مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1394، دوره 15، شماره 1، ص‌ص 403-411

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی جریان جوشش اجباری نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم در یک کانال عمودی

عطاالله ربیعی[1*]، علیرضا عطف[2]

1-استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز

* شیراز، صندوق پستی 7193616548، rabiee@shirazu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 مهر 1393
پذیرش: 16 آبان 1393
ارائه در سایت: 26 آذر 1393

کلید واژگان:
نانوذره
جوشش
دینامیک سیالات محاسباتی
جریان دوفازی

چکیده

امروزه پدیدهٔ جوشش به واسطهٔ افزایش قابل توجهی که در ضرایب انتقال حرارت میدان جریان ایجاد می‌کند، مورد توجه بسیاری از محققان در حوزه‌های مختلف از جمله صنایع نفت، پتروشیمی و نیروگاهی است. در این راستا ارتقای پارامترهای میدانی جهت افزایش انتقال حرارت در کنار استفاده از ذرات نانوی معلق در سیال پایه از مسایل مهم دیگر در این زمینه است. در این مقاله، به کمک دینامیک سیالات محاسباتی تأثیر افزودن نانو ذره اکسید آلومینیوم Al_2O_3 در میدان جریان همراه با جوشش مورد بررسی قرار گرفته است. برای تحلیل میدان جریان از معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی برای هر فاز در دیدگاه اویلرین- اویلرین و همچنین از نحوهٔ سهم‌بندی مدل شار حرارتی اعمالی به دیواره توسط موسسه تحقیقاتی رنسلر برای شرایط جوشش استفاده شده است. در کنار صحت‌سنجی مطالعهٔ جریان جوششی مادون سرد، اثر افزودن نانوذرهٔ اکسید آلومینیوم به سیال پایه بر روی پارامترهای انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده شد که با افزایش غلظت ذرات نانو، دمای دیواره اصطلاحاً خنک‌تر و ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند.

Numerical investigation of water / Al_2O_3 nanofluid forced convective boiling flow in a vertical channel

Ataollah Rabiee*, Alireza Atf

Department of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.
* P.O.B. 7144745618 Shiraz, Iran, rabiee@shirazu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 October 2014
Accepted 07 November 2014
Available Online 17 December 2014

Keywords:
Nanoparticle
Boiling
CFD
Two Phase Flow

ABSTRACT

Nowadays boiling phenomenon has been an important issue in various fields such as petroleum industries and nuclear power plants due to enhancement of the total heat transfer coefficient. One method to increase the level of heat transfer coefficient is to add certain nanoparticles such as Al_2O_3 to the base fluid. The present paper concerns the effect of nanoparticles on forced convective boiling within the general- purpose computational fluid dynamics (CFD) solver FLUENT. The governing equations solved are generalized phase continuity, momentum and energy equations. Wall boiling phenomena are modeled using the baseline mechanistic nucleate boiling model developed in Rensselaer Polytechnic Institute (RPI). To simulate the critical heat flux phenomenon, the RPI model is extended to the departure from nucleate boiling by partitioning wall heat flux to both liquid and vapor phases considering the existence of thin liquid wall film. In addition to validating the subcooled boiling phenomenon, the effect of aluminum oxide Al_2O_3 nanoparticles on heat transfer coefficients has been analyzed. It is concluded that by increasing the volume fraction of Al_2O_3 nanoparticles in the base fluid, wall temperature has been dropped and the heat transfer coefficients have been increased significantly.

1- مقدمه

امروزه در صنایعی مانند نفت، پتروشیمی و نیروگاه‌ها که ضرایب انتقال حرارت بالا در مبدل‌های حرارتی مورد نیاز است، رخ دادن پدیدهٔ جوشش مادون سرد به واسطهٔ افزایش قابل ملاحظه‌ای که در ضرایب انتقال حرارت اعمال می‌کند، امری مطلوب به حساب می‌آید. با این وجود محققان با انجام آزمایش‌های مختلف به این نتیجه رسیده‌اند که حضور ذرات معلق با ابعاد نانو در سیال پایه با غلظت‌های مشخص می‌تواند باعث بهبود ضرایب انتقال حرارت شود.

در این تحقیق تلاش شده است به کمک دینامیک سیالات محاسباتی اثر نانوذره اکسید آلومینیوم Al_2O_3 با غلظت‌های مختلف را برای یک سیال پایه مورد بررسی قرار داده و تأثیر آن در انتقال حرارت همراه با جوشش مورد تحلیل قرار گیرد. در ادامه به فعالیت‌های انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود.

برتولمی و چانتوریا [1] در سال 1969 جریان جوششی مادون سرد را در یک کانال عمودی مورد بررسی قرار دادند. در این فرایند آزمایشگاهی با در نظر گرفتن شار حرارتی یکنواخت و تغییر مقادیر مختلف شامل شار جرمی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. Rabiee, A. Atf, Numerical investigation of water / Al_2O_3 nanofluid forced convective boiling flow in a vertical channel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 403-411, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.1.7]

ورودی، به بررسی توزیع دمای دیوارهٔ کانال، دمای سیال و میزان کسر حجمی بخار تولید شده در مقاطع مختلف در راستای طول کانال پرداختند. هویر در سال 1998 [2] به صورت آزمایشگاهی پارامترهای ترموهیدرولیکی میدان جریان در شرایطی که پدیده ی انحراف از جوشش هسته‌ای رخ می‌دهد را مورد مطالعه قرار داد. به واسطهٔ شدت بالای شار حرارتی اعمالی در شرایط آزمایش نسبت به سطح شار گرمایی بحرانی، هاله‌ای از بخار اطراف دیوارهٔ کانال شکل گرفته که باعث افزایش ناگهانی دمای دیواره می‌شود. در این مطالعه در کنار اثرات شار گرمایی یکنواخت، اثرات غیر یکنواخت شار حرارتی اعمالی به دیواره کانال و تأثیر آن بر روی پارامترهای میدانی شامل دمای سیال ودیواره در کنار کسر حجمی بخار مورد بررسی قرار گرفت.

در کنار فعالیت‌های آزمایشگاهی در سال 2006 ، کرپر و همکارانش [3] قابلیت کدهای دینامیک سیالات محاسباتی را به منظور مدل کردن جریان دوفازی نشان دادند. آن‌ها جریان جوشش مادون سرد را در یک کانال مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که مدل سهم‌بندی شار حرارتی اعمالی به دیواره در کنار سایر معادلات میدانی قابلیت محاسبه کردن مقدار متوسط حجم بخار را در درون کانال را داشته و تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی در این کار دیده می‌شود. در این تحقیق با تحلیل توزیع دما در مناطق مختلف، موقعیت‌های احتمالی که پدیدهٔ خشک شدگی سطح انتقال حرارت را به دنبال خواهد داشت، شناسایی و مورد ارزیابی قرار دادند. در سال 2010 لی و همکارانش [4] با استفاده از مدل تهیه شده توسط موسسه تحقیقاتی به نام RPI در کد محاسباتی در دسترس موجود فلوئنت[1]، در چارچوب تحلیل فازهای مختلف آب و بخار به صورت جداگانه و بر اساس دیدگاه اویلرین-اویلرین، جریان دوفازی همراه جوشش را در داخل یک کانال عمودی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق به بررسی و مقایسه نتایج برخی از نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شده در مبحث جریان همراه با جوشش اجباری شامل کانال ساده و همچنین کانال با مقطع دایروی در راستای تحلیل مبدل‌های دو لوله‌ای و با سیال عامل فرئون پرداختند. مقایسهٔ نتایج حاصل از این شبیه‌سازی شامل توزیع پارامترهای ترموهیدرولیکی میدان جریان مانند دما در بخش‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی، نشان دهندهٔ دقت لازم در مدل‌سازی پدیدهٔ جوشش دراین کد محاسباتی است. لازم به ذکر است تا سال 2010 مدل‌سازی جریان جوشش در این کد محاسباتی به کمک توابع ملحق شونده توسط محققان مختلف انجام می‌شده است. کرپر و زهاک در سال 2011 [5] به شبیه‌سازی جریان دوفازی همراه با جوشش مادون سرد پرداختند. آنها از داده‌های آزمایش‌های دبورا اشاره شده در مراجع [6-8] برای ارزیابی نتایج بدست آمده توسط کد CFX در چارچوب اویلرین-اویلرین، استفاده نمودند. در این تحقیق، اثرات اغتشاشی جریان به کمک مدلی از خانواده $k\text{-}\omega$[2] لحاظ شده است. نتایج آزمایشگاهی استفاده شده شامل برخی پارامترهای ترموهیدرولیکی از جمله میزان کیفیت بخار، قطر حباب‌های تولید شده و دمای سیال بر حسب موقعیت شعاعی لوله بوده که تطابق نتایج عددی با موارد یاد شده در حد قابل قبولی است. یادآوری می‌شود که بررسی میدان جریان همراه با جوشش بواسطه تداخل زیاد آن با سایر پارامترهای میدان جریان شامل اثرات تلاطم از مسائل امروزی محققان در این زمینه است.

در کنار فعالیت‌های انجام شده در زمینهٔ شبیه‌سازی میدان جریان همراه جوشش فعالیت‌های متنوعی نیز در زمینه خصوصیات ترموهیدرولیکی نانو سیال و تأثیر آن در جریان تک فاز و در سال‌های اخیر میدان جریان دوفازی همراه جوشش انجام شده است.

مطالعات و کارهای مشابهی در زمینه افزایش هدایت گرمایی نانوسیال و به دنبال آن ضریب انتقال حرارت نانو سیال در شرایط تک فازی شکل گرفته است. در سال 2011 بزرگان و همکاران [9]، به بررسی اثر نانوذرات اکسید آلومینیوم در سیال پایهٔ اتیلن گلیکول به عنوان سیال خنک کننده در مبدل حرارتی دو لوله‌ای پرداختند. دیده شد در محدودهٔ خاصی از غلظت نانوذره (کمتر از 7 درصد حجمی)، ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در جریان تک فاز افزایش پیدا کرده است.

وایت [10] در سال 2010 به بررسی آزمایشگاهی اثر نشست ذرات نانوی اکسید روی بر روی سطح جوشش و تأثیرات آن بر روی ضریب انتقال حرارت در جوشش استخری پرداخت. در این تحقیق به بررسی نقش اضافه شدن نانوذرات در زاویهٔ تماس سطح و متعاقباً چگالی مکان‌های هسته‌های تولید بخار پرداخته شده است. مشاهده شد که با ته‌نشین شدن ذرات نانو روی سطح، زاویه ی تماس افزایش پیدا کرده و در نتیجه با فعال شدن سایت‌های تولید حباب[3] با قطر کمتر در روی سطح، دیده شد که نشست نانوذرات بر روی سطح، عملکرد جوشش را تا میزان 62 درصد ارتقا می‌دهد. لازم به ذکر است که بدون شکل گیری لایهٔ ذرات نانو بر روی سطح، ضریب انتقال حرارت میدان جریان حدود 25 درصد نسبت به سیال پایه افزایش نشان داده است.

چهاده و همکارانش [11] در سال 2013 به بررسی آزمایشگاهی جریان اجباری همراه با جوشش نانوسیال آب در حضور نانو ذرات نقره با غلظت‌های کم (0/000237 و 0/000475%) در یک کانال با مقطع مستطیلی پرداختند. مشاهده شد که ضریب انتقال حرارت محلی، دمای دیوارهٔ کانال و کسر حجمی بخار تحت تأثیر حضور نانوذرات تغییر کرده به نحوی که با افزایش غلظت نانوذره، ضریب انتقال حرارت به ویژه در نواحی ورودی کانال افزایش چشمگیر داشته است. در این مطالعهٔ آزمایشگاهی تاکید شده است که افزایش غلظت نانوذره در میدان جریان در کنار افزایش کسر حجمی بخار در طول کانال به واسطهٔ شار حرارتی اعمالی باعث کاهش دمای دیواره در طول کانال نسبت به شرایط پایه شده است. پراجاپاتی و روهاتگی [12] در سال 2014 به طور آزمایشگاهی خصوصیات ترموهیدرولیکی نانوسیال آب/اکسید روی را در شرایط جریان اجباری همراه با جوشش در محدودهٔ کاری فشار 1 الی 2/5 بار، شار حرارتی 0-400 کیلووات بر متر مربع، شار جرمی ثابت 400 کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه و با اضافه کردن غلظت نانوذره در محدودهٔ 0/0001 تا 0/1 درصد حجمی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه حدود 126 درصد افزایش، افت فشار 23 درصد افزایش و زبری سطح نیز به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است.

در کنار بررسی تأثیر کلی افزایش انتقال حرارت نانوسیال‌ها فعالیت‌هایی نیز در زمینهٔ اثر حضور نانو ذره در میدان جریان مانند حرکت براونی انجام شده است.

گاپتا و کومار [13] در سال 2007 به تحلیل یک میدان جریان همراه با انتقال حرارت با توجه به تأثیر حرکت براونی ناشی از حضور نانوذره در میدان جریان پرداختند. دیده شد که به واسطهٔ تجمع نانوذرات به خصوص در غلظت‌های پایین، حرکت براونی سهم ناچیزی در افزایش رسانایی گرمایی سیال دارد.

1- Fluent
2- SST k-ω (Shear Stress Model)
3- Nucleation Site

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.1.7]

شیما و همکارانش [14] با تغییر دادن قطر نانوذرات از 2/8 تا 9/5 نانومتر در یک جریان انتقال حرارت تک فاز بدون جوشش، افزایشی به میزان 19 درصد در رسانایی گرمایی را گزارش کردند. نتیجه‌گیری شد که این میزان افزایش در رسانایی گرمایی نانوسیال، به دلیل اثر تجمع نانوذرات در میدان جریان سیال است که در این افزایش، سهم اثر حرکت براونی نانوذرات اندک است. ایوانس و همکارانش [15] نیز در یک فعالیت مشابه به بررسی تأثیر حرکت براونی ناشی از حضور نانوذرات در یک میدان جریان همراه با انتقال حرارت پرداختند و نشان دادند که میزان افزایش در هدایت گرمایی نانوسیال ناشی از حرکت براونی سهم کمی را تشکیل می‌دهد.

فعالیت‌های صورت گرفته و در عین حال در دسترس موجود نشان می‌دهد که مطالعهٔ تأثیر نانوذرات بر میدان جریان در حالت تک فازی و همچنین دو فازی مانند پدیده جوشش، از موضوعات مورد توجه محققان در حوزهٔ ترموهیدرولیک در شرایط امروزی است. در این تحقیق سعی شده در کنار کارهای آزمایشگاهی موجود، اثر نانوذرهٔ اکسید آلومینیوم Al2O3 در پدیدهٔ جوشش که در صنایع مختلف مورد توجه می‌باشد به کمک شبیه‌سازی عددی که کمتر مورد توجه قرار گرفته، مورد ارزیابی قرار گیرد. در ادامه به روش انجام کار شبیه‌سازی عددی، شامل معادلات حاکم بر میدان جریان و نتایج اشاره می‌شود.

2- معادلات حاکم بر میدان جریان

برای مدل‌سازی میدان جریان همراه با جوشش از معادلات متوسط‌گیری شدهٔ ناویر استوکس[1] در کد محاسباتی در دسترس موجود (فلوئنت) بر اساس دیدگاه اویلرین-اویلرین، استفاده شده است. لازم بذکر است که این معادلات برای هر دو فاز اصلی آب و بخار جداگانه مورد تحلیل قرار گرفته و اثرات نانو ذره در این مطالعه به صورت متوسط‌گیری شدهٔ خواص ترموفیزیکی در هر فاز با توجه به درصد حجمی تعریف شده نانو ذره در محاسبات وارد می‌شوند. لازم به ذکر است که به علت وجود نسبت چگالی بالا میان فاز مایع و فاز بخار در میدان جریان‌های همراه با جوشش، داشتن استراتژی مناسب برای بدست آوردن حل همگرا لازم و ضروری است. برای این منظور برای کوپل کردن میدان فشار و سرعت از روش سیمپل کوپل شده با فاز[2] که پایداری بهتری در پیش‌بینی میدان جریان همراه با جوشش ایجاد می‌کند استفاده شده است. به منظور حل عددی برای مجزاسازی جملات پخش و جابجایی معادلات از روش مجزاسازی بالادست مرتبه اول استفاده شده است. استفاده از میان‌یابی خطی برای محاسبهٔ فشار روی دیوارهٔ هر سلول محاسباتی همگرایی بهتری را فراهم می‌کند. لازم به ذکر است که در کنار انتخاب مدل‌های آشفته، استفاده از ضرایب زیر تخفیف کم در مراحل اولیهٔ حل، لازم و ضروری است. در ادامه به معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی، اثرات تلاطم و روابط مورد نیاز برای مدل سازی جوشش شامل نحوهٔ تقسیم‌بندی شار حرارتی در رژیم‌های مختلف و سایر روابط مورد نیاز در این بخش اشاره می‌شود.

معادلهٔ پیوستگی:

$$\frac{\partial(\alpha_q\rho_q)}{\partial t} + \nabla.\left(\alpha_q\rho_q\vec{V}_q\right) = \sum_{r=1}^{n}(\dot{m}_{rq} - \dot{m}_{qr}) + s_q \qquad (1)$$

در معادلهٔ (1) $\dot{m}_{rq}$، $\dot{m}_{qr}$، s_q به ترتیب بیانگر انتقال جرم بین فاز p، r و ترم چشمه هستند.

1- Reynolds Averaged Navier-Stokes
2- Phase Coupled SIMPLE

معادلهٔ مومنتم:

$$\frac{\partial(\alpha_q\rho_q\vec{V}_q)}{\partial t} + \nabla.\left(\alpha_q\rho_q\vec{V}_q\vec{V}_q\right) = -\alpha_q\nabla p + \nabla.\left(\bar{\bar{\tau}}_q\right) + \alpha_q\rho_q\vec{B}_f + \sum_{r=1}^{n}\left(\vec{F}_{rq}^{D} + \vec{F}_{rq}^{TD} + \dot{m}_{rq}\vec{V}_{rq} - \dot{m}_{qr}\vec{V}_{qr}\right) + \left(\vec{F}_q + \vec{F}_q^{L} + \vec{F}_q^{vm}\right) \qquad (2)$$

در معادلهٔ (2) $\vec{F}_{rq}^{D}$، $\vec{F}_{rq}^{TD}$، $\vec{F}_q$، $\vec{F}_q^{L}$، $\vec{F}_q^{vm}$ به ترتیب نیروی اصطکاکی مابین فازها، نیروی ناشی از اثرات میدان جریان مغشوش، اثر نیروهای خارجی، نیروی برا و نیرو ناشی از جرم افزوده هستند [4].

معادلهٔ بقای انرژی:

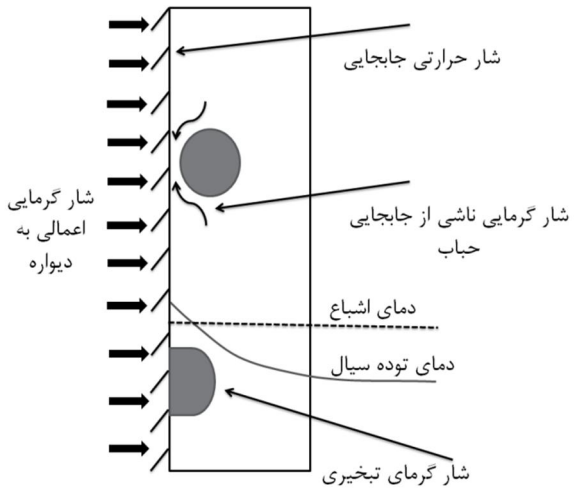
$$\frac{\partial(\alpha_q\rho_q H_q)}{\partial t} + \nabla.\left(\alpha_q\rho_q\vec{V}_q H_q\right) = \bar{\bar{\tau}}_q : \nabla.\vec{V}_q + \alpha_q\frac{\partial p}{\partial t} - \nabla.\dot{\vec{q}} + S_{H,q} + \sum_{r=1}^{n}\left(\dot{q}_{rq} + \dot{m}_{rq}H_{rq} - \dot{m}_{qr}H_{qr}\right) \qquad (3)$$

در معادلهٔ (3) H_q انتالپی مخصوص هر فاز، $\dot{q}$ شار گرمایی و $S_{H,q}$ ترم چشمه است.

اولین و شناخته شده‌ترین مدل جوشش در دینامیک سیالات محاسباتی، مدل ارائه شده توسط کرل و پودوسکی [16] است. این مدل عموماً به عنوان مدلی برای پیش‌بینی مکانیکی پدیدهٔ جوشش شناخته شده است. بر اساس این مدل، شار گرمای کلی منتقل شده از دیواره به سیال به سه بخش کلی قابل تقسیم است:

$$\dot{q}_W = \dot{q}_c + \dot{q}_Q + \dot{q}_E \qquad (4)$$

در رابطهٔ (4) $\dot{q}_c$ شار گرمای ناشی از مجاورت فاز مایع در کنار دیواره[3]، $\dot{q}_Q$ شار گرمایی مربوط به جابجایی حباب[4] و $\dot{q}_E$ شار گرمایی تبخیر[5] هستند. شکل 1 شمایی از این نحوهٔ سهم‌بندی شار حرارتی اعمالی را نشان می‌دهد.



شکل 1 شمایی از شار گرمایی اعمالی

3- Liquid Phase Heat Flux
4- Quenching Heat Flux
5- Evaporation Heat Flux

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.1.7]

در این مدل، فرض شده سطحی از دیواره توسط حباب‌ها اشغال (A_b) و بقیهٔ سطح باقی‌مانده توسط سیال مایع اشغال می‌شود. مدل RPI رابطه‌های زیر را برای بخش‌های متفاوت شار گرمای دیواره ارائه می‌کند:

شار گرمای جابجایی فاز مایع:

$$\dot{q}_c = h_C(T_w - T_l)\,(1\text{-}A_b) \tag{5}$$

در رابطه (5)، h_C ضریب انتقال حرارت فاز مایع، T_w دمای دیواره و T_l دمای مایع نزدیک دیواره است.

سطح نفوذ:

تعریف این سطح بر اساس قطر جدایش حباب و دانسیتهٔ مکان هسته‌ها است.

$$A_b = \min(1\,, \eta\,\frac{\pi}{4}\,d_b^2\,N_w\,) \tag{6}$$

در رابطه (6) ضریب تجربی η از رابطهٔ پیشنهادی توسط وال و کنینگ [17] محاسبه می‌شود:

$$\eta = 4.8\exp(-\frac{\mathrm{Ja}}{80}) \tag{7}$$

که در این معادله Ja عدد جاکوب است که از رابطهٔ (8) محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{Ja} = \frac{\rho_l C_{p,l}\Delta T_{sub}}{\rho_v H_{lv}} \tag{8}$$

که در آن $\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_l$ درجهٔ مادون سردی مایع است.

شار گرمای مربوط به جابجایی حباب:

$$\dot{q}_Q = C_{wt}\frac{2\,k_l}{\sqrt{\frac{\pi\gamma_l}{f_{bw}}}}(T_w - T_{l,q})A_b \tag{9}$$

در این رابطه k_l ضریب هدایت گرمایی، γ_l معرف ضریب پخش حرارتی در فاز مایع است. f_{bw} بیانگر فرکانس جدایش حباب است. C_{wt} ضریبی به منظور تصحیح زمان تاخیر بین حباب‌های متوالی است که به صورت پیش فرض برابر با یک در نظر گرفته می‌شود.

فرکانس جدایش حباب:

فرکانس جدایش حباب معمولاً بر اساس معادلهٔ رشد حباب کنترل شدهٔ پیشنهادی توسط کول [18] محاسبه می‌شود.

$$f_{bw} = \sqrt{\frac{4g\,(\,\rho_l - \rho_v)}{3\rho_l d_{bw}}} \tag{10}$$

که در این رابطه g شتاب گرانش است.

شار گرمای تبخیری:

$$q_E = \frac{\pi}{6}\,d_{bw}^3 f_{bw} N_w \rho_v H_{lv} \tag{11}$$

در رابطه (11)، d_{bw} قطر جدایش حباب، N_w دانسیتهٔ مکان هسته‌های فعال، ρ_v چگالی فاز بخار و H_{lv} گرمای نهان تبخیر هستند.

دانسیتهٔ مکان هسته‌ها:

دانسیتهٔ مکان هسته‌ها معمولاً با یک رابطه که پایه آن بر اساس دیواره فوق داغ است، بدست می‌آید که بیان عمومی آن بر اساس رابطهٔ (12) است:

$$N_w = C^n(\,T_w - T_{sat}) \tag{12}$$

در اینجا پارامترهای تجربی بر اساس کار لامرت و چاولا بدست می‌آیند که n=1.805 و C=210 [19]. در کنار رابطهٔ تجربی حاضر، افراد دیگری نیز مانند کوکامصطفی اگولاری و همکاران در این زمینه، روابطی ارائه کردند [20].

$$N_w^* = f(\rho^*)r_c^{*-4.4} \tag{13}$$

$$N_w^* = N_w D_w^2 \tag{14}$$

$$r_c^* = 2r_c/D_w \tag{15}$$

$$r_c = \frac{2\sigma T_{sat}}{\rho_v\rho_{fv}\Delta T_w} \tag{16}$$

$$\rho^* = (\rho_l - \rho_v)/\rho_v \tag{17}$$

در اینجا D_w قطر جدایش حباب است و تابع دانسیته با رابطهٔ (18) تعیین می‌شود.

$$f(\rho^*) = 2.157 * 10^{-7\rho^{*-3.2}(+0.0049\rho^*)^{4.13}} \tag{18}$$

قطر جدایش حباب:

قطر جدایش حباب بر اساس رابطهٔ تجربی ارائه شده توسط تولوبینسکی [21] بیان می‌شود:

$$D_w = \min(0.0014, 0.0006\exp\left(-\frac{\Delta T_w}{45}\right)) \tag{19}$$

ایشی و همکاران [22] نیز رابطهٔ (20) را پیشنهاد کردند:

$$D_w = 0.0012\,(\rho^*)^{0.9}\,0.0208\,\varphi\,\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \tag{20}$$

که φ زاویه تماس است که به صورت پیش فرض برابر 60 درجه است.

لازم به ذکر است در مدل RPI، دمای بخار از حل معادلهٔ انرژی به دست نمی‌آید بلکه در دمای اشباع ثابت فرض می‌شود. به منظور مدل کردن جوشش غیر تعادلی[1] و شار گرمای بحرانی[2] لازم است که دمای بخار با حل معادله انرژی حاکم بر فاز بخار در کنار سایر معادلات حاکم محاسبه شود. علاوه بر این اثر وجود لایهٔ نازک مایع در طول دیوارهٔ گرما دیده نیز باید در نظر گرفته شود. به این منظور از مدل شار گرمای تصحیح شده‌ای به صورت رابطه (21) استفاده می‌شود:

$$\dot{q}_W = (\dot{q}_c + \dot{q}_Q + \dot{q}_E + \dot{q}_F)f(\alpha_l) + (1 - f(\alpha_l))\dot{q}_v + \dot{q}_G \tag{21}$$

در رابطهٔ (22):

$$f(\alpha_v) = 1 - f(\alpha_l) = \max(0\,, \min\left\{1, \frac{\alpha_v - \alpha_{v,1}}{\alpha_{v,2} - \alpha_{v,1}}\right\}) \tag{22}$$

که $\alpha_{v,1} = 0.9$ و $\alpha_{v,2} = 0.95$ است.

در رابطهٔ (21)، q_F ، q_V و q_G به ترتیب شار گرمای جوششی فیلمی نازک، شار گرمایی در فاز بخار از نوع هدایت و شار گرمای منتقل شده به هرگونه از گازهای دیگر موجود مانند وجود گازهای غیر قابل میعان، می‌باشد.

در رابطه (22)، $f(\alpha_l)$، تابعی است که به نحوی اثرات رژیم‌های مختلف جریان جوشش از جریان حبابی[3] تا جریان جریان[4] حلقویرا مدل‌سازی می‌کند. برای توضیحات بیشتر به مرجع [4] مراجعه شود.

یادآوری می‌شود که در کنار مدل RPI و اصلاح شدهٔ آن، که نحوه سهم‌بندی شار حرارتی اعمال به دیواره را نشان می‌دهد و در شبیه‌سازی عددی انجام شده نیز از این مدل استفاده شده است، فعالیت‌های زیادی برای توصیف ضرایب انتقال حرارت به دو بخش کلی سهم جوشش شامل تبخیر و حرکت حباب در میدان جریان از یک سو و همچنین اثر جریان تک فاز در مکان‌هایی که سایت تشکیل حباب به هر دلیلی فعال نیست انجام شده است که می‌توان به کار چن در مرجع [23] اشاره کرد. در این تحقیق ضرایب انتقال حرارت ناشی از این دو بخش به کمک رابطهٔ پیشنهادی چن بصورت زیر مورد بررسی قرار داده می‌شود.

$$\dot{q}_W = h_{NcB}\,(T_w - T_{SAT}) + h_w\,(T_w - T_f(z)) \tag{23}$$

1- Nonequilibrium Boiling
2- Critical Heat Flux
3- Bubbly Flow
4- Annular Flow

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.1.7]

که در رابطه (23)، $\dot{q}_W$ نمایانگر شار حرارتی کل اعمالی به دیواره می‌باشد.

روابط مورد نیاز اثرات نانوذره:

در این مطالعه معادلات (24) تا (27) برای بدست آوردن خواص ترموفیزیکی نانو سیال بکار گرفته شده است که در آن‌ها φ غلظت حجمی نانوذرات است [24].

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\,\rho_b + \varphi\,\rho_p \quad (24)$$

$$(\rho\, c_p)_{nf} = (1 - \varphi)\,(\rho\, c_p)_{bf} + \varphi\,(\rho\, c_p)_p \quad (25)$$

$$\mu_{nf}/\mu_{bf} = 123\,\varphi^2 + 7.3\,\varphi + 1 \quad (26)$$

$$k_{nf}/k_{bf} = 4.97\,\varphi^2 + 2.72\,\varphi + 1 \quad (27)$$

جدول‌های 1 و 2 به ترتیب خصوصیات ترموفیزیکی نانوذرهٔ اکسید آلومینیوم و سیال پایه مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهند. شکل 2 نیز تغییرات برخی از خصوصیات ترموفیزیکی نانو سیال را در غلظت‌های مختلف نانوذره نشان می‌دهد.

در برخی مراجع، تأثیر حرکت براونی ناشی از حضور نانوذره در میدان جریان به کمک ترمی به ضریب هدایت گرمایی نانو سیال (رابطه 27) به شکل رابطه (28) اضافه می‌شود:

$$\beta \rho_p \varphi C_p \sqrt{\frac{\kappa_B T}{\rho_p d_p}}\, f(T,\varphi) \quad (28)$$

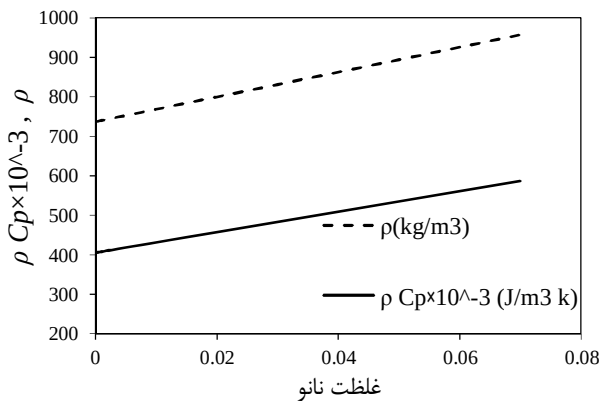
در رابطه (28)، $f(T,\varphi)$ تابعی از دما و غلظت حجمی نانوذرات است و β نیز تابعی از غلظت حجمی نانو ذرات می‌باشد که برای جزئیات بیشتر می‌توان به مرجع [24] مراجعه کرد. با توجه مراجع یاد شده [13-15] در بخش قبل، نسبت به کم بودن سهم حرکت براونی ناشی از حضور نانوذره در میدان جریان، این ترم در محاسبات لحاظ نشده است.

جدول 1 خصوصیات ترموفیزیکی نانو ذره [24]

	رسانایی گرمایی (W/m K)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg K)	چگالی (kg/m³)
آلومینیوم اکسید	36	773	3880

جدول 2 خصوصیات ترموفیزیکی سیال پایه در فشار 45 بار [23]

	رسانایی گرمایی (W/m K)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg K)	چگالی (kg/m³)
آب	0/606522	4952/763	788/1065



شکل 2 تغییرات چگالی و حاصل ضرب چگالی در ظرفیت گرمایی ویژه برای غلظت‌های مختلف نانوذره

3- توصیفی از مدل‌های تلاطم

کد محاسباتی در دسترس موجود، مدل‌های مختلفی را برای شبیه‌سازی جریان مغشوش به همراه اثرات میدان جریان چند فازی ارائه می‌کند. با معرفی کردن ϕ به عنوان پارامتر اغتشاش، می‌توان معادلات کلی جریان مغشوش را در معادله (29) خلاصه کرد.

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q \phi_q)}{\partial t} + \nabla.\left(\alpha_q \rho_q V_q \phi_q\right) = \nabla.\left(\alpha_q \Gamma_{\varphi,q}\, \nabla\, \phi_q\right) + \alpha_q S_{q,\phi} \quad (29)$$

که در آن $\Gamma_{\varphi,q}$ ضریب پخش، $S_{q,\phi}$ ترم چشمه که شامل تولید و از بین رفتن گردابه‌های میدان جریان و همچنین ترم‌های اضافی ناشی از برهم‌کنش حباب‌ها و تأثیر آن‌ها در معادلات تلاطم است که برای توضیحات بیشتر به مرجع [4] مراجعه شود.

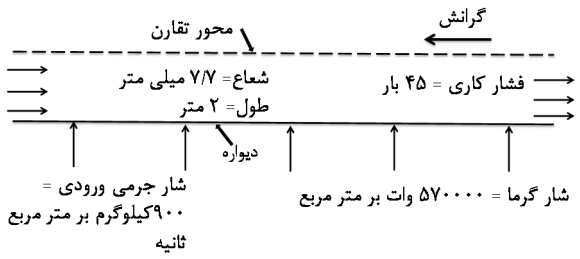
4- نتایج

در این بخش به برخی از نتایج در زمینهٔ یاد شده که شامل مدل‌سازی میدان جریان همراه با جوشش مادون سرد و جریان جوشش بحرانی در راستای صحت‌سنجی داده‌های ناشی از شبیه‌سازی عددی است اشاره و در ادامه اثر اضافه شدن نانو ذرهٔ اکسید آلومینیوم در محاسبات شامل جوشش ارائه می‌شوند.

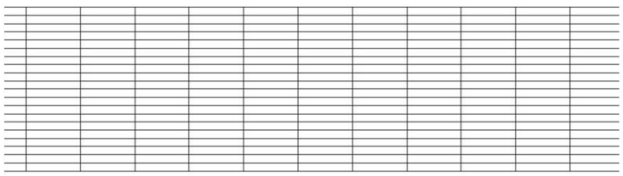
4-1- نتایج جریان همراه با جوشش مادون سرد:

شکل 3 شمایی از کانال مورد بررسی در این بخش را نشان می‌دهد. کانال مورد بررسی در این بخش که مدل‌سازی جریان همراه با جوشش را در یک کانال عمودی نشان می‌دهد، دارای مقطع دایروی با قطر 15/4 میلی‌متر و طول 2 متر بوده که سیال کاری که آب است با میزان 60 درجه مادون سرد و شار جرمی 900 کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه به آن وارد می‌شود. شایان ذکر است که شار حرارتی اعمالی به دیواره برابر 570 کیلو وات بر متر مربع است. لازم بذکر است برای تحلیل، میدان جریان به صورت متقارن محوری بررسی شده است.

شکل 4 بزرگنمایی از شبکهٔ مورد استفاده در بخشی از دامنه حل را نشان می‌دهد.



شکل 3 شمایی از مسأله به همراه شرایط مرزی [1]



شکل 4 بزرگنمایی از توپولوژی شبکه مورد استفاده

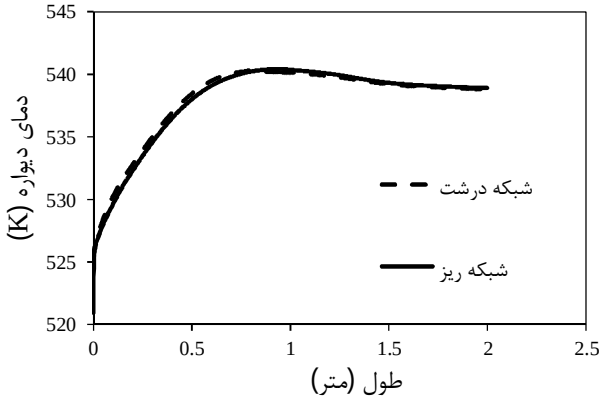
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.1.7]

برای بررسی مسأله مطالعه شبکه، از دو شبکه سازمان یافته با تعداد 13125 و 52500 استفاده شده است. شکل 5 تغییرات دمای دیوارهٔ کانال را برای هر دو شبکهٔ ذکر شده نشان می‌دهد. دیده می‌شود با افزایش تعداد شبکه به میزان 4 برابر تغییر قابل توجهی در نتایج بوجود نمی‌آید.

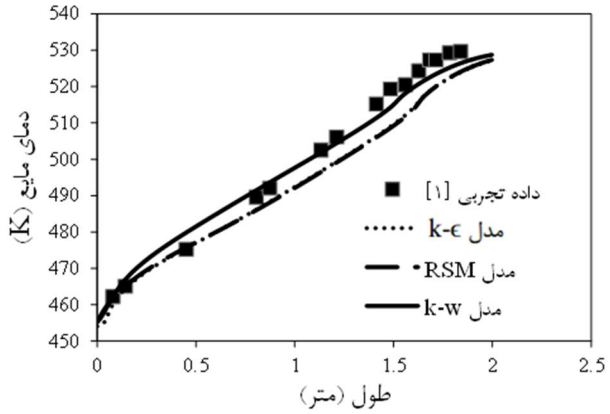
لازم به ذکر است در تمام محاسبات صورت گرفته سعی شده با تنظیم شبکه در نزدیکی دیواره با در نظر گرفتن میزان y^+ در محدودهٔ 75 تا 150 و همچنین با انجام تنظیمات مناسب به ویژه در مجزاسازی ترم‌های مختلف اعم از جابه‌جایی و پخش در معادلات میدانی، در کنار انتخاب مناسب مدل‌های انتقال حرارت، جرم و سایت‌های تشکیل هسته، حداکثر میزان خطا برای متغیرهای میدان جریان دو فازی شامل جوشش از مرتبه 4-^10 باشد. یادآوری می‌شود که برای یک جریان تک فاز معیار y^+ مابین 30 تا 60 است، اما تجربهٔ کارهای عددی در حوزهٔ جریان‌های دوفازی مانند کاویتاسیون نشان داده، نزدیک بودن شبکهٔ اول در نزدیکی دیواره اگر در محدودهٔ y^+، 30 قرار گیرد ممکن است همگرایی حل را در جریان‌های دو فازی تحت الشعاع قرار دهد. در این زمینه می‌توان به کار سنوکک [25] اشاره کرد.

شکل 6 دمای مایع بر روی محور کانال را با توجه به مدل‌های مختلف تلاطم نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مدل تلاطم k-ω نسبت به سایر مدل‌ها دارای تطابق بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی به ویژه در ناحیهٔ انتهایی کانال از خود نشان می‌دهد.

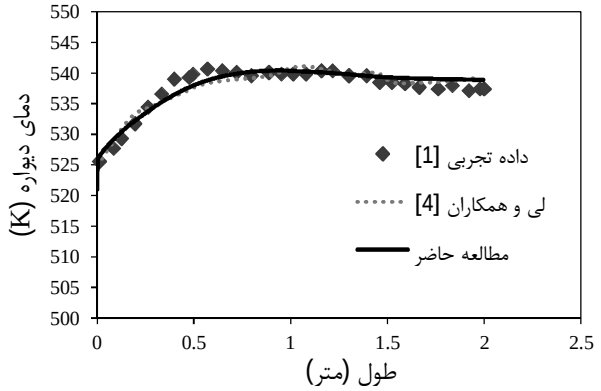
توزیع دمای دیوارهٔ کانال و همچنین توزیع دمای متوسط سیال در شکل‌های 7 و 8 به ترتیب نشان داده شده است. دیده می‌شود که نتایج کار عددی حاضر در کنار کار عددی لی و همکاران تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد.



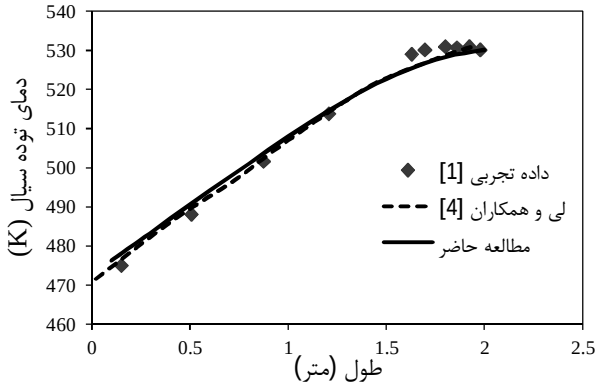
شکل 5 توزیع دمای دیواره در راستای طول کانال با شبکه‌های مختلف



شکل6 توزیع دمای مایع در طول محور کانال



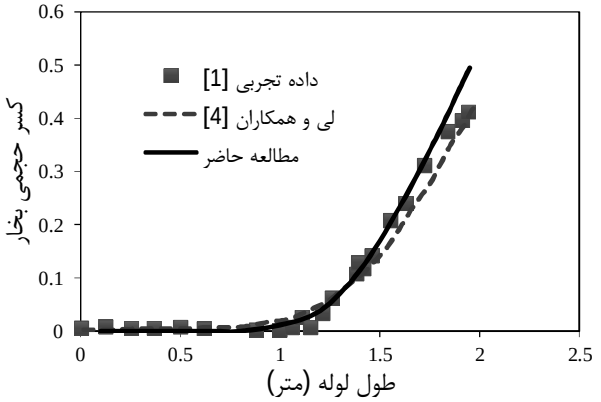
شکل 7 توزیع دمای دیواره در طول کانال



شکل 8 توزیع دمای تودهٔ سیال در طول کانال

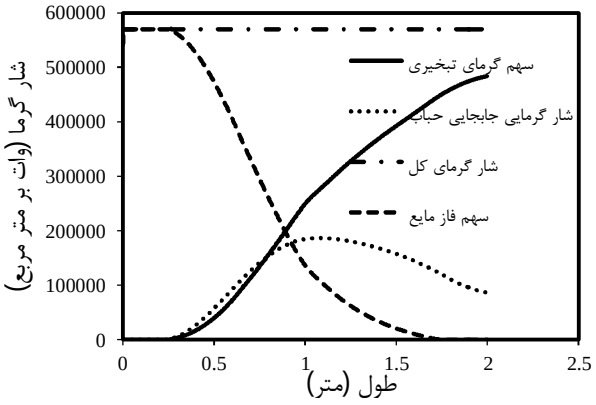
متوسط کسر حجمی بخار در امتداد طول کانال نیز در شکل 9 آمده است. دیده می‌شود نتایج عددی مطالعه حاضر بجز در ناحیهٔ کوچکی در انتهای کانال تطبیق بهتری نسبت به داده‌های آزمایشگاهی در کنار کار لی و همکاران ارائه می‌کند.

شکل 10 نیز توصیفی از نحوهٔ سهم‌بندی شار گرمایی اعمال شده به دیواره را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در هر مقطع مجموع شار حرارتی ناشی از فاز مایع، تبخیر و سهم مربوط به جابجایی حباب برابر کل شار اعمالی در مقطع یعنی 570000 وات بر متر مربع است. مشاهده می‌شود که در طول کانال با داغ شدن سیال عامل و افزایش شدت دانسیتهٔ حباب، از سهم شار فاز مایع کاسته شده و به بخش‌های دیگر به ویژه فاز تبخیر اضافه شده است.

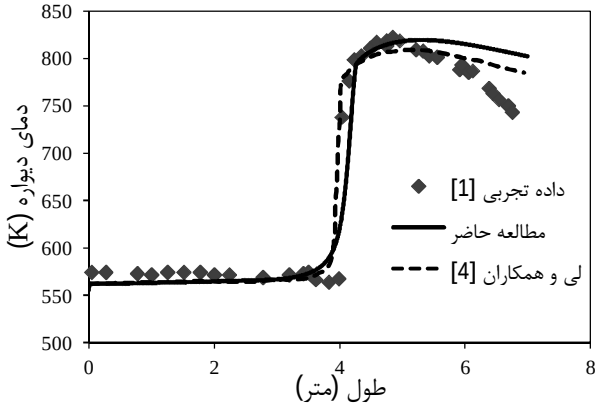


شکل 9 توزیع کسر حجمی بخار روی دیواره

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.1.7]



شکل 10 سهم بندی مختلف مدهای شار گرمای روی دیواره



شکل 11 توزیع دمای دیوارهٔ کانال و افزایش ناگهانی آن

4-2- نتایج جریان همراه با جوشش بحرانی بدون حضور نانو ذره

در این بخش از نتایج در راستای صحت‌سنجی داده‌های عددی شرایط دیگری پیگری می‌شود که به دلیلی شار گرمایی اعمالی از حدی فراتر رفته و میدان جریان همراه با جوشش به سمت جوشش فیلمی منحرف می‌شود. قاعدتاً اطلاع پیدا کردن نسبتاً دقیق از وضعیت پارامترهای میدان شامل دما، میزان بخار و سایر متغیرها می‌تواند کمک زیادی در کنترل این رژیم جریانی کند.

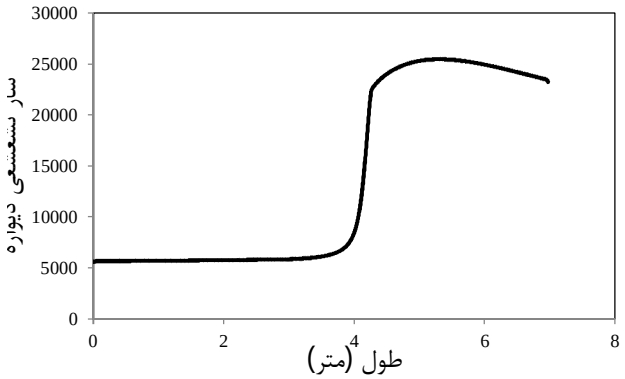
هندسهٔ مورد بررسی در این بخش، شامل کانالی عمودی با قطر 10 میلی‌متر و طول 7 متر می‌باشد. سیال عامل (آب) با شار جرمی 1495 کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه و درجهٔ مادون سرد 10 درجه کلوین وارد دهانهٔ کانال در شرایط کاری فشاری 7/01 مگاپاسکال می‌شود. میزان شار گرمای مورد آزمایش که توسط هویر [2] در امتداد طول دیواره کانال اعمال شد، 797000 وات بر متر مربع می‌باشد.

شکل 11 نحوهٔ تغییرات توزیع دمای دیواره کانال در کنار داده‌های آزمایشگاهی موجود و کار عددی انجام یافته توسط لی و همکاران را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که در فاصلهٔ حدود 4 متری از ورودی کانال تغییر ناگهانی در توزیع دمای دیواره به واسطهٔ شدت بالای شار گرمایی اعمالی اتفاق افتاده است. این افزایش ناگهانی دمای دیواره قاعدتاً ناشی از کاهش شدید ضریب انتقال حرارت به واسطهٔ حضور بخار در کنار دیوار به جای مایع است که اصطلاحاً به آن خشک شدگی[1] می‌گویند. قابل پیگری است که به جز ناحیهٔ انتهایی کانال بعد از شکل‌گیری پدیده خشک شدگی و انحراف از جوشش هسته‌ای تطابق نسبتاً خوبی مابین نتایج ارائه شده به ویژه در حوالی محل رخداد جوشش فیلمی اتفاق افتاده است.

در خصوص عدم تطابق داده‌های شبیه‌سازی عددی با آزمایش در ناحیهٔ بعد از خشک شدگی، دلایل متعدی از جمله عدم در نظر گرفتن اثر تشعشع دیواره با توجه به دمای حدود 800 درجه کلوین و همچنین کارآمد نبودن مدل‌های انتقال حرارت، جرم و پارامترهای مؤثر در جریان بخار حاوی قطرات آب[2] بعد از خشک شدگی را می‌توان اشاره کرد. در زیر، مختصری به تأثیر سهم تشعشع دیوارهٔ کانال پرداخته شده است.

4-3- اثر تشعشع در جریان بعد از خشک شدگی

میزان شار حرارتی ناشی از فرایند تشعشع دیواره با توجه به دمای دیواره در شکل 12 آمده است. دیده می‌شود بعد از خشک شدگی، تغییر ناگهانی در میزان شار تشعشعی دیواره به میزان حدود 25000 وات بر متر مربع شکل گرفته است. قاعدتاً بخشی از این شار حرارتی توسط جریان سیال، بسته به ضریب جذب تشعشعی، دریافت و بقیه دوباره به دیواره برمی‌گردد. دمای متوسط جریان بخار بعد از ناحیه خشک شدگی حدود 550 درجهٔ کلوین است. بنابراین میزان شار حرارتی تشعشع، ناشی از جریان سیال بعد از خشک شدگی با توجه به دمای متوسط حدود 550 درجهٔ کلوین، حدود 5000 وات بر متر مربع می‌باشد. قاعدتاً ماکزیمم انرژی تشعشع خالص منتقل شده با این فرض که دیواره جسم سیاه باشد، از رابطهٔ $\sigma(T_w^4 - T_f^4)$ محاسبه می‌شود که حدود 20000 وات بر مترمربع خواهد بود. این میزان شار با توجه به ضریب عبوری تشعشعی سیال در برابر شار حرارتی 797000 وات بر مترمربعی، حدود 2 درصد است که قاعدتاً نمی‌تواند تأثیر قابل توجهی در تغییر دمای دیواره بعد از خشک شدگی داشته باشد. البته اگر دمای دیواره افزایش قابل ملاحظه‌تری می‌کرد قاعدتاً این سهم می‌توانست در تغییر دمای دیواره مؤثرتر عمل کند. قیاسیان [23] به این مطلب اشاره دارد که الگوی جریان در ناحیهٔ بعد از خشک شدگی، یک جریان شامل جریان بخار در حضور قطرات آب می‌باشد. فرایندهای مختلف هیدرودینامیکی و حرارتی به طور همزمان در این بخش مؤثر هستند که برخی از آن‌ها عبارتند از انتقال حرارت جابجایی دیواره به بخار، انتقال حرارت جابجایی و تشعشع از دیواره به قطرات، انتقال حرارت جابجایی از بخار به قطرات آب با توجه به تفاوت دمایی آنها، تبخیر قطرات، برخورد قطرات آب به دیواره، تقویت پارامترهای جریان مغشوش بخار به وسیله ی حضور قطرات و حرکت آن‌ها. قاعدتاً مدل‌سازی چنین جریانی با توجه به تداخل‌های زیاد موجود که به آنها اشاره شد، نیازمند دقت نظر بیشتری است که می‌توان به عنوان یک تحقیق مجزا به آن پرداخت.



شکل 12 توزیع شار گرمایی تشعشعی دیواره

1- Dryout
2- Droplet Flow

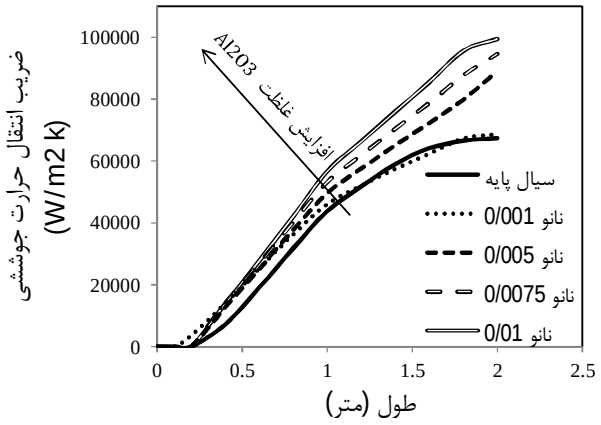
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.1.7]

4-4- نتایج جریان جوشش مادون سرد همراه با ذرات نانو

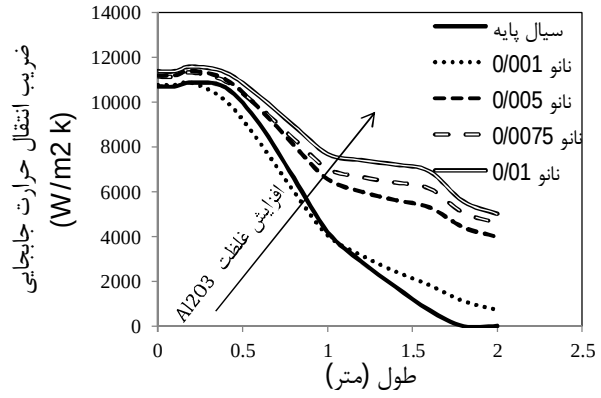
در ادامه اثر افزوده شدن ذرات نانوی اکسید آلومینیوم Al_2O_3 با غلظت‌های مختلف در میدان جریان شامل جوشش مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش، از شرایط مرزی ارائه شده در بخش 4-1 ارایه شده توسط برتولمی و چانتوریا [1] استفاده شده و نانو ذره به این مساله و شرایط کاری اضافه شده است. شکل‌های 13 و 14 توصیفی از افزایش ضریب انتقال حرارت جوششی و همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی ناشی از حضور جریان مایع به کمک رابطه (23) ارائه شده توسط چن را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشخص است، با افزایش کسر حجمی ذرات نانو، افزایش قابل توجهی در ضرایب انتقال حرارت رخ می‌دهد.

با مقایسه شکل‌های 13 و14 دیده می‌شود که ضریب انتقال حرارت مربوط به قسمت جوشش هسته‌ای با دور شدن از ورودی کانال، روندی افزایشی را دنبال می‌کند، در حالی که در ضریب انتقال حرارت مربوط به فاز مایع، این روند، کاهشی است. با این وجود ضریب کلی انتقال حرارت در طول کانال، به واسطهٔ افزایش شدید مربوط به سهم جوشش، افزایش قابل توجهی از خود نشان می‌دهد.

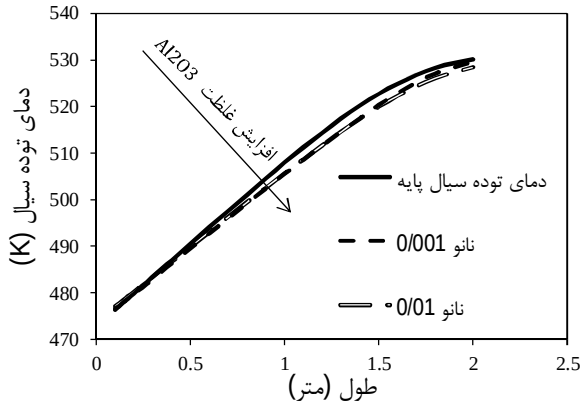
در شکل 15 دمای تودهٔ سیال متوسط‌گیری شده در هر مقطع با غلظت‌های متفاوت ذرات نانو نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش هرچه بیشتر غلظت نانو، دمای متوسط سیال کاهش یافته است.



شکل 13 ضریب انتقال حرارت جوششی با غلظت‌های مختلف نانوذره



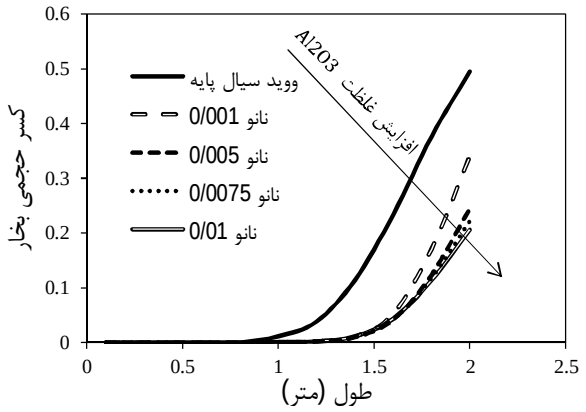
شکل 14 ضریب انتقال حرارت جابجایی فاز مایع با غلظت‌های مختلف نانوذره



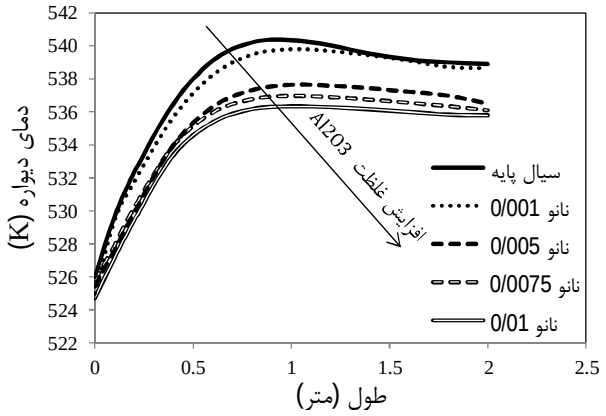
شکل 15 تغییرات دمای تودهٔ سیال با غلظت‌های مختلف ذرات نانو

در شکل 16 نیز به بررسی ذرات نانو با غلظت‌های مختلف روی کسر حجمی بخار در طول کانال پرداخته شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت ذرات نانو، میزان بخار کمتری در کانال تشکیل شده است.

دمای دیواره در طول کانال با غلظت‌های مختلف نانوذره اکسید آلومینیوم در شکل 17 نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش غلظت ذرات نانو، دمای دیواره خنک‌تر شده است. به نظر می‌رسد کاهش دمای دیواره به واسطهٔ افزایش ضریب انتقال حرارت ناشی از حضور نانو ذره در میدان جریان نسبت به سیال پایه در کنار ثابت بودن شار حرارتی اعمالی به دیواره است.



شکل 16 کسر حجمی بخار با حضور غلظت‌های مختلف ذرات نانوی Al2O3



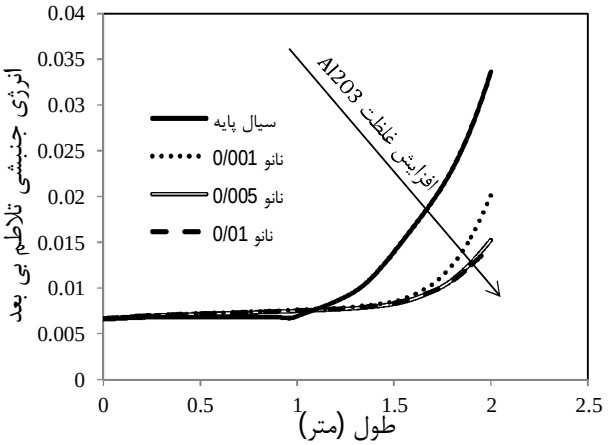
شکل 17 تغییرات دمای دیواره در طول کانال با غلظت‌های مختلف نانو

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.1.7]

در شکل 18 توصیفی از تغییرات انرژی جنبشی تلاطم بی بعد شده با غلظت حجمی ذرات نانو در نزدیک‌ترین سلول محاسباتی نزدیک دیواره در امتداد کانال، ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که افزودن ذرات نانو به سیال پایه، بر روی پارامترهای اغتشاشی تأثیرگذار بوده به نحوی که با افزایش غلظت ذرات نانو، انرژی جنبشی تلاطم کاهش یافته است. این مطلب توسط مرجع [24]، به بیان دیگری تأکید شده است.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به کمک دینامیک سیالات محاسباتی تأثیر افزودن نانو ذرهٔ اکسید آلومینیوم در میدان جریان همراه با جوشش هسته‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی میدان جریان از معادلات متوسط‌گیری شده ناویر استوکس در دیدگاه اویلرین برای هر فاز به صورت جداگانه در کنار روابط مورد نیاز جهت توصیف پدیدهٔ جوشش استفاده شده است. اثرات ذرات نانو به کمک متوسط‌گیری خصوصیات ترموفیزیکی در معادلات میدان جریان همراه با جوشش مورد تحلیل قرار گرفته است. در کنار صحت‌سنجی مدل‌سازی میدان جریان همراه با جوشش، مشاهده شد که افزودن نانوذرهٔ اکسید آلومینیوم به سیال پایه، باعث افزایش قابل توجهی در ضرایب انتقال حرارت، به ویژه در ضریب انتقال حرارت جوششی شده است. دیده شد در کسر حجمی نانوذره اکسید آلومینیوم Al_2O_3 به میزان 1 درصد به عنوان نمونه در مقطع 1/6متری از ورودی کانال، ضریب انتقال حرارت جوششی به میزان 42 درصد افزایش یافته است. همچنین مشاهده گردید که با افزایش غلظت ذرات نانو دمای دیواره اصطلاحاً خنک‌تر شده که امری مطلوب به حساب می‌آید. قابل جمع بندی است که افزایش ضریب انتقال حرارت و در کنار آن کاهش یافتن دمای دیواره کانال نسبت به سیال پایه در صورت افزودن نانو ذره حاشیه ایمن کارکرد را در صورت اعمال شار گرمایی بیش از حد که ممکن است در اثر حوادث به هر دلیلی ایجاد شود، افزایش می‌دهد. در تحقیق یاد شده همان‌طور که اشاره شد اثر نانو ذره به عنوان یک فاز جداگانه در نظر گرفته نشده است. قاعدتاً در نظر گرفتن آن به عنوان یک فاز سوم در کنار سایر فازهای موجود می‌تواند نتایج دقیق‌تری به واسطهٔ اثراتی مانند ته‌نشینی ذرات بر روی سطح ایجاد کند که امید است در آینده به آن پرداخته شود.



شکل 18 انرژی جنبشی تلاطم بی بعد شده بر حسب طول کانال

6- مراجع

[1] G.G. Bartolemei and V.M. Chanturiya, Experimental study of true void fraction when boiling subcooled water in vertical tubes, *Teploenergeika,* Vol. 14(2), pp. 123-128, 1969.
[2] N. Hoyer, Calculation of dryout and post-dryout heat transfer for tube geometry, *International Journal Multiphase Flow,* Vol. 24, No. 2, pp. 319-334, 1998.
[3] E. Krepper, B. Koncar, Y. Egorov, CFD modeling of subcooled boiling-Concept, validation and application to fuel assembly design, Forschungszentrum Rossendorf e.V.(FZR), *Institute of safety research,* Germany, 2006.
[4] H. Li, S. A. Vasquez, H. Punekar, R. Muralikrishnan, Prediction of boiling and critical heat flux using an eulerian multiphase boiling model, *Proceedings of the ASME 2010, International Mechanical Engineering Congress & Exposition,* canada, 2010.
[5] E. Krepper, R. Rzehak, CFD for subcooled flow boiling: Simulation of DEBORA experiments, *Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Institute of Safety Research,* P.O. Box 510119, D-01314 Dresden, Germany, 2011.
[6] J. Garnier, E. Manon, G. Cubizolles, Local measurement on flow boiling of Refrigerant 12 in a vertical tube, *Multiphase Science and Technology,* Vol. 13, pp. 1-58, 2001.
[7] E. Manon, Contribution a l'analyse et a la modelisation locale des ecoulements bouillants soussatures dans les conditions des reacteurs a eau sous pression, *These de Doctorat. Ecole Centrale Paris,* 2000.
[8] D. Bestion, D. Caraghiaur, H. Anglart, P. Peturaud, E. Krepper, H. M. Prasser, D. Lucas, M. Andreani, B. Smith, D. Mazzini, F. Moretti, J. Macek, Review of the Existing Data Basis for the Validation of Models for CHF, *NURESIM SP2 Deliverable,* 2006.
[9] N. Bozorgan, F. Panahizadeh, N. Bozorgan, Investigating the using of Al2O3/EG nanofluids as coolants in a double-tube heat exchanger, *Modares Mechanical Engineering,* pp. 75-84, 2011. (In Persian)
[10] S. B. White, *Enhancement of boiling surfaces using nanofluid particle deposition,* PhD Thesis, *Michigan University,* 2010.
[11] A. A. Chehade, H. L. Gualous, S. L. Masson, F. Fardoun, A. Besq, Boiling local heat transfer enhancement in minichannels using nanofluids, *Nano Scale Research Letters,* 2013, 8:130.
[12] O. S. Prajapati, N. Rohatgi, Flow boiling heat transfer enhancement by using ZnO-Water nanofluids, *Science and Technology of Nuclear Installations,* 2014.
[13] A. Gupta, R. Kumar, Role of Brownian motion on the thermal conductivity enhancement of nanofluids, *Appl. Phys.* Lett. 91, 223102, 2007.
[14] P. Shima, J. Philip, B. Raj, Role of microconvection induced by brownian motion of nanoparticles in the enhanced thermal conductivity of stable nanofluids, *Appl. Phys.* Lett. 94 (22), 223101–223101-3, 2009.
[15] W. Evans, J. Fish, P. Keblinski, Role of Brownian motion hydrodynamics on nanofluid thermal conductivity, *Appl. Phys.* Lett. 88(9), 093116–093116-3, 2006.
[16] N. Kurul, and M.Z. Podowski, On the modeling of multidimensional effects in boiling channels, *Proceedings of the 27th National Heat Transfer Conference,* Minneapolis, Minnesota, USA, July 1991.
[17] V. H. D. Valle, and D. B. R. Kenning, Subcooled flow boiling at high heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 28, No. 10, pp. 1907-1920, 1985.
[18] R. Cole, A Photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux, *AICHE J.*, Vol. 6, pp. 533-542, 1960.
[19] M. Lemmert, J. M. Chawla, Influence of flow velocity on surface boiling heat transfer coefficient, *Heat Transfer in Boiling,* pp. 237-247, 1977.
[20] G. Kocamustafaogullari, M. Ishii, Foundation of the interfacial area transport equation and its closure relations, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 38(3), pp. 481-493, 1995.
[21] V. I. Tolubinski, and D.M. Kostanchuk, Vapor bubbles growth rate and heat transfer intensity at subcooled water boiling, *4th International Heat Transfer Conference,* Paris, France, 1970.
[22] G. Kocamustafaogullari, M. Ishii, Interfacial area and nucleation site density in boiling systems, *International Journal Heat Mass Transfer,* Vol. 26(9), pp. 1377-1387, 1983.
[23] S. M. Ghiaasian, *Two-phase boiling and condensation in Conventional and Miniature Systems,* New York, Cambridge, 2008.
[24] M. Akbari, N. Galanis, A. Behzadmehr, Comparative assessment of single and two-phase models for numerical studies of nanofluid turbulent forced convection, *International Journal of Heat and Fluid Flow,* Vol. 37, pp. 136–146, 2012.
[25] I. Senocak, *Computational methodology for the simulation turbulent cavitating flows,* PhD Thesis, University of Florida, 2002.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.1.7]