J. Energy Conversion
Volume: 8, Issue: 3, 2021: 77−91

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، ص: ۷۷- ۹۱

DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4

مطالعه عددی تغییر الگوی جریان دوفازی در اثر حضور حباب‌های ناشی از جوشش حبابی در یک محفظه بلند حاوی دو سیال غیر قابل امتزاج

سعید ناهیدی

دکترای مهندسی مکانیک، پژوهشگر دانشکده و پژوهشکده فنی مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۲، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۰

چکیده

در بین روش‌های مختلف انتقال حرارت، پدیده جوشش حبابی به عنوان یک روش با قابلیت انتقال حرارت بالا، همواره مورد توجه بسیاری از محققان بوده است. از طرف دیگر، پدیده همرفت طبیعی و پدیده جوشش در سیالات، دارای تاثیر متقابل بر همدیگر بوده و منجر به تقویت و تضعیف یکدیگر در حالت‌های مختلف می‌شوند. بدین منظور در مطالعه عددی حاضر، یک محفظه بلند محتوی دو سیال غیر قابل امتزاج (آب، بخار و هوا) و با دیوار جانبی دارای شار حرارت گرمایی یکنواخت به صورت سه بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه ابتدا بازه‌ی شار حرارتی که به ازای آن جوشش هسته‌ای اتفاق می‌افتد، پیش‌بینی شده است و سپس، تاثیر متقابل پدیده های جوشش و همرفت طبیعی بر روی همدیگر و تاثیر پارمترهای مختلف بر روی انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می دهد که با افزایش عدد رایلی به موجب افزایش ارتفاع بی بعد سیال در محفظه بلند، امکان جدا شدن حباب‌های گازی ناشی از جوشش از سطح دیواره بهبود یافته و در نتیجه تغییر رژیم جوشش حبابی به جوشش فیلمی به تاخیر می‌افتد. ولی در ارتفاع بی‌بعد کمتر که دارای عدد رایلی پایین‌تری هستند، جریان ناشی از همرفت طبیعی توانایی لازم برای جدا کردن حباب‌ها از سطح را ندارد و حباب‌ها به جای جداشدن از سطح دیواره، بر روی آن می‌لغزند. همچنین گردابه‌های ناشی از همرفت طبیعی ابتدا در قسمت‌های پایین محفظه تشکیل می‌یابد و تدریجا این گردابه‌ها توسعه یافته و در قسمت های دیگر از محفظه دارای سیال، فعال می‌شود. در این مقاله به خوبی نشان داده شده است که تولید و جدا شدن حباب‌ها سبب آشفتگی در این جریان‌ها می‌شود.

* **عهده‌دار مکاتبات:** kpsnahidi@ihu.ac.ir

کلمات کلیدی: جوشش حبابی، همرفت طبیعی، دیواره عمودی، جریان دوفازی، محفظه بلند

۱- مقدمه

انتقال حرارت موثر با ضریب انتقال حرارت بالا از گذشته از چالش‌های مطالعات انتقال حرارت بخصوص با توجه به کاربرد-های مختلف صنعتی آن است. از میان روش های مختلف انتقال حرارت شامل همرفت طبیعی و اجباری و جوشش، جوشش هسته‌ای به دلیل قابلیت انتقال حرارت بالا همواره مورد توجه قرار دارد. به همین دلیل مطلوب است در استفاده از جوشش

نحوه استناد به این مقاله: سعید ناهیدی. مطالعه عددی تغییر الگوی جریان دوفازی در اثر حضور حباب‌های ناشی از جوشش حبابی در یک محفظه بلند حاوی دو سیال غیر قابل امتزاج. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۰; ۸ (۳) :۷۷-۹۱.
DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]

برای انتقال حرارت همواره رژیم جوشش هسته‌ای در نزدیکی شار حرارتی بحرانی حفظ شود. تغییر رژیم جوشش به جوشش فیلمی مشکلات متعددی را ایجاد می کند، از این رو، باید از این تغییر رژیم جوشش اجتناب شود. همچنین همرفت طبیعی و جوشش دارای تاثیرات متقابل بر روی هم هستندکه منجر به تقویت و تضعیف یکدیگر در حالت های مختلف می شوند.

اولین گزارش در مورد رابطه بین شار حرارتی دیواره و چگالی سایت‌های فعال جوشش حبابی با شار حرارتی نسبتا کم توسط جاکوب ارائه شد[۱]. سو و گراهام مشاهداتی در مورد بررسی‌های مختلف با توجه به روابط بین شار حرارتی یا ضریب انتقال حرارت، اختلاف دمای دیواره و چگالی سایت های فعال تولید حباب ارائه کردند[۲]. کائو و کنینگ در یک مطالعه تجربی و عددی به بررسی جریان اطراف حباب روی یک دیواره گرم پرداختند. متغییرهای مختلف از جمله الودگی‌های موجود روی سطح مورد مطالعه قرار دادند و تاثیر آلودگی های‌سطح را که موجب کاهش کشش سطحی می‌شود، را مشاهده کردند[۳]. نیشیکاوا و همکاران جوشش از سطوح با زوایای قرارگیری مختلف به ازای شار حرارتی مختلف به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که در شارهای حرارتی پایین با افزایش زاویه قرارگیری سطح میزان انتقال حرارت و تولید حباب افزایش می‌یابد[۴]. کاسمی و رشیدی به بررسی همرفت پایا و نوسان کننده تشکیل شده توسط حباب پرداختند. آن‌ها دریافتند که پایداری همرفت طبیعی وابسطه به ساختارهای گرمایی تشکیل یافته ناشی از حرکت سیال و دمای سطح حباب است. همچنین نیروی جاذبه و همرفت طبیعی نقش مهمی در تشکیل این ساختارهای گرمایی دارند[۵]. شوابه و متچیگر به مطالعه تجربی بر همکنش همرفت طبیعی و همرفت ناشی از انتقال جرم در نزدیکی سطح حباب پرداختند. آن‌ها عامل اصلی جدایش همرفت ناشی از انتقال جرم در نزدکی سطح حباب را گرانش و تغییرات تاثیر سطح آزاد سیال بیان کردند و بیشترین سرعت را در نزدیکی سطح آزاد سیال گزارش کردند[۶]. لی و نیداهی به صورت عددی به بررسی رشد حباب، از لحظه تشکیل تا جدا شدن از سطح افقی پرداختند. آن‌ها دریافتند که حرکت حباب در لحظه جدا شدن سبب ایجاد همرفت اجباری نزدیک سطح می‌شود که باعث تسریع انتقال حرارت می‌شود[۷].

سارکر و همکاران به صورت تجربی دینامیک یک حباب طی جوشش هسته‌ای مادون سرد از سطح یک هیتر قائم، برای بررسی تاثیر ویژگی‌های سطح نظیر میزان تر بودن و زبری را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که کاهش‌تر بودن سطح منجر به تولید حباب با قطر بزرگ‌تر می شود. همچنین برای سطوح صاف‌تر قطر حباب در زمان جدا شدن از سطح کوچکتر و زمان جدا شدن از سطح کمتر از سطوح زبر است[۸]. مت و ادلاس به بررسی همرفت طبیعی در داخل یک سلول الکتروشیمیایی با استفاده از مدل دوفازی پرداختند. نتایج این پژوهش حاکی از تاثیر مستقیم گردابه‌های موجود بر روی اختلاط و تحرک حباب‌ها دارد و همچنین قطر حباب‌های تولیدی نیز بر روی محل تشکیل گردابه‌ها درون سلول تاثیر دارد به طوریکه در قطر حباب‌های کم این گردابه در قسمت‌های بالایی سلول و در قطر حباب بزرگتر گردابه در ارتفاع‌های پایین تر سلول تشکیل می شود[۹]. کریستوفر و وانگ به بررسی تحلیلی همرفت اطراف یک حباب در زمان تشکیل و رشد روی یک صفحه تخت پرداختند. در این پژوهش گرادیان‌های دمایی خطی و غیر خطی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای سیال‌ها با عدد پرانتل پایین به دلیل غلبه رسانش بر همرفت در نزدیکی سطح فقط گرادیان دمایی خطی را مشاهده کردند همچنین برای اعداد پرانتل بالا عدد ناسلت متوسط مستقل از گرادیان دمایی سطح است[۱۰]. کیتاگاوا و همکاران به مطالعه عددی و تجربی تاثیر قطر حباب تزریقی بر روی بهبود انتقال حرارت همرفت طبیعی در طول دیواره عمودی پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند حضور حباب تاثیر قابل توجهی در افزایش میزان انتقال حرارت دارد و با کاهش قطر حباب‌ها بهبود میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد [۱۱]. جونگ و همکاران به صورت تجربی به بررسی جوشش سیال‌های مختلف پرداختند و روابطی برای ضریب انتقال حرارت بر اساس پارامترهای دینامیکی حباب و خواص سیال ارائه کردند[۱۲]. بوتینی و همکاران به بررسی تاثیر تر بودن سطح بر روی شار حرارتی بحرانی در جوشش از یک کانال عمودی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که شار حرارتی بحرانی برای سطح آبگریز کمتر از سطح آب دوست است[۱۳]. ساتو و نیکنو به بررسی عددی سه بعدی جوشش در رژیم‌های جوشش هسته‌ای و فیلمی از سطح افقی پرداختند. شارهای حرارتی مختلف در این پژوهش مورد آزمایش قرار گرفته است و دماهایی که به ازای آن سطح دچار سوختن می شود ارائه شده است[۱۴]. سالاری و همکاران تاثیر حضور حباب‌های

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]

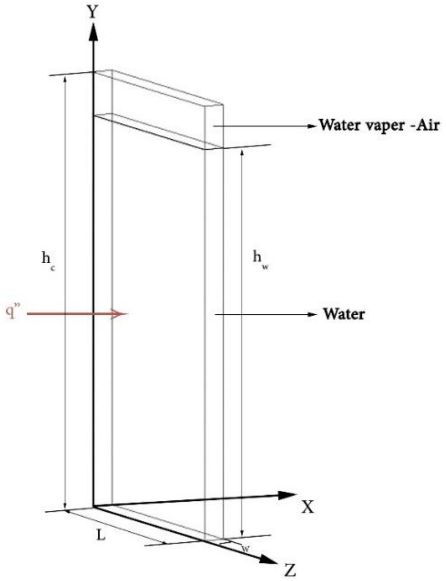
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]

ایستا روی سطوح الکترودهای باتری سرب اسیدی بر روی جریان همرفت طبیعی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تاثیر متغییرهای عدد رایلی و تعداد حباب‌ها بر روی شار حرارتی، ساختار جریان سیال، توزیع دما و سرعت، عدد ناسلت متوسط و... بررسی کردند. نتایج این پژوهش حاکی از کاهش عدد ناسلت متوسط با افزایش تعداد حباب‌ها به دلیل تاثیر عایق حباب‌ها روی دیواره و به دنبال آن افزایش دمای سطح الکترودها است. همچنین حضور حباب‌ها سبب انحراف میدان جریان درون محفظه می شود[۱۵].

در پژوهش حاضر ابتدا بازه‌ی شار حرارتی که به ازای آن جوشش هسته‌ای اتفاق می‌افتد، پیش بینی شده است. همچنین نحوه تشکیل و رشد گردابه‌ها، تولید، رشد و حرکت حباب‌ها، تاثیر متقابل جوشش و همرفت طبیعی بر روی همدیگر و تاثیر متغییرهای مختلف بر روی انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-تعریف مسئله

محفظه سه بعدی مورد بررسی در پژوهش حاضر در شکل ۱ آورده شده است. دیوار جانبی دارای شار حرارت گرمایی یکنواخت است، که ارتفاع این ناحیه با ارتفاع سیال درون محفظه هماهنگی دارد. محفظه با سیال‌های غیر قابل امتزاج، آب، بخار و هوا پر می‌شود. دیواره‌های دیگر محفظه آدیاباتیک هستند. قسمت بالایی محفظه نیز دارای شرط مرز فشار ثابت است. دمای اولیه مجموعه برای آب و بخار ۳۷۳/۱۵ کلوین ، برای هوا۳۰۰ کلوین و دمای بخار اشباع در فشار جو، ۳۷۳/۱۵ کلوین می باشد.



شکل۱. شماتیک هندسه مورد مطالعه

۳- معادلات حاکم

در پژوهش حاضر برای مدلسازی جوشش از دیواره عمودی و جریان دو فازی از مدل چند فازی حجم سیال[۱] نرم افزار Ansys-CFX استفاده شده است. در مدل چند فازی حجم سیال با توجه به امکان دنبال کردن سطح تماس دوفاز، در بررسی جریان‌های دوفازی که تغییرات سطح مشترک فازها بخصوص در پدیده جوشش دارای اهمیت است، به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدل چند فازی حجم سیال معادلات حاکم با استفاده از کسر حجمی در هر سلول حل می‌شوند. در هر سلول، مجموع کسر حجمی فازها برابر واحد است.

[۱] VOF

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]

$$\sum_{k=1}^{n}\alpha_k = 1 \tag{۱}$$

در مدل چند فازی حجم سیال، همه‌ی خواص با استفاده از کسر حجمی هر سلول محاسبه می‌شود. به عنوان مثال در سیستم دو فازی در صورتی که فاز با زیروند های ۱ و ۲ مشخص شوند. در صورتی که کسر حجمی فاز دوم مورد بررسی قرار گیرد، چگالی در هر سلول به صورت زیر است:

$$\rho = \alpha_2\rho_2 + (1-\alpha_2)\rho_1 \tag{۲}$$

همه‌ی خواص دیگر به صورت مشابه محاسبه می‌شوند. بنابراین خواص در هر سلول براساس کسر حجمی متفاوت خواهد بود و معادلات حاکم بر اساس این خواص حل می‌شوند. معادلات حاکم پیوستگی، مومنتوم و انرژی در جدول ۱ آورده شده است. در مدل چند فازی حجم سیال، تغییرات سطح حباب بر اساس حل معادله پیوستگی برای کسر حجمی پیش بینی می‌شود. همچنین در این مدل دوفازی، رابطه مومنتوم در تمام دامنه حل می‌شود و میدان سرعت بدست آمده به تمام فازهای موجود اعمال می‌گردد.

جدول ۱. معادلات حاکم بر جریان دوفازی [۱۳]

	فاز مایع	فاز بخار
پیوستگی	$\frac{\partial\rho_l\alpha_l}{\partial t}+\nabla(\rho_l\alpha_l\overrightarrow{v_l})=S_{lv}$	$\frac{\partial\rho_v\alpha_v}{\partial t}+\nabla(\rho_v\alpha_v\overrightarrow{v_v})=S_i-fS_{lv}$
مومنتوم	$\frac{\partial\rho_l\alpha_l\overrightarrow{u_l}}{\partial t}+\nabla.(\rho_l\alpha_l\overrightarrow{u_l}\overrightarrow{u_l})=$ $-\alpha_l\nabla P+\alpha_l\rho_l\vec{g}+\nabla\left[\alpha_l\mu_l^e(\nabla\overrightarrow{u_l}+(\nabla\overrightarrow{u_l})^T)\right]$ $+(S_{lv}\overrightarrow{u_l}-S_{vl}\overrightarrow{u_v})+F_{lv}$	$\frac{\partial\rho_v\alpha_v\overrightarrow{u_v}}{\partial t}+\nabla.(\rho_v\alpha_v\overrightarrow{u_v}\overrightarrow{u_v})=$ $-\alpha_v\nabla P+\alpha_v\rho_v\vec{g}+\nabla\left[\alpha_v\mu_v^e(\nabla\overrightarrow{u_v}+(\nabla\overrightarrow{u_v})^T)\right]$ $+(S_{vl}\overrightarrow{u_v}-S_{lv}\overrightarrow{u_l})+F_{vl}$
انرژی	$\frac{\partial\rho_l\alpha_lH_l}{\partial t}+\nabla.(\rho_l\alpha_l\overrightarrow{u_l}H_l)=$ $\nabla\left[\alpha_l\mu_l^e(\nabla T_l)\right]+(S_{lv}H_l-S_{vl}H_v)$	$\frac{\partial\rho_v\alpha_vE_v}{\partial t}+\nabla.(\rho_v\alpha_v\overrightarrow{u_v}E_v)=$ $\nabla\left[\alpha_v\mu_v^e(\nabla T_v)\right]+(S_{vl}E_v-S_{lv}E_l)$

در روابط بالا جمله‌های S_{lv} و S_{lv} جمله‌های چشمه مربوط به انتقال جرم هستند، که در زیر به ترتیب به صورت روابط ۳ و ۴ تعریف می‌شود و انتقال جرم بین فازها در مایع شدن حباب با استفاده از این جمله‌ها می تواند مدل سازی شود. همچنین S_i جمله چشمه اضافی مرتبط با به هم پیوستن و از هم گسستن حباب‌ها، f کسر اسکالر مربوط به تراکم تعداد حباب های گسسته است.

$$S_{lv}=\frac{h_p a_{if}(T_{sat}-T_l)}{h_{fg}} \tag{۳}$$

در رابطه ی بالا h_p ضریب انتقال حرارت بین دوفاز، a_{if} تمرکز ناحیه مرزی و h_{fg} گرمای نهان تبخیر است.

$$S_{vl}=\frac{Q_e}{h_{fg}+C_{pl}(T_{sat}-T_l)} \tag{۴}$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]

در رابطه ی بالا Q_e انتقال حرارت ناشی از تبخیر و C_{pl} گرمای ویژه مربوط به فاز مایع است. همچنین در روابط مربوط به مومنتوم، جمله‌های F_{lv} و F_{vl} نماینده ی نیروی کشش سطحی در سطح حباب و نیروی شناوری است که رابطه زیر بین آن‌ها برقرار است:

$$F_{lv} = -F_{vl} \quad (۵)$$

۴- روش حل عددی

در مطالعه حاضر برای مدل سازی جریان دوفازی در نرم افزار Ansys-CFX از مدل چند فازی حجم سیال به صورت ضمنی ، برای جفت شدن سرعت و فشار از الگوریتم ترکیبی سیمپل[۱] برای کسر حجمی از روش بازسازی هندسی[۲] ، برای فشار از پرستو[۳] و برای مومنتوم و انرژی از مرتبه دوم بالادست[۴] استفاده شده است. معیار همگرایی به صورت رابطه‌ی زیر در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\Sigma\left|\lambda_{ij}^{\gamma+1}-\lambda_{ij}^{\gamma}\right|}{\Sigma\left|\lambda_{ij}^{\gamma+1}\right|} \leq 10^{-4} \quad (۶)$$

۴-۱- بررسی استقلال از شبکه و گام زمانی

برای انتخاب اندازه شبکه و گام زمانی مناسب مقادیر کسر حجمی متوسط بخار روی دیواره با شار حرارتی ثابت در زمان ۰/۱ ثانیه به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ برای اندازه شبکه و گام زمانی مختلف آورده شده است. با توجه به مقادیر ارائه شده در جداول اندازه شبکه و گام زمانی مورد استفاده در مدل سازی‌ها به ترتیب ۵×۱۰^{-۴} و ۰/۰۰۰۵ ثانیه است. برای افزایش دقت، از مش بهبود یافته در نزدیکی دیواره با شار حرارتی ثابت استفاده شده است.

جدول ۲. مقدار کسر حجمی متوسط بخار به ازای سایزهای مختلف شبکه

اندازه شبکه	*کسر حجمی متوسط بخار روی دیواره با شار حرارتی ثابت در زمان ۰/۱ ثانیه*	*درصد تغییرات نسبت به شبکه قبلی*
2.00E-03	0.022193497	0
1.00E-03	0.027814616	25.33
5.00E-04	0.041005254	47.42
2.50E-04	0.042225092	2.98

جدول ۳. مقدار کسر حجمی متوسط بخار به ازای گام‌های مختلف زمانی

گام زمانی	**کسر حجمی متوسط بخار روی دیواره با شار حرارتی ثابت در زمان ۰/۱ ثانیه**	**درصد تغییرات نسبت به گام زمانی قبلی**
0.01	0.039659206	0
0.001	0.039213736	1.12
0.0005	0.041005254	4.56
0.0001	0.041010268	0.01

[۱] Simple
[۲] Geo-Reconstruct
[۳] PRESTO
[۴] Second order upwind

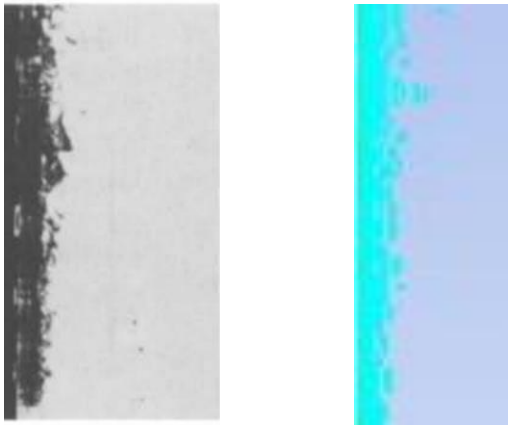
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]

۵- اعتبار سنجی

برای بررسی صحت روش مدل سازی مورد استفاده، شار حرارتی ارائه شده مطالعه تجربی نیشیکاوا و همکاران[۴] به ازای اختلاف دمای مشخص بین دیواره و سیال در زاویه قرار گیری ۹۰ درجه، در جدول ۴ آورده شده است. همچنین در شکل ۲ به مقایسه شکل فاز بخار در نزدیکی دیواره قائم پرداخته شده است.

جدول ۴. مقایسه شار حرارتی به ازای اختلاف دمای مشخص در پژوهش حاضر و مطالعه تجربی نیشیکاوا [۴]

ΔT_{Sat}	q'' (W/m2) در مطالعه نیشیکاوا و همکاران[۴]	q'' (W/m2) در مطالعه حاضر	خطا
5	1.5×104	1.7×104	13.34%
10	7×104	6.7×104	4.28%
20	4×105	3.6×105	10%



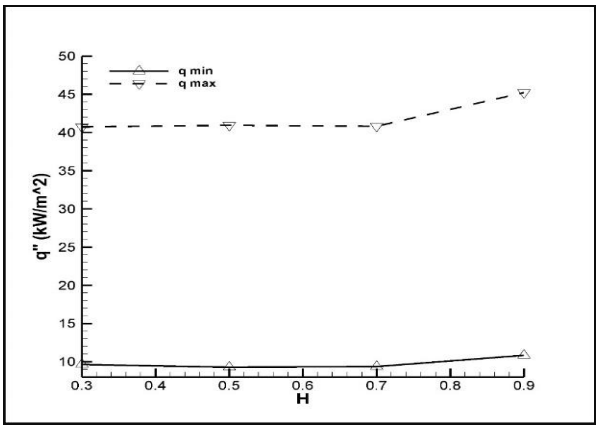
پژوهش حاضر　　نیشیکاوا و همکاران [۴]

شکل۲. مقایسه شکل حباب‌ها در نزدیکی دیواره قائم در پژوهش حاضر و مطالعه تجربی نیشیکاوا و همکاران [۴](q'' =۱۲۰kW)

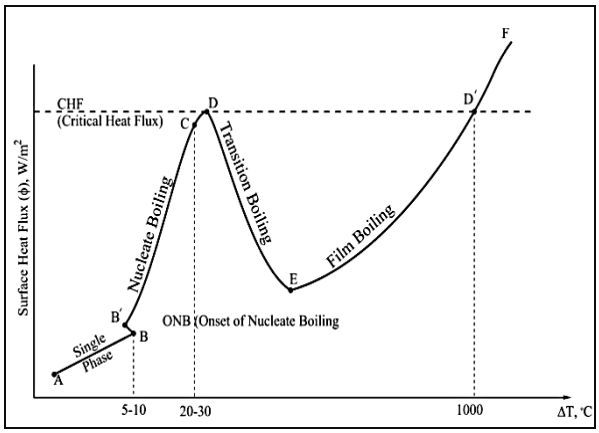
۶- بررسی نتایج و بحث بر روی آن‌ها

۶-۱- تعیین بازه شار حرارتی مربوط به رژیم جوشش هسته‌ای

با توجه به شکل ۳ که رژیم‌های مختلف جوشش را نشان می دهد، به ازای اختلاف دمای سطح و سیال از ۵ تا ۳۰ درجه سانتیگراد جوشش حبابی رخ می دهد.



شکل ۴. بازه‌ی شار حرارتی برای رژیم جوشش هسته‌ای به ازای ارتفاع بی‌بعد مختلف سیال دورن محفظه



شکل۳. نمودار رژیم‌های مختلف جوشش [۱۶]

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]

در پژوهش حاضر به منظور تعیین بازه شار حرارتی مناسب برای بهره‌مندی از رژیم جوشش هسته‌ای $\Delta T_{sat} = 5$ و $\Delta T_{sat} = 30$ در نظر گرفته شده است. بدین معنی که برای پیش‌بینی حداقل شار حرارتی مورد نیاز، با توجه به این که دمای اشباع آب ۱۵/ ۳۷۳ کلوین فرض شده است، دیواره دارای شرط مرزی دما ثابت برابر با ۳۷۸/۱۵ کلوین در نظر گرفته می شود. سپس با بررسی شکل حباب های متناظر با این رژیم جوشش، مقدار شار حرارتی به عنوان کمترین مقدار شار حرارتی اندازه-گیری می‌شود. بیشترین مقدار شار حرارتی نیز به صورت مشابه با فرض شرط مرزی دما ثابت ۴۰۳/۱۵ کلوین اندازه‌گیری می شود. نتایج اندازه‌گیری بازه‌ی شارهای حرارتی به ازای ارتفاع‌های بی بعد سیال درون محفظه در شکل ۴ آورده شده است. با توجه به شکل ۴ به ازای ارتفاع بی بعد کمتر از ۰/۷ تقریبا میزان شار حرارتی مینیموم و ماکزیمم ثابت و به ترتیب برابر با ۱۲/۵ kW/m^2 و ۴۰ kW/m^2 است. این مقادیر برای ارتفاع بی بعد ۰/۹به ترتیب به مقادیر ۱۱kW/m^2 و ۴۵ kW/m^2 تغییر می‌یابد. در ادامه برای شبیه سازی با شرط مرزی شار ثابت از مقادیر ماکزیمم بدست آمده به عنوان شار حرارتی بحرانی استفاده شده است.

لازم به اشاره است که عدد رایلی به عنوان مهمترین مشخصه مربوط به قدرت همرفت طبیعی، در مطالعه حاضر (برای شرط مرزی شار ثابت) به صورت $Ra = \frac{g\beta q''L^4}{\alpha \upsilon k}$ تعریف شده است. در این در رابطه بالا β نشان دهنده ضریب انبساط حرارتی و υو α به ترتیب بیانگر ویسکوزیته سینماتیک و ضریب نفوذ حرارتی، k ضریب رسانش گرما و L طول مشخصه (عرض محفظه) است. تغییرات عدد رایلی در این مطالعه عددی در بازه‌ی $2.5\times10^5 \leq Ra \leq 1.25\times10^6$ قرار دارد.

۳-۶- بررسی تشکیل و توزیع حباب‌ها و رژیم حاکم جوشش

در جدول ۵ زمان مشاهده اولین حباب‌ها و تغییر رژیم جوشش برای ارتفاع‌های بی بعد مختلف آب درون محفظه ارائه شده است. برای ارتفاع‌های بی بعد کمتر از ۰/۹ اولین حباب‌ها در زمان تقریبی ۰/۱۴ ثانیه مشاهده می‌شوند و به سرعت لایه‌های پیوسته بخار همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، روی دیواره با شار حرارتی تشکیل می‌شود و با توجه به اینکه مطالعه در نزدیکی شار حرارتی بحرانی صورت می‌گیرد، رژیم حاکم جوشش از جوشش هسته‌ای به جوشش فیلمی تبدیل می-شود. برای ارتفاع بی بعد ۰/۹ اولین حباب‌ها با توجه به داشتن شار حرارتی بحرانی بالاتر، زودتر از سایر ارتفاع‌های بی بعد مشاهده می‌شود و تا انتهای زمان مدل سازی یعنی ۰/۲ ثانیه همچنان رژیم جوشش به صورت جوشش هسته‌ای است. با توجه به وضعیت کسر حجمی بخار وحباب‌های روی دیواره با شار حرارتی ثابت که در شکل ۵ و تغییر سریع رژیم حاکم بر جوشش در ارتفاع بی بعد سیال کمتر از ۰/۹، می‌توان گفت ارتفاع بی بعد ۰/۹ مناسب ترین ارتفاع برای حفظ رژیم جوشش هسته‌ای داخل محفظه است.

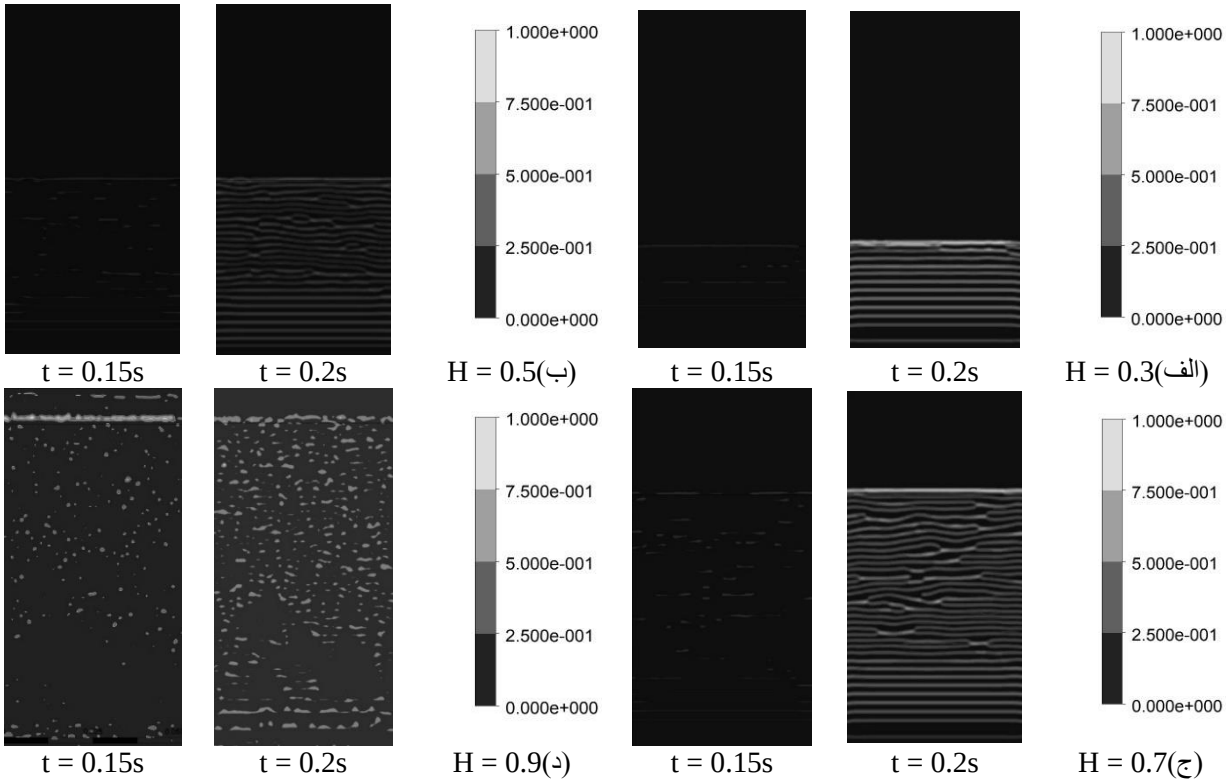
جدول ۵. زمان مشاهده اولین حباب‌ها و تغییر رژیم جوشش

H	*زمان مشاهده اولین حباب ها*	*زمان تغییر رژیم جوشش از جوشش حبابی به جوشش فیلمی*
0.3	0.144 S	0.150 S
0.5	0.143 S	0.152 S
0.7	0.142 S	0.165 S
0.9	0.107 S	--

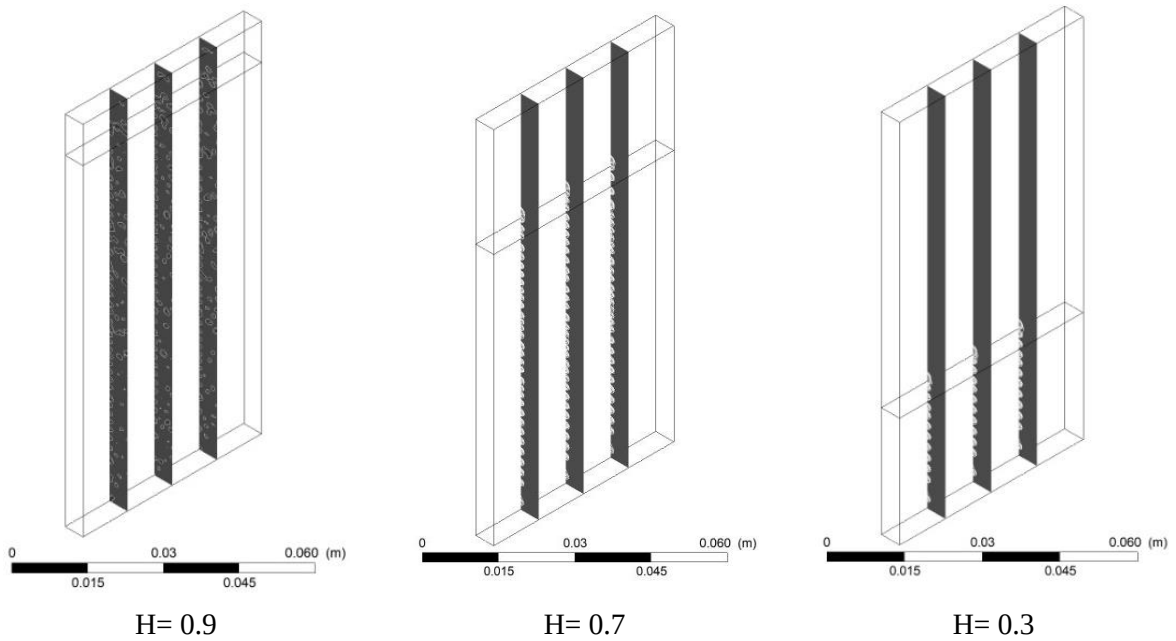
توزیع حباب‌ها درون محفظه به ازای ارتفاع‌های بی بعد مختلف سیال در شکل ۶ آورده شده است. برای ارتفاع بی بعد کمتر از ۰/۹ حباب‌های تولیدی به دلیل غلبه نیروی چسبندگی به نیروی شناوری بیشتر روی دیواره قرار دارند و فرصت و فضای لازم برای جداشدن را ندارد، بنابراین به جای جداشدن از سطح روی دیواره تحت تاثیر نیروی شناوری روی دیواره می‌لغزند. در ادامه به دلیل حضور بیشتر بخارها روی سطح و عدم جدا شدن حباب‌ها، به سرعت رژیم حاکم جوشش به جوشش فیلمی تغییر می‌کند. برای ارتفاع بی بعد ۰/۹ بر خلاف ارتفاع‌های بی بعد کمتر سیال، حباب‌ها به دلیل فعال‌تر بودن جابه‌جایی طبیعی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]

با توجه به بالاتر بودن عدد رایلی، در قسمت های مختلف محفظه توزیع شده است. به دلیل ادغام حباب‌های تشکیل یافته قطر حباب‌ها در نزدیکی سطح آزاد بیشتر است. همچنین با دور شدن از دیواره با شار حرارتی ثابت حضور حباب‌ها در قسمت‌های پایینی محفظه کمتر می‌شود. این امر می‌تواند ناشی از حرکت حباب توسط جریان های ناشی از همرفت طبیعی داخل محفظه باشد، علاوه بر این حرکت رو به بالا حباب ها به دلیل اختلاف چگالی، این پدیده را تشدید می کند.



شکل ۵. شکل حباب‌ها روی دیواره گرم محفظه در دو زمان مختلف به ازای ارتفاع‌های بی بعد ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹



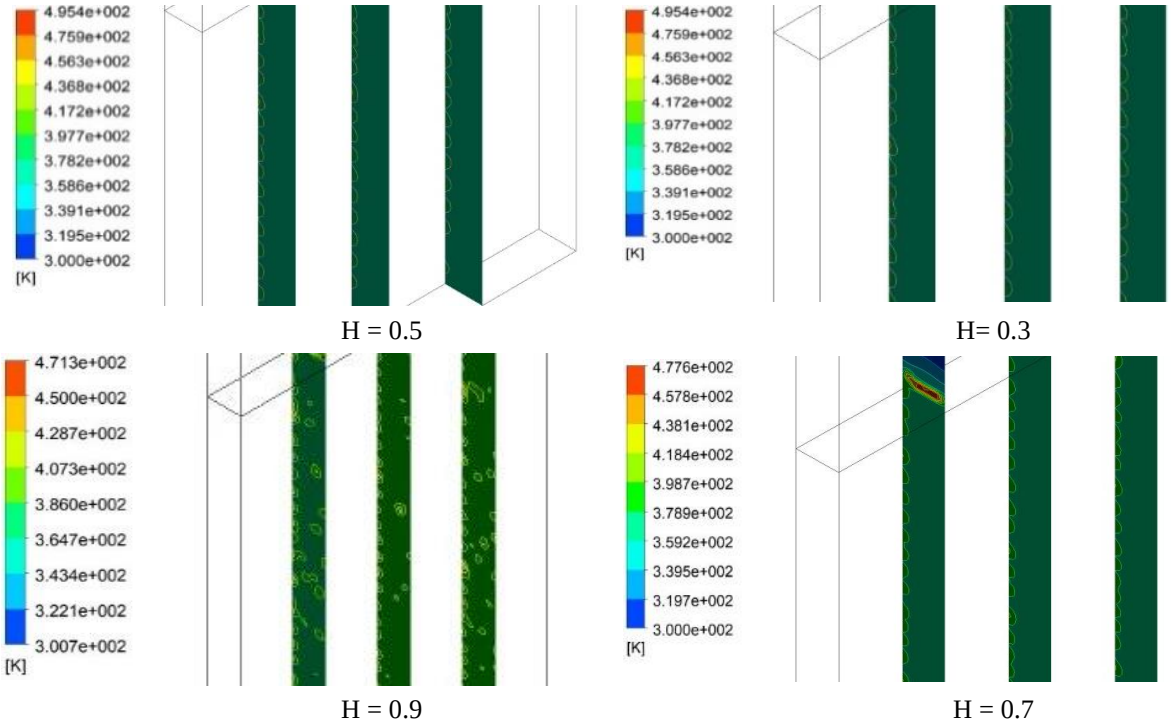
شکل ۶. توزیع حباب ها درون محفظه به ازای ارتفاع‌های بی بعد مختلف سیال

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]

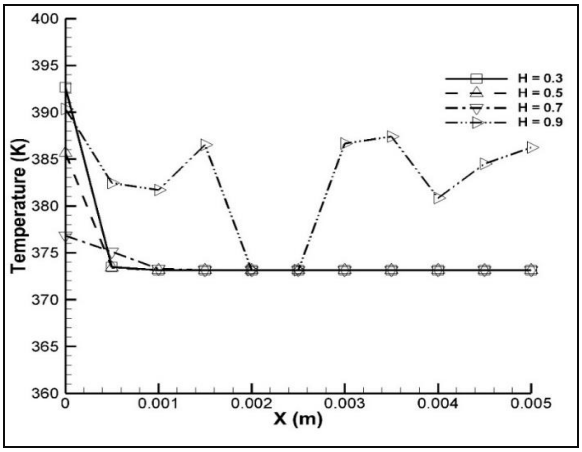
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]

۴-۶- توزیع دما

توزیع دما به صورت سه بعدی در زمان ۰/۲ ثانیه برای ارتفاع بی‌بعد مختلف سیال در شکل ۷ آورده شده است. با توجه به شکل می‌توان گفت با توجه به ماهیت بخار، اختلاف دما در نقاطی که بخار آب حضور دارد، قابل توجه است. در شرایط یکسان با توجه به کانتور دما می‌توان گفت دمای عمومی مایع موجود در محفظه با افزایش ارتفاع سیال افزایش یافته است. همچنین تا ارتفاع بی‌بعد ۰/۷ دمای هوا در بالای آب موجود در محفظه ثابت مانده است و فقط برای ارتفاع بی بعد ۰/۹ دمای هوا موجود در بالای محفظه تدریجا افزایش یافته است که ناشی از حضور بیشتر بخار در این ناحیه است. به صورت کلی با دور شدن از دیواره با شار حرارتی ثابت دمای بخار و آب موجود در محفظه کاهش می‌یابد. همچنین توزیع دما برای ارتفاع‌های بی‌بعد سیال کمتر از ۰/۹ یکنواخت‌تر است. برای ارتفاع بی بعد ۰/۹ اختلاف دمای آب و بخار موجود در محفظه در حدود ۲۰ تا ۶۰ درجه کلوین است.



شکل ۷. توزیع دما درون محفظه به ازای ارتفاع های بی‌بعد مختلف سیال



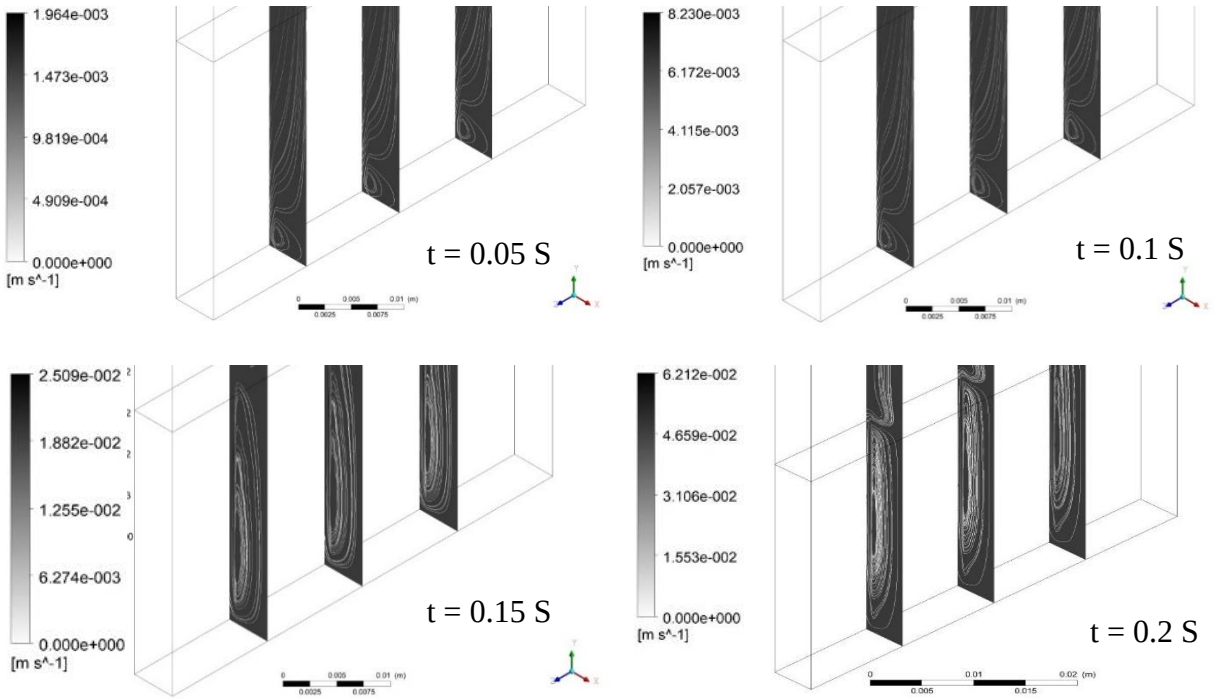
شکل۸. تغییرات دما در راستای محور X دورن محفظه در زمان تغییر رژیم جوشش

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]

لازم به ذکر است که ماکزیمم دما موجود در کانتورها با افزایش ارتفاع بی‌بعد سیال کاهش می‌یابد که نشان دهنده بهبود انتقال حرارت است. شکل ۸ نمودار توزیع دما در راستای محور X را درون محفظه نشان می‌دهد. تاثیر حضور بخار در نواحی مختلف در این نمودار قابل ملاحظه است به طوریکه برای ارتفاع‌های بی بعد کمتر از ۰/۹ به دلیل حضور بیشتر فاز بخار در نزدیکی دیواره دارای شار حرارتی دمای بالاتر فقط در نزدیکی دیواره وجود دارد. برای ارتفاع بی بعد ۰/۹ به دلیل وجود بخار در قسمت‌های مختلف توزیع دما متفاوت‌تر است. روند تغییر دما برای این ارتفاع بی بعد به صورت کاهشی تا مرکز محفظه و سپس افزایشی است. دلیل این امر می تواند تحت تاثیر جریان‌های ناشی از تاثیر همرفت طبیعی داخل محفظه و انتقال حباب-ها با دمای بالاتر به نزدیکی دیواره‌ها باشد.

۵-۶- توزیع میدان سرعت

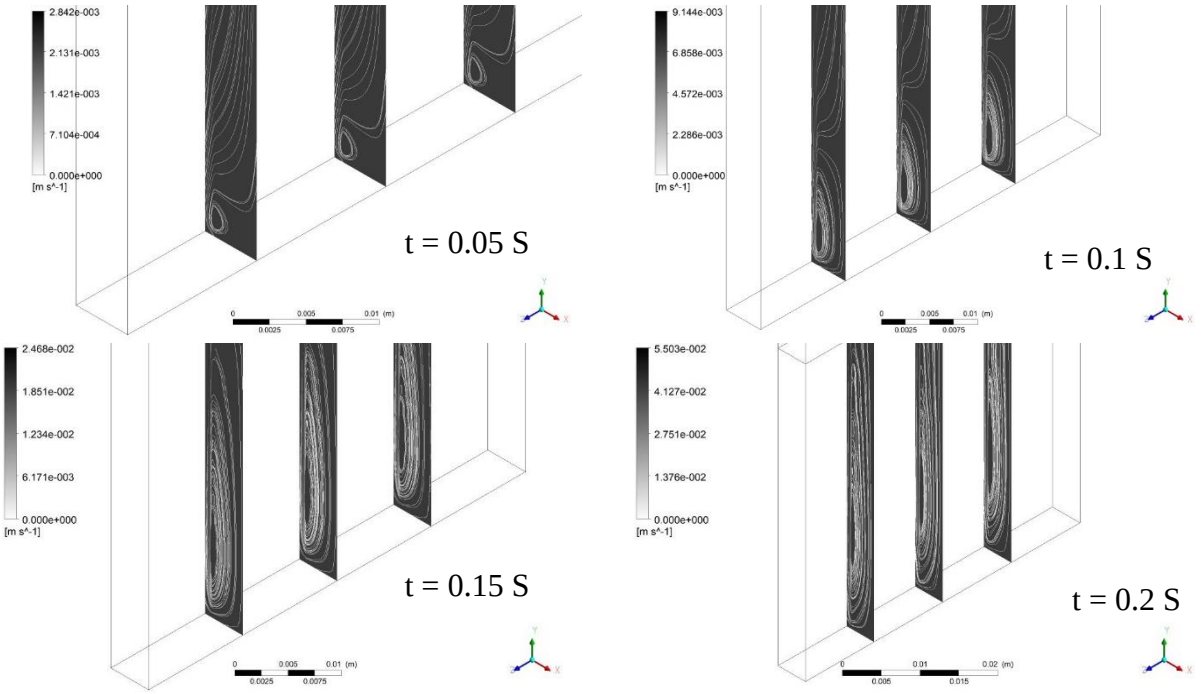
تغییرات توزیع میدان سرعت با گذشت زمان برای ارتفاع‌های بی‌بعد مختلف سیال در شکل های ۹ تا ۱۲ آورده شده است. با توجه به شکل‌ها برای همه‌ی ارتفاع‌های بی بعد با گذشت زمان ابتدا گردابه‌های ناشی از همرفت طبیعی در قسمت‌های پایین محفظه تشکیل می‌یابد و تدریجا این گردابه‌ها توسعه یافته و در قسمت های بیشتری از سیال فعال می‌شود. برای ارتفاع‌های بی‌بعد کمتر از ۰/۹ که حضور حباب‌ها محدود به ناحیه‌ای نزدیک دیواره دارای شار حرارتی است و دارای عدد رایلی کمتری هستند، توزیع میدان سرعت یکنواخت‌تر است. همچنین با توجه به حضور تعداد زیاد حباب‌های تشکیل یافته روی دیواره و عدم امکان نفوذ سیال به ناحیه‌های دارای حباب، گردابه های ناشی از همرفت طبیعی تحت تاثیر قرار می گیرند هرچند به دلیل محدودیت حضور حباب‌ها در نزدیکی دیواره با شار حرارتی شکل کلی و یکنواخت گردابه‌ها در قسمت عمده سیال بدون تغییر باقی می‌ماند. از طرفی با گذشت زمان و تولید حباب بیشتر، حباب‌ها به دلیل داشتن چگالی کمتر به سمت سطح آزاد حرکت می‌کنند همچنین این پدیده ناشی از غلبه نیروی شناوری بر نیروی ناشی از میدان گرانش است. همراه با حرکت حباب‌ها بخشی از سیال در مجاورت حباب‌ها نیز با حرکت حباب جابه‌جا می‌شوند که سرعت حرکت سیال ناشی از این پدیده در مقایسه با حرکت سیال ناشی از همرفت طبیعی بیشتر است، به همین دلیل ماکزیمم سرعت در نزدیکی دیواره با شار حرارتی وجود دارد.



شکل ۹. توزیع سرعت در محفظه در زمان‌های مختلف برای H = 0.3

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]



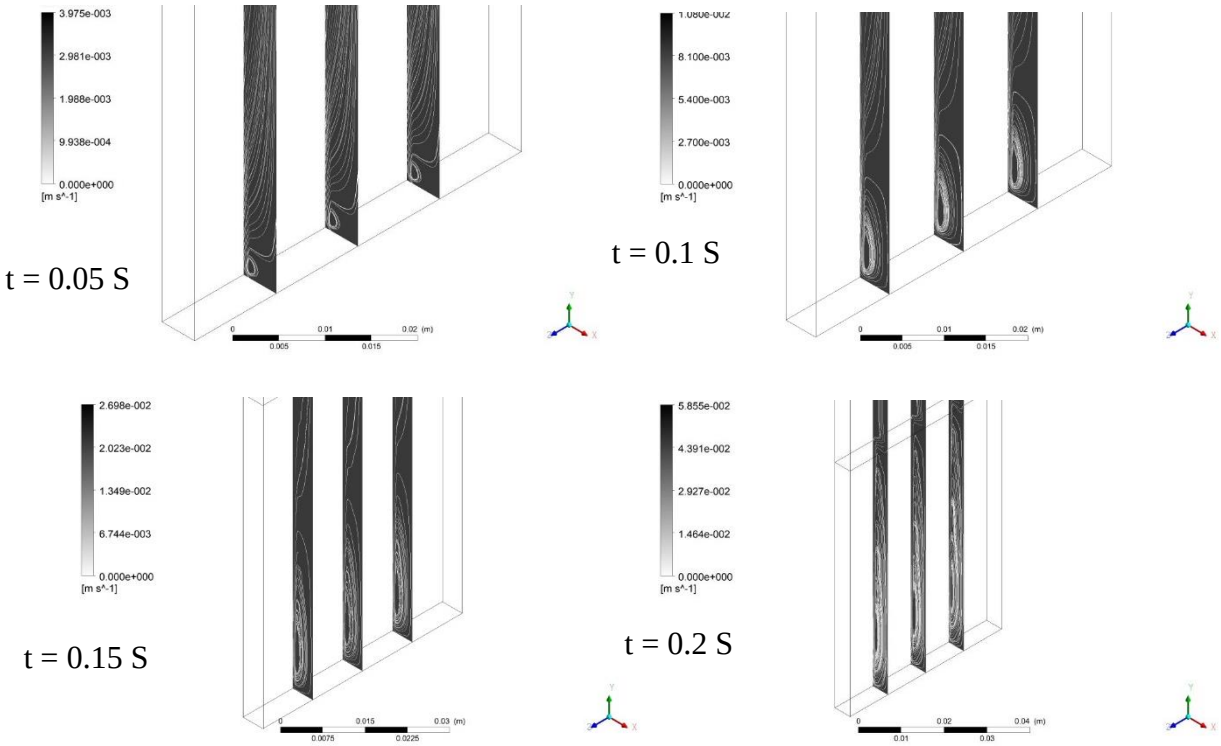
شکل ۱۰. توزیع سرعت درون محفظه در زمان‌های مختلف برای H = 0.5

در ارتفاع بی‌بعد ۰/۹ با افزایش ارتفاع سیال درون محفظه گردابه‌های قوی‌تری ناشی از همرفت طبیعی شکل می‌گیرد. همچنین این ارتفاع بی‌بعد با توجه به داشتن شار حرارتی بیشتر، دارای عدد رایلی بالاتری است. در این حالت با گذشت زمان به دلیل اعمال پیوسته شار حرارتی میزان تولید حباب افزایش می‌یابد. برای ارتفاع بی‌بعد ۰/۹ در ابتدای زمان مدل سازی قبل از تولید حباب مشابه ارتفاع‌های بی بعد کمتر گردابه‌های ناشی از همرفت طبیعی در قسمت پایینی محفظه به صورت یکنواخت تشکیل می‌شود. اما با جدا شدن اولین حباب‌ها از سطح میدان یکنواخت همرفت طبیعی کاملا تحت تاثیر قرار گرفته و رفته رفته حالت آشفته‌ای به خود می گیرد. با توجه به زمان t = 0.1 S شروع آشفتگی نیز از قسمت‌های پایینی محفظه آغاز می‌شود. آشفتگی میدان‌های جریان شامل تغییر شکل آن و یا تقسیم شدن میدان جریان کلی به میدان‌های کوچکتر با تاثیر محلی در نواحی مختلف به خصوص در نزدیکی سطح آزاد می‌شود. این پدیده در شکل ۱۳ که بردارهای سرعت را برای این ارتفاع بی‌بعد نشان می‌دهد، به خوبی قابل مشاهده است. با حرکت حباب و بخشی از سیال مجاور به سمت بالا سیال فاز مایع با حرکت گردابه مانند در محل قبلی حباب حضور می‌یابد که این گردابه‌ها مستقل از گرداب‌های ناشی از همرفت طبیعی است و همان طور که ذکر شد گردابه های ناشی از جابه‌جایی طبیعی را قطع کرده و باعث تبدیل آن‌ها به گردابه‌های کوچتر محلی می‌شود.

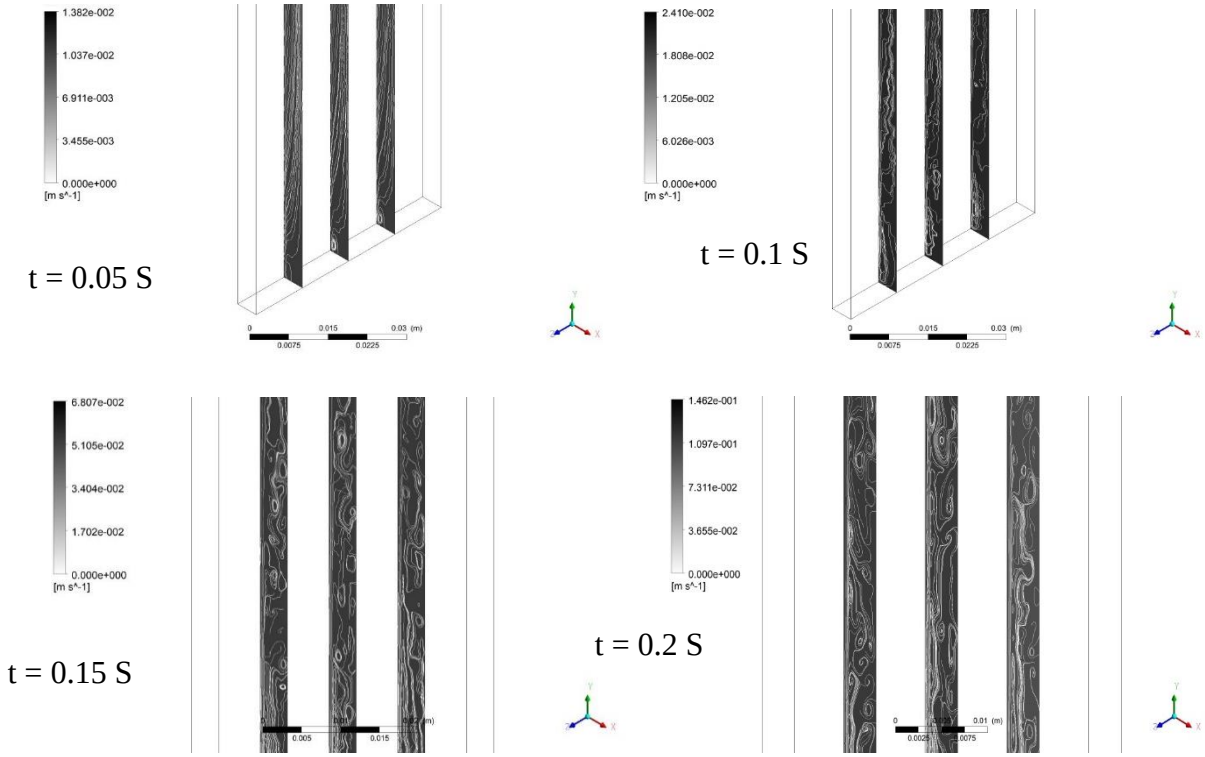
۶-۶- میزان انتقال حرارت

تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با گذشت زمان در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در زمان‌های اولیه شبیه سازی و قبل از تولید حباب‌ها ضریب انتقال حرارت در ارتفاع‌های بی بعد مختلف دارای مقدارکم و برای ارتفاع‌های بی‌بعد کمتر از ۰/۹ دارای مقدار تقریبا یکسانی است. با گذشت زمان و ایجاد جوشش هسته‌ای این مقدار افزایش قابل توجهی دارد و پس از آن تقریبا به مقدار ثابتی میل می‌کند. ارتفاع بی بعد ۰/۹ به دلیل توزیع حباب‌ها در قسمت‌های مختلف محفظه دارای ضریب انتقال حرارت بالاتری نسبت به بقیه ارتفاع‌های بی‌بعد است. ارتفاع های بی‌بعد کمتر از ۰/۹ به دلیل تمرکز حباب‌ها روی دیواره که به صورت عایق عمل می‌کنند، دارای ضریب انتقال حرارت کمتری هستند. همچنین در زمان‌هایی که همرفت طبیعی به عنوان رژیم حاکم بر انتقال حرارت است و هنوز حباب های ناشی از جوشش هسته‌ای تشکیل نیافته اند با گذشت زمان ضریب انتقال حرارت تغییرات قابل توجهی ندارد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]



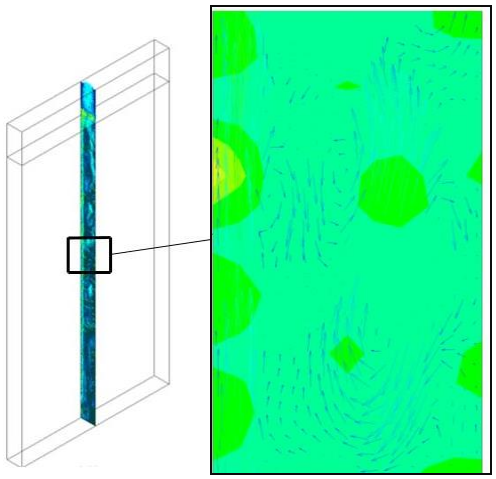
شکل ۱۱. توزیع سرعت درون محفظه در زمان‌های مختلف برای H = 0.7



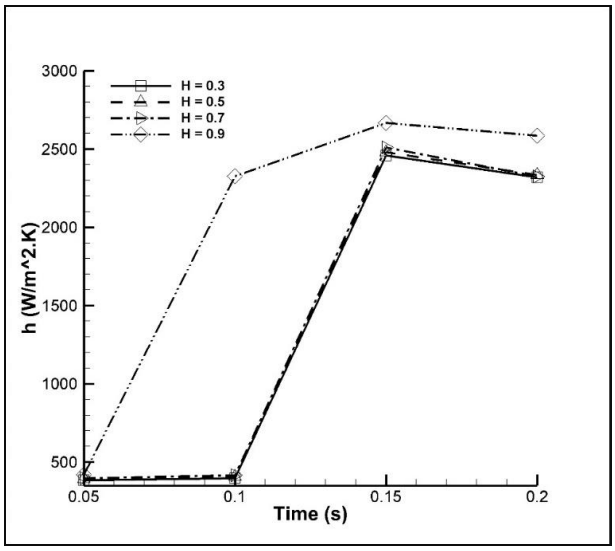
شکل ۱۲. توزیع سرعت درون محفظه در زمان‌های مختلف برای H = 0.9

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]



شکل ۱۳. بردارهای سرعت برای H = 0.9 در زمان t = 0.15 s



شکل ۱۴. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با گذشت زمان برای ارتفاع بی‌بعد مختلف سیال

۷- نتیجه گیری

در مطالعه عددی حاضر، پدیده جوشش حبابی به همراه انتقال حرارت جابجایی طبیعی برای دو سیال غیرقابل امتزاج در یک محفظه بلند سه بعدی با دیواره دارای شار حرارتی ثابت بررسی شده است. در این مطالعه با تغییر دمای دیواره محفظه بلند، در ابتدا بازه‌ی شار حرارتی که به ازای آن جوشش حبابی رخ می دهد، پیش بینی شده است. سپس با اعمال شار حرارتی بدست آمده برای هر ارتفاع بدون بعد از دو سیال غیرقابل امتزاج در محفظه، تغییر الگوی جریان دوفازی در اثر حضور حباب-های ناشی از جوشش حبابی بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان داده است که بازه شار حرارتی برای ایجاد جوشش حبابی برای ارتفاع بی بعد ۰/۹ سیال در محفظه مورد نظر، دارای مقدار بالاتری نسبت بازه‌ی شار حرارتی تقریبا یکسان مرتبط با ارتفاع‌های بی‌بعد دیگر است. در این بررسی، با افزایش عدد رایلی در ارتفاع بی بعد ۰/۹ نسبت به ارتفاع های بی بعد دیگر، جدا شدن حباب‌ها از سطح دیواره بهبود یافته است. همچنین در این مطالعه، اگرچه شروع تشکیل گردابه‌های ناشی از همرفت طبیعی از قسمت پایینی محفظه ایجاد شده اما با گذشت زمان این گردابه ها به قسمت های دیگر سیال توسعه یافته اند. همچنین توزیع دما و میدان سرعت برای ارتفاع های بی بعد کمتر از ۰/۹ یکنواخت‌تر بوده اند. در این بررسی به خوبی نشان داده شده که ارتفاع های بی بعد کمتر از ۰/۹ به دلیل حضور طولانی و تمرکز حباب‌ها روی دیواره محفظه که به صورت عایق عمل می‌کنند، دارای ضریب انتقال حرارت کمتری هستند. همچنین در زمان‌هایی که همرفت طبیعی به عنوان رژیم حاکم بر انتقال حرارت است و هنوز حباب های ناشی از جوشش هسته‌ای تشکیل نیافته‌اند، با گذشت زمان ضریب انتقال حرارت تغییرات قابل توجهی ندارد. با شروع تولید حباب‌ها ضریب انتقال حرارت افزایش قابل توجهی دارد و در نهایت به مقدار تقریبا ثابتی میل می‌کند.

۸- فهرست علائم

a_{if}	تمرکز ناحیه مرزی (m^{-1})
C_p	گرمای ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
D	قطر حباب (m)
E	آنتالپی (Jkg^{-1})
F	نیرو حجمی (N)
g	شتاب جاذبه زمین (ms^{-2})

علایم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
θ	زاویه تماس حباب با سطح (rad)
α	ضریب نفوذ گرمایی (m^2s^{-1})

زیرنویس‌ها

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]

H	ارتفاع بی بعد سیال در محفظه ($\frac{h_w}{h_c}$)	K	شمارنده فاز
h_c	ارتفاع محفظه	l	فاز مایع
h_w	ارتفاع سیال درون محفظه	SAT	اشباع
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر (Jkg^{-1})	v	فاز بخار
L	طول محفظه		
Q_e	انتقال حرارت ناشی از تبخیر (Wm^{-1})		
Ra	عدد رایلی		
S	جمله چشمه انتقال جرم بین فازها ($kgm^{-3}s^{-1}$)		
T	دما (K)		
u	سرعت (ms^{-1})		
w	ضخامت محفظه		
$x\ y\ z$	مختصات کارتزین		

مراجع

[1] Jakob, M., 1949, Heat Transfer, Wiley, New York.

[2] Hsu, Y. Y., and Graham, R. W., 1976, Transport Processes in Boiling and Two-Phase Systems, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC.

[3] Y. S. Kao and D. B. R. Kenning, Thermocapillary flow near a hemispherical bubble on a heated wall. J. Fluid Mech,1972. 53: p. 715-725.

[4] K. Nishikawa, Y. Fujita, S. Uchida, H. Ohta, Effect of surface configuration on nucleate boiling heat transfer. Int. J. Heat Mass Transfer, 1984. 27: p. 1559-1571.

[5] M. Kassemi and N. Rashidnia, Steady and oscillatory thermocapillary convection generated by a bubble. PHYSICS OF FLUIDS, 2000. 12: p. 3133-3146.

[6] D. Schwabe, J. Metzger, Coupling and separation of buoyant and thermocapillary convection. J. Crystal Growth, 1989. 97: p. 23-33.

[7] R. C. Lee and J. E. Nydah, Numerical calculation of bubble growth in nucleate boiling from inception through departure. ASME JOURNAL OF HEAT TRANSFER, 1989. 111: p. 474-479.

[8] D. Sarker, R. Franz, W. Ding, U. Hampel, Single bubble dynamics during subcooled nucleate boiling on a vertical heater surface: An experimental analysis of the effects of surface characteristics. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017. 109: p. 907-921.

[9] Mahmut D. Mata, Kemal Aldas, Application of a two-phase flow model for natural convection in an electrochemical cell. International Journal of Hydrogen Energy, 2005. 30: p. 411-420.

[10] David M. Christopher, Bu-Xuan Wang, Similarity simulation for Marangoni convection around a vapor bubble during nucleation and growth. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001 44: p. 799-810.

[11] Atsuhide Kitagawa, Kenji Uchida, Yoshimichi Hagiwara, Effects of bubble size on heat transfer enhancement by sub-millimeter bubbles for laminar natural convection along a vertical plate. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009. 30: p. 778-788.

[12] Jung D, Kim Y, Ko Y, Song K., Nucleate boiling heat transfer coefficients of pure halogenated refrigerants. Int J Refrig, 2003. 26: p. 240-248.

[13] Joseph L. Bottini, Vineet Kumar, Sabrina Hammouti, David Ruzic, Caleb S. Brooks, Influence of wettability due to laser-texturing on critical heat flux in vertical flow boiling. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. 127: p. 806-817.

[14] Yohei Sato, Bojan Niceno, Pool boiling simulation using an interface tracking method: From nucleate boiling to film boiling regime through critical heat flux. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. 125: p. 876-890.

[15] Mahmoud Salari, Abbas Kasaeipoor, Emad Hasani Malekshah, Influence of static bubbles at the surface of electrodes on the natural convection flow for application in high performance lead-acid battery. Thermal Science and Engineering Progress, 2018. 5: p. 204-212

[16] John. G. Collier, John. R. Thome, 1994, Convective Boiling and Condensation, Third Edition.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]

چکیده انگلیسی:

Numerical study on the two-phase flow pattern due to the presence of bubbles caused by nucleate boiling in a tall cavity containing two incompatible fluids

Saeed Nahidi

Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

Received: August 2021, Accepted: September 2021

Abstract

Among the methods of heat transfer, the bubble boiling phenomenon as a method with high heat transfer coefficient is considered by many researchers. On the other hand, natural convection and nucleate boiling have interactions on each other which lead to strengthening and weakening each other in different situations. In the present numerical study, a three-dimensional tall cavity filled with incompatible fluids of water, vapor, and air with a uniform heat flux on the main wall has been investigated. At first in this study, the range of the critical heat flux for nucleate boiling has been predicted and then, the interaction between the natural convection and nucleate boiling and the effective parameters on heat transfer have been studied. The results show that increase in the Raleigh number due to increase in the dimensionless height of fluid in the tall cavity has improved the enhance of separation of gas bubbles due to boiling pheromone on the wall surface and as a result, has delayed the film boiling regime. However, in lower dimensionless heights of fluid in the cavity (lower Rayleigh number), streams of fluid due to natural convection haven't got enough strength to separate bubbles from the surface and bubbles slip on the surface instead of separating from it. In addition, vortexes of fluid caused by natural convection, first form in the down parts of the cavity and then they gradually develop and be active in other parts of the fluid. Also in this paper is well shown that the production and separation of the gas bubbles cause turbulence in the fluid flows..

Key words: Nucleate Boiling, vertical Surface, Natural Convection, Two Phase Flow, Tall Cavity.

*corresponding author: **kpsnahidi@ihu.ac.ir**

Cite this article as: Saeed Nahidi, Numerical study on the two-phase flow pattern due to the presence of bubbles caused by nucleate boiling in a tall cavity containing two incompatible fluids. Journal of Energy Conversion, 2021, 8(3), 77-91. DOR**:** **20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-12-02]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.6.4]