



شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای میدان جریان در ریبویلر

عطاله ربیعی^{1*}، امیرحسین کمالی نیا²، کمال حداد³

1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

2- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

3- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 خرداد 1394

پذیرش: 28 تیر 1394

ارائه در سایت: 24 مرداد 1394

کلید واژگان:

کتل ریبویلر

دینامیک سیالات محاسباتی

جسم متخلخل

افت فشار

کسر خلا

چکیده

شبیه‌سازی و آنالیز جریان دوفازی عبوری از دسته لوله ریبویلرهای کتل و مولدهای بخار در راستای آنالیز ایمنی و طراحی، از اهمیت بسزایی برخوردار است. پیچیدگی بالای هندسی در تحلیل میدان جریان دسته لوله‌ها بر دشواری هر چه بیشتر تحلیل‌های عددی مرسوم افزوده است. یکی از راهکارهای موجود در راستای کاهش هزینه محاسبات استفاده از تئوری جسم متخلخل است که در این پژوهش به آن پرداخته شده است. در تحلیل معادلات حاکم بر جسم متخلخل از معادلات مرتبط با نیروی درگ و نیروی مقاوم ناشی از دیواره لوله‌های کتل ریبویلر بهره گرفته شده است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود، دو نوع آرایش مختلف در نظر گرفته شده است. در مطالعه حاضر هندسه موردنظر با توجه به وجود تقارن و یکنواختی چشمه گرمایی دسته لوله‌ها به صورت دو بعدی و متقارن در نظر گرفته شده است. مشاهده شد افت فشار ناشی از دسته لوله‌ها می‌تواند با دقت مناسبی نسبت به نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی شود. همچنین کسر حجمی بخار محاسبه شده در پژوهش حاضر با توجه به در نظر گرفتن شرایط مرزی خروجی متفاوت، در مقایسه با فعالیت‌های عددی مشابه تطبیق مناسب‌تری را نسبت به نتایج تجربی ارائه می‌کند. دیده می‌شود با افزایش توان حرارتی دسته لوله‌ها کسر حجمی بخار در ناحیه‌ی حرارتی ریبویلر افزایش پیدا می‌کند.

Simulation and prediction of reboiler flow field parameters

Ataollah Rabiee*, Amir Hossein Kamalinia, Kamal Haddad

Department of Mechanical Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran.

* P.O.B. 7144745618 Shiraz, Iran, rabiee@shirazu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 11 June 2015
Accepted 19 July 2015
Available Online 15 August 2015

Keywords:
Kettle Reboiler
CFD
Porous Media
Pressure Drop
Void Fraction

ABSTRACT

Simulation and analysis of two phase flow that crosses over tube bundles is crucial in safety analysis and design of kettle reboilers and steam generators. The geometry complexity of the tube bundle flow field increases the difficulty of the conventional numerical analysis. One of the methods to reduce the numerical calculations cost is to use the porous media theory instead of the complete tube bundle modeling. Drag and tube bundle resistance force equations have been used in the porous media analysis. Based on available experimental results, two tube bundle arrangements have been considered. Due to existence of symmetric geometry and uniform energy source over the tube bundle, the two dimensional symmetric models have been used as well. It was observed that the predicted pressure drop in this research has acceptable adaptation with the experimental results. Meanwhile, by considering different outlet boundary conditions, calculated void fraction is compared to the experimental results and showed better accuracy than similar CFD research. It was observed that the enhancement of the tube bundle thermal power increases the void fraction in the heating area of the reboiler.

1- مقدمه

دوفازی، جریان در فاصله میان دسته لوله و پوسته محفظه گردش پیدا می‌کند.

با توجه به اینکه مدل‌سازی و تحلیل ترموهیدرولیکی این نوع از مبدل‌های گرمایی اهمیت ویژه‌ای در بررسی ایمنی و عملکرد آن‌ها دارد مدل‌سازی‌ها و پژوهش‌های فراوانی پیرامون ریبویلرهای کتل عموماً با استفاده از مدل‌های یک بعدی و دو بعدی انجام گرفته است. ساده‌ترین روش در تحلیل این نوع از مبدل‌های حرارتی، مدل‌سازی یک بعدی ارائه شده در پژوهش‌های انجام گرفته در مراجع [1-4] می‌باشد. در این پژوهش‌ها فرض

ریبویلرها به صورت گسترده در صنایع فرایندی، از جمله صنایع شیمیایی، نیروگاهی و پتروشیمی با هدف تولید بخار استفاده می‌شوند. ریبویلرها انواع مختلفی دارند که ریبویلرهای کتل یکی از انواع پرکاربرد در میان ریبویلرهای متداول است. نحوه عملکرد این نوع از ریبویلرها که مبنای طراحی مولدهای بخار افقی قرار گرفته است به گونه‌ای است که سیال موجود در پوسته‌ی ریبویلر با جذب گرمای سیال گرم عبوری از لوله‌های حرارتی، بخار مورد نیاز را تولید خواهد کرد. در نتیجه با توجه به تفاوت موجود در چگالی مخلوط

Please cite this article using:

A. Rabiee, A. H. Kamalinia, K. Haddad, Simulation and prediction of reboiler flow field parameters, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 289-297, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

شده است که سیال مایع اشباع از قسمت پایین ریبویلر وارد محفظه کتل می‌شود و با بالا رفتن در طول دسته لوله تبدیل به بخار می‌شود. افت فشار دوفازی در این دسته لوله‌ها معادل با هد استاتیکی مایع در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه افت فشار دوفازی دارای مؤلفه‌های گرانشی، شتابی و اصطکاکی می‌باشد، نیاز به اصلاح افت فشار مایع و تعریف روابط و ضرایب جدیدی برای پیش‌بینی افت فشار جریان دوفازی در جریان روی دسته لوله‌ها احساس می‌شد. در این راستا اشراج و همکارانش [5]، دولتی و همکارانش [6]، و فینسترا و همکارانش [7] از پژوهشگران پیشرو در این زمینه بودند.

اشراج و همکارانش با بکارگیری پژوهش‌های آزمایشگاهی، افت فشارهای هیدروستاتیک، شتابی و اصطکاکی را در جریان دوفازی عبوری از دسته لوله‌ها مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش مقادیر کسر حجمی بخار و ضرایب جریان دوفازی گزارش شده است. دولتی و همکارانش اثر گام به قطر دسته لوله با آرایش مربعی را مورد مطالعه قرار دادند. اندازه‌گیری‌های کسر حجمی بخار برای جریان دوفازی آب و بخار عبوری از دسته لوله‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان دهنده‌ی تاثیر مستقیم نسبت گام به قطر دسته لوله بر افت فشار می‌باشد. روابط ارائه شده برای جریان دوفازی و کسر حجمی بخار با نتایج آزمایشگاهی موجود تطابق مناسبی را نشان می‌دهد. فینسترا و همکارانش مدل کسر حجمی بخار بهبود یافته‌ای را برای جریان دوفازی عبوری از دسته لوله‌های افقی مورد بررسی قرار دادند. این مدل بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده در جریان‌های دوفازی آب-بخار و مبرد R113 عبوری از دسته لوله‌ی افقی با نسبت گام به قطر مشخص می‌باشد. مدل ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی موجود تطابق مناسبی را نشان می‌دهد.

در همین زمینه مدل‌های قدیمی‌تری نیز وجود دارد که بر مبنای روابط مارتینلی، ضرایب افت فشار دوفازی را گزارش داده‌اند. از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های لاکهارت و همکارانش [8] و چیشولم و همکارانش [9] اشاره کرد. با ایجاد بسترهای مناسب در تحلیل‌های عددی و پیشرفت پژوهش‌های عددی در زمینه‌ی انتقال حرارت، مدل‌های عددی دو بعدی با در نظر گرفتن روابط مناسب و ساده‌سازی‌هایی، در زمینه‌های مبدل‌های حرارتی مورد بررسی قرار گرفت.

ادوارد و همکارانش [10] از پیشگامان تحلیل‌های ترموهیدرولیکی دوبعدی ریبویلرهای کتل می‌باشند. آن‌ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و در نظر گرفتن مفروضاتی پیرامون رژیم جریان کتل ریبویلرها، پارامترهای میدان جریان، اعم از افت فشار و کسر حجمی بخار را مورد مطالعه قرار دادند. ادوارد و همکارانش مدلی دو بعدی، با هدف پیش‌بینی کسر حجمی بخار ریبویلر کتل را ارائه دادند. در این پژوهش از ضریب درگ ثابت برای تمام رژیم‌های جریانی بهره گرفته شده است. در این پژوهش گزارش شده است که در شارهای گرمایی بالا، همگرایی در حل عددی با استفاده از معادلات بکار برده شده دارای مشکلاتی خواهد بود.

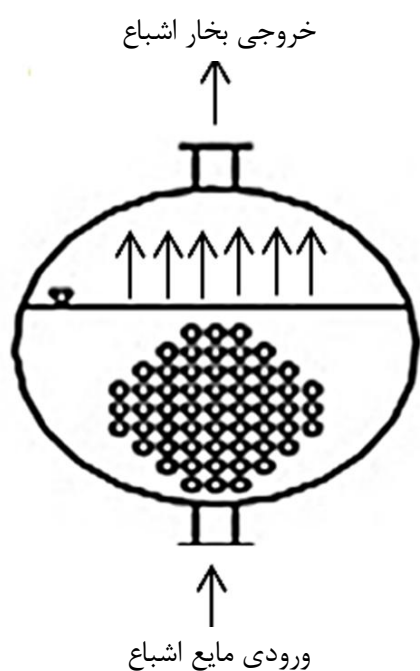
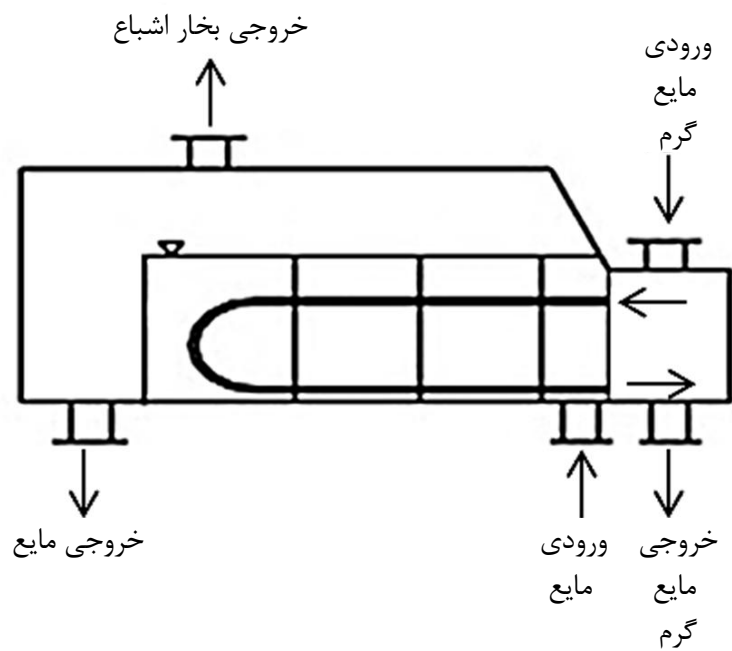
برنساید [11] یک مدل دوبعدی، پیرامون جریان دوفازی مخلوط مایع – بخار و R113 ارائه داد. در این پژوهش اثر شرایط مرزی مختلف بر جریان پیرامون دسته لوله‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده بر اساس پارامترهای فاز مایع مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پژوهش نشان داده شده است روابط جوشش جریان برای شارهای گرمایی مختلف می‌تواند منطبق بر نتایج یک بعدی بدست آمده باشد. در این پژوهش از مدل دوبعدی به عنوان راه حلی برای تعیین حداکثر شار گرمایی

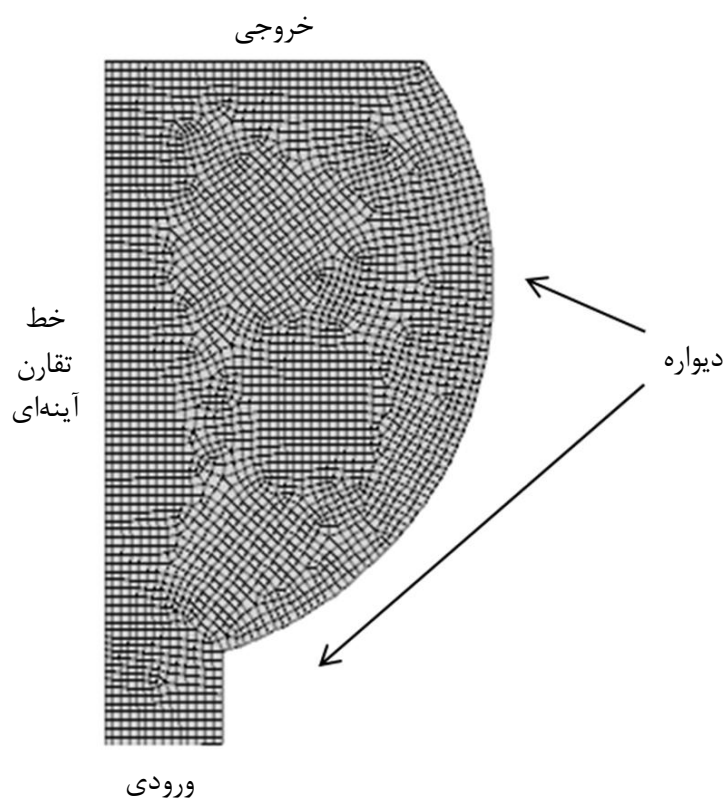
مجاز در شرایط مختلف نام برده شده است. پزو و همکارانش [12] مدل عددی دوبعدی را برای پیش‌بینی پارامترهای ترموهیدرولیکی دسته لوله‌های ریبویلرهای کتل ارائه داده است. در این مدل از R113 به عنوان سیال کاری بهره گرفته شده است. روابط مرزی دوفازی ارائه شده در این پژوهش را می‌توان با جزئیات بیشتر در پژوهش‌های سیموویچ و همکارانش [13] مشاهده کرد. در این پژوهش از روابط حاکم بر جسم متخلخل استفاده شده است. کسر حجمی بخار بدست آمده در این شبیه‌سازی تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. پزو و همکارانش [14] در مطالعه دیگری به بررسی مدل‌های مختلف جریان دوفازی شامل مدل دوفازی مخلوط¹ در دیدگاه اوپلرین پرداخته است. در این پژوهش نشان داده شده است که مدل دوفازی مورد نظر در دیدگاه اوپلرین با استفاده از مدل درگ سیموویچ نسبت به مدل مخلوط با استفاده از مدل درگ شیلر مقادیر کسر حجمی بخار را نسبت به مقدار آزمایشگاهی با دقت مناسب‌تری پیش‌بینی می‌کند. مک‌نیل و همکارانش [15] با هدف ایجاد مدلی دو بعدی برای شبیه‌سازی ریبویلرهای کتل مدل تک فازی را بسط دادند و با بکار بردن روابط تجربی متفاوت برای رژیم‌های جریانی مختلف مقدار کسر حجمی بخار و افت فشار را برای ریبویلرهای کتل مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش نشان داده شده است که این مدل سازی با در نظر گرفتن R113 به عنوان سیال کاری قادر به پیش‌بینی مناسب کسر حجمی بخار با توجه به رژیم‌های جریانی متفاوت می‌باشد. روش به کار گرفته شده در این پژوهش در رژیم جریانی حبابی قابلیت پیش‌بینی مناسب نتایج آزمایشگاهی را دارند و برای رژیم‌های جریانی غیر حبابی باید از روابط بهبود یافته‌ای بهره برده شود. در این مدل‌سازی نوع شرط مرزی خروجی با هدف مطالعه جریان برگشتی مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج بدست آمده برای سه نوع جریان برگشتی با کسر حجمی بخار صفر، 0/5، 0/9 نشان می‌دهد که در شارهای گرمایی 10، 20، 30، 40 kW/m² جریان برگشتی با کیفیت بخار 0/9 بهترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در پژوهشی دیگر مک‌نیل و همکارانش [16] با بهبود روابط بدست آمده از پژوهش قبل و با در نظر گرفتن روابط تجربی و روابط آزمایشگاهی موجود در ESDU²، پیرامون افت فشار دسته لوله‌ها، معادلات مناسبی پیرامون درگ در فصل مشترک دو فاز در رژیم‌های جریانی متفاوت جریان دوفازی ارائه کردند. نتایج بدست آمده برای افت فشار و کسر حجمی بخار برای چهار شرایط مختلف با شارهای گرمایی 10، 20، 30 و 40 kW/m² با نتایج آزمایشگاهی موجود تطابق مناسبی را نشان می‌دهد. ماسلاواریچ و همکارانش [17] با استفاده از کد موجود و با بهره گرفتن از روابط درگ توسط سیموویچ و همکارانش [13] شبیه‌سازی عددی را به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انجام داده‌اند. در این مدل‌سازی از روابط حاکم بر جسم متخلخل استفاده شده است. افت فشار محاسبه شده بخوبی قابلیت پیش‌بینی این مدل را نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

با توجه به مرور پژوهش‌های انجام گرفته توسط محققان در زمینه پیش‌بینی پارامترهای جریان در عبور جریان دوفازی از دسته لوله‌ها مشخص است که تعیین روابط دوفازی و بخصوص درگ در فصل مشترک دو فاز از اهمیت بسزایی در پیش‌بینی دقیق افت فشار و کسر حجمی بخار جریان دوفازی در عبور از دسته لوله‌های افقی برخوردار است. رحمان و همکارانش [18] از اولین نفراتی بودند که نیروی درگ در فصل مشترک دو فاز را در

1- Mixture
2- Engineering Sciences Data Unit



شکل 1 شمای کلی ریبویلر کتل در دو نما



شکل 2 شرایط مرزی در تحلیل دو بعدی

آرایش مربعی مختلف در تحلیل استفاده شده است که در شکل 3 و جدول 1 مشخصات آن‌ها آورده شده است.

محاسبات خود مورد مطالعه قرار دادند. این معادلات با استفاده از داده‌های بدست آمده در آزمایش‌های انجام گرفته در رژیم‌های جریانی مختلف جریان دوفازی در عبور از دسته لوله‌های افقی بدست آمد. استوسیچ و همکارانش [19] در بررسی پارامترهای جریان بر جسم‌های پیچیده اعم از ریبویلرهای کتل و مولدهای بخار با فرض جسم متخلخل به جای دسته لوله‌های افقی برای رژیم‌های جریانی حبابی و چرن¹-آشفته به صورت مجزا، روابط درگ مختلفی در فصل مشترک دو فاز ارائه دادند. مک نیل و همکارانش [20] نیز با استفاده از آزمایش‌های انجام گرفته بر عبور جریان دوفازی از دسته لوله‌ها روابط متفاوتی را برای رژیم‌های جریانی متفاوت ارائه داده‌اند.

با توجه به مطالعات انجام گرفته دیده می‌شود فعالیت‌های نسبتاً کمی به کمک تئوری جسم متخلخل برای تحلیل ریبویلرهای کتل انجام گرفته است که در این تحقیق سعی شده با بهره‌گیری از دیدگاه تحلیل میدان جریان دوفازی به صورت اویلرین-اویلرین برای هر دو فاز و با بهره بردن از روابط موجود و در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب به کمک پژوهش‌های انجام گرفته، پیش‌بینی مناسبی از کسر حجمی بخار و افت فشار حاکم بر جریان در کتل ریبویلر با استفاده از کد محاسباتی دینامیک سیالات محاسباتی در دسترس موجود (فلوئنت) انجام گیرد. لازم به ذکر است که با توجه به داده‌های آزمایشگاهی موجود پیرامون کتل ریبویلر، دو آرایش مربعی متفاوت برای دسته لوله‌ها مدنظر قرار گرفته است. در ادامه به شرایط مرزی و معادلات حاکم بر میدان جریان اشاره می‌شود.

2- هندسه و شرایط مرزی

ریبویلرهای کتل به عنوان یکی از کارآمدترین ریبویلرهای موجود همواره هدف پژوهش‌های ترموهیدرولیکی قرار گرفته است. مهمترین مشخصه این نوع ریبویلر تولید بخار در حجم زیاد و تغییر فاز بدون تغییرات دمایی می‌باشد. دسته لوله‌های این ریبویلر از نوع U شکل می‌باشد که به صورت افقی در پوسته مبدل حرارتی قرار می‌گیرد. در قسمت ورودی، مایع در شرایط اشباع وارد محفظه می‌شود و بعد از دفع حرارت از دسته لوله‌ها به صورت بخار اشباع خارج می‌شود. از لحاظ عملکرد ترموهیدرولیکی می‌توان این نوع از ریبویلر را با مولدهای بخار افقی مقایسه کرد. شکل 1 شمایی از دو نمای مختلف از این نوع ریبویلرها را نشان می‌دهد.

دسته لوله‌ها شامل N لوله می‌باشند که گرمای یکنواخت q را به ناحیه‌ی سیال اعمال می‌کنند. لوله‌ها دارای قطر خارجی D و طول L می‌باشند. با توجه به اینکه مایع وارد شده در شرایط اشباع می‌باشد، نرخ جریان جرمی بخار تولید شده در دسته لوله‌ها می‌تواند به صورت رابطه (1) محاسبه شود:

$$M_g = \frac{N\pi DLq}{h_{fg}} \quad (1)$$

با توجه به اینکه نرخ جریان مایع اشباع ورودی مساوی با نرخ کلی تولید بخار در نظر گرفته شده است در نتیجه بزرگی نرخ جریان وارد شده از مرز پایین جریان می‌تواند با استفاده از همین رابطه محاسبه شود. شرط مرزی خروجی با توجه به مرجع [15] از نوع فشار خروجی با جریان برگشتی مخلوط مایع و بخار با کیفیت 90 درصد در نظر گرفته شده است. با توجه به یکنواخت بودن چشمه گرمایی در سطح دسته لوله‌ها تحلیل به صورت متقارن در نظر گرفته شده است و از شرط مرزی تقارن آینه‌ای در خط وسط ریبویلر بهره گرفته شده است. در شکل 2 شرایط مرزی نشان داده شده است.

در پژوهش انجام گرفته بر طبق نتایج آزمایشگاهی موجود از دو نوع

جدول 1 مشخصات آرایش‌های 1 و 2

آرایش 2	آرایش 1	
15.9mm	19mm	قطر لوله
23/85mm	25/4mm	گام دسته لوله
0/254m	0/368m	شعاع پیوسته‌ی ریبویلر
0/17m	0/21m	ارتفاع مایع از مرکز پوسته (b)
0/0714m	0/114m	فاصله‌ی مرکز دسته لوله از مرکز پوسته
75	241	تعداد لوله
مربعی	مربعی	آرایش لوله‌ها
مبرد R113	مبرد R113	سیال کاری

- دسته لوله‌های موجود در محفظه‌ی ریبویلر با استفاده از معادلات حاکم بر جسم متخلخل شبیه‌سازی شده است.
- میدان جریان بصورت پایا² تحلیل شده است.
- نیروی مقاوم ناشی از دسته لوله‌ها به صورت پیوسته در تمام ناحیه پخش شده است.
- معادلات حاکم بر جریان دسته لوله‌ها در شرایط آرام حل می‌شود. اثرات آشفتگی به صورت غیر مستقیم با توجه به ضرایب مقاوم ناشی از دسته لوله‌ها در معادلات حاکم بر جسم متخلخل در نظر گرفته شده است.
- در ناحیه خارج از دسته لوله‌ها از مدل آشفتگی k-ε بهره گرفته می‌شود.

3- معادلات حاکم

در مدل‌سازی میدان جریان از معادلات ناویر استوکس حاکم بر جریان دوفازی میدان جریان با توجه به فرضیات بیان شده، استفاده شده است. مدل‌سازی انجام گرفته بر اساس دیدگاه اویلرین-اویلرین انجام گرفته است. در این نوع مدل معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی به صورت جداگانه برای هر کدام از فازها در نظر گرفته می‌شوند. در حل عددی حاضر مجزا سازی دسته معادلات حاکم بر میدان جریان به کمک روش حجم محدود³ می‌باشد، در جفت شدگی معادلات سرعت و فشار از مدل کوپل ساده⁴ بهره گرفته شده است و در گسسته‌سازی معادله مومنتم نیز از مدل آپویند درجه دوم⁵ استفاده شده است.

با توجه به اینکه در این پژوهش از معادلات حاکم بر جسم متخلخل برای تحلیل پارامترهای میدان جریان بهره گرفته شده است معادلات سه گانه بقا می‌تواند به صورت روابط (2-4) بیان شود.

- معادله پیوستگی:

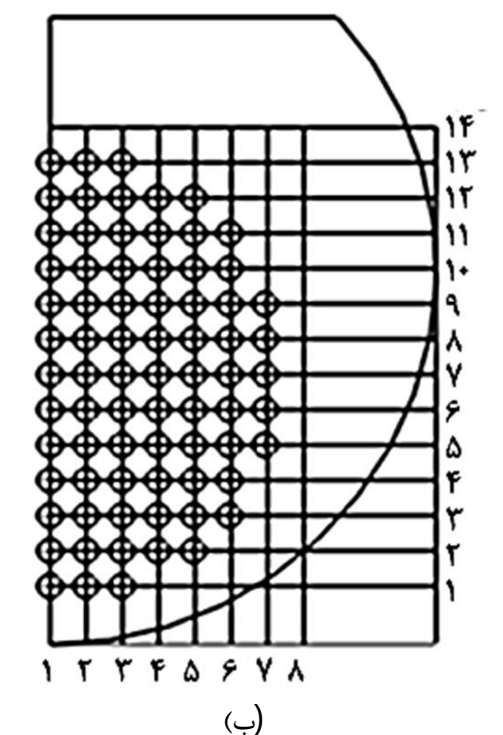
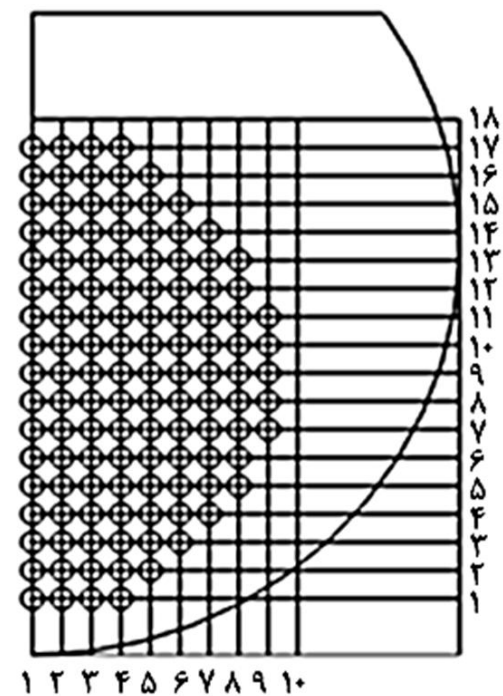
$$\frac{\partial(\gamma\alpha_q\rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma\alpha_q\rho_q\vec{v}_q) = \gamma \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + \gamma S_q \quad (2)$$

در معادله (1) ترم‌های سمت راست به ترتیب بیانگر جرم مبادله شده به فاز q در فصل مشترک دوفاز بوده و S_q نشان‌دهنده چشمه یا چاه فاز q موجود در میدان جریان می‌باشد.

- معادله مومنتم:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\gamma\alpha_q\rho_q\vec{v}_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma\alpha_q\rho_q\vec{v}_q\vec{v}_q) &= -\gamma\alpha_q\nabla p + \nabla \cdot (\gamma\vec{\tau}_q) + \gamma\alpha_q\rho_q\vec{g} \\ &+ \gamma \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq}\vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp}\vec{v}_{qp}) \\ &+ \gamma(\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q}) \\ &+ \alpha_q \left(\left(\frac{\mu}{\alpha} + \frac{C_2\rho}{2} |\vec{v}_q| \right) \vec{v}_q \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ترم آخر معادله (3) بیان‌کننده ترم چشمه⁶ مومنتم در جسم متخلخل است. این ترم شامل دو قسمت می‌باشد: ترم افت لزجت، و ترم افت لختی. پارامتر $1/a$ نشان‌دهنده مقدار نفوذپذیری، و پارامتر C_2 نشان‌دهنده ضریب



شکل 3 (الف) آرایش شماره 1 (ب) آرایش شماره 2

به صورت کلی در تحلیل میدان جریان مورد نظر مفروضات زیر در نظر گرفته شده است:

- شبیه‌سازی میدان جریان بصورت دو بعدی در نظر گرفته شده است.
- با توجه به توزیع یکنواخت گرما در دسته لوله‌ها شبیه‌سازی از نوع تقارن آینه‌ای¹ است.

1- Symmetric

2- Steady State
3- Finite Volume
4- Coupled Simple
5- Second Order Upwind
6- Source Term

حجمی بخار در ناحیه ریویلر کتل برخوردار است. در تحلیل حاضر از معادله درگ مرزی استوسیچ و همکارانش [19] استفاده شده است.

$$\vec{R}_{gf} = \frac{3}{4} \rho_f \frac{C_d}{D_b} |\vec{U}_g - \vec{U}_f| (\vec{U}_g - \vec{U}_f) \quad (12)$$

در پژوهش سیموویچ و همکارانش با توجه به رژیم‌های جریانی متفاوت دو معادله مختلف (13-16) برای ضریب درگ تعریف شده است:

جریان حبابی ($\phi \leq 0.3$):

$$C_d = 0.267 D_b \sqrt{\frac{g \Delta \rho}{\sigma} \left\{ \frac{1 + \sqrt{17.67 f(\phi)^6}}{18.67 f(\phi)} \right\}^2} \quad (13)$$

$$f(\phi) = (1 - \phi)^{1.5} \quad (14)$$

$$\phi = \frac{\alpha_g}{\alpha_f + \alpha_g} \quad (15)$$

جریان چرن ($\phi > 0.3$):

$$C_d = 1.487 D_b \sqrt{\frac{g \Delta \rho}{\sigma}} (1 - \phi)^3 (1 - 0.75 \phi)^2 \quad (16)$$

در معادلات مومنتم از نیروی کار مجازی صرفنظر شده است و ضریب نیروی برآ بر طبق پژوهش استوسیچ و همکارانش [19] برابر با 0/3 در نظر گرفته شده است.

3-3- تخلخل

با توجه به اینکه دسته لوله‌های تعبیه شده در ریویلرهای کتل دارای آرایش مربعی هستند می‌توان با توجه به مرجع [14] و در نظر گرفتن شکل 4 از معادلات (17) و (18) برای تعیین میزان درصد تخلخل بهره جست.

$$\gamma = 1 - \phi_3 \quad (17)$$

$$\phi_3 = \frac{\pi D^2}{4 P_x P_y} \quad (18)$$

4-3- انتقال جرم بین فازی

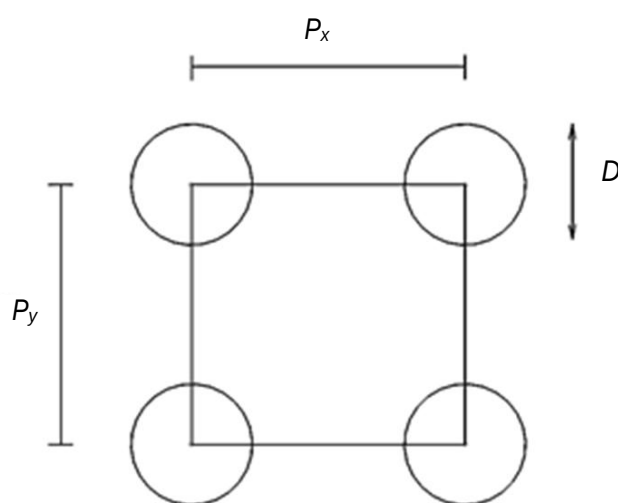
نرخ انتقال جرم میان فازهای مایع و گاز با استفاده از معادله تجربی گزارش شده توسط استوسیچ و همکارانش [19] و بر اساس انتالپی مایع (h) به صورت روابط (19،20) شبیه‌سازی شده است.

فرایند تبخیر:

$$\Gamma_e = \frac{\alpha_f \rho_f}{\tau_e} \frac{h - h_f}{h_g - h_f}, \quad h > h_f \quad (19)$$

فرایند میعان:

$$\Gamma_c = \frac{\alpha_f \rho_f}{\tau_c} \frac{h_f - h}{h_g - h_f}, \quad h < h_f \text{ و } \alpha_g > 0 \quad (20)$$



شکل 4 قطر و گام دسته لوله‌ها

لختی می‌باشد. هر دوی $1/a$ و C_2 تابعی از مقدار $(1 - \gamma)$ می‌باشند. لازم به ذکر است که مابقی ترم‌ها در بخش علائم اختصاری معرفی شده است.

- معادله بقای انرژی:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\gamma \alpha_q \rho_q h_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \alpha_q \rho_q \vec{v}_q h_q) \\ = -\gamma \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + (\gamma \vec{\tau}_q : \nabla \vec{v}_q) + \gamma S_q \\ - \nabla \cdot (\gamma \vec{q}_q) + \gamma \alpha_q \rho_q \vec{g} + Q_{sp} \\ + \gamma \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \end{aligned} \quad (4)$$

در معادله (4) ترم‌های سمت راست به ترتیب اثرات کار نیروی فشار ناشی از انقباض و انبساط حجم فاز q در بستر زمان، کار ناشی از ترم‌های تنش‌های لزجت، اثر ترم‌های چشمه یا چاه، انرژی گرمایی مبادله شده از طریق هدایت در فاز q ، کار ناشی از نیروی گرانش، Q_{pq} بیانگر میزان گرمای مبادله شده در فصل مشترک به فاز q ، میزان انرژی مبادله شده مابین دوفاز در فصل مشترک بر حسب انتالپی و نهایتاً ترم آخر، Q_{sp} ، نشاندهند انتقال حرارت از فاز جامد به فاز p می‌باشد.

3-1- نیروی مقاوم دسته لوله‌ها

بر طبق بررسی‌های انجام گرفته توسط سیموویچ و همکارانش [13] افت فشار ناشی از دسته تیوب‌ها بر اساس رابطه ارائه شده توسط راسوهین [21] بکار گرفته می‌شود. این رابطه بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته بر روی دسته لوله‌های افقی و با در نظر گرفتن ضریب دوفازی تعریف شده است. نمود معادلات (5) و (6) می‌تواند در ترم آخر معادله مومنتم (3) مشاهده شود.

فاز مایع:

$$\Delta p_f = Eu_1 \rho_f u_f^2 (1 - \phi) \quad (5)$$

فاز گاز:

$$\Delta p_g = Eu_2 \rho_g u_g^2 \phi \quad (6)$$

ضرایب موجود در معادلات افت فشار در آرایش مربعی به صورت روابط (7،8) تعریف می‌شوند:

$$Eu_k = 0.265 \left(\frac{\frac{P}{D} - 0.8}{\frac{P}{D} - 1} \right)^{2.5} zRe_k^m, \quad \frac{\frac{P}{D} - 0.8}{\frac{P}{D} - 1} \leq 1 \quad (7)$$

$$Eu_k = 0.265 \left(\frac{\frac{P}{D} - 0.8}{\frac{P}{D} - 1} \right)^2 zRe_k^m, \quad \frac{\frac{P}{D} - 0.8}{\frac{P}{D} - 1} > 1 \quad (8)$$

در معادلات فوق توان m با توجه به نسبت میان گام و قطر دسته لوله‌ها به صورت روابط (9،10) محاسبه می‌شود:

$$m = -0.133, \quad \frac{P}{D} \geq 1.24 \quad (9)$$

$$m = 0.867 \left(\frac{P}{1.24D} \right)^{0.7} - 1, \quad \frac{P}{D} < 1.24 \quad (10)$$

رابطه میان Eu و ضریب افت اصطکاکی (f) می‌تواند به صورت (11) بیان شود:

$$f = 2Eu \quad (11)$$

3-2- نیروی فصل مشترک مرزی¹

در معادلات مومنتم نیروی درگ از اهمیت بسزایی در پیش‌بینی درست کسر

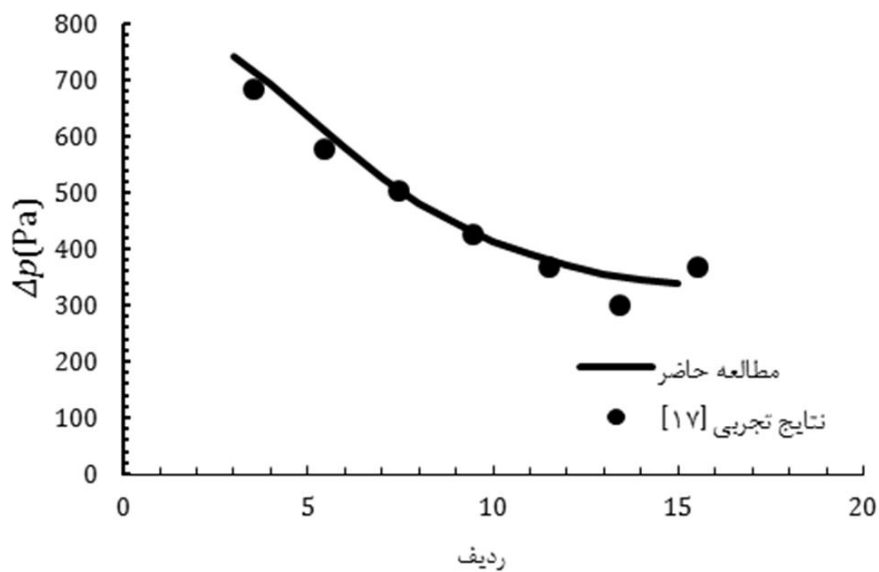
2- Churn-Turbulent
3- Porosity

1- Interfacial Force

4- نتایج

در طراحی مبدل‌های حرارتی افت فشار ناشی از لوله‌ها و کسر حجمی بخار در محدوده‌های مختلف از اهمیت بالایی در شیوه طراحی و آنالیزهای بعد از طراحی برخوردار است. در این پژوهش با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود دو آرایش مربعی مختلف در نظر گرفته شد.

با توجه به جدول 1 مقادیر بدست آمده برای افت فشار در آرایش شماره 1 با نتایج آزمایشگاهی موجود در مرجع [17] برای ستون شماره 1 مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های 5 تا 8 به ترتیب افت فشار ناشی از دسته لوله‌های ریبویلر در شارهای حرارتی 10، 20، 30، 40 kW/m^2 نشان می‌دهند.

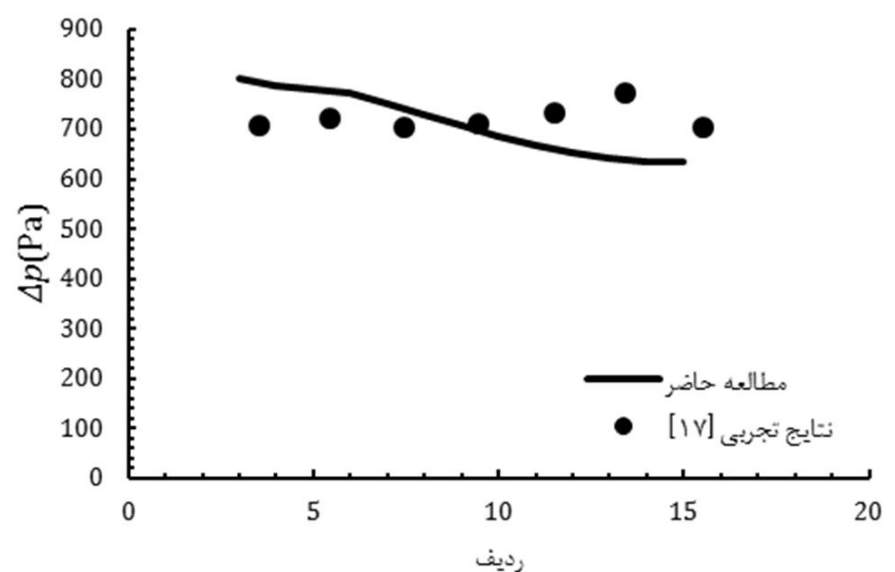


شکل 8 افت فشار در شار حرارتی 40kW/m^2

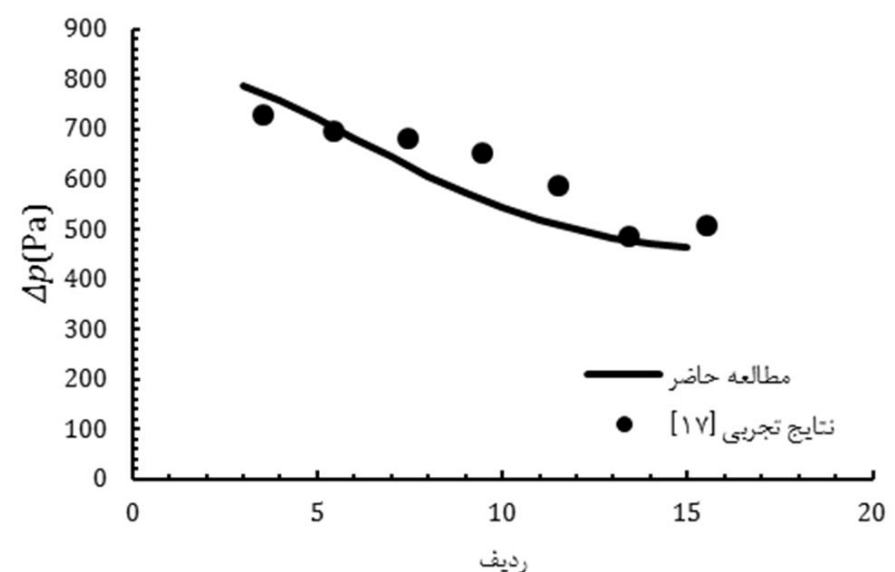
همان‌طور که ملاحظه می‌شود شکل‌های مرتبط با شارهای حرارتی 30 و 40 kW/m^2 به خوبی روند افت فشار را در دسته لوله افقی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع و بالا رفتن تعداد ردیف‌ها افت فشار به صورت منطقی کاهش پیدا می‌کند. در شارهای حرارتی 10 و 20 kW/m^2 خطای محاسباتی کوچکی میان افت فشار پیش‌بینی شده و نتایج تجربی ملاحظه می‌شود.

همواره پیش‌بینی پراکندگی کسر حجمی بخار در ناحیه حرارتی ریبویلر از اهداف پژوهشی محققان بوده است. با توجه به در دسترس بودن نتایج آزمایشگاهی کسر حجمی بخار در آرایش شماره 2 ریبویلر کتل، این نوع ریبویلر با هدف بررسی پراکندگی کسر حجمی بخار مورد نظر قرار گرفت. شکل‌های 9 و 10 به ترتیب نشان دهنده توزیع کانتور پراکندگی ریبویلر در اعمال شار حرارتی 10 و 30 kW/m^2 می‌باشد.

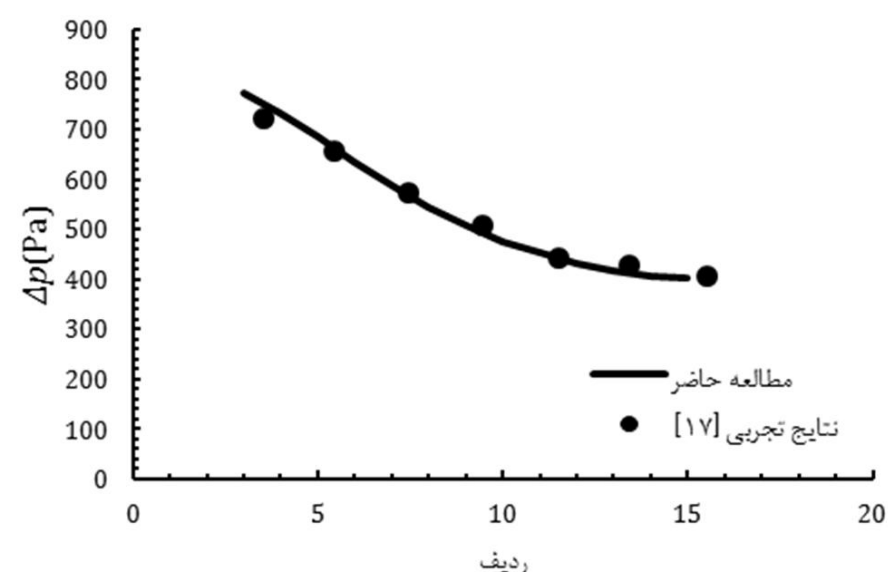
در شکل‌های 11 تا 14 مقادیر کسر حجمی بخار با نتایج تجربی و تحلیل عددی ارائه شده در پژوهش پزو و همکارانش [12] برای شار حرارتی 10kW/m^2 در موقعیت‌های مختلف دسته لوله‌های ریبویلر کتل با آرایش (2) مورد مقایسه قرار گرفته است. گردش جریان در ریبویلر ناشی از پایین تر بودن چگالی بخار نسبت به مایع باعث می‌شود که مقدار متوسط بخار موجود در میدان جریان با افزایش ردیف دسته لوله‌ها افزایش یابد. همان‌طور که دیده



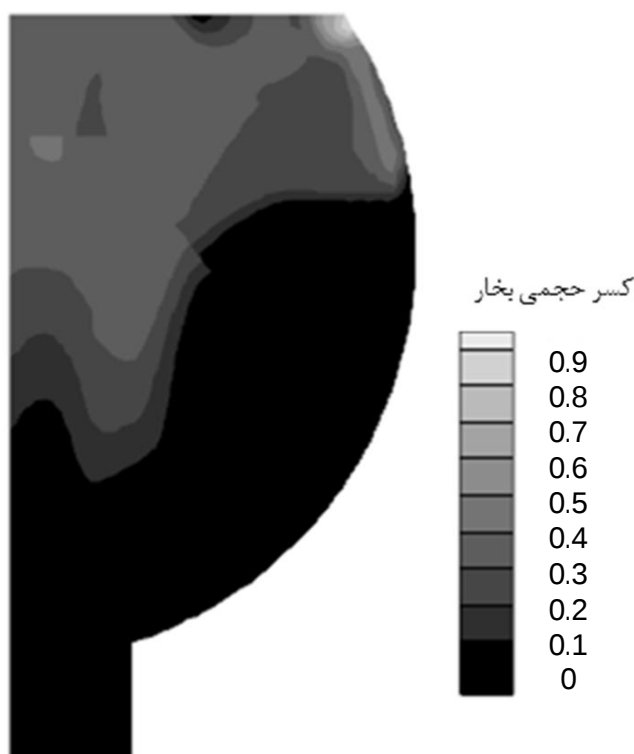
شکل 5 افت فشار در شار حرارتی 10kW/m^2



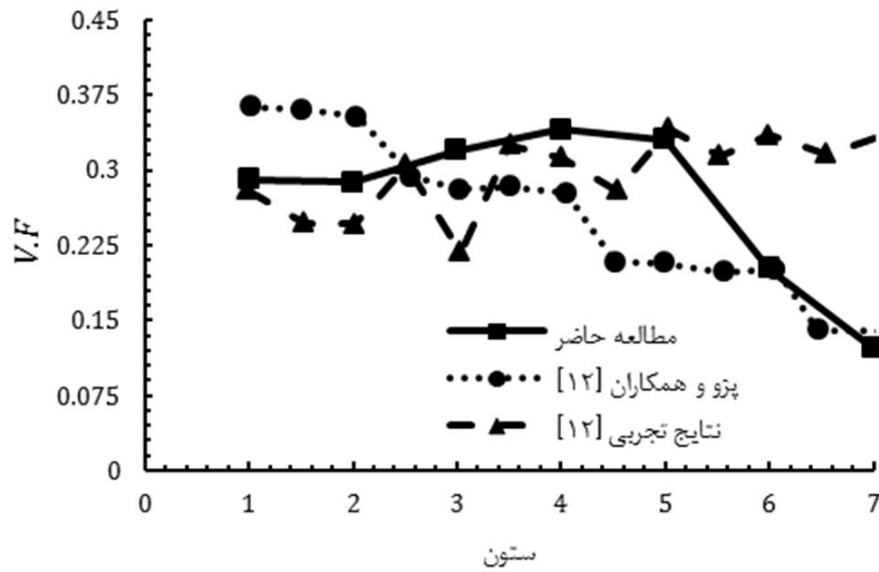
شکل 6 افت فشار در شار حرارتی 20kW/m^2



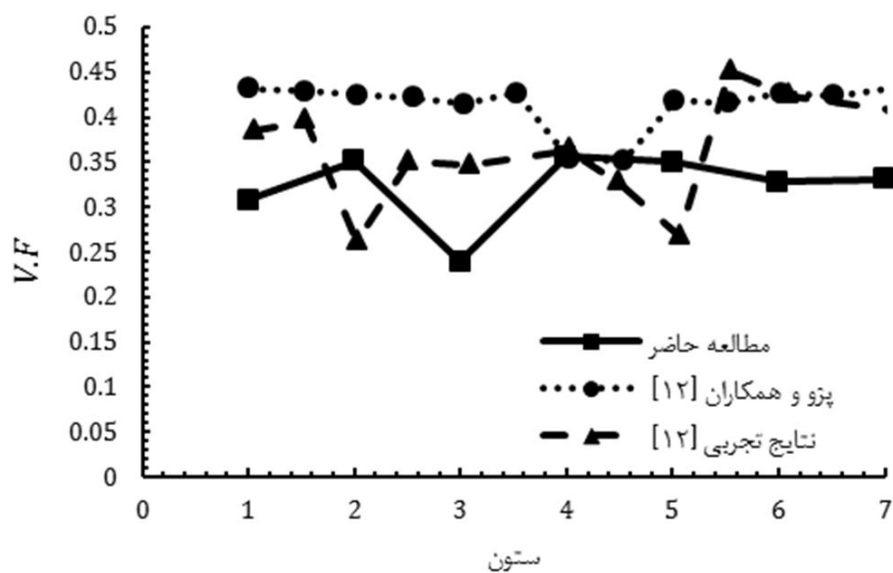
شکل 7 افت فشار در شار حرارتی 30kW/m^2



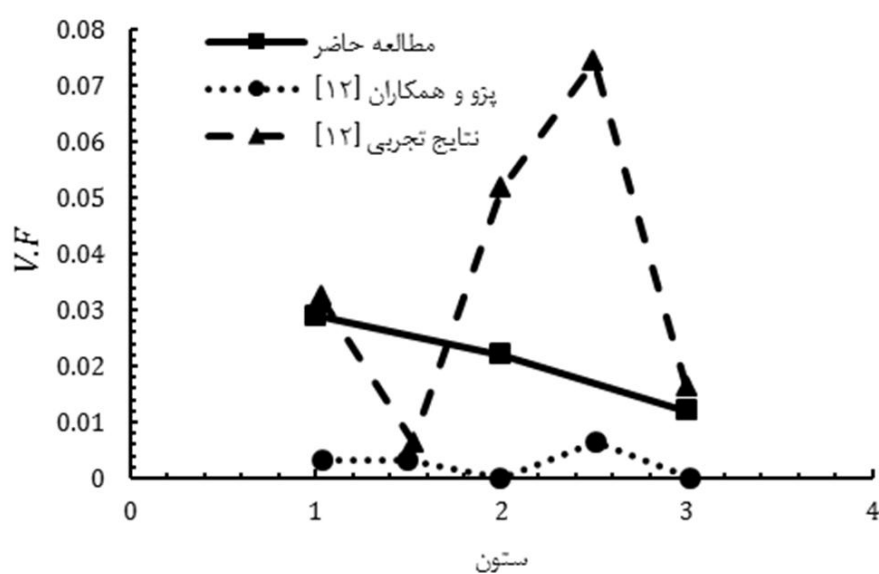
شکل 9 کانتور پراکندگی کسر حجمی بخار در شار حرارتی 10kW/m^2



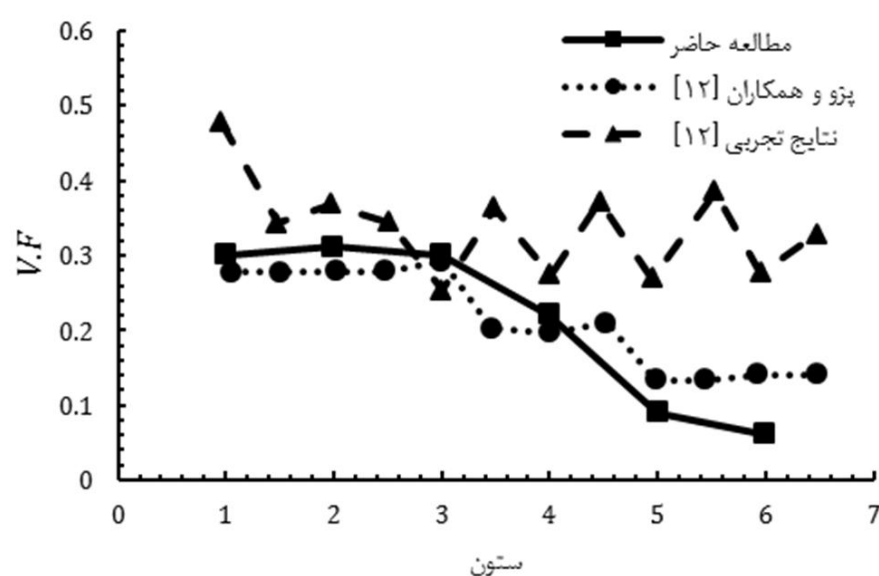
شکل 13 کسر حجمی بخار شار حرارتی 10 kW/m^2 در فاصله بین ردیف 8 و 9



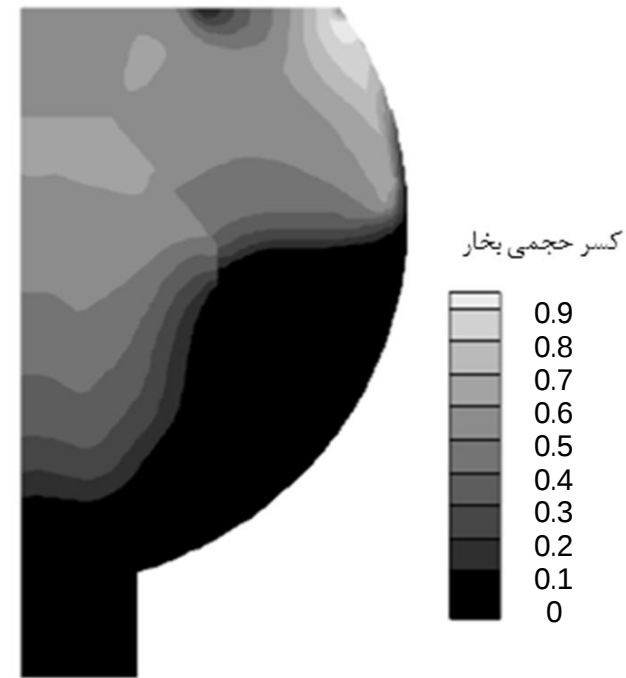
شکل 14 کسر حجمی بخار شار حرارتی 10 kW/m^2 در فاصله بین ردیف 13 و 14



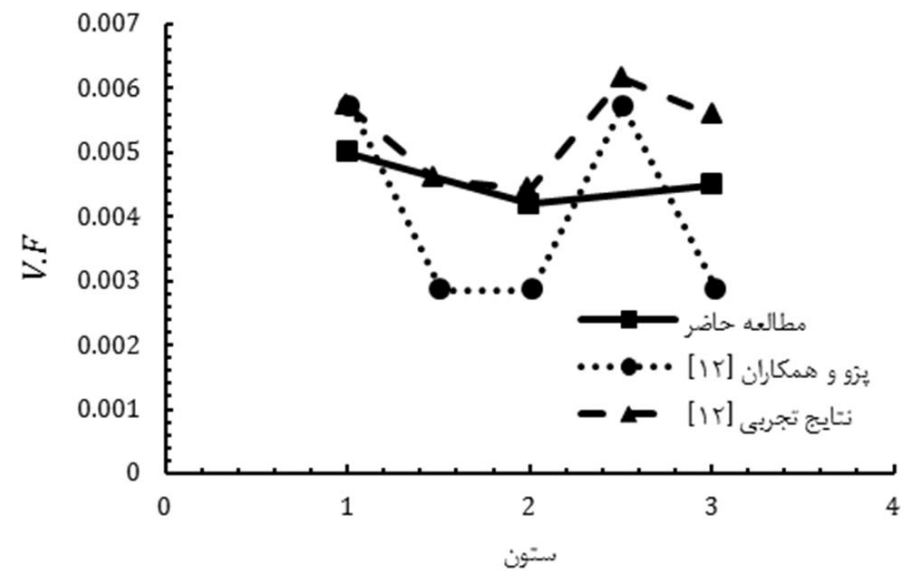
شکل 15 کسر حجمی بخار شار حرارتی 30 kW/m^2 در فاصله بین ردیف 1 و 2



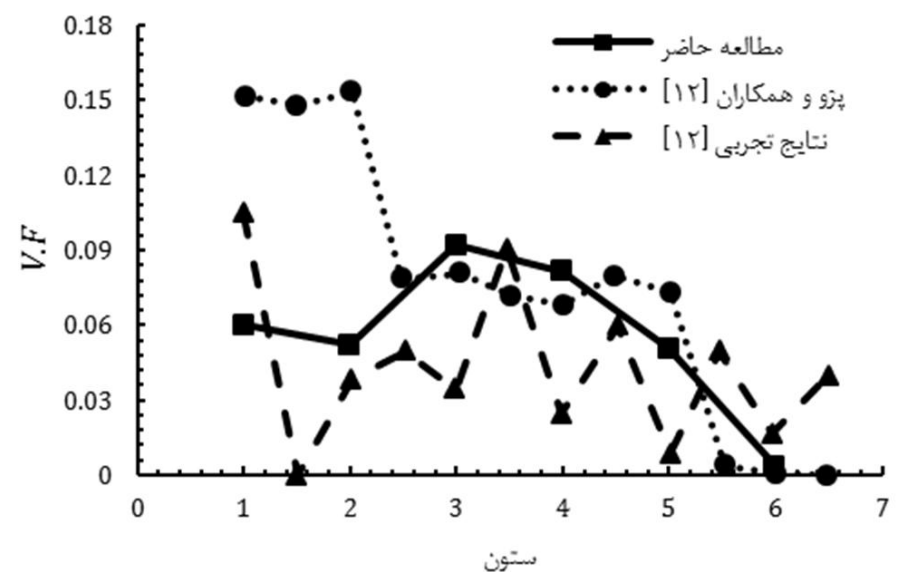
شکل 16 کسر حجمی بخار شار حرارتی 30 kW/m^2 در فاصله بین ردیف 4 و 5



شکل 10 کانتور پراکندگی کسر حجمی بخار در شار حرارتی 30 kW/m^2



شکل 11 کسر حجمی بخار شار حرارتی 10 kW/m^2 در فاصله بین ردیف 1 و 2



شکل 12 کسر حجمی بخار شار حرارتی 10 kW/m^2 در فاصله بین ردیف 4 و 5

می‌شود با بالا رفتن شماره ستون در دسته لوله‌های ریبویلر به دلیل کاهش تعداد دسته لوله‌های موجود در میدان جریان مقدار پراکندگی کسر حجمی بخار به صورت متوسط کاهش می‌یابد.

در شکل‌های 15 تا 18 مقادیر کسر حجمی بخار با نتایج تجربی و تحلیل عددی ارائه شده در پژوهش پزو و همکارانش [12] برای شار حرارتی 30 kW/m^2 در موقعیت‌های مختلف دسته لوله‌های ریبویلر کتل با ارایش (2)

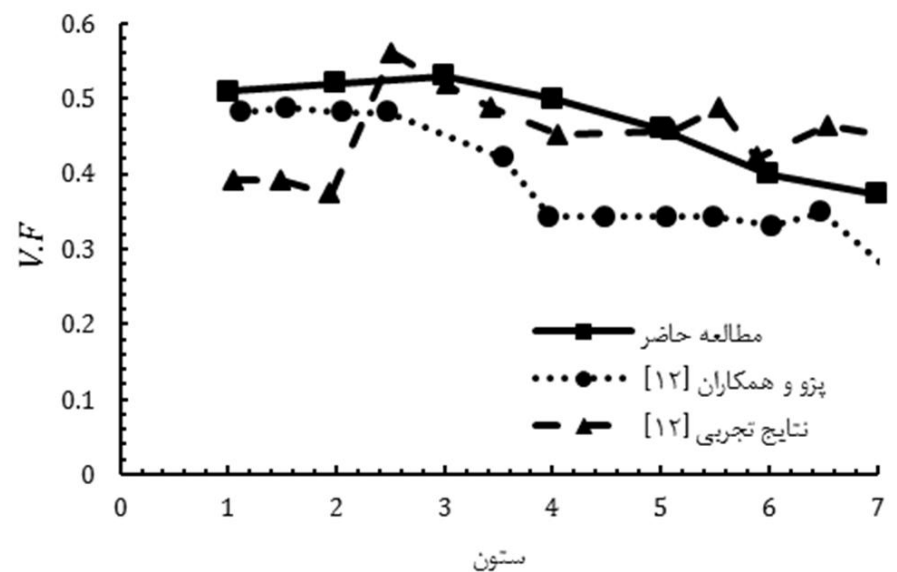
مربعی به کمک جسم متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش با توجه به در نظر گرفتن توان حرارتی یکنواخت به صورت تقارن آینه‌ای در نظر گرفته شد.

نتایج بدست آمده در تحلیل عددی موجود برای آرایش شماره 1 با مشخصات موجود در جدول 1، با نتایج افت فشار گزارش شده در مرجع [17] مورد مقایسه قرار گرفت. از نتایج حاصل برای چهار شار حرارتی مختلف 10، 20، 30 و 40 kW/m^2 مشاهده گردید که مدل‌سازی انجام گرفته به خوبی قابلیت پیش‌بینی افت فشار دسته لوله‌های ریبویلر کتل را با استفاده از معادلات حاکم بر جسم متخلخل در توان‌های حرارتی مختلف حرارتی را دارد.

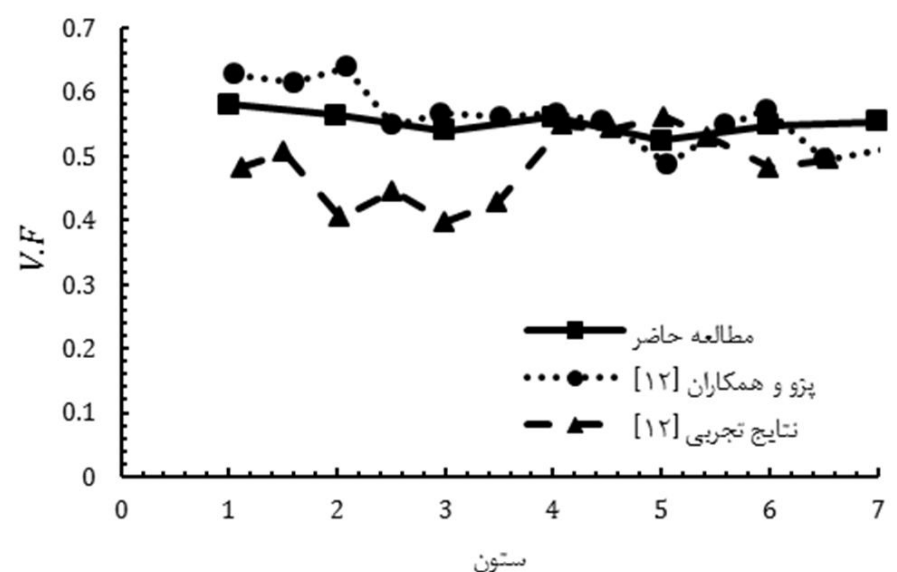
با در نظر گرفتن آرایش شماره 2 شبیه‌سازی انجام گرفته در کنار اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی گزارش شده در مرجع [12] مشاهده گردید که با در نظر گرفتن جریان برگشتی موجود در مرز خروجی به کمک توصیه‌های مرجع [15] بصورت مخلوط 10 درصد آب و 90 درصد بخار، تطبیق مناسب تری با داده‌های آزمایشگاهی بدست می‌آید. به نحوی که نتایج بدست آمده برای کسر حجمی برای هر کدام از توان‌های حرارتی 10 و 30 kW/m^2 در سه ردیف مختلف در کنار نتایج عددی توسط پزو و همکارانش [12] با دقت قابل قبول‌تری نسبت به داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌شود.

همان‌طور که در شکل‌های 5 تا 8 مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده به خوبی روند افت فشار را پیش‌بینی می‌کنند. بیشترین خطای محاسباتی در شار حرارتی 10 kW/m^2 به 10 درصد مقدار آزمایشگاهی می‌رسد اما در بیشتر نقاط مقدار خطا کمتر از 5 درصد است. بیشترین مقدار خطای محاسبات عددی در شار حرارتی 20 kW/m^2 به حدود 5 درصد و در بیشتر نقاط به کمتر از 3 درصد می‌رسد. بیشترین مقدار خطای محاسبات عددی در بیشتر نقاط شارهای حرارتی 30 و 40 kW/m^2 به کمتر از 2 درصد مقدار آزمایشگاهی می‌رسد.

با توجه به شکل‌های 11 تا 18 مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده به خوبی روند تغییرات کسر حجمی بخار در نقاط مختلف ریبویلر را نسبت به داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کنند. در پیش‌بینی کسر حجمی بخار با توجه به پژوهش‌های انجام گرفته توسط پزو و همکارانش [12] و مکنیل و همکارانش [15] و پژوهش‌های بسیار دیگر که نوع تحقیقاتشان در زمینه بررسی توزیع حجم بخار در فضای ریبویلرهای کتل و مولدهای بخار می‌باشد همواره پیش‌بینی نسبی و کیفی حجم بخار مورد نظر بوده است. خطاهای کمی موجود در پیش‌بینی مقادیر کسر حجمی بخار خود می‌تواند ناشی از ناپایداری‌های موجود و یا خطای تحلیل عددی ناشی از ساده‌سازی‌های انجام گرفته در تحلیل‌های میدان جریان اعم از دو بعدی در نظر گرفتن هندسه‌های سه بعدی یا متقارن در نظر گرفتن هندسه‌ها و غیره باشد. در نتیجه تحلیل عددی که بتواند روند مناسب‌تر، نزدیک‌تر و منطقی‌تری از توزیع بخار ارائه کند می‌تواند دارای برتری باشد. در تحلیل عددی حاضر با توجه به اصلاحات انجام گرفته در مرز خروجی و بکار بستن معادلات و نیروهای بین فازی اشاره شده، این مطلب مشهود است که در بیشتر نقاط مورد مطالعه نتایج بدست آمده نسبت به تحلیل عددی مشابه و بیشتر آزمایشگاهی بدست آمده دقت مناسب‌تری را نشان می‌دهد به طوری که در بیشتر نقاط به طور متوسط حدود 50 تا 80 درصد بهبودی نتایج در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.



شکل 17 کسر حجمی بخار شار حرارتی 30 kW/m^2 در فاصله بین ردیف 8 و 9



شکل 18 کسر حجمی بخار شار حرارتی 30 kW/m^2 در فاصله بین ردیف 13 و 14

مورد مقایسه قرار گرفته است. مشاهده می‌شود با بالا رفتن شار حرارتی اعمالی توسط دسته لوله‌های ریبویلر کتل متوسط کسر حجمی بخار در میدان جریان افزایش پیدا می‌کند. روند تغییرات کسر حجمی بخار در شار حرارتی 30 kW/m^2 به صورت متوسط مطابق با روند تغییرات در شار حرارتی 10 kW/m^2 می‌باشد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج بدست آمده نسبت به نتایج بدست آمده در تحلیل عددی ریبویلر کتل توسط پزو و همکارانش با نتایج تجربی تطابق بهتری را نشان می‌دهد که این مسأله می‌تواند نشان دهنده بهینه بودن شرایط مرزی خروجی باشد. در این پژوهش به جای استفاده از بخار به عنوان سیال برگشتی در مرز خروجی با توجه به پژوهش انجام گرفته توسط مکنیل و همکارانش [15] از مخلوط 90 درصد بخار و 10 درصد آب استفاده شده است.

خطای بدست آمده در نتایج عددی با توجه به فرض دو بعدی بودن ریبویلر کتل می‌تواند قابل توجیه باشد و نتایج بدست آمده می‌تواند به خوبی پراکندگی فاز بخار را در ناحیه‌ی حرارتی ریبویلر کتل پیش‌بینی کند.

با توجه به نتایج بدست آمده تحلیل حاضر می‌تواند مبنای تحلیل ترموهیدرولیکی دو بعدی و سه بعدی مولدهای بخار افقی و تحلیل سه بعدی ریبویلرهای کتل قرار گیرد.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به کمک دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی میدان جریان ریبویلرهای کتل با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود برای دو نوع آرایش

مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شبیه	Γ_e	نرخ انتقال جرم در تبخیر
سازی دسته لوله‌های ریبویلر، با فرض جسم متخلخل، می‌تواند علاوه بر کاهش	τ_c	زمان آسایش میعان
مدت زمان ایجاد یک شبکه مناسب در هندسه‌های پیچیده، زمان انجام	τ_e	زمان آسایش تبخیر
محاسبات تا رسیدن به جوابی مناسب‌تر را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش	γ	تخلخل
دهد.		

7- مراجع

- [1] T.W.C. Brisbane, I.D.R. Grant, P.B. Whalley, Prediction method for kettle reboiler performance, ASME paper 80-HT-42, 1980.
- [2] M.K. Jensen, Model for the re-circulating flow in a kettle reboiler, *Proceedings of AIChE*, New York, 1988.
- [3] P.B. Whalley, D. Butterworth, *A simple method for calculating the recirculating flow in vertical thermosiphon and kettle reboilers*, Proceedings of the 21st National Conference, vol. 27, ASME-HTD, pp. 47–53, 1983.
- [4] J.W. Palen, C.C. Yang, Circulating boiling model for analysis of kettle and internal reboiler performance, *Heat Exchangers for 2-Phase Applications*, vol. 27, ASME Publ. HTD, 1981, pp. 55–61, 1981.
- [5] D.S. Schrage, J.T. Hsu, M.K. Jensen, Two-phase pressure drop in vertical crossflow across a horizontal tube bundle, *AIChE J.* 34 (1), 1988, 107–115.
- [6] R. Dowlati, M. Kawaji, A.M.C. Chan, Pitch-to-diameter effect on two-phase flow across an in-line tube bundle, *AIChE J.* 36, pp. 765–772, 1990.
- [7] P.A. Feenstra, D.S. Weaver, R.L. Judd, Improved void fraction model for twophase cross-flow in horizontal tube bundles, *Int. J. Multiphase Flow* 26 (11) pp. 1851–1873, 2000.
- [8] R.W. Lockhart, R.C. Martinelli, Proposed correlation of data for isothermal twophase, two-component flow in pipes, *Chem. Eng. Prog.* 45, pp. 39–48.
- [9] D. Chisholm, A.D.K. Laird, Two-phase flow in rough tubes, *Trans. ASME* 80 pp. 276–286.
- [10] D.P. Edwards, M.K. Jensen, Two-Dimensional Numerical Model of Two-Phase Heat Transfer and Fluid Flow in a Kettle Reboiler, vol. 159, *American Society of Mechanical Engineers*, Heat Transfer Division, HTD (Publication), Minneapolis, MN, USA, pp. 9–16, 1991.
- [11] B.M. Burnside, K.M. Miller, D.A. McNeil, T. Bruce, Heat transfer coefficient distributions in an experimental kettle reboiler thin slice, *Chem. Eng. Res. Des.* 79 (4), pp. 445–452, 2001.
- [12] M. Pezo, V. Stevanovic, Z. Stevanovic, A two-dimensional model of the kettle reboiler shell side thermal-hydraulics, *Int. J. Heat Mass Transfer* 49 (7–8), pp. 1214–1224, 2006.
- [13] Z. Simovic, S. Ocokoljic, V. Stevanovic, Interfacial friction correlation for two phase flow across tube bundle, *Int. J. Multiphase Flow* 33, pp. 217–226, 2007.
- [14] M. Pezo, V. Stevanovic, Z. Stevanovic, Simulations of the kettle reboiler shell side thermal-hydraulics with different two-phase flow models, *thermal science*, Vol. 10, No. 2, pp. 127–140, 2007.
- [15] D.A. McNeil, K. Bamardouf, B.M. Burnside, Two-dimensional flow modelling of a thin slice kettle reboiler, *Int. J. Heat Mass Transfer* 54, pp. 1907–1923, 2011.
- [16] D.A. McNeil, K. Bamardouf, B.M. Burnside, M. Almeshaal, Investigation of flow phenomena in a kettle reboiler, *Int. J. Heat Mass Transfer* 53 pp. 836–848, 2010.
- [17] B. Maslovaric, V. D. Stevanovic, S. Milivojevic, numerical simulation of two-dimensional kettle reboiler shell side thermal-hydraulics with swell level and liquid mass inventory prediction, *Heat and Mass Transfer* 75, pp. 109–121, 2014.
- [18] F.H. Rahman, J.G. Gebbie, M.K. Jensen, An interfacial friction correlation for shell-side vertical two-phase cross-flow past horizontal in-line and staggered tube bundles, *Int. J. Multiphase Flow* 22, pp. 753–766, 1996.
- [19] Z.V. Stosic, V.D. Stevanovic, Advanced three-dimensional two-fluid porous media method for transient two-phase flow thermal-hydraulics in complex geometries, *Numer. Heat Transfer B: Fundam.* 41 (3–4), pp. 263–289, 2002.
- [20] D.A. McNeil, K. Bamardouf, B.M. Burnside, A one-fluid, two-dimensional flow simulation model for a kettle reboiler, *Int. J. Heat Mass Transfer* 53 pp. 825–835, 2010.
- [21] N.G. Rasohin, *Nuclear power plant steam generators*, Energoatomizdat Moskva 106, pp. 60–64, 1980.

6- فهرست علائم

C_2	ضریب اینرسی
C_d	ضریب درگ
D	قطر لوله
D_b	متوسط قطر حباب
F_{lift}	نیروی برآ
F_{VM}	نیروی کار مجازی
g	شتاب گرانش
h_f	آنتالپی مایع اشباع
h_g	آنتالپی بخار اشباع
h_{fg}	تفاوت آنتالپی فاز گاز و مایع
L	طول
$\dot{m}_{pq}$	انتقال جرم از فاز p به فاز q
M_g	نرخ جریان جرمی بخار
P	گام دسته لوله
q	شار حرارتی
Q_{sp}	انتقال حرارت از فاز جامد به فاز p
$\vec{R}_{pq}$	نیروی درگ بین فازی
S	چشمه
t	زمان
T	دما
U_f	سرعت مایع
U_g	سرعت بخار
علائم یونانی	
α	نفوذ پذیری
α_f	کسر حجمی مایع
α_g	کسر حجمی بخار
ρ_f	چگالی مایع
ρ_g	چگالی بخار
μ	لزجت دینامیکی
σ	کشش سطحی
Δp_f	افت فشار مایع ناشی از دسته لوله‌ها
Δp_g	افت فشار بخار ناشی از دسته لوله‌ها
Γ_c	نرخ انتقال جرم در میعان