مدلسازی عددی جوشش وبررسی دمای دیواره در لوله های بویلر نیروگاهی

محمد جواد سبط الشیخ انصاری[۱]، محسن پیر محمدی[۲*]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، پردیس، ایران
[۲]استادیار، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، پردیس، ایران

دریافت:بهار ۹۸ پذیرش: تابستان ۹۸

چکیده

در این مطالعه، شبیه‌سازی ۲ بعدی جوشش اجباری جریان سیّال درون رایزر یک بویلر می‌پردازد. سیال در حالت اشباع وارد رایـزر مـی‌شـود. رایـزر تحـت شـار حرارتی ثابت قرار دارد. مراحل شبیه سازی جریان ۲ بعدی دوفازی مغشوش در درون یک لوله قائم با شرط مرزی شار ثابت ارائه شده است. جهت شـبیه سـازی از نرم افزار فلوئنت ورژن ۱۸ استفاده و همچنین جهت اعتبار سنجی نتایجِ حاصل با نتایج تجربی، مقایسه شد. میزان خطای شبیه سازی در حـدود ۳ درصـد بدسـت آمد. اثر شدت شار حرارتی بر روی ضریب انتقال حرارت کسرحجمی و دمای دیواره سرعت و فشار سـیال بررسـی شـد. نتـایج شـبیه سـازی نشـان داد بـا افـزایش فلاکس حرارتی در جداره تیوب، ضریب انتقال حرارت h روند نزولی دارد. دلیل این امر افزایش کسـر حجمـی بخـارآب و بـالطبع کـاهش ضـریب هـدایت حرارتـی رسانشی بخار نسبت به سیال آب مایع می‌باشد. همچنین در فلاکس حرارتی بالاتر، میزان ضریب انتقال حرارت h (به علت نوسـان سـریع در خـواص ترمـوفیزیکی سیال مایع و بخار و همچنین پیدایش ناپایداری دینامیکی گردابه‌ها) افزایش می‌یابد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** pirmohamadi@pardisiau.ac.ir

کلمات کلیدی:جوشش، تیوب عمودی بویلر، مدلسازی عددی، شار حرارتی ثابت، کسر حجمی

Abstract

In this study, a 2-D simulation of forced boiling of a fluid flow inside a boiler raiser. The fluid enters the raisin in saturated state. The raiser is under constant heat flux. The simulated 2-D two-phase flow simulation process is presented in a vertical tube with a constant flux boundary condition. To simulate the application of Fluent version 18, and also to validate the results, the results were compared with the experimental results. The simulation error rate was about 3%. The effect of thermal flux intensity on the heat transfer coefficient of heat transfer and the wall temperature and fluid pressure were investigated. The simulation results showed that with the thermal thermochemistry increasing in the tube wall, the heat transfer coefficient h has a downward trend. This is due to an increase in the volume fraction of water vapor and, consequently, to a decrease in the thermal conductivity of the vapor relative to the fluid in the liquid water. Also, in higher thermal flasks, the heat transfer coefficient h (due to rapid fluctuations in the thermo physical properties of the liquid and vapor fluid, as well as the emergence of the dynamic instability of vortices) increases.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.4.8]

۱- مقدمه

امروزه تکنولوژی در زمینه نیروگاه های حرارتی و واحدهای تولیدِ انرژی موجود در صنعت نفت با سرعت زیاد رو به گسترش است. افزایش راندمان و کاربری بویلرهای صنعتی سبب کاهش مصرف انرژی و صرفه جویی در هزینه و همچنین کاهش انتشار گاز کربنیک میگردد. بویلرهای صنعتی یکی از مهمترین تجهیزات تولید انرژی، در واحدهای صنعتی می‌باشند. انجام پژوهش های تجربی در این حوزه گرچه مفید و ارزشمند هستند ولیکن به دلایلی مانند زمانبر بودن و هزینه بر بودن کمتر مورد استقبال قرار می گیرند و عموما در مراحل نهایی به پژوهش های تجربی می پردازند.

در مراحل ابتدایی جهت کاهش هزینه ها و کـاهش زمـان بهتـرین روش استفاده از تکنیک های دینامیک سیالات محاسباتی است. به کمک تکنیک های دینامیک سیالات محاسباتی محققان قادرند میدان دما و کسر جرمـی بخار وتوزیع دما و ضریب انتقال حرارت را با دقت مطلـوبی محاسـبه کننـد. بنابراین به کمک شبیه سازی تا حد زیادی میتوان در امر طراحـی و بهینـه سازی موفق عمل نمود و از تعداد آزمایشات تجربی کاست کـه همـین امـر سبب کاهش هزینه و کاهش زمان طراحی می گردد.

جوشش یکی از مهمترین پدیده‌های تغییر فاز و یکی از اصلی ترین زمینه‌های دانش انتقال حرارت و جرم است و کاربردهای فراوانی برای این علم در صنعت و فناوری وجود دارد. کاربردهای صنعتی گوناگونی مطابق شکل زیر با پدیده جوشش سر و کار دارند.

از آن جمله می‌بتوان به کاربرد آنها در نیروگاه‌های حرارتی، سیکل‌های قدرت و تبریدف طراحی دیگ‌های بخار، کندانسورها، اپراتورها، مبدل‌ها و پمپ‌های حرارتی و رآکتورهای هسته‌ای اشاره کرد.

هدف اصلی این پژوهش شبیه سازی جریان مغشوش در پدیده جوشش در داخل تیوب یک بویلر صنعتی می‌باشد. از جمله اهدف فرعی این پژوهش بررسی اثر شار حرارتی بر الگوهای جریان و ضریب انتقال حرارت دیواره تیوب است. هدف کاربردی این پژوهش ارائه یک مدل و شبیه سازی دقیق به مهندسین مکانیک به کمک نرم افزار فلوئنت جهت استفاده در صنعت نیروگاهی و صنایع نفت گاز میباشد.

در مرحله کنونی، روش های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به منظور بررسی جریان جوش و مکانیزم های درگیر با آن در سال های اخیر، به وفور استفاده شده است. جاد و هوانگ [۱] مدل پیشنهادی برای پیش بینی گرمایش جوش که شامل تبخیر ، انتقال حرارت طبیعی بود پیشنهاد کردند. آنها دریافتند که انتقال گرمایی تبخیر نسبت قابل توجهی از کل انتقال حرارت است.کاربرد مدل های مختلف CFD برای شبیه سازی جوش اجباری توسط تعدادی از محققان مورد بررسی قرار گرفته است[۲-۶] این محققان از مدل های مختلف دوفازی با رویکردهای مختلف جهت شبیه سازی استفاده کرده اند. در این پژوهش ها معادلات بقا برای جرم، مومنتوم و انرژی برای هر فاز حل شده علاوه بر این معادلات ازیک سری روابط تجربی کمکی نیز جهت شبیه سازی استفاده نموده اند. کپرپ و همکاران[۷] ثابت کرد که مدل جوش RPI قادر به محاسبه کسر حجمی بخار به طور میانگین در مقاطع مختلف جوشش سیال در لوله عمودی میباشد و نتایج آنها با نتایج تجربی تطابق خوبی دارد.

ریورا و ژیکاله [۸] به بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی جریان مخلوط بالاروندهٔ آب – لیتیم برماید در یک لولهٔ قائم گرمادیدهٔ یکنواخت پرداختند و برای ضرایب انتقال حرارت جوشش اشباع هسته ای،داده های آزمایشگاهی ارزشمندی ارائه کردند.

اوهایب و همکاران [۹] به بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی جریان سیال R-134a در یک لولهٔ مدور قائم از جنس کوارتز که با گرمکن، حرارتی یکنواخت به سطح آن داده می شد .پرداختند .هدف اصلی آنها شبیه سازی جوشش اشباع و مادون سرد جریان مبرّد بالارونده در لولهٔ قائم به واسطهٔ جریان بخار پرفشاری که خارج از لوله جریان داشت، بوده است.

استوانوویچ و همکاران [۱۰] ، یک مدل چند سیالی تک بعدی را به منظور پیش بینی الگوهای جریان دوفازی در لوله های قائم ارائه کردند . مدل ارائه شده بر مبنای پایستگی جرم، انرژی و ممنتوم استوار بوده و برای هر جریان سیالی که دارای الگوهای جریان دوفازی است قابلیت استفاده دارد.

کوهی کمالی [۱۱] به شبیه سازی عددی چگالش جابجایی اجباری در یک سیلندر قائم پرداخت. شبیه سازی میعان با استفاده از مدل حجم سیال انجام شد و تأثیر پارامترهایی از قبیل قطر هیدرولیکی، تغییرات سرعت سیال، عددی رینولدز و اختلاف دمای دیواره و دمای اشباع سیال بر ضریب انتقال حرارت بررسی شد.

اوزاوا و همکاران[۱۲] طیف وسیعی از رفتارهای حرارتی اعم از الگوهای جوشش، انتقال حرارت، افت فشار و شار حرارتی بحرانی را در جریان جوشش CO2 در فشارهای بالا برای یک میکروکانال افقی مورد بررسی و تحلیل عددی قرار دادند .متغیرهای مورد مطالعه، تغییرات قطر لوله، شار جرمی، شارحرارتی دیواره و دما و فشار اشباع سیال در نظر گرفته شد.

در جریان های داخل تیوب الگوهای مختلف جوششِ جابجایی اجباری وجود دارد در این پژوهش به بررسی ضریب انتقال حرارت دوفازی و همچنین مدل‌سازی عددی این مساله در یک تیوب عمودی پرداخته می‌شود بدین منظور هندسه جریان بصورت ۲ بعدی (متقارن) رسم میگردد سپس این هندسه شبکه بندی (مش بندی) می‌گردد. در نهایت در نرم افزار فلوئنت با انتخاب شرایط مرزیِ مناسب، مساله حل می‌گردد. قبل از ادامه‌ی شبیه سازی بررسی استقلال حل از شبکه و همچنین صحه سنجی نتایج انجام گرفت. در ادامه، شبیه سازی برای ۳ شار حرارتی انجام می‌گیرد. الگوهای جریان دو فازی برای هر سه حالت محاسبه میگردد. نتایج شبیه سازی بصورت کانتورکسر جرمی، کانتور فشار، کانتور سرعت سیال و ضریب انتقال حرارت جابجایی و دمای سطح لوله ارائه می گردد.

۲- معادلات حاکم

در این بخش مبانی نظری و معادلات حاکم بر شبیه سازی انتقال حرارت در یک بویلر به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی آورده شده است. در این پژوهش از روش مدل اغتشاش RNG K-epsilon برای شبیه سازی جریان مغشوش استفاده می‌شود در ادامه معادلات انتقال برای مدلε-k RNG ارائه شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \qquad (۲)$$

$$c_{2\varepsilon}^{*}=c_{2\varepsilon}+\frac{c_\mu \eta^3(1-\frac{\eta}{\eta_0})}{1+\beta\eta^3} \qquad (۳)$$

$$\eta=\frac{sk}{\varepsilon} \qquad (۴)$$

$$s=\left(2s_{ij}s_{ij}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (۵)$$

ثوابت مورد استفاده دراین مدل در جدول زیر ارائه شده است.

جدول(۱) ثوابت مورد استفاده در مدل توربلانس RNG k-ε

Constant for RNG k-ε							
Const	c_μ	σ_k	σ_ε	$c_{\varepsilon1}$	$c_{\varepsilon2}$	η_0	β
value	0.084	0.719	0.719	1.42	1.68	4.38	**0.012**

برای جریان تراکم ناپذیر معادله‌ی انرژی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\nabla.(\vec{V}(\rho E+P))=\nabla.(K_{eff}\nabla T)+S_{\Delta H} \qquad (۶)$$

که در آن، $S_{\Delta H}$ عبارت چشمه در اثر تبخیر می باشد.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.4.8]

۳- شبیه سازی

در این پژوهش شبیه سازی بر اساس یک جریان چندفازی صورت می‌گیرد. ساده‌ترین حالت جریان چندفازی، جریان ۲ فازی است که ۲ فاز از یک مادّه تشکیل شده باشند (مانند آب و بخارآب). در جریان ۲ فازی، فاز نخست قسمت اصلی حجم و یا سطح جریان را در بر می‌گیرد و فاز ۲ در فاز اصلی شناور میباشد. کسر حجمی یک فاز در واقع نسبت سطح یا حجم اشغال شده توسط هر فاز، به سطح یا حجم کل جریان سیّال که مجموع این کسرهای حجمی برای تمامی فازها برابر یک است.

تحقیق حاضر به شبیه‌سازی ۲ بعدی جوشش اجباری جریان سیّال درون رایزر یک بویلر می‌پردازد. سیال در حالت اشباع وارد رایزر می‌شود. رایزر تحت شار حرارتی ثابت قرار دارد. مراحل شبیه سازی جریان ۲ بعدی دوفازی مغشوش در درون یک لوله قائم با شرط مرزی شار ثابت در ادامه بصورت گام به گام ارائه شده است (جزییات هر مرحله در ادامه آورده شده است.). لازم بذکر است جهت شبیه سازی از نرم افزار فلوئنت ورژن ۱۸ استفاده شده است.

۳-۱- هندسه

هندسه مورد نظر با مشخصات ابعادی شعاع رایزر ۱۲.۵ میلی متر و طول رایزر ۲۵۰ میلی متر که با توجه به دو بعدی بودن مدل بصورت یک مستطیل در نرم افزار ساید ورک رسم شده است که در شکل ۱ مشخص می باشد .



شکل(۱) رسم هندسه رایزر مورد بررسی در نرم افزار متیا

۳-۲- شبکه بندی

اساس حل معادلات بقای جرم مومنتوم و انرژی و معادلات جریان ۲ فازی در نرم افزار فلوئنت، بر گسسته سازی ناحیه حل و استفاده از روش حجم کنترل است. در این راستا فضای داخل رایزرِ بویلر به تعداد سلولهای مشخص، تقسیم بندی می‌گردد. معادلات بیان شده در بالابرای هر حجم کنترل استخراج میگردد سپس این معادلات برای تمام سلول‌ها یک دستگاه معادلات جبری تشکیل می‌دهد که می بایست حل گردد. بنابراین ساخت شبکه‌ای از سلول‌ها، ضروری‌ترین قسمت یک شبیه سازی عددی است. در جدول (۲) تعداد تقسیم بندی هر ناحیه از هندسه به اختصار آورده شده است.

جدول(۲) مشخصات اندازه و تعداد شبکه در نواحی مختلف هندسه

Total quadrilateral cells	20000
2D pressure-outlet faces	50
2D axis faces	400
2D wall faces	50
2D mass-flow-inlet faces	50
2D interior faces	39550

مشخصات شبکه مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول(۳) مشخصات شبکه مورد استفاده در این پژوهش

Description	Value
Number of cells	20000
Type	quadrilateral cells
Minimum Orthogonal Quality	1
minimum face area (m^2)	1.500000e-04
maximum face area (m^2):	2.528284e-08
Maximum Aspect Ratio	9.64

۳-۳- شرایط مرزی

یکی از موارد حائز اهمیت در شبیه سازی به کمک تکنیک های دینامیک سیالات محاسباتی انتخاب شرایط مرزی مناسب (اعمال صحیح مقادیر متغیرهای هیدرودینامیکی و حرارتی در گره‌های مرزی) برای مساله است.. در این پژوهش شرایط مرزی برای فاز اول (آب مایع) وفاز دوم (بخار آب) در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۴) شرایط مرزی مورد استفاده (هیدرودینامیکی و حرارتی)

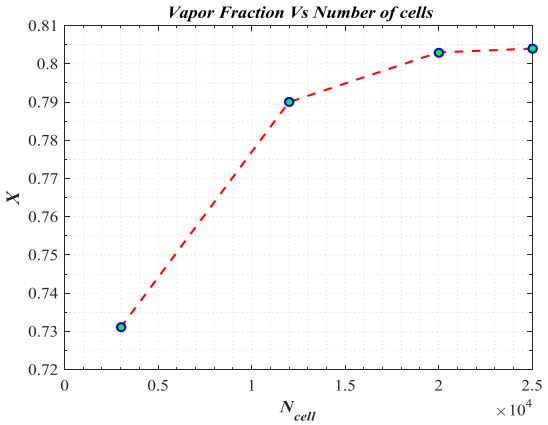
شرط مرزی	خروجی جریان از رایزر	ورودی جریان به رایزر	محور مرکزی	دیواره رایزر
نوع شرط مرزی	Pressure outlet	Inlet mass flow rate	axisymmetric	wall
هیدرودینامیکی (فاز۱)	Gauge pressure=0	0.19 ton/hr	$\frac{\partial}{\partial r} = 0$	V=0 m/s
هیدرودینامیکی(فاز۲)	Gauge pressure=0	0 ton/hr	$\frac{\partial}{\partial r} = 0$	V=0 m/s
حرارتی (فاز۱)	373 k	373 k	$\frac{\partial}{\partial r} = 0$	$q" = cte$
حرارتی(فاز۲)	373 k	373 k	$\frac{\partial}{\partial r} = 0$	$q" = cte$
	Turbulent length scale= 0.00170	Turbulent length scale= 0.00170		Roughness model=std
	Turbulent Intensity=5.2 %	Turbulent Intensity=5.2 %		Contact angle=45°

۳-۴- استقلال حل از شبکه

از جمله اقداماتی که لازم است در اجرای پروژه های CFD انجام

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.4.8]

گیرد بررسی استقلال از شبکه یا بـه عبـارتی (Mesh independency) است که بایستی برای هر گونه کد یـا شـبیه سـازی عـددی بررسـی شـود. استقلال از شبکه به بیان ساده عبارت است از بررسـی تعـداد شـبکه دامنـه حل و نمایش عدم وابستگی نتایج به این شبکه است. بـه عبـارتی، بایسـتی برای دامنه حل با تعداد شبکه های مختلـف حـل عـددی صـورت گیـرد و نشان داده شود که این حل برای تمام شبکه هـا جـوابی یکسـان و نزدیـک دارد و حل مورد نظر به تعداد شـبکه وابسـتگی نـدارد.برای یـک شـبکه بـا سلول بزرگ مقدارعددی خطاها بدلیل بـزرگ بـودن خطـای بـرش، بـزرگ بدست خواهد آمد و حل میدان جریان غیـر دقیـق خواهـد بـود همچنـین کوچک کردن بیش اندازه ی سلول سبب افـزایش تعـداد سـلول‌هـا شـده و خطای گرد کردن (round off) افزایش می‌یابد و حل میدان جریان غیـر دقیق بدست می آید. متغیر کسر حجمی بخـار در فاصـله ۵ سـانتی متـری مقطع ورودی جهت بررسی استقلال حل عددی از مش انتخـاب گردیـد.در شکل (۲) کسر حجمی بخار برحسب تعداد سلول ارائه شده است .



شکل(۲) بررسی استقلال حل از شبکه (۴ اندازه شبکه مختلف)

همانطور که مشاهده میکنید برای شبکه محاسباتی با تعـداد سـلول بزرگتر از ۲۰۰۰۰، میزان کسر حجمی بخار (x=۰/۸۰۳) مستقل از تعـداد سلّول است و با افزایش تعداد سلول نتایج تغیر نمیکند بنابراین هندسه‌ی با تعداد سلول ۲۰۰۰۰ بعنوان شبکه مناسب مورد پذیرش واقع شد.

۳-۵-تنظیمات رژیم جریان

مدل های زیادی برای جریان‌های مغشوش، تاکنون ارائه شده اسـت به دلیل ماهیت پیچیده ی جریان مغشوش، هیچکدام از مدلهای ارائه شـده قادر به تجزیه و تحلیل تمـامی جریانهـا را ندارنـد و معمـولا بایـد براسـاس شرایط جریان سیال و شکل هندسه،سرعت و دقت همگرایی یکـی از مـدل های مغشـوش را برگزیـد .در ایـن پـژوهش از مـدل مغشـوش k-ω SST جهت مدلسازی جریان استفاده شد به دلیـل وجـود گردابـه‌هـا و تغییـرات سـریع جریـان ایـن مـدل مناسـبتر از بقیـه مـدل هاسـت. در جـدول زیـر تنظیمات مربوط به مدل k-ω SST ارائه شده است.

جدول (۵) تنظیمات مدل k-ε (پیش فرض نرم افزار)

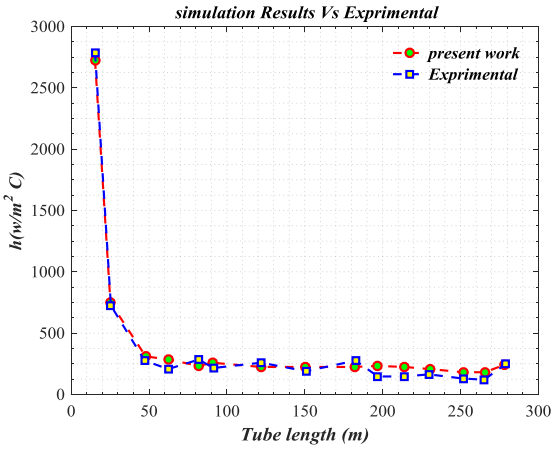
k-ω SST model	Value	k-ω SST model constant	Value
α_{∞}^{*}	**1**	**TKE (inner)**	1.176
α_{∞}	**0.52**	**TKE (outer)**	1
β_{∞}	**0.09**	**SDR (inner)**	2
a_1	**0.31**	**SDR(outer)**	1.168
β_i **inner**	**0.075**	**Dissipation pr number**	0.75
β_i **outer**	**0.0828**	**Energy prandle number**	0.85
Wall pr number	**0.85**	**Production limiter clip factor**	10

۳-۶- شرایط مرزی

یکی از موارد حائز اهمیت در شبیه سازی بـه کمـک تکنیـک هـای دینامیک سیالات محاسباتی انتخاب شرایط مرزی مناسـب (اعمـال صـحیح مقادیر متغیرهای هیدرودینامیکی و حرارتی در گره‌های مرزی) برای مساله است. در واقع شرایط هیـدرودینامیکی و حرارتـی مرزهـای سـیال بایـد بـه عنوان ورودی به نرم افزار داده شود تا مساله از نظـر محاسـباتی قابـل حـل باشد. اعمالِ شرایط مرزیِ مختلف، منجر به حل‌های متفـاوت خواهـد شـد. در این پژوهش شرایط مرزی برای فاز اول (آب مایع) وفـاز دوم (بخـار آب) در جدول زیر ارائه شده است. بـرای حـل مسـأله‌ی حاضـر از تئـوری مـدل اویلری و زیرمجموعه‌ی جوشش و بـرای مـدل‌سـازی جوشـش در نزدیکـی دیواره از زیرمجموعه‌ی جوشش آر- پی-آی[1]استفاده شده است.

۳-۷- صحه سنجی نتایج

یکی از اهداف مهم این تحقیق، اعتبارسنجی روش‌های حل عـددی موجود در نرم افزار برای مدل‌سازی جوشش(تبخیر) می‌باشد. مطابق شـکل زیر نتایج حل عددی پژوهش حاضر با داده‌های آزمایشـگاهی بدسـت آمـده مرجع [۱۳] مقایسه گردید. نتایج نشان داد تطابق خوبی میان نتـایج شـبیه سازیِ بدست آمده از این پژوهش و نتایج آزمایشـگاهی وجـود دارد. میـزان خطای شبیه سازی در ابتدای تیوب که حـداکثر ضـریب انتقـال حـرارت را دارد کمتر از ۳ درصد بدست آمد.



شکل(۲) اعتبار سنجی ومقایسه نتایج شبیه سازی با کار آزمایشگاهی

۴- نتایج

در ادامه نتایج مربوط به شبیه سازی میدان جریان برای فاز مـایع و بخار برای شار حرارتی $q = 7500\ w/m^2$ ارائه شده اسـت. ایـن نتـایج شامل میدان سرعت ، میدان فشار، دما و کسرحجمی بخار پروفایل سـرعت و کسر حجمی بخار و ... می‌باشد که در ادامـه ارائـه خواهـد .میـدان بـردار سرعت ۲ بعدیِ جریان در مقطع خروجی بـرای فـاز اول (مـایع) و فـاز دوم (بخار) برای شار حرارتی $q = 7500\ w/m^2$ ارائه شده است. همـانطور

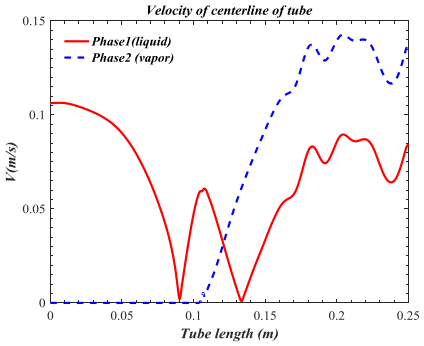
[1]RPI Boiling

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.4.8]

که انتظار میرفت سرعت فاز بخار اندکی بیشتر از سرعت فاز مایع است. پروفایل سرعت توربولانس در دیواره صفر سپس با فاصله گرفتن از دیواره ابتدا افزایش یافته سپس در نواحی مرکز تیوب به حداقل مقدار خود میرسد.

در شکل (۳) سرعت فاز مایع وبخار در امتداد محورتقارن لوله رسم شده است. مطابق شکل از اواسط لوله تا انتهای لوله سرعت فاز بخار از سرعت فازمایع بیشتر است.

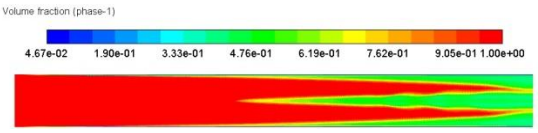
در یک افت فشار ثابت بین دو مقطع جریان برای فاز مایع و بخار سرعت فاز بخار بیشتر است این بجهت اینست که دانسیته بخار پایین تر است .



شکل(۳) سرعت در طول محور تقارن ($q=7500\ w/m^2$)

نمودارکانتور کسر حجمی مایع در طول رایزر به ترتیب در شکل(۴) رسم شده است. مطابق شکل در ابتدای لوله تقریبا بخارآبی تشکیل نشده است در امتداد طول لوله و دریافت شار حرارتی بیشتر، کسر حجمی فاز مایع کم میشود وبه کسر حجمی فاز بخار اضافه گردد.

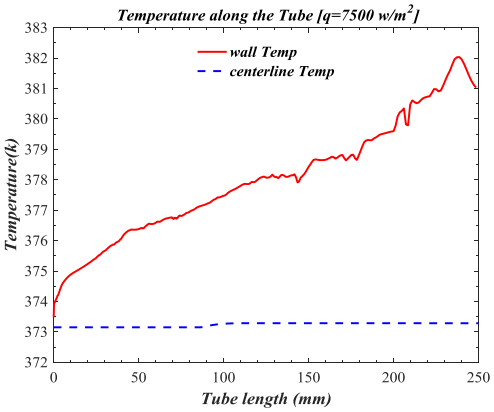
مقدار بخار رفته رفته در طول رایزر افزایش می‌یابد. مطابق شکل تولید بخار از نواحی جداره لوله و هسته‌ی میانی شروع میشود و در امتداد لوله این دو ناحیه آرام آرام به یکدیگر متصل می‌شود. الگوی جریان دو فازی در این ناحیه لخته‌ای می‌باشد.



شکل(۴) کسر حجمی مایع در صفحه میانی ($q=7500\ w/m^2$)

مطابق شکل(۴) در ۱۰۰ میلیمتر ابتداییِ رایزر، کسر حجمی بخار تولیدی، بر روی محور تقارن لوله صفر است. حرارت از جداره لوله وارد شده و بخش زیادی از آن در راستای شعاعی به سمت مرکز لوله پخش میگردد (دیفیوژن حرارت) بنابراین نواحی مرکزی نسبت به نواحی نزدیک جداره، دیرتر تحت تاثیر شار حرارتی جداره لوله قرار می‌گیرند. در واقع زمانیکه لایه مرزی حرارتی گسترش پیدا کرد و تمام فضای داخل تیوب را در بر گرفت بخش میانی لوله تحت تاثیر شار جداره قرار می‌گیرد و این دلیل تاخیر در تولید بخار در بخش میانی لوله است .

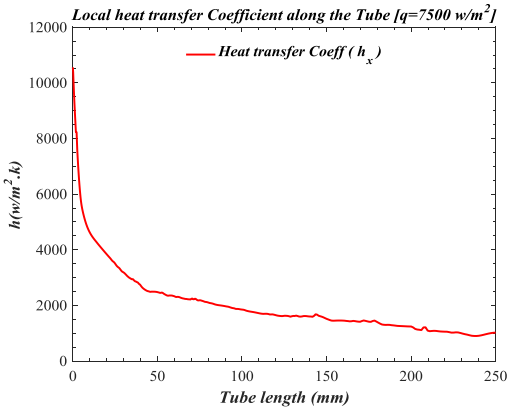
دمای جداره تیوب تحت شار $q=7500\ w/m^2$ در شکل (۵) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده میکنید دما در بخش ابتدایی لوله برابر است با دمای مایع اشباع ورودی (۳۷۳ k) و با دریافت شار حرارتی q دما رفته رفته در امتداد رایزر افزایش می‌یابد هر اندازه ضریب انتقال حرارت کلی h مقدار کمتری داشته باشد دمای جداره برای انتقال شار حرارت qافزایش بیشتری دارد.



شکل(۵) دمای سیال در امتداد رایزر در محور مرکزی لوله (Tc) و دمای جداره لوله ($q=7500\ w/m^2$) (Tw)

نمودار شکل(۶) ضریب انتقال حرارت محلی h را در امتداد رایزر نشان میدهد همانگونه که مشاهده می کنید با گسترش لایه مرزی حرارتی و افزایش ضخامت آن میزان ضریب انتقال حرارت h روند نزولی دارد در بخش ابتدایی لوله میزان ضریب انتقال حرارت h مقداری بزرگ دارد و به سرعت با شیب زیاد میزان این ضریب کاهش می‌یابد و به مقدار w/m^2 ۱۰۰۰ می‌رسد. با کاهش ضریب انتقال حرارت h دمای سطح لوله (Tw) افزایش می یابد تا مقدار شار حرارت عبوری همچنان ثابت بماند (h↓→Tw↑)

این پدیده به خوبی در شکل۵ نمایش داده شده است. در رابطه زیر Tw ، Tm ، hx ، q به ترتیب دمای سطح تیوب، دمای میانگین سیال ، ضریب انتقال حرارت و شار حرارتی میباشد.

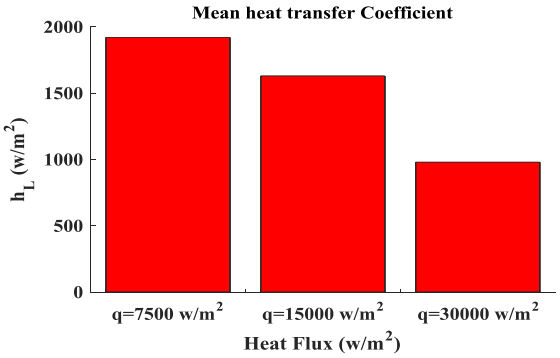


شکل(۶) ضریب انتقال حرارت h در امتداد رایزر ($q=7500\ w/m^2$)

شکل(۷) ضریب انتقال حرارت متوسط را در امتداد تیوب برای فلاکس حرارتی ۷۵۰۰-۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ وات بر متر مربع ارائه می‌کند. با افزایش فلاکس حرارتی در جداره تیوب، ضریب انتقال حرارت h روند نزولی دارد. دلیل این امر افزایش کسر حجمی بخارآب و بالطبع کاهش ضریب هدایت حرارتی رسانشی بخار نسبت به سیال آب می‌باشد. از طرفی دیگر در فلاکس حرارتی بالاتر، میزان تغیرات ضریب انتقال حرارت h (به علت نوسان سریع در خواص ترموفیزیکی سیال مایع و بخار و پیدایش

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.4.8]

ناپایداری دینامیکی گردابه‌ها) افزایش می‌یابد.



شکل(۷) ضریب انتقال حرارت متوسط در امتداد طول تیوب

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از مدل اویلری و زیرمجموعه‌ی جوشش و همچنین برای مدل‌سازی جوشش در نزدیکی دیواره زیرمجموعه‌ی جوشش RPI انتخاب شد. شبیه سازی برای سه شار حرارتی (q=7500-15000-30000 w/m^2) انجام گرفت نتایج بدست امده بصورت نمودار و کانتور ارائه گردید. بطور خلاصه نتایج بدست آمده از این پژوهش به شرح زیر است.

- در مرحله صحه سنجی، نتایج حل عددی با داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی داشته و میزان خطای شبیه سازی در ابتدای تیوب که حداکثر ضریب انتقال حرارت را دارد کمتر از ۳ درصد بدست آمد.
- مقدار سرعت سیال در ناحیه مرکزی لوله برای فاز مایع کمتر از فازبخار بدست آمد.
- همانطور که انتظار می‌رود فشار سیال در امتداد تیوب روند نزولی دارد دلیل افت فشار وجود اصطکاکی در جداره تیوب می‌باشد. بدلیل بالا بودن دانسیته مایع نسبت به بخار، ترم فشار دینامیک ($\frac{1}{2}\rho V^2$) برای مایع خیلی بزرگتر از بخارخواهد بود بنابراین برای سیال مایع ترم فشار دینامیک($\frac{1}{2}\rho V^2$) اثر بیشتری بر فشار کل خواهد داشت.
- نتایج نشان داد افت فشار در ناحیه خروجی با شیب بیشتری نسبت به ناحیه ورودی رخ داده است. به عبارت دیگر میزان افت فشار با افزایش کیفیت بخار روند کاهش سریعتری دارد.
- بررسی نتایج مربوط به کانتور کسر جرمی نشان داد در ابتدای لوله تقریبا بخارآبی تشکیل نشده است در امتداد طول لوله و با دریافت شار حرارتی بیشتر، کسر حجمی فاز مایع کم میشود وبه کسر حجمی فاز بخار اضافه گردد مقدار بخار رفته رفته در طول رایزر افزایش می‌یابد تولید بخار از نواحی جداره لوله و هسته‌ی میانی شروع میشود و در امتدا لوله این دو ناحیه آرام آرام به یکدیگر متصل می‌شود. الگوی جریان دو فازی در این ناحیه لخته‌ای می‌باشد.
- نتایج نشان داد با افزایش فلاکس حرارتی در جداره تیوب، ضریب انتقال حرارت h روند نزولی دارد. دلیل این امر افزایش کسر حجمی بخارآب و بالطبع کاهش ضریب هدایت حرارتی رسانشی بخار نسبت به سیال آب مایع می‌باشد. از طرفی دیگر در فلاکس حرارتی بالاتر، میزان تغیرات ضریب انتقال حرارت h به علت نوسان سریع در خواص ترموفیزیکی سیال مایع و بخار و همچنین پیدایش ناپایداری دینامیکی گردابه‌ها افزایش می‌یابد.
- نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با افزایش فلاکس حرارتی، میزان ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد برای ثابت ماندن شار، دمای سطح جداره افزایش می‌یابد.

مراجع

[1] Judd, R.L., Hwang, K.S., 1976. A comprehensive model for nucleate pool boiling heat transfer including microlayer evaporation. J. Heat Tran. 98, 623–629.

[2] Krepper, E., & Rzehak, R. (2011). CFD for subcooled flow boiling: Simulation of DEBORA experiments. Nuclear Engineering and Design, 241(9), 3851-3866.

[3] Kunkelmann, C., & Stephan, P. (2009). CFD simulation of boiling flows using the volume-of-fluid method within OpenFOAM. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 56(8), 631-646.

[4] Zhang, Xiang, et al. "Effects of interaction models on upward subcooled boiling flow in annulus." Progress in Nuclear Energy105 (2018): 61-75.

[5] Promtong, M., Cheung, S. C. P., Yeoh, G. H., Vahaji, S., & Tu, J. (2018). CFD investigation of sub-cooled boiling flow using a mechanistic wall heat partitioning approach with Wet-Steam properties. The Journal of Computational Multiphase Flows, 1757482X18791900.

[6] Pothukuchi, H., Kelm, S., Patnaik, B. S. V., Prasad, B. V. S. S. S., & Allelein, H. J. (2018). Numerical investigation of subcooled flow boiling in an annulus under the influence of eccentricity. Applied Thermal Engineering, 129, 1604-1617.

[7] Krepper, E., Končar, B., Egorov, Y., 2007. CFD modelling of subcooled boiling—concept, validation and application to fuel assembly design. Nucl. Eng. Des. 237, 716–731.

[8] W. Rivera, A. Xicale, "Heat transfer coefficients in two phase flow for the water/lithium bromide mixture used in solar absorption refrigeration systems", Solar energy materials and solar cells, Vol. 70, No. 3, pp. 309-320, 2001.

[9] W. Owhaib, B. Palm, C. Martín-Callizo, "Flow boiling visualization in a vertical circular minichannel at high vapor quality", Experimental thermal and fluid science, Vol. 30, No. 8, pp. 755-763, 2006.

[10] S. P. V.Stevanovic' , B.Maslovaric', "Multi-fluid model predictions of gas-liquid two-phase Flows in

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.4.8]

vertical tubes", FME Transactions, Vol. 35, pp. 173-181, 2007.
[11] R. Kouhikamali, "Numerical simulation and parametric study of forced convective condensation in cylindrical vertical channels in multiple effect desalination systems", Desalination, Vol. 254, No. 1, pp. 49-
57, 2010.
[12] M. Ozawa, T. Ami, H. Umekawa, "Forced flow boiling of carbon dioxide in horizontal mini-channel", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 50, No. 3, pp. 296-308, 2011.
[13] M. Mosaad, and K. Johannsen, "Experimental study of steady-state film boiling heat transfer of subcooled water flowing upwards in a vertical tube," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 2, no. 4, pp. 477-493, 1989.
[14] F. P. Incropera, A. S. Lavine, and D. P. DeWitt, Fundamentals of heat and mass transfer: John Wiley & Sons, 2011.
[15] Rouhani S. Z. and M. S. Sohal, "Two-phase flow patterns: a review of research results", Progress in Nuclear Energy, Vol. 11, No. 3, pp. 21~259, 1983.
[16] K. Gungor, R. Winterton, "A general correlation for flow boiling in tubes and annuli", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 29, No. 3, pp. 351-358, 1986.
[17] S. G. Kandlikar, "A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes", Journal of heat transfer, Vol. 112, No. 1, pp. 219-228, 1990.
[18] S. Saisorn, J. Kaew-On, S. Wongwises, "An experimental investigation of flow boiling heat transfer of R-134a in horizontal and vertical mini- channels", Experimental thermal and fluid science, Vol. 46, pp. 232-244, 2013.
[19] Release, A.F., 2016.16.2, ANSYS® Academic Research, Help System.*Fluent Theory and User's Guide*.
[20] Z. Shen, D. Yang, G. Chen, "Experimental investigation on heat transfer characteristics of smooth tube with downward flow", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 68, pp. 669-676, 2014.
[21] Z. Yang, X. Peng, P. Ye, "Numerical and experimental investigation of two phase flow during boiling in a coiled tube", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, No. 5, pp. 1003-1016, 2008.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.4.8]