آورده شده است.



شکل ۷: 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

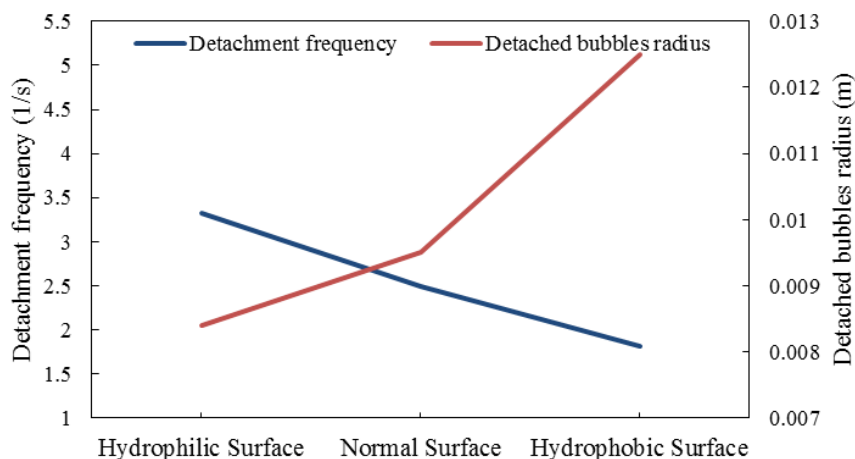
توجه میزان باقیمانده‌ای از بخار بر روی سطح است که جوشش حباب بعدی از آن آغاز می‌شود. حجم این بخار باقیمانده بر روی سطح، در سطح آب‌دوست بسیار کوچک‌تر از سطح آب‌گریز است. ضمناً زوایای تماس تشکیل شده در مرز حباب بخار باقی‌مانده با سطح در هر سه سطح مذکور قابل توجه است.

سه ردیف آخر شبیه‌سازی‌های جوشش بر روی سطوح مذکور را توسط مدل تاناساوا نمایش می‌دهد. از آنجا که مدل تاناساوا، تغییر فاز را از لبه مرزهای حباب باقی‌مانده بر روی سطح آغاز می‌کند و یا به عبارتی دیگر برای تغییر فاز هم به گرادیان دما و هم به گرادیان فاز به‌طور همزمان نیاز دارد، شبیه‌سازی جوشش در این مدل بر روی سطح آب‌دوست پس از جدایش اولین حباب متوقف می‌گردد. چرا که در اولین جدایش، به دلیل آب‌دوست بودن سطح، بخار بر روی سطح باقی نمی‌ماند و ترم چشمه تغییر فاز را در معادلات برابر صفر می‌کند. مدل تاناساوا در شبیه‌سازی جوشش بر روی سطح آب‌گریز، حباب‌های کوچک بیشتری را نه بر روی سطح بلکه در منطقه با گرادیان دمای بالا (نزدیک به هیتر) ایجاد می‌کند که تا انتهای شبیه‌سازی جوشش ادامه دارد. این مورد خود نمونه‌ای است که گاهی شبیه‌سازی توسط مدل تاناساوا را زیر سوال می‌برد و مدل لی را مدلی مناسب، دقیق‌تر و محبوب‌تر می‌داند. صحت عملکرد مدل لی در مقابل مدل تاناساوا در پژوهشی دیگر از مولفان همین مقاله به‌طور گسترده مورد بحث قرار گرفته است [۴]. لازم به ذکر است کانتورهای آورده شده در شکل ۶ تنها بخشی از خروجی‌های شبیه‌سازی شده تا جدایش اولین حباب از سطح را نمایش می‌دهد.

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 آب‌گریز 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 and hydrophobic surfaces in both Lee and Tanasawa models

نوع سطح	انتقال حرارت (W)		درصد اختلاف در دو مدل تغییر فاز (%)
	مدل تاناساوا	مدل لی	
آب‌دوست	۲/۱۸	۳/۲۷	۳۳
نرمال	۲/۸۴	۳/۸۴	۲۶
آب‌گریز	۵/۲۲	۷/۶۶	۳۲



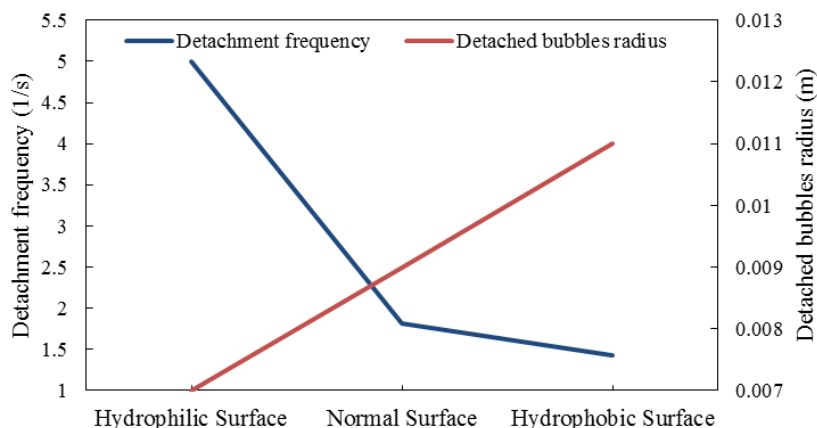
شکل ۹: فرکانس و شعاع جدایش حباب در مدل لی-تک حباب
 Fig. 9. Detachment frequency and bubbles radius in Lee model-single bubble

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 ۰/۰۱۲۵ 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 ۰/۰۰۷ 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.

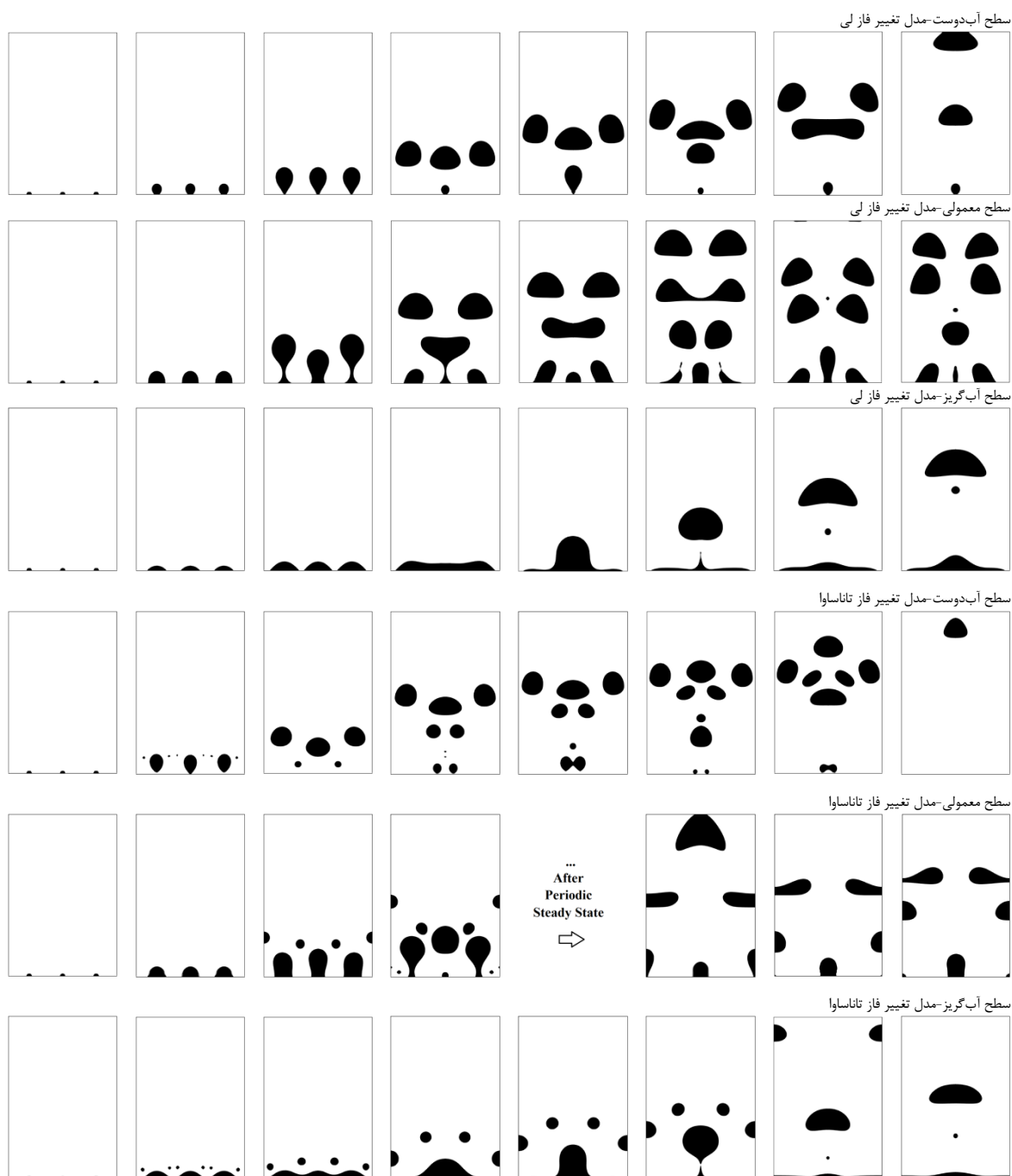
در شکل ۱۱، دینامیک تشکیل حباب در پدیده جوشش و از طریق کاشت سه هسته جوانه زارائه شده است. در هر ردیف روند تشکیل، رشد و جدایش حبابها در فواصل زمانی برابر نمایش داده شده است. هدف از این نوع شبیه سازی، بررسی نحوه تاثیر گذاری

همانطور که در این شکلها مشخص است، بیشترین بخاری که بر روی سطح باقی می ماند متعلق به سطح آب گریز، سپس معمولی و میزان ناچیزی در سطح آب دوست می باشد. به همین ترتیب شکل و نحوه جدایش حبابها در این سه سطح نیز با هم متفاوت است. مقایسه این دو شکل نشان می دهد که مدل لی حبابهای جدا شده بزرگتری را نسبت به مدل تاناساوا محاسبه می کند. این مورد از کانتورهای شکل ۶ نیز برداشت می شود. 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 می گذارد، 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 آب دوست و آب گریز و معمولی در مدل تغییر فاز لی در شکل



شکل ۱۰: فرکانس و شعاع جدایش حباب در مدل تاناساوا-تک حباب
 Fig. 10. Detachment frequency and bubbles radius in Tanasawa model-single bubble

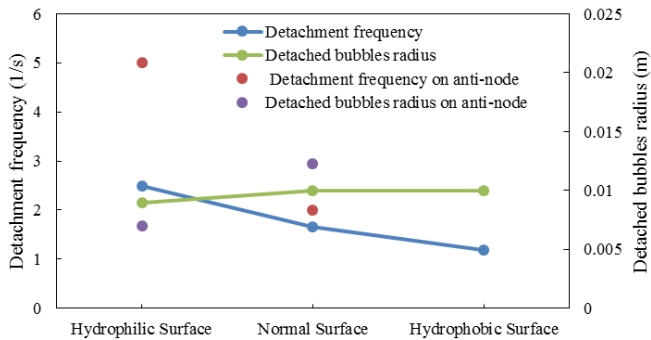


شکل ۱۱. کانتور کسر حجمی در جوشش هسته‌ای حباب سه‌گانه

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, Hydrophobic Surface-Lee model, Hydrophilic Surface-Tanasawa model, Normal Surface-Tanasawa model, hydrophobic Surface-Tanasawa model

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

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 ندهد و ضمناً جدایش اولین حباب، گرادیان‌هایی را بوجود می‌آورد که اجازه تغییر فاز بعدی را به این مکان‌ها نمی‌دهد و



شکل ۱۳. فرکانس و شعاع جدایش حباب در مدل تاناساوا-سه حباب
 Fig. 13. Detachment frequency and bubbles radius in Tana-sawa 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 آب‌گریز 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 در 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 دارای نرخ بیشتری نسبت به گره می‌باشد.

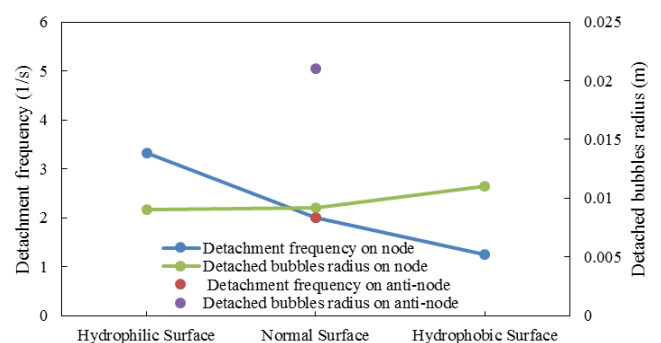
۷- جمع‌بندی

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

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 آب‌گریز 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 به دلیل آب‌دوست بودن سطح و باقی نماندن حباب بخار بر روی 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 می‌گردد. 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 به صورت 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 هیتز 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 شبیه‌سازی‌های متعلق به جوشش تک‌حباب، مدل تاناساوا میزانی جوشش و تولید بخار را در فضای دارای گرادیان دما و نه بر روی سطح ایجاد می‌کند. از مقایسه کانتورها می‌توان نتیجه گرفت حباب‌های تولیدی از سطح آب‌گریز بزرگتر از حباب‌های تولیدی از سطوح آب‌دوست هستند.



شکل ۱۲. فرکانس و شعاع جدایش حباب در مدل لی-سه حباب
 Fig. 12. Detachment frequency and bubbles radius in Lee model-triple bubble

ضریب تطابق، کسر مولکولی	γ
چشمه جرمی در مدل لی ($\text{kg/m}^3 \text{s}$)	Γ
ضخامت فیلم اولیه بخار (m)	δ
تخفیف زمانی، فاکتور شدت انتقال جرم (s^{-1})	λ
طول مشخصه (m)	λ'
ویسکوزیته دینامیکی (Pa s)	μ
ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)	ν
چگالی (kg/m^3)	ρ
کشش سطحی (N/m)	σ

زیر نویس ها

چگالش	C
انرژی، تبخیر	E
موثر	Eff
مابع	F
بخار	G
سطح مشترک دو فاز	I
مابع	L
فشار	P
اشباع	Sat, s
بخار	V
دیواره هیت	wall

پیوست

برای محاسبه میزان تغییر فاز در هر یک از مدل ها می بایست جملات چشمه معادلات پیوستگی و انرژی بصورت کدهای یو.دی.اف برای نرم افزار فلونت آماده شود. در این پیوست جملات چشمه مورد نیاز برای مدل لی به عنوان نمونه ارائه شده است. جملات چشمه در معادلات پیوستگی و معادله انرژی به صورت زیر نوشته می شود.

```
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))*rho_f*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

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 می‌گردد. یافته‌ها حاکی از آن است که ادغام حباب‌هایی که در هسته‌های جوانه‌زای نزدیک به هم بر روی سطح آب‌گریز تشکیل شده‌اند سبب تشکیل لایه‌ای از بخار بر روی سطح و سوق جوشش به سمت جوشش فیلمی می‌شوند.

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

فهرست علائم

علائم انگلیسی	
C	ظرفیت حرارتی (J/kg K)
E	انرژی بر واحد جرم سیال (J/kg)
\vec{F}	نیروی حجمی (N/m^3)
\vec{g}	شتاب جاذبه (m/s^2)
h	انتالپی (J/kg)
k	ضریب هدایت حرارتی (W/m K)
M	جرم مولکولی سیال (kg/mole)
\dot{m}''	نرخ جرمی تغییر فاز ($\text{kg/m}^2 \text{s}$)
\vec{n}	بردار عمود بر سطح مشترک دو فاز
p	فشار (Pa)
R	ثابت جهانی گازها (J/mole K)
S	چشمه جرمی ($\text{kg/m}^3 \text{s}$)، چشمه انرژی (W/m^3)
t	زمان (s)
\vec{u}	بردار سرعت (m/s)
علائم یونانی	
α	کسر حجمی، ضریب نفوذ حرارتی، (m^2/s)

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 می‌کند. عبارت (۲) C_UDMI(cell, tm, ۲) جمله چشمه انرژی را فراهم می‌سازد.

مراجع

- [1] 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.
- [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.
- of Heat and Mass Transfer, 85 (2019) 865–879.

