



پیش بینی انحراف از جوشش هسته ای در یک مینی کانال به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

عطاله ربیعی^{1*}، علیرضا عطف²

1-استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز

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

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 01 دی 1393

پذیرش: 20 دی 1393

ارائه در سایت: 21 بهمن 1393

کلید واژگان:

مینی کانال

جوشش

انحراف از جوشش هسته ای

شار گرمای بحرانی

چکیده

از دیاد مقدار انرژی گرمایی تولیدی توسط مدارهای الکترونیکی که خود همواره روز به روز در حال کوچک شدن در ابعاد و اندازه می باشند، نیاز به خنک سازی هر چه کارآمد تر این مدارها را ضروری می سازد. تلاش های اخیر محققین نشان داده است که با عبور جریان دوفازی جوششی از مینی کانالها می توان به ضرایب انتقال حرارت مطلوب دست پیدا کرد. رخ دادن پدیده خشک شدگی و به دنبال آن افزایش ناگهانی دما به واسطه شار گرمای بحرانی از چالش های پیش رو در این زمینه می باشد. در این پژوهش به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، پدیده انحراف از جوشش هسته ای در یک مینی کانال مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تحلیل میدان جریان از معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی برای هر فاز و از نحوه سهم بندی مدل شار حرارتی اعمالی به دیواره توسط موسسه تحقیقاتی رنسلر در کنار اصلاحات لازم برای شرایط جوشش بحرانی استفاده شده است. در کنار صحت سنجی مدلسازی میدان جریان همراه با جوشش به ویژه در شرایط جوشش فیلمی، مشاهده گردید که در صورت اعمال شار حرارتی بحرانی در یک مینی کانال، پدیده انحراف از جوشش هسته ای رخ داده و لایه ای از بخار در مجاورت دیواره شکل می گیرد که در عین حال غالب میدان جریان، هنوز به صورت مایع مادون سرد است.

Prediction of departure from nucleate boiling in a mini channel using CFD

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 22 December 2014
Accepted 10 January 2015
Available Online 10 February 2015

Keywords:
Mini Channel
Boiling
DNB
CHF

ABSTRACT

In order to meet the increased demand for dissipating high heat fluxes from electronic chips that are continually shrinking in size, development of new cooling technologies has been considered for the last two decades. Recent research efforts have shown that boiling two phase flow through the mini-channels can provide the desired heat transfer coefficients. The occurrence of the dryout phenomenon followed by a sudden increase in temperature due to the critical heat flux is one of the most important challenges in this context. In this study, departure from nucleate boiling phenomenon due to the critical heat flux in a mini-channel has been examined using computational fluid dynamics. 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 by Rensselaer Polytechnic Institute (RPI). To simulate the critical heat flux phenomenon, the RPI model is extended to the departure from nucleate boiling (DNB) by partitioning wall heat flux to both liquid and vapor phases considering the existence of thin liquid wall film. It was observed that by applying high heat fluxes near to CHF, DNB occurred and a vapor layer formed adjacent to the wall while most of the flow field is still subcooled liquid.

1- مقدمه

تحقیق تلاش شده است به کمک دینامیک سیالات محاسباتی پدیده انحراف از جوشش هسته ای در یک مینی کانال مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه به فعالیت های انجام شده در این زمینه اشاره می شود.

کو و موداوار در سال 2004 [1] به بررسی آزمایشگاهی شار گرمایی بحرانی در یک میکرو کانال پرداختند. شرایط آزمایشگاهی با آب دیونیزه شده و گستره ای از شار گرمی و دمای سیال ورودی انجام شد. مشاهده گردید که به محض نزدیک شدن به شرایط شار گرمای بحرانی، یک جریان

امروزه مینی کانالها پتانسیل زیادی را به منظور گسترش بسیاری از تکنولوژی های پیشرفته از جمله سیستم های فضا نوردی، میکرو الکترونیک، پزشکی و بسیاری از تجهیزات که نیاز به خنک سازی در ابعاد مینی دارند، فراهم نموده است. همچنین از آن جایی که سیستم های مورد استفاده روز به روز در حال کوچک شدن در مقیاسشان هستند، محققین در حوزه های مختلف را به تحلیل جریان سیال در مینی کانال ها واداشته است. در این

در این کد محاسباتی به کمک توابع اضافه شونده توسط محققین مختلف انجام شده است. در سال 2011 لی و همکارانش [7] توانستند پدیده جوشش و همچنین انحراف از جوشش هسته ای را در یک کانال عمودی توسط کد محاسباتی یاد شده مدل کنند. در این پژوهش با اصلاح سهم بندی شار حرارتی اعمالی به دیواره کانال که در ادامه به آن پرداخته می‌شود، توانستند موقعیت شکل گیری انحراف از جوشش هسته ای را نسبت به نتایج آزمایشگاهی با دقت قابل قبولی پیش بینی نمایند. البته در این تحقیق، فعالیت‌های متنوع دیگری در خصوص اثر غیر یکنواخت بودن شار حرارتی دیواره، نرخ شار گرمی و درجه‌ی مادون سرد سیال عامل نیز انجام گرفته است. قابل بیان می‌باشد که بررسی میدان جریان همراه با جوشش به علت تداخل زیاد آن با سایر پارامترهای میدان جریان شامل اثرات تلاطم، از مسائل مورد توجه پژوهشگران در این زمینه می‌باشد.

در کنار فعالیت‌های انجام گرفته در زمینه مدلسازی جریان دو فازی همراه جوشش فعالیت‌هایی نیز در زمینه شبیه سازی میدان جریان تک فازی و همچنین تغییر فاز در کانال‌ها با ابعاد ریز شکل گرفته است که به آن‌ها اشاره می‌شود. رشیدی و همکارانش [8] در سال 2011 به بررسی تحلیلی جریان لغزشی در داخل یک مینی کانال پرداختند. آن‌ها با استفاده از یک روش تغییراتی مناسب، میدان جریان دو بعدی در داخل مینی کانال را شبیه سازی و نتایج حاصل را با نتایج بدست آمده از روش‌های عددی دیگر مقایسه نمودند که مطابقت قابل قبولی در نتایج ارائه شده مشاهده گردید. در مطالعه دیگری در سال 2014 رشیدی و همکارانش [9]، جریان جابجایی اجباری نانوسیال آب/مس را در داخل یک کانال موج دار، به صورت عددی بررسی نمودند. در این تحقیق، با استفاده از مدل‌های عددی تک فازی و دوفازی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، میدان جریان نانوسیال مورد تحلیل قرار گرفته است. دیده شد که مدل‌های دوفازی، قابلیت بهتری نسبت به مدل تک فازی، به منظور شبیه سازی میدان جریان با توجه به مقایسه داده‌ها ارائه می‌نمایند. همچنین با افزایش غلظت ذرات نانو درسیال عامل پایه، بهبود در ضرایب انتقال حرارت در تمامی عددهای رینولدز، گزارش گردید. فعالیت‌های دیگری نیز در زمینه مدلسازی جریان تک فازی در خصوص میکروکانال‌ها صورت پذیرفته که می‌توان به مراجع [10,11] مراجعه نمود. جسیلا و سبحان در مرجع [12] به پیش بینی میدان جریان سیال عامل آب همراه با تغییر فاز در یک میکرو کانال با مقطع مستطیلی در گستره ای از قطرهای هیدرولیکی به صورت عددی پرداختند. در این پژوهش، اثرات کشش سطحی به همراه سایر پارامترهای اثرگذار مانند شار گرمای اعمالی، نرخ شار گرمی سیال و همچنین هندسه مساله روی توزیع میدان سرعت و افت فشار در کنار توزیع دمای دیواره میکروکانال مورد بررسی قرار گرفته است.

فعالیت‌های صورت گرفته و در عین حال در دسترس موجود نشان می‌دهد که غالب مطالعات موجود در حوزه مسائل کانال‌ها با ابعاد مینی و کمتر از آن به ویژه در فعالیت‌های عددی، تحلیل جریان تک فاز همراه با انتقال حرارت بوده و مطالعه‌های عددی نسبتاً کمی در خصوص شبیه سازی میدان جریان جوشش در شرایط جوشش فیلمی در داخل مینی کانال‌ها انجام شده است. در این تحقیق تلاش شده است به کمک کد محاسباتی در دسترس موجود، پدیده شار حرارتی بحرانی در داخل یک مینی کانال مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه به روش انجام کار شبیه سازی عددی، شامل معادلات حاکم بر میدان جریان و نتایج اشاره می‌شود.

برگشتی از بخار در کانال به وجود آمده که تأثیر بسزایی در شرایط بالادست میدان جریان سیال ایجاد می‌نماید. کاوالینی و همکارانش [2] در سال 2007 به بررسی آزمایشگاهی پدیده خشک شدگی در یک مینی کانال دایروی همراه با جریان جوششی سیال عامل R-134a، پرداختند. اندازه گیری‌های ارائه شده برای دمای سطح دیواره مینی کانال، نوسان‌ها و افزایش قابل توجهی را نشان داد که بیان کننده وقوع پدیده خشک شدگی در کانال است. مقادیر آزمایشگاهی گزارش شده برای کیفیت خشک شدگی برای گستره شار گرمی ورودی بین 300 تا 600 کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه ارائه شده است. کوثر [3] در سال 2008 مدلی را به منظور پیش بینی پدیده شار گرمی بحرانی در مینی کانال و همچنین میکرو کانال ارائه نمودند. مدل ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی صورت پذیرفته با سیال‌های عامل مختلف و همچنین شار گرمی متفاوت ورودی، مقایسه گردیده است.

لیو و همکارانش [4] در سال 2012 به بررسی آزمایشگاهی یک جریان جوششی مادون سرد نفت سفید هیدروکربنی در یک کانال افقی با قطر 1 میلی‌متر با مقطع دایروی که تحت تأثیر شار گرمایی می‌باشد، پرداختند. آزمایش برای گستره ای از شار گرما و شار گرمی ورودی و همچنین فشار تکرار گردید. مشاهده شد که دمای دیواره در طول کانال، تحت شرایط جریان جوششی توسعه یافته ثابت باقی می‌ماند. بعد از شروع جوشش هسته ای، اختلاف بین دمای داخلی دیواره و توده سیال شروع به کم شدن می‌کند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که رفتار رژیم جریان جوششی در داخل مینی کانال بسیار پیچیده بوده و به شدت وابسته به فشار و شار گرما و به خصوص درجه مادون سردی سیال ورودی است.

در کنار کارهای آزمایشگاهی صورت پذیرفته در زمینه جوشش در مینی کانال‌ها، فعالیت‌هایی نیز در زمینه مدل سازی جوشش هسته ای و پدیده جوشش بحرانی انجام شده که مهم‌ترین آنها به شرح زیر است. در سال 2006 کرپر و همکارانش [5] قابلیت کدهای دینامیک سیالات محاسباتی را به منظور مدل کردن جریان دوفازی نشان دادند. آن‌ها جریان جوشش مادون سرد را در یک کانال همراه با جوشش مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که مدل ارائه شده جهت سهم بندی شار حرارتی اعمالی به دیواره در کنار سایر معادلات میدانی، قابلیت محاسبه کردن مقدار متوسط حجم بخار را در درون کانال داشته و تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در این تحقیق با تحلیل توزیع دما در مناطق مختلف، موقعیت‌های احتمالی که پدیده خشک شدگی سطح انتقال حرارت را به دنبال خواهد داشت، شناسایی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. در سال 2010 لی و همکارانش [6] با استفاده از مدل تهیه شده توسط موسسه تحقیقاتی به نام RPI در کد محاسباتی در دسترس موجود فلونت¹، در چارچوب تحلیل فازهای مختلف آب و بخار به صورت جداگانه و بر اساس دیدگاه اولیرین- اولیرین، 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 زمینه جریان همراه با جوشش اجباری شامل کانال ساده و همچنین کانال با مقطع دایروی در راستای تحلیل مبدل‌های دو لوله ای با سیال عامل فرئون پرداختند. مقایسه نتایج به دست آمده از این شبیه سازی شامل توزیع پارامترهای ترموهیدرولیکی میدان جریان مانند دما در بخش‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی، نشان دهنده دقت لازم در مدلسازی پدیده جوشش در این کد محاسباتی می‌باشد. لازم به ذکر است تا سال 2010 مدلسازی جریان جوشش

2- معادلات حاکم بر میدان جریان

برای مدل سازی میدان جریان همراه با جوشش از معادلات متوسط گیری شده نایبر استوکس¹ در کد محاسباتی در دسترس موجود (فلوننت) بر اساس دیدگاه اولیترین-اولیترین، برای هر دو فاز اصلی مایع و بخار جداگانه استفاده شده است. لازم به ذکر است که به علت وجود نسبت چگالی بالا میان فاز مایع و فاز بخار در میدان جریان های همراه با جوشش، داشتن استراتژی مناسب برای به دست آوردن حل همگرا لازم و ضروری است. برای این منظور جهت کوپل نمودن میدان فشار و سرعت از روش سیمپل کوپل شده با فاز² که پایداری بهتری در پیش بینی میدان جریان همراه با جوشش ایجاد می کند، 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 میانبایی خطی برای محاسبه فشار روی دیواره هر سلول محاسباتی همگرایی بهتری را فراهم می نماید. لازم به ذکر است که در کنار انتخاب مدل های آشفتنه، استفاده از ضرایب زیر تخفیف کم از مرتبه 0/1 به ویژه برای فشار، مومنتم و انرژی در مراحل اولیه حل، لازم و ضروری است. ادامه به معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی، اثرات تلاطم و رابطه های مورد نیاز برای مدل سازی جوشش شامل نحوه تقسیم بندی شار حرارتی در رژیم های مختلف و سایر روابط مورد نیاز در این بخش اشاره می گردد.

2-1- معادله پیوستگی

در رابطه (1) معادله پیوستگی آمده است.

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

در معادله (1) \dot{m}_{rq} ، \dot{m}_{qr} ، s_q ، به ترتیب بیانگر انتقال جرم ما بین فاز r ، q و ترم چشمه می باشند [7].

2-2- معادله مومنتوم

معادله مومنتوم در رابطه (2) آمده است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_q \rho_q \vec{V}_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q \vec{V}_q) = & \\ & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}_q) + \alpha_q \rho_q \vec{B}_f \\ & + \sum_{r=1}^n (\vec{F}_{rq}^D + \vec{F}_{rq}^{TD} + \dot{m}_{rq} \vec{V}_{rq} - \dot{m}_{qr} \vec{V}_{qr}) \\ & + (\vec{F}_q^L + \vec{F}_q^L + \vec{F}_q^{vm}) \end{aligned} \quad (2)$$

در معادله (2) \vec{F}_q^L ، \vec{F}_q^L ، \vec{F}_q^L ، \vec{F}_q^{TD} ، \vec{F}_q^D به ترتیب نیروی اصطکاکی مابین فازها، نیروی ناشی از اثرات میدان جریان مغشوش، اثر نیروهای خارجی، نیروی برا و نیرو ناشی از جرم افزوده می باشند [7].

2-3- معادله بقای انرژی

معادله بقای انرژی در رابطه (2) آمده است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_q \rho_q H_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q H_q) = & \\ \bar{\tau}_q : \nabla \cdot \vec{V}_q + \alpha_q \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \vec{q} + S_{H,q} & \\ + \sum_{r=1}^n (\dot{q}_{rq} + \dot{m}_{rq} H_{rq} - \dot{m}_{qr} H_{qr}) & \end{aligned} \quad (3)$$

در معادله (3) H_q انتالپی مخصوص هر فاز، \vec{q} شار گرمایی و $S_{H,q}$ ترم چشمه می باشند [7].

اولین و شناخته شده ترین مدل جوشش در دینامیک سیالات محاسباتی، مدل ارائه شده توسط کرل و پودوسکی [13] است. این مدل عموماً به عنوان مدلی برای پیش بینی مکانیکی پدیده جوشش شناخته شده است. بر اساس این مدل، شار گرمای کلی منتقل شده از دیواره به سیال به سه بخش کلی قابل تقسیم می باشد (رابطه (4)):

$$\dot{q}_W = \dot{q}_C + \dot{q}_Q + \dot{q}_E \quad (4)$$

که در رابطه (4) \dot{q}_C شار گرمای ناشی از مجاورت فاز مایع در کنار دیواره³، \dot{q}_Q شار گرمایی مربوط به جابجایی حباب⁴ و \dot{q}_E شار گرمایی تبخیر⁵ می باشند. شکل 1 شمایی از این نحوه سهم بندی شار حرارتی اعمالی را نشان می دهد.

در این مدل فرض شده سطحی از دیواره توسط حباب ها اشغال (A_b) و بقیه سطح باقیمانده توسط سیال مایع اشغال می شود. مدل RPI رابطه های زیر را برای بخش های متفاوت شار گرمای دیواره ارائه می کند:

2-4- شار گرمای جابجایی فاز مایع

$$\dot{q}_C = h_C (T_w - T_l) (1 - A_b) \quad (5)$$

که در این رابطه h_C ضریب انتقال حرارت فاز مایع، T_w دمای دیواره و T_l دمای مایع نزدیک دیواره است.

2-5- سطح نفوذ

تعریف این سطح بر اساس قطر جدایش حباب و دانسیته مکان هسته ها طبق رابطه (6) می باشد.

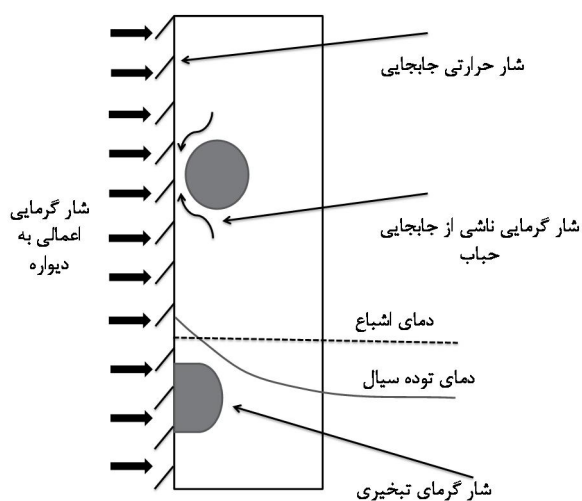
$$A_b = \min(1, \eta \frac{\pi}{4} d_b^2 N_w) \quad (6)$$

که در آن ضریب تجربی η از رابطه پیشنهادی توسط وال و کینینگ [14] طبق رابطه (7) محاسبه می شود:

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

که در این معادله Ja عدد جاکوب می باشد که از رابطه (8) محاسبه می گردد:

$$Ja = \frac{\rho_l C_{p,l} \Delta T_{sub}}{\rho_v H_{lv}} \quad (8)$$



شکل 1 شمایی از نحوه سهم بندی شار گرمایی اعمالی

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

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

که در آن $\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_l$ درجهٔ مادون سرد مایع می باشد.

6-2- شار گرمای مربوط به جابجایی حباب

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

در معادله (9) k_l ضریب هدایت گرمایی، γ_l معرف ضریب پخش حرارتی در فاز مایع است. f_{bw} بیانگر فرکانس جدایش حباب می باشد. C_{wt} ضریبی است که به منظور تصحیح زمان تأخیر بین حباب‌های متوالی است که به صورت پیش فرض برابر با یک در نظر گرفته می شود.

7-2- فرکانس جدایش حباب

فرکانس جدایش حباب معمولاً بر اساس معادلهٔ رشد حباب کنترل شده پیشنهادی توسط کول [15] مطابق رابطه (10) محاسبه می شود.

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

که در این رابطه g شتاب گرانش است.

8-2- شار گرمای تبخیری

$$q_E = \frac{\pi}{6} d_{bw}^3 f_{bw} N_w \rho_v H_{lv} \quad (11)$$

که در رابطه (11)، d_{bw} قطر جدایش حباب، N_w دانسیته مکان هسته های فعال، ρ_v چگالی فاز بخار و H_{lv} گرمای نهان تبخیر می باشند.

9-2- دانسیته مکان هسته ها

دانسیته مکان هسته ها معمولاً با یک رابطه که پایه آن بر اساس دیواره فوق داغ می باشد، به دست می آید که بیان عمومی آن بر اساس رابطه (12) است:

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

در اینجا پارامترهای تجربی بر اساس کار لامرت و چاولا بدست می آیند که $C=210$ و $n=1.805$. [16]. در کنار رابطهٔ تجربی حاضر، افراد دیگری نیز مانند کوکامصطفی اگولاری و ایشی در این زمینه روابط (13) تا (17) ارائه نمودند [17].

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

$$N_w^* = N_w D_w^2 \quad (14)$$

$$r_c^* = 2r_c / D_w \quad (15)$$

$$r_c = \frac{2\sigma T_{sat}}{\rho_v \rho_f \Delta T_w} \quad (16)$$

$$\rho^* = (\rho_l - \rho_v) / \rho_v \quad (17)$$

در اینجا D_w قطر جدایش حباب می باشد و تابع دانسیته با رابطه (18) تعیین می شود.

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

10-2- قطر جدایش حباب

قطر جدایش حباب بر اساس رابطهٔ تجربی ارائه شده توسط تولوبینسکی و کوستانچوک [18] بیان می شود:

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

کوکامصطفی اگولاری و ایشی [17] نیز رابطه (20) را پیشنهاد نمودند:

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

که φ زاویه تماس است که به صورت پیش فرض برابر 60 درجه می باشد. لازم به ذکر است در مدل RPI، دمای بخار از حل معادله انرژی به دست نمی آید بلکه در دمای اشباع ثابت فرض می گردد. به منظور مدل کردن جوشش غیر تعادلی¹ و شار گرمای بحرانی² 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 لایه نازک مایع در طول دیواره گرمادیده را نیز باید در نظر گرفت. به این منظور از مدل شار گرمای تصحیح شده ای به صورت (21) استفاده می شود:

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

که برای رابطه (22) داریم:

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

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

در رابطه (21)، q_G ، q_v ، q_F 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، می باشد. در رابطه (22)، $f(\alpha_l)$ تابعی است که به نحوی اثر رژیم های مختلف جریان جوشش از جریان حبابی³ تا جریان حلقوی⁴ را مدل سازی می نماید. برای توضیحات بیشتر به مرجع [7] مراجعه شود.

11-2- توصیفی از مدل های تلاطم

کد محاسباتی در دسترس موجود، مدل های مختلفی را برای شبیه سازی جریان مغشوش به همراه اثرهای میدان جریان چند فازی ارائه می نماید. با معرفی کردن Φ به عنوان پارامتر اغتشاش، می توان معادلات کلی جریان مغشوش را در معادله ی (23) خلاصه نمود.

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q \Phi_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q V_q \Phi_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \Gamma_{q,\phi} \nabla \Phi_q) = \alpha_q S_{q,\phi} \quad (23)$$

که در آن $\Gamma_{q,\phi}$ ضریب پخش، $S_{q,\phi}$ ترم چشمه که شامل تولید و از بین رفتن گردابه های میدان جریان و همچنین ترم های اضافی ناشی از برهمکنش حباب ها و تاثیر آن ها در معادلات تلاطم می باشد که جهت توضیحات بیشتر به مرجع [7] مراجعه شود.

3- نتایج

در این بخش به برخی از نتایج در زمینه یاد شده که شامل مدلسازی میدان جریان همراه با جوشش مادون سرد و جریان جوشش بحرانی در راستای صحت سنجی داده های ناشی از شبیه سازی عددی است اشاره و در ادامه به بررسی پدیده جدا شدن از شرایط جوشش هسته ای در یک مینی کانال پرداخته می شود. لازم به ذکر است که نظر به عدم وجود داده های دقیق پارامترهای میدان جریان در خصوص مینی کانال ها مانند توزیع دمای سیال در امتداد کانال و همچنین دمای دیواره مینی کانال، جهت صحت سنجی کد محاسباتی در دسترس موجود از شرایط آزمایش با کانال هایی در ابعاد بزرگتر از میلی متر استفاده شده است.

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

3-1- نتایج جریان همراه با جوشش مادون سرد:

جهت بررسی مسأله مطالعه شبکه از سه شبکه سازمان یافته با تعداد 9000، 36000 و 144000 استفاده شده است. شکل 4 تغییرات دمای دیواره‌ی داخلی کانال را برای هر سه شبکه ذکر شده نشان می‌دهد. دیده می‌شود با افزایش تعداد شبکه بمیزان 8 برابر تغییر قابل توجهی در نتایج دیده نمی‌شود.

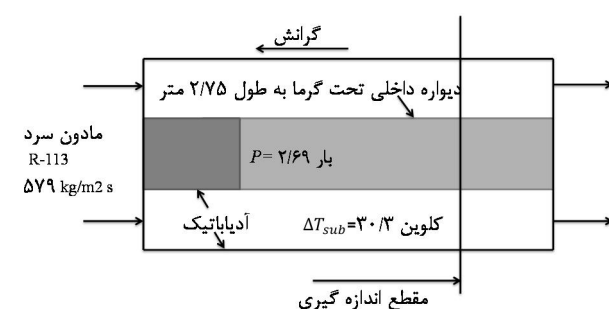
لازم به ذکر است در کلیه محاسبات صورت گرفته، سعی شده با تنظیم شبکه در نزدیکی دیواره با در نظر گرفتن میزان γ^+ در محدوده 50 الی 100 و همچنین با انجام تنظیمات مناسب به ویژه در مجزاسازی ترم های مختلف اعم از جا به جایی و پخش در معادلات میدانی، در کنار انتخاب مناسب مدل های انتقال حرارت، جرم و مکان‌های تشکیل هسته، تلاش گردید حداکثر میزان خطا برای متغیرهای میدان جریان دو فازی شامل جوشش از مرتبه⁴ تا 10 باشد. یادآوری می‌شود که برای یک جریان تک فاز معیار γ^+ مابین 30 تا 60 می‌باشد اما تجربه کارهای عددی در حوزه جریان‌های دوفازی مانند کویتاسیون نشان داده که نزدیک بودن شبکه اول در نزدیکی دیواره اگر در محدوده γ^+ 30 قرار گیرد ممکن است همگرایی حل را در جریان‌های دو فازی تحت تأثیر قرار دهد. در این زمینه می‌توان به کار سنوک [20] اشاره کرد. شکل 5 دمای مایع را در مقطعی از کانال به فاصله 0/816 متر از مقطع خروجی که در شکل 2 نیز نشان داده شده است را با توجه به مدل‌های مختلف تلاطم صورت پذیرفته توسط لی و همکارانش در کنار مطالعه عددی حاضر نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد تطابق نسبتاً خوبی مابین کار عددی حاضر در کنار کار لی و همکارانش نسبت به داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. توصیفی از توزیع سرعت مایع و بخار در همین مقطع در شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده است. شایان ذکر است که در نزدیکی دیواره تحت شار حرارتی اعمالی سرعت فاز مایع به دلیل اثر کنده شدن حباب از روی دیواره و حرکت فاز مایع جهت جایگزین شدن آن باعث تلاطم بیشتر و در عین حال افزایش سرعت متوسط در سلول‌های محاسباتی نزدیک دیواره نسبت به دیواره‌ای که تحت شار حرارتی نمی‌باشد گردیده است (توجه به شکل‌های 1 و 6).

کسر حجمی بخار در مقطع یاد شده به واسطه‌ی شار حرارتی اعمالی در شکل 8 آمده است. دیده می‌شود نتایج عددی مطالعه حاضر دارای تطبیق بهتری نسبت به داده‌های آزمایشگاهی در کنار کار لی و همکارانش ارائه می‌کند.

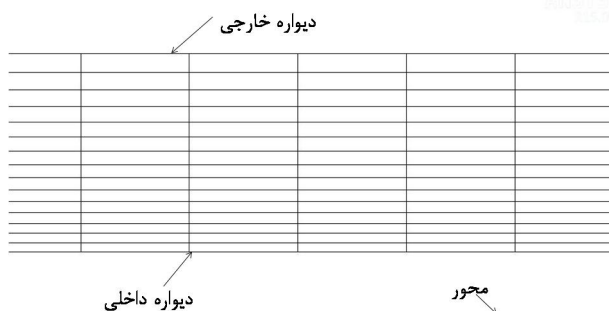
3-2- نتایج جریان همراه با جوشش بحرانی

در این بخش از نتایج، در راستای صحت سنجی داده‌های عددی شرایط

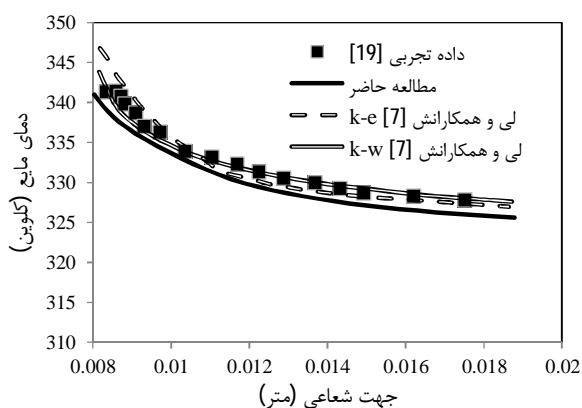
اولین مورد در راستای صحت سنجی کد محاسباتی در دسترس موجود کانالی عمودی با مقطع حلقوی می‌باشد. شکل 2 شمایی از آن را نشان می‌دهد. این کانال که جهت مدل‌سازی میدان جریان همراه با جوشش توسط ولداندل و همکارانش [19] مورد استفاده قرار گرفته، دارای مقطع حلقوی دایروی با قطر داخلی و خارجی 15/8 میلی‌متر، 38/1 میلی‌متر و طول 3/66 متر بوده که سیال کاری فرئون 113 با میزان 30/3 درجه مادون سرد و شار گرمی 579 کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه به آن وارد می‌شود. شایان ذکر است که شار حرارتی اعمالی به دیواره برابر 79 کیلو وات بر متر مربع بوده و جهت تحلیل، میدان جریان به صورت متقارن محوری در نظر گرفته شده است. شکل 3 بزرگنمایی از شبکه مورد استفاده در بخشی از دامنه حل را نشان می‌دهد.



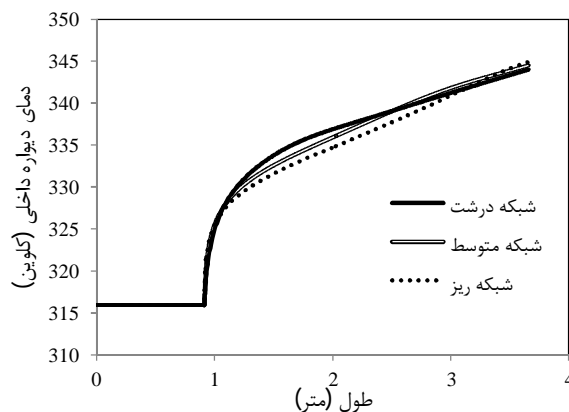
شکل 2 شمایی از هندسه مساله به‌همراه شرایط مرزی [19]



شکل 3 بزرگنمایی از توپولوژی شبکه



شکل 5 توزیع شعاعی دمای مایع در فاصله 0/816 متر از مقطع خروجی



شکل 4 توزیع دمای دیواره داخلی در راستای طول کانال با شبکه‌های مختلف

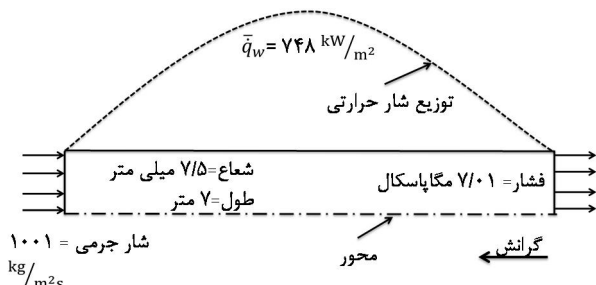
شرایط کاری فشاری 7/01 مگاپاسکال می گردد. میزان شار گرمایی مورد آزمایش که توسط هویر [21] در امتداد طول دیواره کانال اعمال گردید متغیر با مقدار متوسط 748 کیلووات بر متر مربع می باشد. شکل 9 شمایی از هندسه مسأله به همراه شرایط مرزی را نشان می دهد.

شکل 10 نحوه تغییرات توزیع دمای دیواره کانال در کنار داده های آزمایشگاهی موجود و کار عددی انجام یافته توسط لی و همکارانش را نشان می دهد. دیده می شود که در فاصله حدود 4/5 متری از ورودی کانال تغییر ناگهانی در توزیع دمای دیواره به واسطه شدت بالای شار گرمایی اعمالی اتفاق افتاده است. این افزایش ناگهانی دمای دیواره قاعدتاً ناشی از کاهش شدید ضریب انتقال حرارت به واسطه حضور بخار در کنار دیوار به جای مایع می باشد که اصطلاحاً به آن خشک شدگی¹ می گویند. قابل پی گیری است که در اطراف ناحیه شکل گیری پدیده خشک شدگی و انحراف از جوشش هسته ای تطابق نسبتاً خوبی مابین نتایج ارائه شده به ویژه در حوالی محل رخداد جوشش فیلمی اتفاق افتاده است.

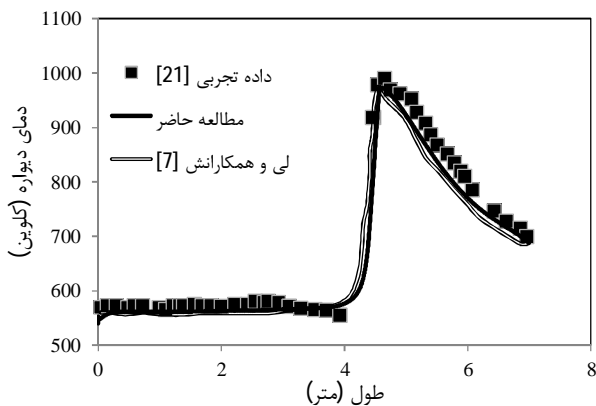
شکل 11 نیز توصیفی از نحوه سهم بندی شار گرمایی اعمال شده به دیواره را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود در هر مقطع مجموع شار حرارتی ناشی از فاز مایع، تبخیر و سهم مربوط به جابجایی حباب برابر کل شار اعمالی در مقطع می باشد. قابل پیگیری است که در طول کانال با داغ شدن سیال عامل و افزایش شدت دانسیته حباب از سهم شار فاز مایع کاسته و به بخش های دیگر به ویژه فاز تبخیر اضافه شده است.

3-3- نتایج نتایج جریان همراه با جوشش بحرانی در یک مینی کانال

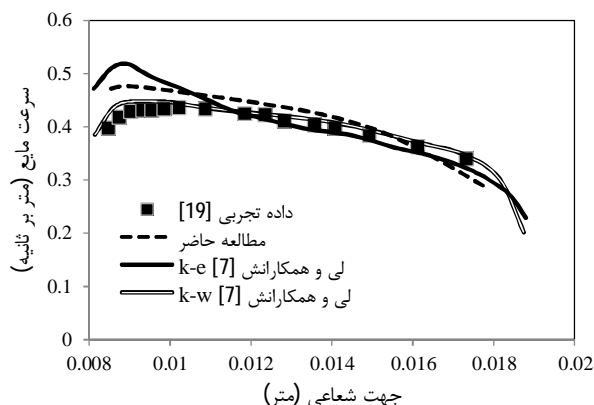
با توجه به دقت قابل قبول نتایج شبیه سازی عددی با داده های آزمایشگاهی به بررسی پدیده شار گرمایی بحرانی در یک مینی کانال پرداخته می شود.



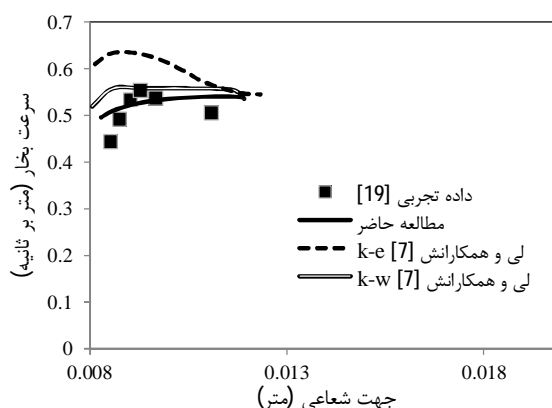
شکل 9 شماتیکی از هندسه مساله بهمراه شرایط مرزی



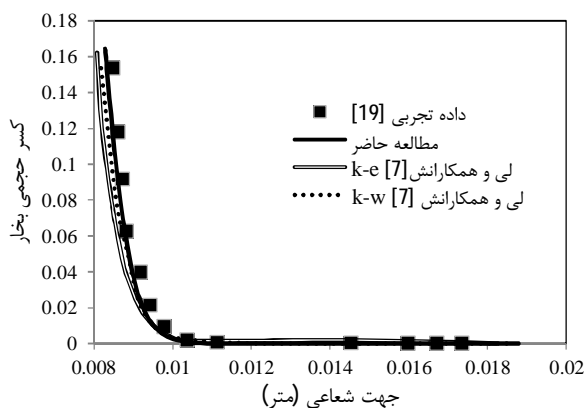
شکل 10 توزیع دمای دیواره ی کانال و افزایش ناگهانی آن



شکل 6 توزیع شعاعی سرعت مایع در فاصله 0/816 متر از مقطع خروجی



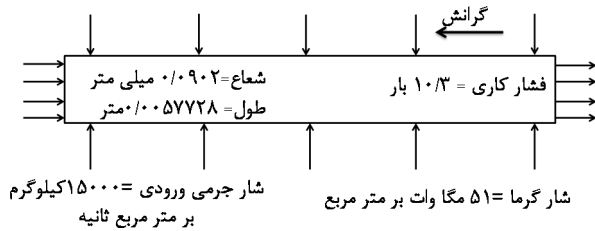
شکل 7 توزیع شعاعی سرعت بخار در فاصله 0/816 متر از مقطع خروجی



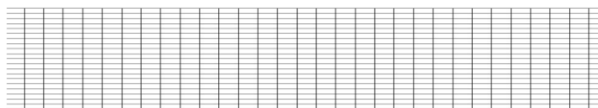
شکل 8 توزیع کسر حجمی بخار در فاصله 0/816 متر از مقطع خروجی

دیگری پی گیری می شود که به دلیل شار گرمایی اعمالی از حدی فراتر رفته و میدان جریان همراه با جوشش به سمت جوشش فیلمی منحرف می شود. قاعدتاً اطلاع پیدا کردن نسبتاً دقیق از وضعیت پارامترهای میدان شامل دما، میزان بخار و سایر متغیرها می تواند کمک زیادی در کنترل این رژیم جریان نماید. یادآوری می شود که در ادامه به بررسی میدان جریان دوفازی در شرایط انحراف از جوشش هسته ای در یک مینی کانال پرداخته می شود. هندسه مورد بررسی در این بخش، شامل کانالی عمودی با قطر 10 میلی متر و طول 7 متر می باشد. سیال عامل (آب) با شار گرمی 1001 کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه و درجه مادون سرد 10 درجه کلونین وارد دهانه کانال در

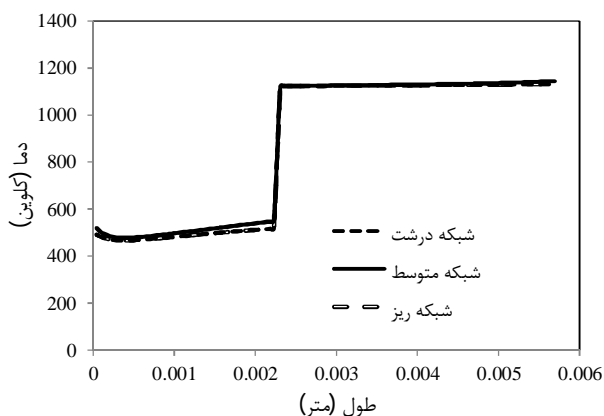
سیال با افزایش شار گرماء، تقریباً به صورت خطی افزایش پیدا کرده است که شباهت زیادی به توزیع دمای سیال در شرایط جریان تک فاز دارد. شکل‌گیری یک لایه نازک از بخار در اطراف دیواره در عین حال که غالب میدان جریان از مایع اشغال شده، می‌تواند دلیلی بر این توزیع دما باشد [24,23]. شکل 19 توصیفی از کانترهای فاز در بخش انتهایی از مینی کانال در شرایط شار گرمایی 51 مگاوات را نشان می‌دهد. قابل پیگیری است که رژیم جریان در مینی کانال یاد شده، انحراف از جوشش هسته ای در کنار سایر تقسیم بندی های شرایط جریان به واسطه شار حرارتی بحرانی می‌باشد.



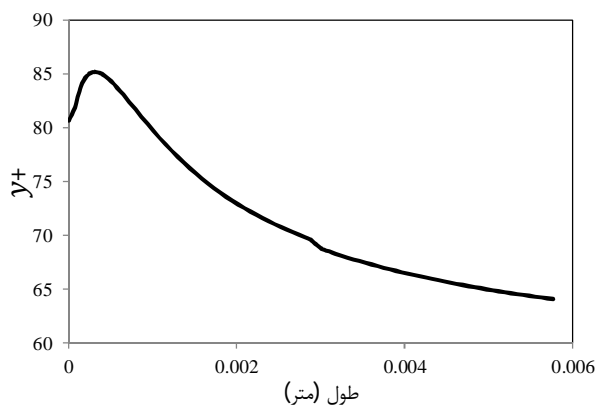
شکل 12 شماتیکی از هندسه ی مینی کانال به همراه شرایط مرزی



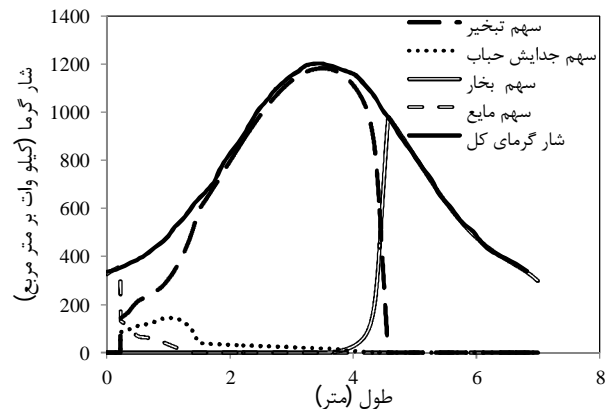
شکل 13 بزرگنمایی از توپولوژی شبکه



شکل 14 دمای دیواره در امتداد مینی کانال



شکل 15 توصیفی از y^+ در امتداد مینی کانال



شکل 11 سهم بندی مختلف مدهای شار گرمای روی دیواره

شکل 12 شمایی از شرایط مرزی و ابعاد هندسی مسئله را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که داده های استفاده شده نتیجه مطالعات آزمایشگاهی مدور و باور [22] می باشد که تحلیل پدیده شار گرمایی بحرانی را به طور آزمایشگاهی انجام دادند.

شکل 13 بزرگنمایی از شبکه مورد استفاده در بخشی از دامنه حل را نشان می‌دهد.

جهت بررسی مسئله مطالعه شبکه از سه شبکه با تعداد 2800 ، 10530 و 39091 استفاده شده است. شکل 14 تغییرات دمای دیوار کانال را برای هر سه شبکه ذکر شده نشان می‌دهد. دیده می‌شود با افزایش تعداد شبکه به میزان حدود 14 برابر، تغییر قابل توجهی در نتایج دیده نمی‌شود. شکل 15 نیز توصیفی از y^+ را در امتداد مینی کانال در اولین سلول های محاسباتی نزدیک دیواره نشان می‌دهد. دیده می‌شود که میزان y^+ قدری از معیار در جریان های تک فازی بیشتر است که در دستیابی به حل نهایی با همگرایی مناسب در جریان های دوفازی به علت پیچیدگی های میدان جریان به ویژه در نزدیکی دیواره موثر می باشد.

لازم به ذکر است که با توجه به شرایط آزمایش میزان دمای متوسط خروجی به کمک محاسبات ناشی از شبیه سازی عددی حدود 318 کلونین به دست می آید که با داده های آزمایش مرجع [22] به میزان 1/6 درصد اختلاف دارد.

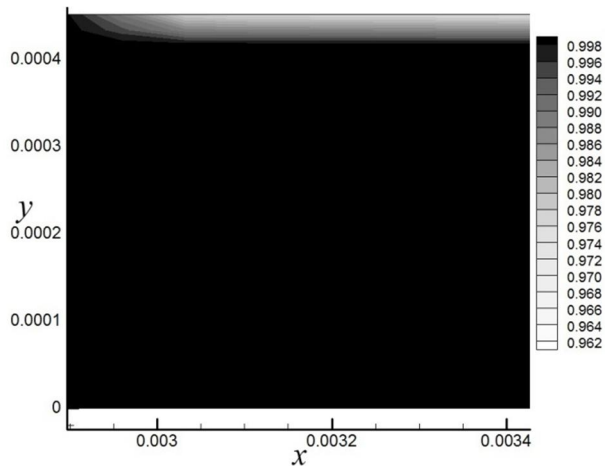
به منظور بررسی آستانه شار گرمای بحرانی، مسئله برای میزان شار گرمای متفاوت مورد تحلیل قرار گرفته که نتایج دمای دیواره در امتداد مینی کانال در قالب شکل 16 آورده شده است. در حالت جریان با مقدار شار حرارتی 51 مگاوات بر متر مربع، به واسطه رخ دادن پدیده انحراف از جوشش هسته ای، دمای دیواره تا مقدار بیشینه 1143 درجه کلونین بالا می رود که سطح انتقال دچار خشک شدگی شدید خواهد شد. همانطور که از شکل پیدا است، با کاهش شار گرمای اعمالی به عنوان نمونه به مقدار 41 مگاوات بر متر مربع، تأخیری در محل وقوع پدیده انحراف از جوشش هسته ای مشاهده می‌گردد. با کاهش هرچه بیشتر شار گرمای اعمالی، دیگر پدیده انحراف از جوشش هسته ای رخ نخواهد داد. لازم به ذکر است که در مرجع [22] آورده شده است که در اثر تکرار آزمایش در شرایط اعمال شار بحرانی مینی کانال مورد نظر دچار ذوب و از هم گسیختگی گردیده است. شکل 17 مینی کانال مورد آزمایش را در این حالت نشان می‌دهد.

در شکل 18 دمای توده سیال بر حسب فاصله از مقطع ورودی کانال با شارهای گرمایی مختلف نمایش داده شده است. دیده می‌شود که دمای توده

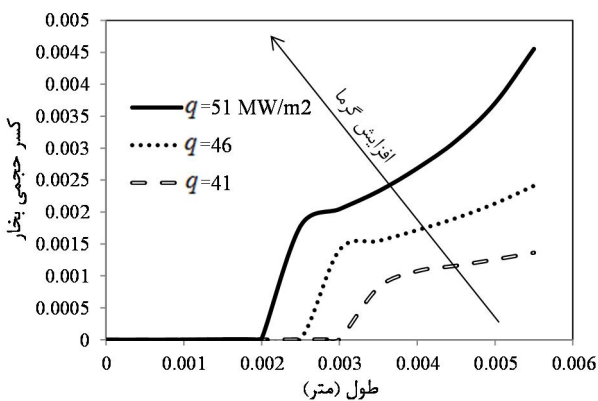
حدود 2 متر بر ثانیه در سرعت بخار، بعد از رخ دادن انحراف از جوشش هسته ای به وجود می آید.

4- نتیجه گیری و جمع بندی

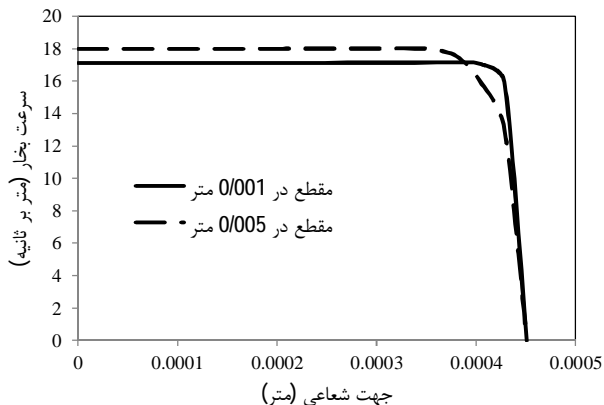
در این تحقیق به کمک دینامیک سیالات محاسباتی جریان همراه با جوشش هسته ای و انحراف از آن که منجر به پدیده خشک شدگی می گردد در یک مینی کانال مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مدل سازی میدان جریان از معادلات متوسط گیری شده ناویر استوکس در دیدگاه اویلرین برای هر فاز



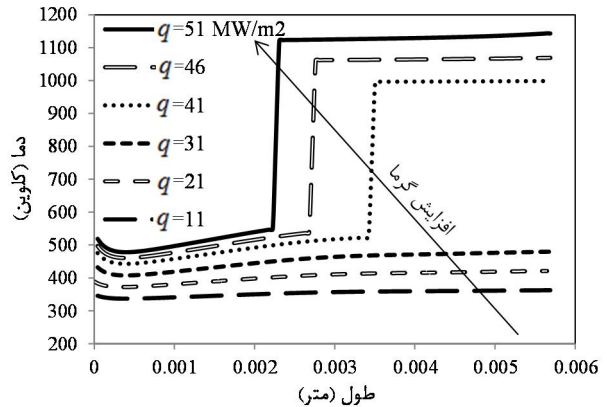
شکل 19 توصیف شماتیکی از کانتورهای فاز در بخش انتهایی از مینی کانال



شکل 20 کسر حجمی بخار متوسط گیری شده در مقاطع مختلف در امتداد مینی کانال



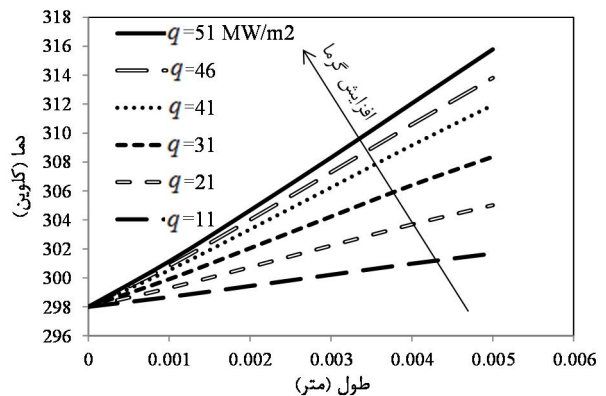
شکل 21 توزیع سرعت شعاعی بخار، قبل و بعد از انحراف از جوشش هسته ای



شکل 16 توزیع دمای دیواره در امتداد مینی کانال با شار گرمایی اعمالی مختلف



شکل 17 مینی کانال دچار ذوب و از هم گسیختگی بواسطه شار حرارتی بحرانی بالا [22]



شکل 18 توزیع دمای توده سیال مایع در امتداد مینی کانال با شار گرمایی اعمالی مختلف

میزان کسر حجمی بخار متوسط گیری شده در هر مقطع، بر حسب طول کانال با شارهای گرمایی اعمالی مختلف در شکل 20 آورده شده است. ملاحظه می شود که با افزایش مقدار شار گرمایی اعمالی به دیواره کانال، میزان بخار تولیدی نیز افزایش پیدا کرده است.

شکل 21 نمایانگر سرعت شعاعی بخار در دو مقطع 0/001 و 0/005 متری، قبل و بعد از وقوع پدیده انحراف از جوشش هسته ای در میزان شار گرمای 51 مگاوات بر متر مربع می باشد. ملاحظه می شود که افزایشی در

بصورت جداگانه در کنار روابط مورد نیاز جهت توصیف پدیده جوشش در شرایط غیر تعادلی استفاده شده است. در کنار صحت سنجی مدل سازی میدان جریان همراه با جوشش به ویژه در شرایط جوشش فیلمی، مشاهده گردید که کد محاسباتی در دسترس موجود، توانایی پیش بینی آستانه شار حرارتی برای شکل گیری پدیده خشک شدگی را دارا می باشد. دیده شد که در صورت اعمال شار حرارتی به میزان حدود 40 مگاوات، پدیده انحراف از جوشش بحرانی (DNB) اتفاق افتاده و لایه ای از بخار در مجاورت دیواره شکل می گیرد و در عین حال غالب میدان جریان، هنوز به صورت مایع مادون سرد است. مشاهده گردید که با افزایش میزان شار حرارتی اعمالی به دیواره مینی کانال، شکل گیری خشک شدگی یا دقیق تر انحراف از جوشش هسته ای به سمت ورودی کانال پیش روی کرده و در همه ی شارهای اعمالی دیده شد که توزیع دمای توده سیال در امتداد مینی کانال تقریباً خطی است.

$\Gamma_{\phi,q}$	ضریب پخش
c	فاز پیوسته
C	جابجایی
d	فاز پخش شده
E	تبخیر
G	فازهای دیگر به غیر از مایع و بخار
l	مایع
r_q	انتقال از فاز r به فاز q
v	بخار
w	دیواره

6- مراجع

- [1] W. Qu, I. Mudawar, Measurement and correlation of critical heat flux in two-phase micro-channel heat sinks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 2045-2059, 2004.
- [2] A. Cavallini, S. Bortolin, D. D. Col, M. Matkovic and L. Rossetto, Experiments on dry-out during flow boiling in a round minichannel, *Microgravity Science and Technology*, Vol. 19(3):pp. 57-59, 2007.
- [3] A. Kosar, A model to predict saturated critical heat flux in minichannels and microchannels, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. (48), 261-270, 2008.
- [4] Z. Liu, Q. Bi, Y. Guo, Q. Su, Heat transfer characteristics during subcooled flow boiling of a kerosene kind hydrocarbon fuel in a 1mm diameter channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. (55), pp. 4987-4995, 2012.
- [5] 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.
- [6] H. Li, S. A. Vasquez, P. Spicka, Advanced computational modeling of multiphase boiling flow and heat transfer, *Proceedings of the ASME 2010, International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, British Columbia, Canada, 2010.
- [7] 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 2011, International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, USA, 2011.
- [8] M.M. Rashidi, D.D. Ganji, H. Shahmohamadi, Variational iteration method for two-dimensional steady slip flow in micro-channels, *Archive of Applied Mechanics*, Vol.(81), pp.1597-1605, 2011.
- [9] M.M. Rashidi, A. Hosseini, I. Pop, S. Kumar, N. Freidoonimehr, Comparative numerical study of single and two-phase models of nanofluid heat transfer in wavy channe, *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol.(35), pp.831-848, 2014.
- [10] M. Kalteh, A. Abbassi, M. Saffar-Avval, J. Harting, Eulerian-Eulerian two-phase numerical simulation of nanofluid laminar forced convection in a microchannel, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.(32), pp.107-116, 2011.
- [11] A. Karimipour, A. Hossein Nejad, A. D. Orazio, M. H. Esfe, M. R. Sadaei, E. Shirani, Simulation of Copper-Water nanofluid in a microchannel in slip flow regime using lattice boltzmann method, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol.(49), pp.89-99, 2015.
- [12] S. Jesseela, C.B. Sobhan, Numerical modeling of annular flow with phase change in a microchannel, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol.(89), pp. 87-99, 2015.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] R. Cole, A Photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux, *AIChE J.*, vol. 6, pp. 533-542, 1960.
- [16] M. Lemmert, J. M. Chawla, Influence of flow velocity on surface boiling heat transfer coefficient, *Heat Transfer in Boiling*, pp. 237-247, 1977.
- [17] 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.
- [18] 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.

5- فهرست علائم

A_b	قسمتی از سطح که توسط حباب ها پوشیده شده (m^2)
\vec{B}_f	نیروی حجمی (N)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
C_v	ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
C_{wt}	ضریب انتظار حباب
d_{bw}	قطر جدایش حباب (m)
d_b	قطر حباب (m)
F_D	نیروی پسا (N)
F_L	نیروی برا (N)
F_{TD}	نیروی دریفت اغتشاشی (N)
f_{bw}	فرکانس جدایش حباب (Hz)
g	ثابت گرانش (ms^{-2})
H	انتالپی (Jkg^{-1})
H_{lv}	گرمای نهان تبخیر (Jkg^{-1})
Ja	عدد جاکوبین
k_l	ضریب رسانایی گرمایی مایع ($Wm^{-1}K^{-1}$)
\dot{m}	شار جرمی ($kg s^{-1}$)
N_w	دانسیته مکان هسته ها ($\#sites m^{-2}$)
P	فشار (Pa)
\dot{q}	شار گرما (W)
S_H	ترم چشمه
T	دما (K)
V	سرعت (ms^{-1})
علائم یونانی	
ρ	چگالی (kgm^{-3})
α	کسر حجمی بخار
τ	تانسور تنش برشی
η	ضریب تجربی
γ_l	ضریب پخش حرارتی در فاز مایع
σ	ضریب کشش سطحی (Nm^{-1})
ϕ	زاویه جدایش حباب
ϕ	پارامتر اغتشاش

- water flow Boiling-I: CHF data and parametric effects for small diameter tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.(4), pp.1405-1428,1999.
- [23] S. M. Ghiaasian, *Two-phase boiling and condensation in Conventional and Miniature Systems*, New York, Cambridge, 2008.
- [24] M. Nasiri, M. M. Rashidi, Numerical study of Subcooled Flow boiling of Water-Al₂O₃ in vertical sinusoidal wavy channel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol.(14), No. 11, pp. 195-203, 2014 (In Persian)
- [19] V. Velldandla, S. Putta, , R. P. Roy, and S.P. Kalra, Velocity field in turbulent subcooled boiling flow, National Heat Transfer Conference, Volume 12, ASME1995.
- [20] I. Senocak, *Computational methodology for the simulation turbulent cavitating flows*, PhD thesis, University of Florida, 2002.
- [21] N. Hoyer, Calculation of dryout and post-dryout heat transfer for tube geometry, *Int.J.Multiphase Flow*, Vol. 24, No.2, pp.319-334, 1998.
- [22] I. Mudawar, M. B. Bowers, Ultra-high critical heat(CHF) for subcooled