

مدل سازی عددی خواص هیدرودینامیکی و انتقال حرارتی جریان جوششی در یک

میکروکانال

بهرام مولائی

کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک تبدیل انرژی-دانشگاه صنعتی ارومیه

bvmolaei@yahoo.com

عبدالرحمان دادوند

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک-دانشگاه صنعتی ارومیه

a.dadvand@mee.uut.ac.ir

مجید عباسعلیزاده

دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک-دانشگاه ارومیه

m.abbasalizadeh@mail.urmia.ac.ir

مرتضی محمدی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک تبدیل انرژی-دانشگاه صنعتی ارومیه

m.mohammadi@mee.uut.ac.ir

چکیده

در این مقاله جریان جوششی آب خالص در یک میکروکانال با دبی جرمی ثابت به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. جریان سیال آب به صورت تک فاز (مایع) وارد کانال شده و تحت تاثیر شار حرارتی ثابت هیتر به جریان دوفازی تبدیل می شود. ابعاد میکروکانال مستقیم با مقطع مستطیلی $7500 \times 100 \times 250 \mu\text{m}$ می باشد. در سطح پایینی میکروکانال هیتری مسطح و با ابعاد $80 \times 3500 \mu\text{m}$ به شکل متقارن نسبت به مرکز قرار گرفته است. مدل سازی عددی جریان جوششی به کمک نرم افزار تجاری ANSYS Fluent انجام گرفته و کدهایی به صورت UDF نوشته و به نرم افزار پیوست شده است. در این مطالعه از روش اویلری-اویلری برای شبیه سازی جریان دوفازی ناپایا استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می دهد که جریان سیال تک فاز ورودی هنگام عبور از روی سطح هیتر دچار جوشش شده و حباب های تولید شده در فاصله کمی دورتر از سطح هیتر چگالش یافته و به عبارتی جریان سیال تک فاز به جریان جوششی زیرسرد که جریانی دوفازی است تبدیل می شود. نتایج شبیه سازی به خوبی شکل گیری و آغاز جریان جوششی را نشان می دهد که با نتایج تجربی سازگاری خوبی دارد. همچنین نتایج کار حاضر، نتایج تحقیقات دیگر محققان را که نشان می دهد در هندسه های ساده (یعنی لوله ها و کانال های مستقیم با مقطع مستطیلی) نتایج شبیه سازی عددی با نتایج آزمایشات تجربی مطابقت خوبی دارد را تصدیق می نماید.

کلمات کلیدی: جریان جوششی، انتقال حرارت، مدل سازی عددی، جریان دوفازی، میکروکانال

۱ مقدمه

سرمایش نقش مهمی را در کاربردهای مختلف مهندسی، معمولاً در مواجهه با صنایع خودروسازی، الکترونیک، شیمیایی و فرآیند نیروگاهی و غیره ایفا می‌کند. خنک‌کاری ناقص به عمل‌کرد ضعیف، کاهش توان خروجی، کاهش طول عمر دستگاه و در کارکرد طولانی مدت به شکست فیزیکی به دلیل خستگی و تنش حرارتی بالا منجر می‌شود. عمل‌کرد با توان بالاتر نیازمند نرخ خنک‌کاری بالاتر است که به طور مرسوم با تجهیزات انتقال حرارت حجیم که دارای دبی جریان سیال عامل بالاتر است انجام می‌گیرد. خنک‌کاری با هوا اصلی‌ترین روش برای خنک‌کاری سیستم‌های الکترونیکی است، اما فلاکس‌های حرارتی بیشتر از $100 \frac{W}{cm^2}$ در صنایع و سیستم‌های الکترونیکی به خنک‌کاری توسط مایعات نیاز خواهند داشت. روش نوین جهت افزایش شدت خنک‌کاری بکارگیری جوشش هسته‌ای زیر سرد است که در آن حرارت از بخش دما بالا به سیال عامل با دو مکانیزم کلی، جابجایی به دلیل حرکت توده‌ای سیال و انتقال حرارت نهان مربوط به تغییر فاز مایع به بخار در سطح هیتر صورت می‌گیرد. سیستم‌های به اصطلاح خنک‌کاری بر مبنای جوشش توجه زیادی را به دلایل؛ فشردگی، حجم کوچک تجهیزات، هزینه عملکردی پایین و نرخ انتقال حرارت بالا به خود جلب کرده‌اند. در جریان جوششی زیرسرد که دمای توده سیال پایین‌تر از دمای اشباع مایع در فشار جریان قرار دارد حباب در منطقه سوپرهیت نزدیک دیواره رشد کرده و وابسته به شرایط جریان یا در نزدیکی دیواره چگالیده و یا به منطقه میانی جریان سیال خنک‌کننده در فاصله‌ای دور از دیواره انتقال و در هسته جریان چگالیده می‌شود. در هر صورت این هسته‌زایی باعث انتقال حرارت اضافی از سطح هیتر می‌شود. وابسته به ویژگی‌های مجرای جریان و رفتار جریان گاهی جوشش هسته‌ای کنترل نشده باعث تولید بسته‌های بخار در منطقه نزدیک دیواره شده لذا منجر به حالت خشکی و این هم تأثیر نامطلوبی روی عملکرد خنک‌کاری دارد. از این رو یک مدل مهندسی مفصل که به مهندسان امکان رسیدن به بهترین نرخ سرمایش ممکن و رفع معایب طرح‌های اولیه در فرآیند طراحی را بدهد مورد نیاز است. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یکی از قوی‌ترین ابزارها جهت تحصیل بصیرت از هر جریان پیچیده و فرایند انتقال حرارت است. هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی توانایی یا عدم توانایی مدل‌سازی جریان جوششی در میکروکانال با مدل‌های جوششی توسعه یافته در زمینه CFD می‌باشد. با کمک افزایش منابع محاسباتی در حال حاضر مدل‌سازی هسته-زایی و رشد حباب نزدیک دیواره جوششی ممکن شده [۱-۴]، اما چنین مطالعاتی به تعداد محدودی حباب در حال رشد روی هندسه ساده با سطح ایده‌آل محدود است. چنین پیش‌بینی عددی مدل-آزاد برای جوشش در مسایل مهندسی واقعی فراتر از دامنه قدرت محاسباتی است. علاوه بر این به دلیل درک محدودی پدیده جوشش نزدیک دیواره، حتی برخی محققان [۵،۶] آن را به عنوان یک فرآیند توربولانت غیرقابل پیش‌بینی که موجب نوسانات فلاکس حرارتی دیواره یا دمای دیواره می‌شود در نظر می‌گیرند. زمینه مهندسی نیازمند پیش‌بینی انتقال حرارت جوششی در کاربردهای واقعی است و تحلیلگران CFD و مهندسان طراح برای توسعه مدل‌های انتقال حرارت جوششی بر مبنای روابط تجربی که شامل مقدار زیادی تجربه‌گرایی برای مقابله با اثرات زبری سطح، سطح ترکیبی مایع، شرط اولیه سطح و غیره و همچنین برای اکثر موارد مهندسی پیچیده به چنین شرایط تجربی مشتق شده از یک حالت خاص تکیه می‌کنند.

برای پیش‌بینی جوشش هسته‌ای انواع متعددی از مدل‌های فلاکس حرارتی دیواره تک معادله (1-D) در ادبیات فن در دسترس هستند. این مدل‌ها از خواص متوسط توده‌ای روی مساحت سطح مقطع عمود بر جریان و مجموعه معادلات تجربی برای تثبیت مناسب جریان استفاده می‌کنند. مدل‌های موجود در کل به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند.

الف) روابط تجربی عمومی، که نرخ انتقال حرارت دیواره یا ضریب انتقال حرارت را به دمای سوپر هیت دیواره از طریق گروه‌های بی بعد به هم مرتبط می‌کند. در این مدل‌ها رژیم جوشش هسته‌ای به طور عمده به دو بخش تقسیم می‌شود. جوشش هسته‌ای توسعه‌یافته جزئی و جوشش هسته‌ای کاملاً توسعه‌یافته. در رژیم جوشش هسته‌ای توسعه‌یافته جزئی تنها چند سایت هسته‌زایی فعال بوده و به عنوان یک نتیجه هردو مدل، انتقال حرارت جابجایی اجباری تک فاز و جوشش هسته‌ای نقش عمده‌ای را بازی می‌کنند. در برخی نقاط انتقال حرارت تنها از مدل جوشش هسته‌ای خواهد بود که به رژیم جوشش هسته‌ای کاملاً توسعه‌یافته معروف بوده که تأثیر انتقال حرارت جابجایی تک فاز ناچیز می‌باشد. برای هر کدام از رژیم‌ها روابط مختلف بکار می‌روند.

ب) مدل‌های مکانیکی یا مدل‌های پارتیشن‌بندی که تلاش می‌کند انتقال حرارت کل را از طریق تقسیم‌بندی آن به طور کلی به دو بخش، انتقال حرارت جابجایی تک فاز و انتقال حرارت تبخیری جوشش هسته‌ای بدست بیاورد [۷-۱۳]. مزیت اصلی این مدل‌ها این است که تنها یک تک-معادله می‌تواند کل رژیم جوشش هسته‌ای را پوشش دهد و آن هم نیازمند تعیین نقاط گذار از جوشش هسته‌ای توسعه‌یافته جزئی به جوشش هسته‌ای کاملاً توسعه‌یافته نیست.

همه این مدل‌ها در هندسه‌های ساده مانند، لوله، کانال با مقطع مستطیلی و مجاری انیولار تولید و اعتبارسنجی شده‌اند. برخی مواقع یک مسئله سه بعدی (۳-D) پیچیده نظیر جت خنک‌کاری موتور، مبدل حرارتی هلیکال و غیره به یک مسئله تک بعدی (۱-D) ساده‌سازی می‌شود که در آن کانالی با قطر هیدرولیکی معادل که این مدل‌ها روی آن اعمال می‌شود در نظر گرفته می‌شود [۱۴-۱۵-۱۸]. برای بدست آوردن متغیرهای فضایی و زمانی دما و کسر حجمی بخار برخی از این مدل‌ها در حلگر سه بعدی CFD ساده‌سازی و تکمیل می‌شوند. در طول دو دهه اخیر، روش چند فاز دو-سیال^۱ با اصطلاح مدل جوشش دیواره RPI توسط کرول و پودوسکی (Kurul and podowski, 1991) در موسسه پلی‌تکنیک رنسلیر^۲ به عنوان روش مدل‌سازی برای پیش‌بینی مکانیکی پدیده جوشش ایجاد شده. این مدل یک مدل جوششی مفصل است که با مدل چند فاز اولری کار می‌کند و زیر-مکانیزم‌های جوششی متعدد مانند دینامیک حباب نزدیک دیواره و پارتیشن‌بندی فلاکس حرارتی را در نظر می‌گیرد. این مدل به شکل گسترده‌ای برای بررسی جوشش در شرایط پدید آمده در صنعت هسته‌ای [۱۸-۱۹-۲۵] استفاده می‌شود. برخی محققان بیان کرده‌اند در چند سال اخیر چندین محقق بررسی‌های CFD سه بعدی (۳-D) برای تحلیل انتقال حرارت جوششی زیر سرد انجام داده‌اند. تاو بو (Bo, 2004) یک مدل جوششی از مرتبه پایین با کد CFD انجام و با داده‌های تجربی مقایسه کرده. این مدل مکانیکی از رابطه جوشش استخری روحسانو (Shah, 1977) برای پیش‌بینی جوشش جریانی استفاده می‌کند. این مدل نه تأثیر سرعت توده‌ای جریان را به حساب می‌آورد و نه تصحیح رابطه تجربی برای جوشش جریانی را در نظر می‌گیرد. سیرینیواسان مدل جدایی حباب BDL^۳ که بدو^۴ توسط ستینر و همکاران (Lee, 2009) در چهارچوب چند-سیالی اولری پیشنهاد شده بود را توسعه داد. همچنین یک مکانیزم انتقال جرم بر مبنای دینامیک حباب نزدیک دیواره تکمیل شده. همچنین در مدل BDL برای بدست آوردن تأثیر جابجایی در جوشش هسته‌ای نیاز است یک مجموعه معادله دیفرانسیلی غیر خطی در هر سلول محاسباتی نزدیک دیواره حل شود. این مدل همراه با مدل چند-فازی اولر-اولر (معادلات انتقال برای هر کدام از فازها حل می‌شود) حل عددی بر مبنای مدل BDL را از نظر محاسباتی گران می‌کند. لی و همکاران (Li and Wang, 2011) یک مدل جوششی را در محیط CFD تک فاز بر مبنای روش بخش توضیحات^۴ ارائه داده که تمرکز اصلی آن بر جوشش هسته‌ای در مجرای میرد جکت موتور می‌باشد.

¹ Two-fluid Multiphase Method

² Rensselaer Polytechnic Institute

³ Bubble Departure Liftoff

⁴ Division Description Method

۲ روش‌شناسی عددی

جهت مدل‌سازی دقیق جوشش هسته‌ای زیرسرد لازم است جریان سیال، دوفازی شبیه‌سازی شود، تقویت انتقال حرارت در دیواره در محاسبه وارد و انتقال حرارت بین فازهای مایع و بخار مدل شود. مدل‌های مختلفی برای تحلیل و شبیه‌سازی جوشش سیالات وجود دارد از جمله مدل مخلوط^۱، مدل اولری-اولری^۲، و مدل اویلری-لاگرانژی^۳. از بین روش‌های مذکور، دقیق‌ترین روش مدل دوسیالی^۴ یا همان مدل اولری می‌باشد [۲۰-۲۲]. مدل جوشش دیواره حاضر با بکارگیری مدل چندفازی اولری موجود در نرم‌افزار تجاری ANSYS Fluent توسعه یافته است. این مدل معادلات مومنتوم، پیوستگی و انرژی را برای هر کدام از فازها حل می‌کند. ارتباط این معادلات از طریق فشار و ضرایب تبادل بین‌فازی صورت می‌گیرد. این ارتباط به نوع فازها بستگی دارد. تبادل مومنتوم میان فازها نیز به نوع مخلوطی که باید مدل شود بستگی دارد. در سال‌های گذشته محققان مختلف تغییراتی در مدل مذکور ایجاد کرده و باعث بهبود این مدل شده‌اند [۲۳-۲۵]. معادلات حاکم در این روش عبارتند از:

۱-۲ معادلات حاکم

۱-۱-۲ معادلات پیوستگی

$$\frac{\partial[(1-\alpha)\rho_l]}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(1-\alpha)\rho_l \vec{u}_l] = \Gamma_{lv} \quad (1)$$

که در آن α کسر حجمی بخار و $(1-\alpha)$ کسر حجمی مایع و ρ_l ، μ_l و \vec{u}_l به ترتیب معرف چگالی، لزجت و سرعت جریان برای فاز مایع می‌باشند. همچنین نرخ انتقال جرم از فاز مایع به بخار به دلیل جوشش می‌باشد.

$$\frac{\partial[\alpha\rho_v]}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\alpha\rho_v \vec{u}_v] = \Gamma_{vl} \quad (2)$$

که در آن، ρ_v و \vec{u}_v به ترتیب معرف چگالی و سرعت جریان برای فاز بخار می‌باشند. و همچنین معرف نرخ انتقال جرم از فاز بخار به مایع به دلیل چگالش می‌باشد.

۲-۱-۲ معادلات مومنتوم

$$\frac{\partial[(1-\alpha)\rho_l \vec{u}_l]}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(1-\alpha)\rho_l \vec{u}_l \vec{u}_l] = -(1-\alpha)\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot [(1-\alpha)(\tau_l + \tau^{turb}_l)] + (\Gamma_{lv}\vec{u}_v - \Gamma_{vl}\vec{u}_l) + \vec{f}_{lv} \quad (3)$$

که در آن، \vec{f}_{lv} نرخ انتقال مومنتوم از فاز مایع به بخار می‌باشد. همچنین τ_l و τ^{turb}_l به ترتیب معرف تنش و تنش ناشی از آشفتگی برای فاز مایع می‌باشد.

¹ Mixture model

² Eulerian-Eulerian model

³ Eulerian-Lagrangian model

⁴ Two-Fluid model

$$\frac{\partial(\alpha \rho_v \bar{u}_v)}{\partial t} + \bar{v} \cdot [\alpha \rho_v \bar{u}_v \bar{u}_v] = -\alpha \bar{v} p + \bar{v} \cdot [\alpha(\tau_v + \tau_v^{turb})] + (\Gamma_{v1} \bar{u}_1 - \Gamma_{1v} \bar{u}_v) + \bar{f}_{v1} \quad (4)$$

در این رابطه، τ_v و τ_v^{turb} به ترتیب معرف تنش و تنش ناشی آشفتگی برای فاز بخار می باشد. و همچنین معرف نرخ انتقال مومنوم از فاز بخار به فاز مایع است.

۳-۱-۲ معادلات انرژی

$$\frac{\partial[(1-\alpha)\rho_l H_l]}{\partial t} + \bar{v} \cdot [(1-\alpha)\rho_l H_l \bar{u}_1] = \bar{v} \cdot [(1-\alpha)K_L \bar{v} T_1] + (\Gamma_{1v} H_v - \Gamma_{v1} H_1) + q_1 \quad (5)$$

در این رابطه، H_l ، K_L و H_v به ترتیب معرف آنتالپی فاز مایع، ضریب انتقال حرارت هدایتی فاز مایع و آنتالپی فاز بخار می باشد. و همچنین معرف q_1

$$\frac{\partial[\alpha \rho_v H_v]}{\partial t} + \bar{v} \cdot [\alpha \rho_v H_v \bar{u}_v] = \bar{v} \cdot [\alpha K_v \bar{v} T_v] + (\Gamma_{v1} H_1 - \Gamma_{1v} H_v) + q_v \quad (6)$$

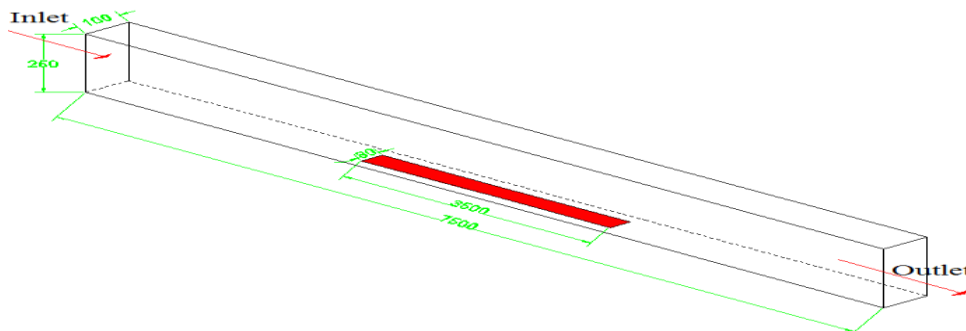
در این رابطه، K_v ضریب انتقال حرارت هدایتی فاز بخار می باشد.

در تمام هندسه های مورد بررسی شرط مرزی لغزش آزاد برای حباب های بخار در روی هیتر در نظر گرفته شده است. همچنین در دیواره شرط مرزی فلاکس ثابت اعمال شده و دیواره خارجی آنها عایق فرض گردیده است. در ورودی سرعت و دمای یکنواخت و در خروجی شرط مرزی فشار معلوم اعمال شده است.

در سیستم های چند فاز و از جمله در جوشش، تعدادی از پدیده های انتقال بین فازها اتفاق می افتد که شامل انتقال جرم، مومنوم و انرژی می باشد. مطالعات مختلف در این زمینه انجام شده و روابط و مدل های متعدد برای اعمال تأثیر این انتقال ها بدست آمده است. در ادامه به ذکر برخی از روش های موجود برای محاسبه این انتقال ها پرداخته شده است.

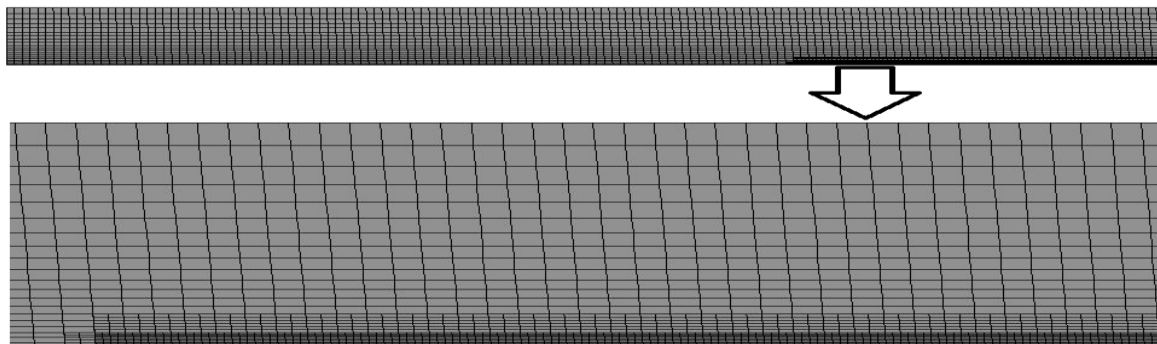
۳ توصیف مسئله

شکل ۱ پیکربندی فیزیکی مسئله با واحد میکرومتر را نشان می دهد. جریان دوفازی، پایا و سه بعدی فرض شده است هیتری با ابعاد 3500×100 میکرومتر مربع در کف میکروکانال واقع شده که فلاکس حرارتی ثابت $3.775 \frac{MW}{m^2}$ به آن وارد می شود. جریان تک فاز آب با دبی جرمی $171.2 \text{ Kg/m}^2 \text{ s}$ و با دمای ورودی 300 K وارد و به صورت جریان دو فاز خارج می شود. به دلیل بالا بودن فلاکس حرارتی هیتر سیال هنگام حرکت از روی هیتر دچار تغییر فاز شده و قادر خواهد بود که چنین فلاکس حرارتی بالا را انتقال دهد.



شکل ۱. پیکربندی فیزیکی مسئله، تمام ابعاد بر حسب میکرومتر هستند

شکل ۲ مش بندی میکروکانال مورد نظر را در ورودی/خروجی و دیواره مجاور هیتر را نشان می‌دهد به دلیل گرادیان شدید دما و فرایندهای هسته‌زای، رشد حباب و جدایی حباب از سطح هیتر در نزدیکی سطح باید شبکه بسیار ریز می‌بود و از طرفی به دلیل دوفازی بودن جریان و استفاده از روش اولری که برای هر کدام از فازها دستگاه معادلات مجزایی را حل می‌کند تعداد معادلات زیاد بوده و لذا زمان حل به شدت افزایش می‌یابد برای حل مشکل زمان باید از شبکه بلوکی استفاده کنیم. این امر کمک می‌کند که دقت محاسبات در نزدیک دیواره‌ها تا حد ممکن با مدل واقعی مطابقت داشته باشد. بنابراین شمایی از مش بندی در شکل زیر ارائه شده است.



شکل ۲. مش بندی میکروکانال در ورودی/خروجی و در دیواره مجاور هیتر که با حرکت به سمت پایین شبکه ریزتر شده.

۴ نتایج و بحث

این مدل توسط نرم‌افزار فلونت^۱ که بر پایه محاسبات حجم محدود^۲ می‌باشد شبیه‌سازی شده است. در حل مدل به اختلاف چگالی مایع و بخار و برای گریز از خطاهای عددی از روش بالادست مرتبه اول^۳ استفاده شده، که در اختلاف‌های شدید از پایداری عددی برخوردار است. مدل سازی حاضر سعی کرده نقطه بعد از شروع جوشش یا بعد از شروع نوسانات جریان^۴ (OFI) (Li Xu, 2012) را بررسی نماید.

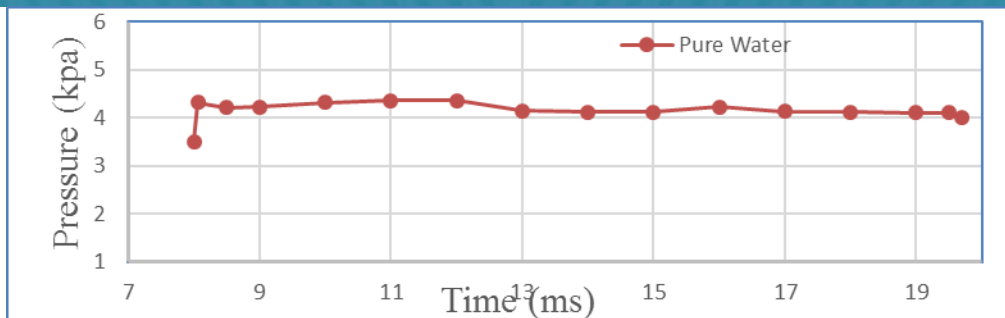
شکل ۳، پارامتر افت فشار را در طول میکروکانال نشان می‌دهد. همان طور که می‌دانیم افت فشار برای جریان سیال تک فاز کم‌تر از افت فشار جریان سیال دوفازی می‌باشد. همچنان که از نمودار پیداست ابتدا افت فشار کم بوده همین که تعداد نقاط هسته‌زایی بر روی سطح هیتر افزایش می‌یابد یعنی جریان با شدت بیشتر شروع به جوشیدن می‌کند جریان به شکل ملموسی شکل جریان دوفازی به خود گرفته و افت فشار به شکل ناگهانی افزایش می‌نماید. و بعداً برای یک بازه زمانی حدود ۱۰ ms تقریباً ثابت می‌ماند از آنجایی که از گامهای زمانی از مرتبه میلییونم ثانیه استفاده می‌شود و بنابه دلایلی که در بالا بحث شد بازه زمانی بیش از این به زمان حل بسیار طولانی نیاز داشت.

¹ Fluent

² Finite Volume

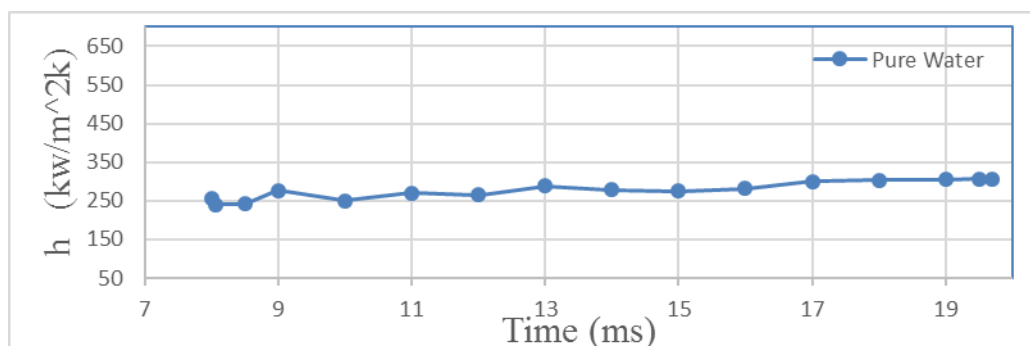
³ First Order Upwind

⁴ Onset of Flow Instabilities



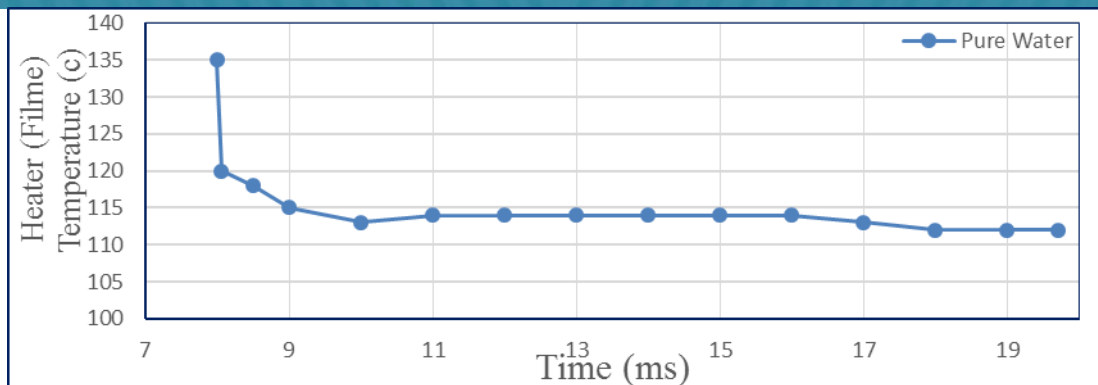
شکل ۳. افت فشار جریان جوششی آب خالص در یک میکروکانال مستطیلی.

شکل ۴، ضریب انتقال حرارتی جریان جوششی رو نشان می‌دهد، که کمی دارای نوسان می‌باشد یعنی زمان‌هایی که حباب روی سطح هیتر تشکیل می‌شود ضریب انتقال حرارتی جوشش کاهش یافته به دلیل انتقال حرارت به فاز بخار که ضریب انتقال حرارتی آن نسبت به فاز مایع کم بوده به جای انتقال حرارت به فاز مایع. و نوسانات به دلیل هسته‌زایی و جدایش حباب در سطح بسیار کوچک چون که بازه زمانی حل خیلی کوتاه بوده و فرصت کافی برای هسته‌زایی همه جانبه و کامل در سطح هیتر نبود. و همین افت و خیزهای کوچک هم به دلیل تعداد کم هسته‌های حباب زا می‌باشد.



شکل ۴. ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان جوششی.

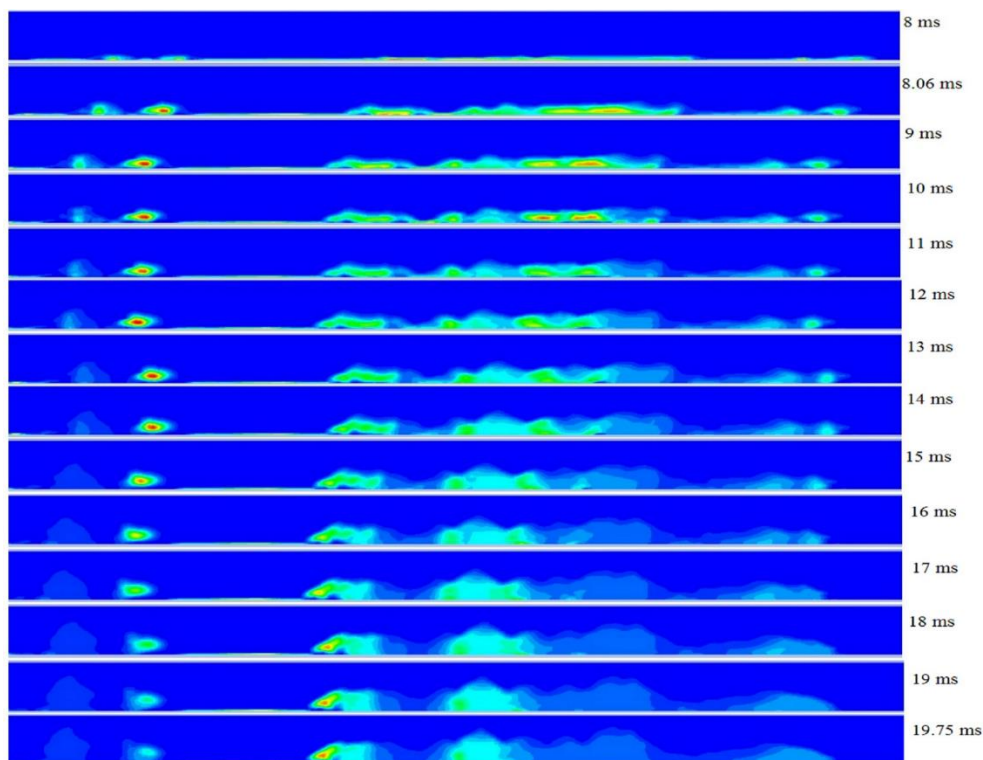
شکل ۵، دمای سوپرهیت (اختلاف دمای سطح هیتر از دمای اشباع سیال در فشار جریان) سطح هیتر را نشان می‌دهد. همان طوری که نمایان هست در ابتدا دمای سوپرهیت بالاست به دلیل وجود حباب روی سطح هیتر که باعث شده ضریب انتقال حرارت و از آنجا انتقال حرارت کلی کاهش و دمای سطح افزایش می‌یابد. و بعد از جدایی حباب‌ها دمای سطح به علت جایگزینی مایع و افزایش ضریب انتقال حرارت جریان و از آنجا افزایش انتقال حرارت دمای سطح هیتر کاهش یافته و تقریباً ثابت می‌ماند طبق توضیحات بالا به دلیل کوتاه بوده بازه حل زمان کافی برای تشکیل و جدایی متعدد حباب‌ها فراهم نیست و دما تقریباً ثابت می‌ماند.



شکل ۵. دمای سوپر هیت (اختلاف دمای سطح هیتر از دمای اشباع مایع در فشار جریان سیال) سطح هیتر.

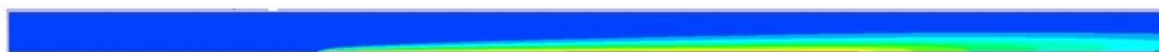
شکل ۶ کانتور تغییر فاز یا کسر حجمی بخار را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. این کانتورها از این نظر دارای اهمیت

است که بیان‌گر توانایی نرم‌افزارهای تجاری برای مدل‌سازی جریان جوششی است.



شکل ۶ کانتور تغییر فاز یا کسر حجمی بخار را در زمان‌های مختلف.

شکل ۷ کانتور دمای دو بعدی روی دیوار متقارن در جریان جوششی داخل میکروکانال نشان می‌دهد.



شکل ۷ کانتور دمای دو بعدی روی دیوار متقارن در جریان جوششی داخل میکروکانال.

۵ نتیجه گیری

هدف این مطالعه، بررسی قابلیت مدل سازی CFD جریان جوششی آب خالص در یک میکروکانال مستقیم با بکارگیری نرم افزار تجاری ANSYS Fluent می باشد. از آنجایی که تحلیل CFD جریان جوششی با استفاده از نرم افزارهای تجاری به پدیده-ی نوپایی است و همچنین پدیده‌ی مذکور نیازمند مطالعات گسترده تجربی و CFD می باشد. لذا این مطالعه در جهت بسط مدل سازیهای عددی در زمینه‌ی CFD جریان های جوششی در میکروکانالها می باشد. جریان جوششی به دلیل وابستگی به تعداد زیادی از پارامترهای نامعلوم و دارا بودن فرایندهای هیدرودینامیکی کاملاً تصادفی پدیده‌ی کاملاً پیچیده بوده و همگرا کردن فرایند حل با مشکلات ویژه‌ی همراه است. اکثر مدل سازیهای عددی از حالت پایا در لوله‌های معمولی استفاده می کنند با این وجود در این مطالعه جریان سیال به صورت دوفازی و با روش اولر-اولر و مدل ناپایا مورد بررسی قرار گرفته. نتایج این مطالعه نشان می دهد که در سطح هیتر دچار جوشش شده یا به عبارتی تولید بخار اتفاق افتاده و بخارهای تولید شده در فاصله‌ی کمی دورتر از سطح هیتر چگالیده می شوند. یعنی جریان جوششی از نوع جریان جوششی زیر سرد می باشد. همچنین لازم است بیان شود که در مدل های جوششی موجود در نرم افزار قطر جدایی حساب و فرکانس جدایی حساب دارای اهمیت می باشد و باید به درستی جایگذاری شود. و اندرکنش بین دوفاز هم باید با دقت تمام مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می توان گفت که استفاده از پیش فرضهای نرم افزار بعضی موارد دارای خطای قابل توجه بوده و باید به مدل های مناسب تغییر کنند. و استفاده از مدل تطبیق مش می تواند باعث پایا کردن روند حل می گردد. نتایج این مطالعه نشان می دهد که مدل سازی عددی جریان جوششی زیر سرد در هندسه های ساده یعنی لوله ها و کانال های مستقیم با مقطع مستطیلی با نتایج آزمایشات تجربی انجام شده و موجود در ادبیات فن مطابقت خوبی دارد. و با بررسی نتایج می توان نتیجه گرفت که جریان جوششی با وجود دبی جرمی بسیار کم قابلیت دفع حرارتی بسیار بالایی دارد و این نتیجه امید کاربردهای جدید و گسترده این پدیده را درخشان می کند.

منابع

- [۱] Dhir, V.K., Abarjith, H.S. and Warriar, G.R., "From Nano to Micro to Macro Scales in Boiling," In: Microscale heat transfer: fundamentals and application, Kakaç, S. (Ed.), 197-216, Springer, 2005.
- [۲] Dhir, V.K., "Boiling Heat Transfer," Annual Reviews of Fluid Mechanics 30, 365-401, 1998.
- [۳] Son, G. and Dhir, V.K., "Numerical Simulation of Film Boiling Near Critical Pressures with a Level Set Method," J. Heat Transfer 120, 183-192, 1998.
- [۴] Yuan, D., Pan, L. and Chen, D., "Numerical Investigation of Bubble Growth in Subcooled flow Boiling", 7th International Conference of Multiphase Flow, FL USA, May 13th to June 4th, 2010
- [۵] Dhir, V.K., "Mechanistic Prediction of Nucleate Boiling Heat Transfer- Achievable or a Hopeless Task?," J. of Heat Transfer, Vol. 128, 1-12, 2006.
- [۶] Dhir, V.K., "Mechanistic Prediction of Nucleate Boiling Heat Transfer- Achievable or a Hopeless Task?," J. of Heat Transfer, Vol. 128, 1-12, 2006.
- [7] Chen, J.C., "Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow," Ind. & Eng. Chem. Process Design and Development, Vol. 5 no 3, 322-329, 1966.
- [8] Shah, M.M., "A General Correlation for Heat Transfer during Subcooled Boiling in Pipes and Annuli", ASHRAE Transactions, 83, Part I, 205-217, 1977.
- [9] Rohsenow, W.M., "A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling of Liquid," Trans. ASME, 74, 969, 1952.

- [10] Robinson, K., Hawley, J.G. and N.A.F., "Experimental and Modeling Aspects of Flow Boiling Heat Transfer for Application to Internal Combustion Engines," Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part D: Automobile Engineering, 2004.
- [11] Steiner, H., Kobor, A. and Gebhard, L.A., "A Wall Heat Transfer Model for Subcooled Boiling Flow," Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, 4161-4173, 2005.
- [12] Basu, N., Warriar, G.R., Dhir, V.K., "Wall Heat Flux Partitioning during Subcooled Flow Boiling at Low Pressures," Proceedings of HT, ASME Summer Heat Transfer Conference, July 21-23, 2003, Las Vegas, USA.
- [13] Basu, N., Warriar, G.R. and Dhir, V.K., "Wall Heat Flux Partitioning during Subcooled Flow Boiling: Part 1 –Model Development," Journal of Heat Transfer, Vol.127,131-140, 2005.
- [14] Kroes, J.P., Geld, C. W. M. van der, Velthooven, E. van, "Modeling of Nucleate Boiling in Engine Cylinder Head Cooling Ducts," HEAT 2008, Fifth International Conference on Transport Phenomena In Multiphase Systems, Bialystok, Poland, June 30 -July 3, 2008.
- [15] Lee, H. S., "Heat Transfer Predictions using the Chen Correlation on Subcooled Flow Boiling in a standard IC Engine," SAE International 2009-01-1503, 2009.
- [16] Kurul, N., and Podowski, M.Z., "On the Modeling of Multidimensional Effects in Boiling Channels", Proceedings of the 27th National Heat Transfer Conference, Minneapolis, Minnesota, USA, July 1991.
- [17] Bo, T., "CFD Homogeneous Mixing Flow Modelling to Simulate Subcooled Nucleate Boiling Flow", SAE International 2004-01-1512, 2004.
- [18] Li Xu, Jinliang Xu, "Nanofluid stabilizes and enhances convective boiling heat transfer in a single microchannel" International Journal of Heat and Mass Transfer, 55 (2012) 5673–5686.
- [19] Li, Z., Huang, R-H , Wang, Z-W, "Subcooled boiling heat transfer modeling for internal combustion engine applications," J. Automobile Engineering, Proc. IMechE Vol. 226 Part D, 2011
- [20] Ishii, M. Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow: Eyrolles; 1975.
- [21] Drew, D.A. 1983. Mathematical Modeling of Two-Phase Flow. Annual Review of Fluid Mechanics. 15:261-291.
- [22] Dykhuizen, R.C., Roy,R.P., and Kalra, S.P. 1986. A Linear Time-Domain Two-Fluid Model Analysis of Dynamic Instability in Boiling Flow Systems. Journal of Heat Transfer. 108:100-108.
- [23] Anglart, H., and Nylund, O. 1996. CFD application to prediction of void distribution in two-phase bubbly flows in rod bundles. Nuclear Engineering and Design. 163:81-98.
- [24] Kurul, N., and Podowski, M.Z. Multidimensional effects in forced convection subcooled boiling. In: Proceeding of the Ninth International Heat Transfer Conference. Jerusalem, Israel 11990.p.21-26.
- [25] Roy, P.P., Kang, S., Zarate, J.A., and Laporta, A. 2001. Turbulent Subcooled Boiling Flow – Experiments and Simulations. Journal of Heat Transfer. 124:73-93.
- [26] Li Xu, Jinliang Xu, Nanofluid Stabilizes and Enhances Convective Boiling Heat Transfer in a Single Microchannel. International Journal of Heat and Mass Transfer. 55(2012) 5673-5686.