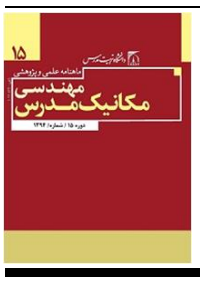
مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دوره 15، شماره 12، ص‌ص 303-310

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir



شبیه‌سازی و تحلیل جریان در مولد بخار افقی نیروگاه هسته‌ای بوشهر

عطاالله ربیعی[1*]، امیرحسین کمالی نیا[2]، کمال حداد[3]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز
2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز
* شیراز، صندوق پستی: 7193616548، rabiee@shirazu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 21 شهریور 1394
پذیرش: 23 آبان 1394
ارائه در سایت: 10 آذر 1394

کلید واژگان:
دینامیک سیالات محاسباتی
مولد بخار
جسم متخلخل
کسر حجمی بخار

چکیده

مولدهای بخار به عنوان رابط میان مدار اول و دوم نیروگاه‌های هسته‌ای آبی تحت فشار در تولید بخار لازم برای حرکت توربین و در نتیجه تولید برق از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشند. تحلیل ترموهیدرولیک با هدف ایجاد مدلی مناسب در پیش‌بینی پراکندگی بخار در فضای مولد بخار می‌تواند طراحی و بررسی این جزء مهم از نیروگاه را تحت تأثیر قرار دهد. در این گونه مدل‌سازی‌های ترموهیدرولیکی، شبیه‌سازی و آنالیز جریان دوفازی عبوری از دسته لوله‌ها در طراحی و آنالیزهای ایمنی از اهمیت بالایی در طراحی مولدهای بخار برخوردار است. پیچیدگی بالا در هندسه مولد بخار در کنار تعداد زیاد لوله‌ها بر دشواری هر چه بیشتر تحلیل‌های عددی می‌افزاید. در شبیه‌سازی حاضر به کمک دینامیک سیالات محاسباتی دسته لوله‌ها به عنوان جسم متخلخل مدل شده است و در تحلیل معادلات حاکم بر جسم متخلخل از معادلات مرتبط به نیروی درگ و نیروی مقاوم ناشی از دیواره‌ی دسته لوله‌های مولد بخار به کمک معادلات تجربی موجود در پژوهش های مشابه بهره گرفته شده است. در تحلیل حاضر انتقال حرارت از مدار اول به مدار دوم به صورت سه بعدی و با استفاده از چشمه‌ی انرژی در مولد بخار در نظر گرفته شده است. در کنار صحت‌سنجی مطالعه‌ی میدان جریان بکمک تئوری جسم متخلخل، کاهش دامنه محاسباتی با اعمال شرایط مرزی مناسب مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده گردید که کسر حجمی بخار بدست آمده با در نظر گرفتن شرایط مرزی خروجی مناسب در مقایسه با فعالیت‌های عددی مشابه تطبیق مناسبی را نسبت به نتایج تجربی ارائه می‌نماید.

Simulation and analysis of bushehr nuclear power plant steam generator

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 12 September 2015
Accepted 14 November 2015
Available Online 01 December 2015

Keywords:
Computational Fluid Dynamics
Steam Generator
Porous Media
Volume Fraction

ABSTRACT

Steam generators as an interface between first and second loop of light water nuclear power plants is very important in design and safety analysis. Thermo hydraulic analysis can affect the design and operation of a horizontal steam generator using prediction of vapor distribution. In this kind of thermo hydraulic analysis, simulation and study of the tube bundles is crucial in design and safety study of the steam generator two phase flow field. In this research, due to high complexity of the numerical simulation, the tube bundles have been assumed as the porous media. Two phase flow field correlations such as interfacial drag force and tube bundle resistance force have been obtained by the equations that have been reported in similar computational fluid dynamic researches. The heat transfer from primary side fluid to the secondary is calculated three-dimensionally for each iteration and is supplied as a heat source on the secondary flow field calculation. Besides porous media flow field validation, decrease of computational domain has been studied using appropriate boundary conditions. It was observed that the computed void fraction compared to the experimental results shows better accuracy than similar computational fluid dynamic investigations.

1- مقدمه

همواره تحلیل و بررسی مولد بخار در نیروگاه‌های هسته‌ای از موضوع‌های جذاب و پراهمیت در تحقیقات و مطالعات پیرامون نیروگاه‌های نوع PWR به شمار می‌رود. برای این اهمیت دلایل بیشماری ذکر شده است که می‌توان کلیت آن‌ها را در دو موضوع زیر تقسیم‌بندی کرد:

• تولید بخار خشک مورد نیاز برای به حرکت درآوردن توربین: به هر حال ماحصل کارکرد راکتور در ایجاد بخاری با کیفیت بالا برای به حرکت در آوردن توربین و ایجاد برق خلاصه می‌شود.

• حفظ مرز میان قسمت آلوده و پاک نیروگاه: مولد بخار وظیفه‌ی ایجاد بخار با استفاده از سیال خروجی از راکتور را بر عهده دارد. با توجه به آلودگی خنک کننده به مواد رادیواکتیو هرگونه نشتی در لوله‌های مولد بخار می‌تواند آلودگی را در گستره‌ی نیروگاه، پخش کند که خود مستوجب صرف هزینه و وقت خواهد شد.

در بین موضوع‌های بیشماری که می‌توان برای مولدهای بخار، از جنبه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Rabiee, A.H. Kamalinia, K. Haddad, Simulation and analysis of bushehr nuclear power plant steam generator, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 12, pp. 303-310, 2015 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.25.3]

های گوناگون، مطرح کرد شاید اساسی‌ترین موضوع، مسائل ترموهیدرولیکی به وجود آمده در مولد بخار باشد. بر همین اساس کدهای بی‌شماری در رابطه با تحلیل‌های ترموهیدرولیکی مولدهای بخار نوشته شده است که قریب به اتفاق آن ها (با توجه به کدهای قابل دسترس در کشور) از نوع آنالیزهای یک بعدی می‌باشند که علارغم بدست آوردن نتایجی مورد انتظار، نمی‌توانند به خوبی کنش‌های به وجود آمده در سه بعد را به نمایش گذارند که این مسئله خود معضلی در این گونه تحلیل‌ها قلمداد می‌شود. در سال‌های اخیر با گسترش مطالعات عددی و بخصوص ایجاد زیر ساخت‌های رایانه‌ای، تلاش-هایی برای ایجاد مدل سه‌بعدی مولد بخار انجام گرفته است. در این راستا از مدل‌های بیشماری بهره گرفته شده است تا با کمک نرم‌افزارهای متداول و قدرتمند دینامیک سیالات محاسباتی بتوان درک صحیحی از روند کارکرد مولد بخار در سه بعد بدست آورد و در طراحی این گونه مولدهای بخار حجیم و بررسی ایمنی آن‌ها در حوادث گوناگون دیدی متفاوت و البته کمک‌کننده به مهندسان داده شود.

مولدهای بخار نیروگاه بوشهر از نوع مولدهای بخار افقی می‌باشند که در آن‌ها دسته لوله‌های افقی با هدف انتقال حرارت مدار اول به بخش پوسته‌ای مولد بخار طراحی شده‌اند. سیال مدار اول در ابتدا وارد کلکتور گرم مولد بخار شده و پس از تبادل حرارت از طریق دسته لوله‌ها با بخش پوسته‌ای مولد بخار از طریق کلکتور سرد خارج می‌شود. کلکتور ورودی (گرم)، وظیفه‌ی توزیع سیال مدار اولیه را بین دسته لوله‌ها و کلکتور خروجی (سرد)، وظیفه‌ی جمع آوری سیال خارج شده از دسته لوله‌ها را بر عهده دارد.

تحقیقات انجام شده در زمنیه‌ی جریان دوفاری آب و بخار در مولدهای بخار افقی یا عمودی به علت کمبود وسایل آزمایشگاهی مناسب، همچنین مشکلات مرتبط با اندازه‌گیری‌ها در نیروگاه‌های هسته‌ای محدود می‌باشند. از طرف دیگر تحلیل عددی جریان دوفازی در یک هندسه‌ی سه بعدی با این حد پیچیدگی چالش برانگیز است. با توجه به اهمیت کیفیت بخار در نیروگاه، توزیع بخار در مولدهای بخار، نیاز به تحقیقاتی با جزئیات بیشتر دارد. مطالعات جریان سیال پیرامون دما و فشار سیال در مدیریت پارامترهای ترموهیدرولیکی چرخه‌ی قدرت، آنالیز حوادث و عمر مولد بخار می تواند بسیار مؤثر باشد اما هندسه‌ی مولد بخار برای مدل‌سازی با جزئیات بالا بسیار پیچیده است.

استاوانوویچ و استادوویچ [1] با توجه به وجود لوله‌های بی‌شمار و فاصله-ی نسبتا کم آن‌ها نسبت به یکدیگر، استفاده از معادلات حاکم بر جسم متخلخل را با هدف جایگزینی دسته لوله‌ها در جسم متخلخل پیشنهاد دادند. در این پژوهش بیان شده است که می‌توان لوله‌های زیاد موجود در ناحیه‌ی انتقال حرارت مولد بخار را با استفاده از چند بلوک متخلخل مدل‌سازی کرد. این نوع مدل‌سازی علاوه بر کاهش قابل قبول سلول‌های محاسباتی مورد نیاز برای تحلیل عددی، با بکار بردن روابط معادل، می‌تواند دید عمیق‌تری نسبت به کنش‌های ترموهیدرولیکی در سه بعد مولد بخار را ایجاد کند. استوسیچ و استاوانوویچ [2] یکی از کاملترین مدل‌سازی‌های جسم‌های پیچیده بر اساس جسم متخلخل را ارائه دادند. این مدل‌سازی با هدف شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی اجسام پیچیده بخصوص دسته لوله‌های موجود در مولدهای بخار و مبدل‌های حرارتی از نوع پوسته لوله می‌باشد. در این پژوهش معادلاتی برای نیروی درگ در فصل مشترک ارائه شده است، که در اینگونه شبیه‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لازم به ذکر است که در این پژوهش با شبیه‌سازی چند مثال نمونه، اعتبارسنجی این مدل‌سازی بررسی شده است. آن‌ها در بررسی پارامترهای جریان جسم‌های پیچیده‌ای اعم از ریبویلرهای کتل و مولدهای بخار را مورد بررسی قرار دادند، در این بررسی دسته لوله‌ها با فرض جسم متخلخل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. کاپال و چاند [3] مدل‌سازی افت فشار جریان مایع در مبدل‌های حرارتی پوسته لوله را به انجام رساندند. در این پژوهش یک مدل تئوریکی برای افت فشار جریان عبوری از دسته لوله‌ی مبدل حرارتی ارائه شده است. مدل ارائه شده در این پژوهش در محدوده‌ی رینولدز مابین 10^3 تا 10^5 با نتایج حاصل از آزمایشات، تطابق مناسبی دارد. پزو و همکارانش [4] مدل‌سازی ریبویلر کتل را در دو بعد مورد بررسی قرار دادند. جریان دوفازی لوله‌های انتقال حرارت با استفاده از معادلات حاکم بر جسم متخلخل مدل‌سازی شده است. در این پژوهش با استفاده از مدل حجم محدود، تحلیل عددی با تقریب بسیار مناسبی، پراکندگی بخار در دو بعد را گزارش می‌دهد. سیموویچ و همکارانش [5] روابطی برای جریان دوفازی عمود بر دسته لوله‌های افقی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها شبیه‌سازی جریان در مولدهای بخار و گرمکن‌ها را مبنای پژوهش خود قرار دادند. مدل‌سازی ارائه شده توسط آن‌ها به خوبی با نتایج آزمایشگاهی منطبق بوده است. استریژوف و همکارانش [6] مدل سه بعدی پیشنهاد شده توسط استاوانوویچ و همکارانش را با هدف تحلیل جریان هیدرودینامیکی مولد بخار توسعه دادند تا بتوانند درک بهتری از حوادث پایه داشته باشند. در این پژوهش برخی محاسبات انجام گرفته از جمله سرعت خنک کننده در لوله‌های انتقال حرارت توسط کد STAR-CD و نرم افزار قدرتمند CFX انجام گرفته است. نتایج بدست آمده شبیه سازی مناسبی را نشان می‌دهد. بامعروف و مک‌نیل [7] به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی‌هایی پیرامون افت فشار جریان دوفازی در عبور از دسته لوله‌های افقی را مورد توجه قرار دادند. داده‌های افت فشار آزمایشگاهی برای جریان عمودی آب - هوا برای کسرهای جرمی گاز در محدوده‌ی میان 0.0005 تا 0.6 و شار-های جرمی در رنج های میان 25 تا 700 kg/m^2s ارائه شده است. دسته لوله‌ی مربعی دارای یک ستون شامل 10 ردیف لوله به عنوان مبنای کار آزمایشگاهی قرار گرفته است. لوله‌ها دارای قطر 38 میلی‌متر و نسبت گام به قطر 1.32 می‌باشد. در مقایسه‌ی مطالعات عددی و آزمایشگاهی با تقریب مناسبی مطابقت میان اندازه‌گیری‌ها گزارش داده شده است. در سال 2010 پاتیکانگاس و همکارانش[8] با استفاده از دیدگاه اویلرین - اویلرین و در نظر گرفتن چندین ساده‌سازی که مهمترین آن‌ها متخلخل گرفتن لوله‌های انتقال حرارت می‌باشد جریان دوفازی موجود در مولد بخار نیروگاه VVER440 را شبیه‌سازی و تحلیل کنند. در این بررسی مدار اول توسط کد APROS مدل-سازی شده است و نتایج حاصله به عنوان شرایط مرزی مولد بخار در نرم افزار فلوئنت جایگذاری شده است. مک‌نیل و همکارانش [9] با استفاده از آزمایشات انجام گرفته بر عبور جریان دوفازی از دسته لوله‌ها روابط متفاوتی را برای رژیم‌های جریانی متفاوت جریان دوفازی ارائه داده اند. در این پژوهش سعی شده است، با استفاده از دیدگاه اویلرین-اویلرین در میدان جریان دوفازی و با بهره بردن از روابط موجود و در نظر گرفتن شرایط مرزی متناسب با پژوهش‌های انجام گرفته پیش‌بینی مناسبی از کسر حجمی بخار و افت فشار حاکم بر جریان دوفازی کتل ریبویلر انجام گیرد. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی کتل ریبویلر، دو آرایش مربعی متفاوت دسته لوله‌ها مدنظر قرار گرفته است. در تحلیل دسته لوله‌ها از روابط حاکم بر جسم متخلخل بهره گرفته شده است. ولادیمر ملیکوف و همکارانش [10] با استفاده از کد ترموهیدرولیکی STEG مدلی سه بعدی برای مولدهای بخار افقی ارائه کرده-اند. تطابق توزیع کسر حجمی بخار در فضای مولد بخار با اندازگیری‌های انجام شده مناسب، توصیف شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.25.3]

مک‌نیل و همکارانش [11] بر اساس مدل‌سازی‌های موجود و پژوهش-های پیشین خود در زمنیه‌ی جریان‌های دوفازی خارجی حول دسته لوله‌ها، مدل‌سازی مقطعی از ریبویلر کتل را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش که از نرم افزار CFX و روش حل عددی حجم محدود استفاده شده است از معادلات حاکم بر جسم متخلخل بهره برده شده است. تنگلونگ کونگ و همکارانش [12] با استفاده از نرم افزار فلوئنت و با به کار بردن مدل شار رانشی برای جریان دوفازی، انتقال حرارت از حلقه اول به حلقه دوم را در سه بعد برای مولد بخار AP1000 مورد بررسی قرار داده‌اند. پیش‌بینی‌های بدست آمده در این پژوهش پیرامون کسر حجمی‌بخار تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. دهبی و بادربین [13] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی تحلیلی برای یک نمونه مولد بخار با استفاده از مدل متخلخل به انجام رساندند و نتایج حاصل را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. در این پژوهش تطابق نتایج در طول مولد بخار قابل مشاهده است. صفوی و همکارانش [14] بررسی خود را معطوف به بررسی اثر صفحه‌ی سوراخدار مولد بخار VVER1000 کردند. آن‌ها با استفاده از نرم افزار CFX مدل‌سازی خود را بر مبنای دیدگاه اویلرین- اویلرین پایه‌گذاری کردند. استفاده از جسم متخلخل و به کار بردن معادلات حاکم بر جسم متخلخل در این پژوهش مشاهده می‌شود. ماسلوواریچ و همکارانش [15]، پژوهشی دیگر در ریبویلرهای کتل ارائه داده‌اند. در این مدل‌سازی با استفاده از جایگزینی واسط متخلخل به جای دسته لوله‌های افقی، مدل‌سازی و آنالیز جریان‌های دوفازی عمود بر دسته لوله‌های یک ریبویلر کتل مورد بررسی قرار گرفته است. روابط حاصل بیشتر بر پایه‌ی معادلات ارائه شده توسط سیموویچ و همکارانش [5] پایه ریزی شده‌است که درستی این روابط با مقایسه‌ی داده-های بدست آمده با نتایج تجربی قابل مشاهده است. جی‌یانگ و همکارانش [16] چهار روش مدل سازی مبدل حرارتی از نوع پوسته لوله را مورد بررسی قرار دادند. در میان مدل‌های مختلف به کار گرفته شده، مدل جسم متخلخل با وجود کاهش قابل ملاحظه‌ی زمان انجام محاسبات، دارای دقت به مراتب مناسبی نسبت به مدل‌های به کار گرفته دیگر بوده است. با توجه به پژوهش-های انجام گرفته توسط محققین و بررسی نتایج بدست آمده در پژوهش‌های مرتبط در زمینه‌ی پیش بینی پارامترهای جریان در عبور جریان دوفازی از دسته لوله‌ها، مشخص است که تعیین روابط دوفازی و بخصوص درگ مرزی از اهمیت بسزایی در پیش بینی دقیق افت فشار و کسر خلا جریان دوفازی در عبور از دسته لوله‌های افقی برخوردار است. در این پژوهش سعی شده است با در نظر گرفتن روابط بین فازی و روابط تجربی بدست آمده در پژوهش‌های آزمایشگاهی و با در نظر گرفتن جسم متخلخل و جایگزینی روابط حاکم بر جسم متخلخل، پراکندگی کسر حجمی بخار در مولدبخار با نتایج اندازه‌گیری شده در پژوهش‌های مشابه بعنوان یک پارامتر مهم در طراحی و بررسی ایمنی مولدهای بخار افقی VVER1000 مورد مقایسه قرار گیرد. در ادامه تلاش شده با توجه به اهمیت شرایط مرزی خروجی با توجه به پژوهش انجام گرفته توسط مک‌نیل و همکارانش [11] جریان برگشتی به مولد بخار در بالای دسته‌لوله‌ها بخار اشباع بعنوان پارامتر مؤثر در بالابردن دقت نتایج و کاهش دامنه محاسباتی در نظر گرفته شود. جهت شبیه سازی میدان جریان در مولد بخار از معادلات متوسط‌گیری شده‌ی ناویر استوکس در سه بعد استفاده شده است که با آن پرداخته می شود.

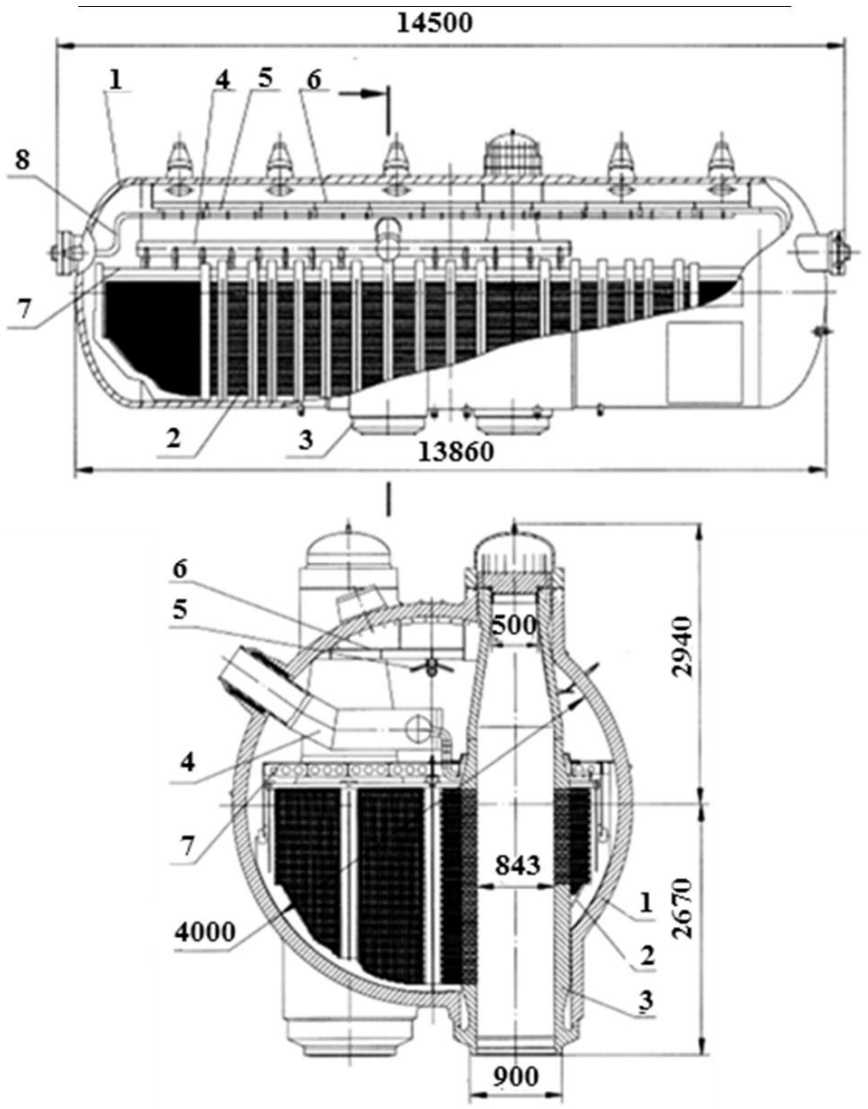
2- هندسه و شرایط مرزی

مولد بخار نیروگاه بوشهر دارای 10987 لوله‌ی انتقال حرارت با قطر داخلی 13 میلی‌متر و ضخامت 1/5 میلی‌متر می‌باشد. این لوله‌ها که از جنس فولاد و به شکل U می‌باشند که به صورت افقی با آرایش شطرنجی در محفظه‌ی مولد بخار جایگذاری شده‌اند. منبع تغذیه‌ی آب این نوع مولد بخار که برای نیروگاه‌های VVER1000 مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل یک کلکتور اصلی و دارای لوله‌های سوراخ دار در طول خود می‌باشد. این لوله‌ها به سمت قسمت گرم مولد بخار کشیده شده‌اند که در طول خود آب را درون مولدبخار تخلیه می‌کنند. ذکر این نکته لازم است که در کارکرد نرمال مولد بخار نرخ جریان آب برابر با نرخ کلی بخار خروجی می‌باشد. شکل 1 مولد بخار بوشهر همراه با اجزای داخلی آن را نشان می‌دهد. در جدول 1 مشخصات کامل مولد بخار مورد استفاده در نیروگاه بوشهر قابل مشاهده است.

جدول 1 مشخصات کامل مولد بخار بوشهر [17]

Table 1 Bushehr Steam Generator Characteristics [17]

پارامتر	مقدار
توان حرارتی (MW)	753
ظرفیت بخار (t/h)	1470
فشار بخار خروجی (MPa)	6.27
دمای ورودی خنک کننده (C)	321
دمای خروجی خنک کننده (C)	291
دمای آب تغذیه (C)	220
دبی ورودی خنک کننده (m^3/h)	21200
سطح آب استاندارد مولد بخار (m)	2.6
فشار خنک کننده‌ی اولیه در ورودی مولد بخار(MPa)	15.7
قطر داخلی(m)	4
فاصله‌ی بین ردیفی در دسته لوله‌ها (mm)	19
فاصله بین ستونی در دسته لوله‌ها (mm)	23



1-Housing 2-Heat Exchanger Surface 3-Collector 4-Feed Water Collector 5-Emergency Feed Water Collector 6- Steam Perforated Plate 7-Perforated Plate
Fig. 1 Bushehr Steam Generator [17]

شکل 1 مولد بخار بوشهر [17]

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.25.3]

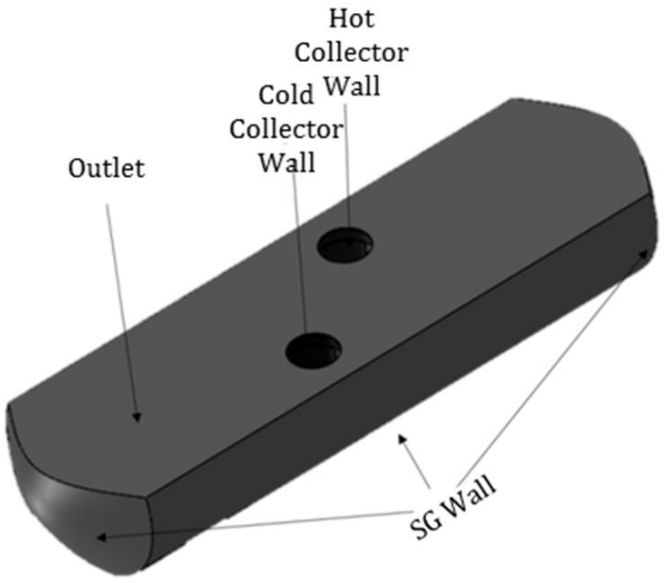


Fig. 2 Boundary conditions

شکل 2 شرایط مرزی

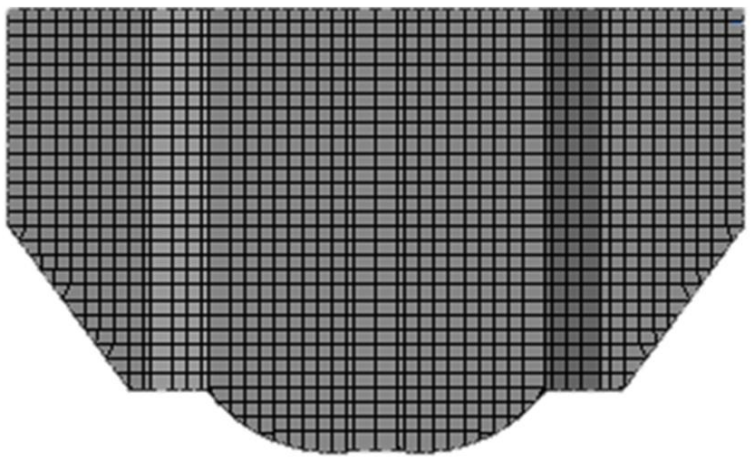


Fig. 3 Mesh Grid

شکل 3 نمایی از شبکه

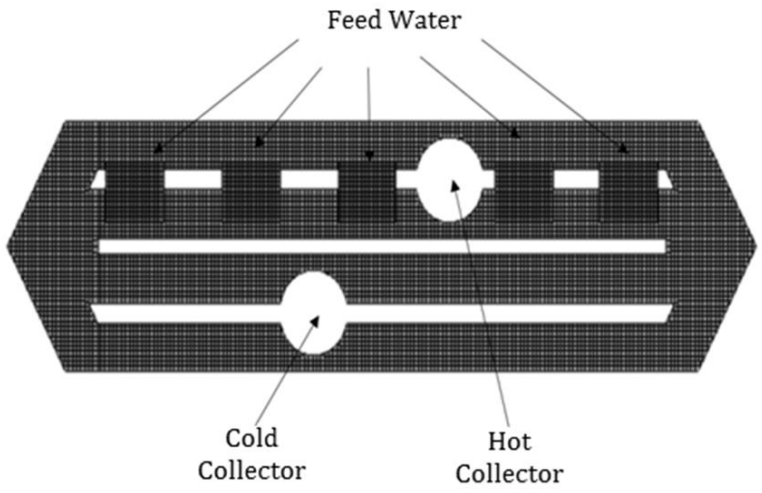


Fig. 4 Feed Water Inlet

شکل 4 ورودی آب تغذیه

شرایط مرزی در نظر گرفته شده در تحلیل ترموهیدرولیکی مولد بخار از اهمیت ویژه‌ای برخودار است. در شکل 2 و شکل 3 به ترتیب شرایط مرزی و شبکه بندی در نظر گرفته شده در این پژوهش قابل مشاهده است.

با توجه به پاشش آب تغذیه در بالای دسته لوله‌های گرم (نزدیک به کلکتور گرم) ورودی آب با توجه به شرایط ذکر شده در جدول 1 از طریق چشمه‌ی جرمی به صورت نشان داده شده در شکل 4 تعریف شده است.

3- معادلات حاکم

در مدل‌سازی میدان جریان از معادلات متوسط‌گیری شده‌ی ناویر استوکس حاکم بر جریان دوفازی میدان جریان در سه بعد استفاده شده است. با توجه به اینکه در این پژوهش از معادلات حاکم بر جسم متخلخل برای تحلیل پارامترهای میدان جریان در دیدگاه اویلرین - اویلرین بهره گرفته شده است معادلات سه گانه‌ی بقا برای فاز q ام (1 مشخص کننده‌ی مایع و 2 مشخص کننده‌ی بخار) می‌تواند به صورت زیر بیان شود.

- معادله‌ی پیوستگی

$$\frac{\partial(\gamma\alpha_{\mathrm{q}}\rho_{\mathrm{q}})}{\partial t}+\nabla\cdot(\gamma\alpha_{\mathrm{q}}\rho_{\mathrm{q}}\vec{v}_{\mathrm{q}})=\gamma\sum_{p=1}^{n}(\dot{m}_{\mathrm{pq}}-\dot{m}_{\mathrm{qp}})+\gamma S_{\mathrm{q}} \quad (1)$$

- معادله‌ی مومنتوم

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

- معادله‌ی بقای انرژی

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\gamma\alpha_{\mathrm{q}}\rho_{\mathrm{q}}h_{\mathrm{q}})}{\partial t}+\nabla\cdot(\gamma\alpha_{\mathrm{q}}\rho_{\mathrm{q}}\vec{v}_{\mathrm{q}}h_{\mathrm{q}})&=-\gamma\alpha_{\mathrm{q}}\frac{\partial p_{\mathrm{q}}}{\partial t}+(\gamma\bar{\bar{\tau}}_{\mathrm{q}}:\nabla\vec{v}_{\mathrm{q}})+\gamma S_{\mathrm{q}}\\&-\nabla.(\gamma\vec{q}_{\mathrm{q}})+\gamma\alpha_{q}\rho_{\mathrm{q}}\vec{g}+Q_{\mathrm{sp}}\\&+\gamma\sum_{\mathrm{p}=1}^{n}(Q_{\mathrm{pq}}+\dot{m}_{\mathrm{pq}}h_{\mathrm{pq}}\dot{m}_{\mathrm{qp}}h_{\mathrm{qp}})\end{aligned} \quad (3)$$

3-1- افت فشار

بر طبق بررسی‌های انجام گرفته توسط سیموویچ و همکارانش [5] افت فشار ناشی از دسته تیوب‌ها بر اساس رابطه‌ی ارائه شده توسط راسوهین [18] بکار گرفته شده است. این رابطه بر اساس آزمایشات انجام گرفته بر روی دسته لوله‌های افقی و با در نظر گرفتن ضریب دوفازی تعریف شده است.

مایع:

$$\Delta p_1 = Eu_1\rho_1u_1^2\alpha_1 \quad (4)$$

گاز:

$$\Delta p_2 = Eu_2\rho_2u_2^2\alpha_2 \quad (5)$$

ضرایب موجود در معادلات افت فشار در آرایش شطرنجی به صورت (6) تعریف می‌شوند [5]:

$$Eu_{\mathrm{k}} = 1.4(z+1)\mathrm{Re}_{\mathrm{k}}^{-0.25},\frac{1-\frac{D}{P}}{\frac{P}{D}-1}\le 0.53 \quad (6)$$

$$Eu_{\mathrm{k}} = 1.93(z+1)\sqrt{\frac{1-\frac{D}{P}}{\frac{P}{D}-1}}\mathrm{Re}_{\mathrm{k}}^{-0.25},\frac{1-\frac{D}{P}}{\frac{P}{D}-1} > 0.53 \quad (7)$$

3-2- نیروی مرزی

در معادلات مومنتوم نیروی درگ از اهمیت بسزایی در پیش بینی درست کسر حجمی بخار در ناحیه‌ی ریبویلر کتل برخوردار است.

$$\vec{R}_{21} = \frac{3}{4}\rho_1\frac{C_{\mathrm{di}}}{D_{\mathrm{b}}}\alpha_1.|\vec{U}_2-\vec{U}_1|(\vec{U}_2-\vec{U}_1) \quad (8)$$

در تحلیل حاضر از ضریب درگ مرزی سیموویچ و همکارانش [5] استفاده شده است که عبارتند از:

برای جریان حبابی ($\alpha_2 \le 0.3$) ضریب درگ برابر است با:

$$C_d = 0.267D_{\mathrm{b}}\sqrt{\frac{g\Delta\rho}{\sigma}}\left\{\frac{1+\sqrt[7]{17.67f(\alpha_2)^6}}{18.67f(\alpha_2)}\right\}^2 \quad (9)$$

برای جریان چرن - آشفته ($\alpha_2 > 0.3$) ضریب درگ برابر است با:

$$C_{\mathrm{d}} = 1.487D_{\mathrm{b}}\sqrt{\frac{g\Delta\rho}{\sigma}}(1-\alpha_2)^3(1-0.75\alpha_2)^2 \quad (10)$$

قابل ذکر است که ضریب نیروی برآ بر طبق پژوهش استوسیچ و همکارانش [2] برابر با 0.3 در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.25.3]

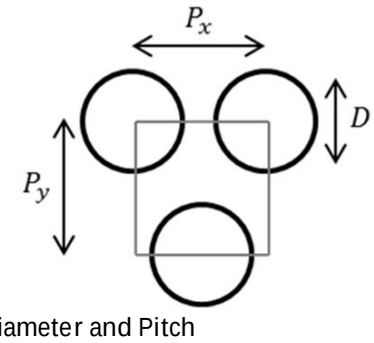


Fig. 5 Tube Bundle Diameter and Pitch

شکل 5 قطر و گام دسته لوله‌ها

3-3- تخلخل[1]

با توجه به اینکه دسته لوله‌های تعبیه شده در ریبویلرهای کتل دارای آرایش مثلثی می باشند، در نتیجه می توان از معادله‌ی ارائه شده توسط مک‌نیل و همکارانش [11] بهره جست. شکل 5 نشان دهنده‌ی آرایش موجود در دسته لوله‌های مولد بخار می باشد.

$$\gamma = 1 - \varphi_3 \quad (11)$$

$$\varphi_3 = \frac{\pi}{4}\frac{D^2}{P_x P_y} \quad (12)$$

3-4- جریان جرمی در فصل مشترک

تغییرات فاز در میدان جریان دوفازی با استفاده از یک معادله‌ی تجربی ساده شبیه سازی شده است، انتقال جرم ناشی از چشمه‌ی حرارتی عبارتست از:[2]

در شرایطی که آنتالپی سلول محاسباتی بزرگتر از آنتالپی مایع اشباع باشد $(h > h_f)$، داریم:

$$\Gamma_e = \frac{\alpha_1 \rho_1}{\tau_e}\frac{h - h_f}{h_g - h_f} \quad (13)$$

و در شرایطی که آنتالپی سلول محاسباتی کوچکتر از آنتالپی بخار اشباع باشد $(h_1 > h_f$ و $\alpha_2 > 0)$، داریم:

$$\Gamma_c = \frac{\alpha_1 \rho_1}{\tau_c}\frac{h_f - h}{h_g - h_f} \quad (14)$$

3-5- چشمه‌ی حرارتی

مقدار چشمه‌ی حرارتی ناشی از گرمای حاصل در لوله‌های انتقال حرارت به هر کدام از فازها برابر است با: [4]

$$\dot{q}_{3k} = \dot{q}_{AK} a_{i3} \quad (15)$$

$$\dot{q}_{AK} = h(T_s - T_k) \quad (16)$$

$$a_{i3} = \frac{S}{V} \quad (17)$$

S سطح خارجی لوله

V حجم لوله

ضریب انتقال حرارت از دیواره‌ی لوله‌های انتقال حرارت به مخلوط دوفازی از نوع حبابی یا چرن با استفاده از معادله‌ی پیشنهاد شده برای جوشش‌های اشباع هسته‌ای به صورت (18) و (19)، عبارتست از:

$$h = f(p) q_A^n \quad (18)$$

$$f(p) = 4.32(p^{0.14} + 1.28 \times 10^{-2} p^2)\ ,n = 0.7 \quad (19)$$

p فشار بر حسب مگاپاسکال

q شار گرمایی بر حسب W/m^2

4- اعتبار سنجی نتایج

با در نظر گرفتن نتایج آزمایشگاهی موجود برای اعتبارسنجی معادلات و روابط حاکم بر جسم متخلخل و حل عددی کد محاسباتی در دسترس موجود (فلوئنت)، تحلیل عددی آزمایش انجام شده توسط نائو ستو و همکارانش [19] با توجه به مرجع 20 برای آرایش مثلثی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل 6 نشان دهنده‌ی آرایش مثلثی موجود در لوله می‌باشد.

شرایط مرزی حاکم بر مسئله در شکل 7 نشان داده شده است.

شکل‌های 8 و 9 به ترتیب نشان دهنده‌ی مقایسه‌ی نتایج بدست آمده در تحلیل عددی حاضر و نتایج تجربی افت فشار و عدد ناسلت در رینولدزهای متفاوت می‌باشد.

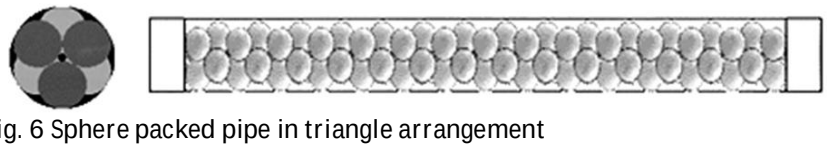


Fig. 6 Sphere packed pipe in triangle arrangement

شکل 6 آرایش مثلثی گوی‌های موجود در لوله

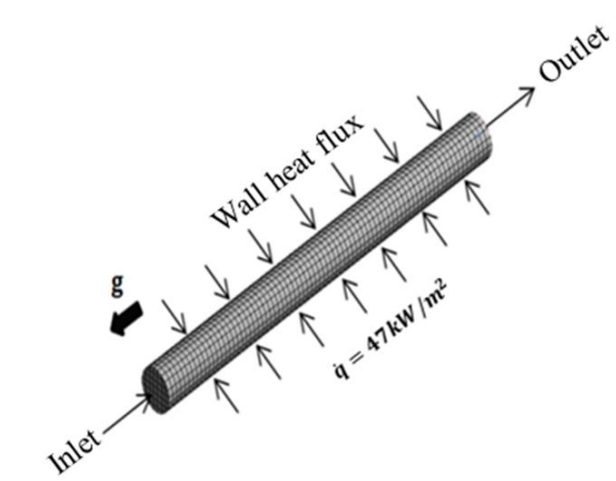


Fig. 7 Boundary condition

شکل 7 شرایط مرزی

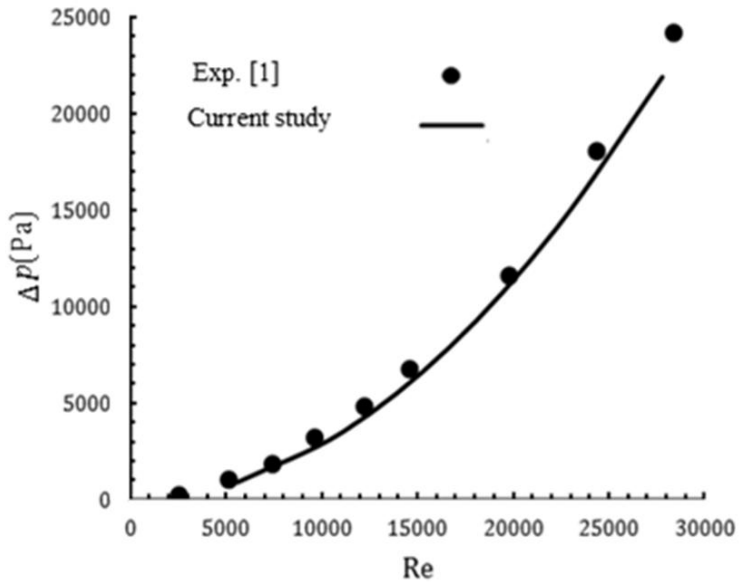


Fig. 8 pressure drop variations in triangle arrangement

شکل 8 تغییرات افت فشار در آرایش مثلثی

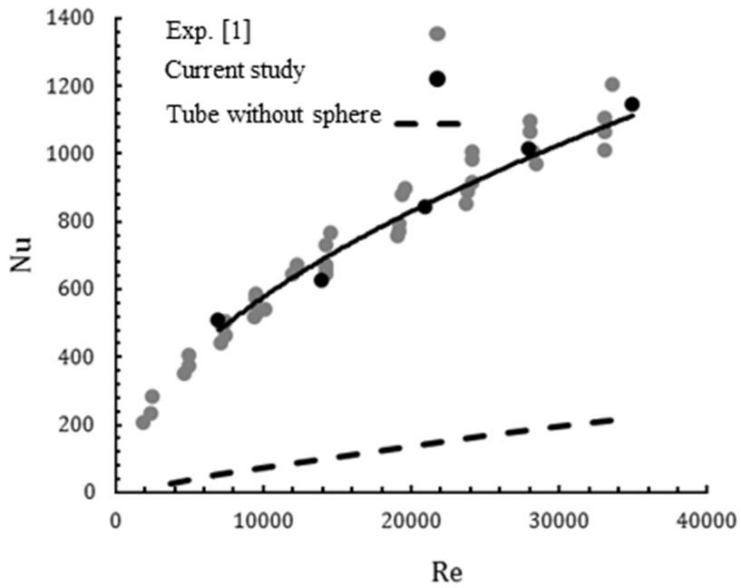


Fig. 9 Pipe average nusselt variations in triangle arrangement

شکل 9 تغییرات ناسلت متوسط لوله در آرایش مثلثی

1 - Porosity

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.25.3]

همانطور که مشاهده می‌شود نتایج تحلیل عددی تطابق مناسب را در پارامترهای موجود با نتایج تجربی نشان می‌دهد. تحلیل عددی ریبویلرهای کتل می‌تواند به عنوان نمونه‌ای دیگر از اعتبارسنجی معادلات استفاده شده تلقی شود که می‌توان به مرجع 21 تهیه شده توسط نویسندگان مقاله‌ی حاضر مراجعه نمود.

5- نتایج

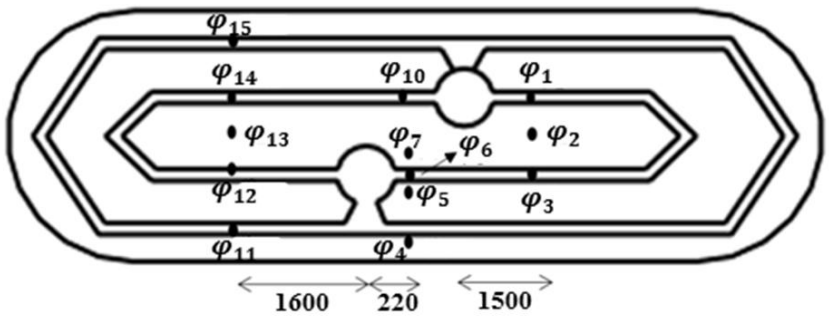
پراکندگی فاز بخار در مولد بخار می‌تواند در نوع طراحی و کیفیت بخار تولیدی نقش بسزایی را ایفا کند. مدل‌سازی در نظر گرفته شده در این پژوهش بر مبنای دیدگاه اویلرین - اویلرین و با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی در دسترس موجود (فلوئنت) برای پیش‌بینی مناسب توزیع بخار در مولد بخار صورت پذیرفته است.

نتایج بدست آمده در این پژوهش با اندازه‌گیری‌های انجام گرفته در مراجع 11 و 15 مقایسه شده است. نتایج حاصل، نشان دهنده‌ی نزدیکی نتایج با نتایج گزارش شده در پژوهش‌های گذشته می‌باشد.

جدول 2 مشخصات نقاط معیار

Table 2 Criterion Points

نقطه	فاصله از صفحه‌ی سوراخدار (mm)
φ_1 ،φ_2 ،φ_3 ،φ_8، φ_{10} ،φ_{12} ،φ_{13} ،φ_{14}	350
φ_4 ،φ_{11} ،φ_{15} ،φ_{16}، φ_{17} ،φ_{18}	70
φ_5 ،φ_7	35



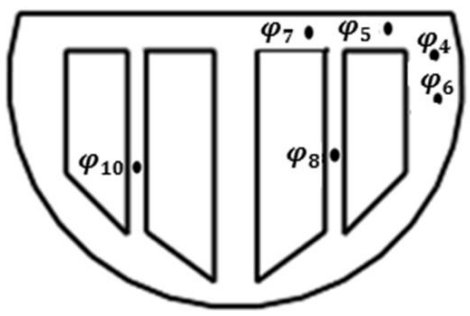


Fig. 10 Criterion Points

شکل 10 شماتیکی از نقاط معیار

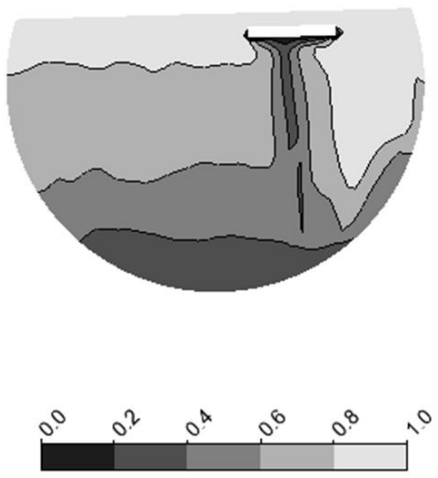


Fig 11. Void Fraction Contour between Collectors

شکل 11 کانتور توزیع کسر حجمی بخار در مقطع مابین کلکتور سرد و گرم

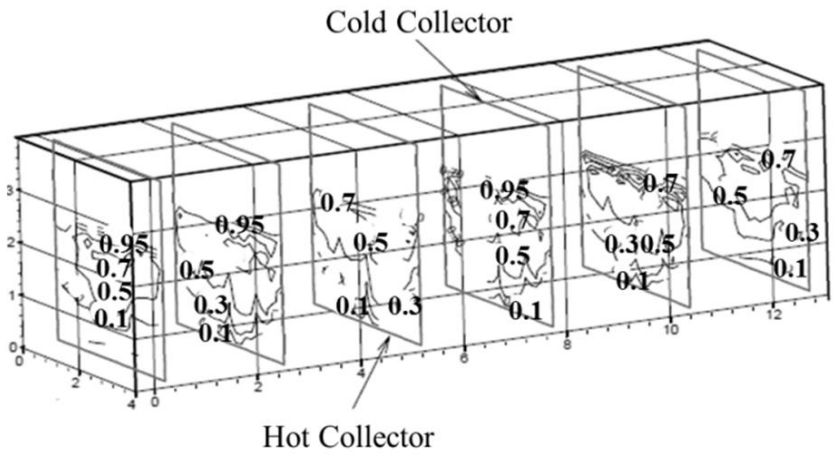


Fig. 12 Void Fraction Contour in Different Section of SG (Melikhov et. al. [10])

شکل 12 کانتور توزیع کسر حجمی بخار در مقاطع مختلف مولد بخار (ملیکوف و همکارانش [10])

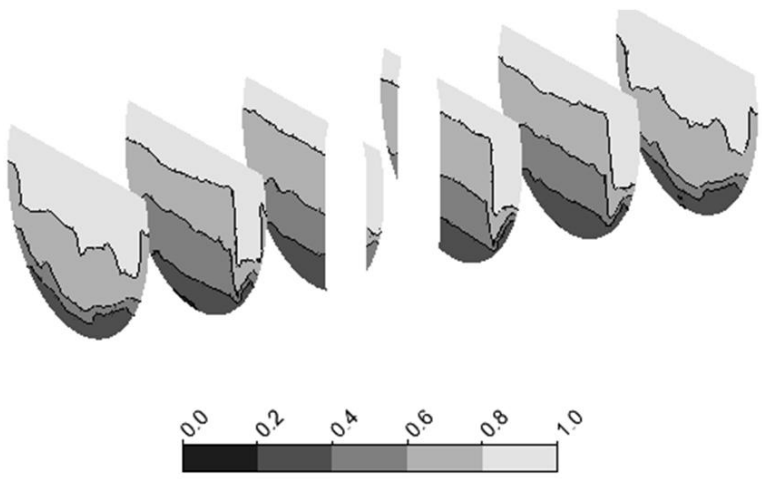


Fig 13 Void Fraction Contour in Different Section of SG (Current Study)

شکل 13 کانتور توزیع کسر حجمی بخار در مقاطع مختلف مولد بخار(مطالعه‌ی حاضر)

نقاط اندازه گیری شده در جدول 2 و در شکل 10 بصورت شماتیکی نشان داده شده است.

شکل 11، 12 و 13 به ترتیب توزیع کسر حجمی بخار در تحلیل عددی حاضر در فاصله‌ی میان کلکتور سرد و گرم، توزیع کسر حجمی بخار در طول مولد بخار در مطالعه‌ی ملیخوف [10] و مطالعه‌ی حاضر را نشان می‌دهد.

همانطور که با مقایسه‌ی کانتورهای موجود در شکل‌های 12 و 13 مشاهده می شود بالاتر بودن مقدار کسر حجمی بخار در سمت گرم مولد بخار در ارتفاع‌های یکسان با روندی منطقی پیش‌بینی شده است. با توجه به کانتورهای رسم شده در شکل‌های 11 و 13 مقادیر اندازه‌گیری شده در نقاط معیار معرفی شده در جدول 2 و شکل 10 با نتایج گزارش شده در پژوهش های مشابه در جدول 3 مورد بررسی قرار گرفته است.

همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج بدست آمده در تحلیل عددی حاضر قابلیت پیش‌بینی منطقی کسر حجمی بخار در مولد بخار افقی را داراست و در بسیاری از نقاط نتایج مناسب‌تری نسبت به نتایج عددی مشابه را دارا می-باشد.

جدول 3 مقایسه‌ی مقدار کسر حجمی بخار در نقاط معیار

Table 3 Criterion Points Void Fraction Comparison

نقاط معیار [10]	نتایج تجربی [14]	تحلیل عددی حاضر	صفوی و همکارانش
φ_1	0.50	0.45	0.56
φ_2	0.58	0.49	0.52
φ_3	0.42	0.50	0.48
φ_4	0.80	0.64	0.82
φ_5	1.00	0.88	0.92
φ_6	1.00	0.68	0.88
φ_7	0.98	0.86	0.95
φ_8	0.48	0.53	0.52
φ_{10}	0.47	0.54	0.50
φ_{12}	0.54	0.51	0.50
φ_{13}	0.51	0.57	0.50
φ_{14}	0.56	0.48	0.49

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.25.3]

6- نتیجه گیری

بررسی پارامترهای ترموهیدرولیکی در مولد بخار در طراحی و تحلیل ایمنی نیروگاه دارای اهمیت فراوان می باشد. تحلیل میدان جریان در سه بعد با توجه به پیچیدگی‌های بالای مولد بخار دارای دشواری‌های بیشماری در ایجاد شبکه و تحلیل عددی می‌باشد. در تحلیل حاضر با در نظر گرفتن لوله‌های انتقال حرارت به عنوان جسم متخلخل و در نظر گرفتن روابط مرتبط علاوه بر کاهش زمان روند محاسبات، نتایج مناسبی در مقایسه با نتایج تجربی و عددی مرتبط بدست آمد. در نظر گرفتن شرایط مرزی به عنوان یکی از عوامل تعیین‌کننده در تعیین توزیع کسر حجمی بخار در مولد بخار یکی از پارامترهای تعیین کننده در محاسبه‌ی درست کسر حجمی بخار در فضای مولد بخار می‌باشد در تحلیل حاضر با استفاده از نتایج بدست آمده در مرجع 9 و 21 و در نظر گرفتن بخار اشباع به عنوان جریان برگشتی در سطح آب موجود در مولد بخار (با توجه به جدول 1) علاوه بر کاهش چشمگیر تعداد سلول محاسباتی، نتایج مطلوب محاسبه شد. استفاده از مرز خروجی بخار اشباع در تحلیل حاضر می‌تواند مشکلات تحلیل عددی با تعداد سلول‌های محاسباتی بالا را بهبود بخشد.

با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده شد که شبیه‌سازی انجام گرفته به خوبی قابلیت پیش‌بینی کسر حجمی بخار در نقاط مختلف مولد بخار را دارد و با توجه به در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب‌تر قابلیت پیش بینی مناسب تر کسر حجمی بخار در اغلب نقاط را نسبت به تحلیل مشابه دارد. مشاهده گردید که در سمت گرم مولد بخار مقدار کسر حجمی بخار غالب می‌باشد که این خود می‌تواند به دلیل وجود شار حرارتی بالاتر در این قسمت از مولد بخار باشد. مقایسه‌ی نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شبیه‌سازی دسته لوله‌های مولد بخار، با فرض جسم متخلخل، می‌تواند علاوه برکاهش مدت زمان ایجاد یک شبکه‌ی مناسب در هندسه‌های پیچیده، زمان انجام محاسبات تا رسیدن به جوابی مناسب‌تر را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد.

7- فهرست علائم

C_2	ضریب اینرسی
C_{d}	ضریب درگ
D	قطر لوله (m)
D_{b}	متوسط قطر حباب (m)
F_{lift}	نیروی برآ ($kgms^{-2}$)
F_{VM}	نیروی کار مجازی ($kgms^{-2}$)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
h_{f}	آنتالپی مایع اشباع (m^2s^{-2})
h_{g}	آنتالپی بخار اشباع (m^2s^{-2})
h_{fg}	تقاوت آنتالپی فاز گاز و مایع (m^2s^{-2})
L	طول (m)
$\dot{m}_{\mathrm{pq}}$	انتقال جرم از فاز p به فاز q($kgm^{-3}s^{-1}$)
M_{g}	نرخ جریان جرمی بخار ($kgm^{-3}s^{-1}$)
P	گام دسته لوله (m)
q	شار حرارتی ($kgm^{-2}s^{-3}$)
Q_{sp}	انتقال حرارت از فاز جامد به فاز p($kgm^{-2}s^{-3}$)
$\vec{R}_{\mathrm{pq}}$	نیروی درگ بین فازی ($kgms^{-2}$)
S	چشمه
t	زمان (s)
T	دما (K)
T_{s}	دمای سطح جامد (K)
T_{k}	دمای فاز (K)
U_{f}	سرعت مایع (ms^{-1})
U_{g}	سرعت بخار (ms^{-1})

علائم یونانی

α	نفوذ پذیری (m^2)
α_1	کسر حجمی مایع
α_2	کسر حجمی بخار
ρ_1	چگالی مایع (kgm^{-3})
ρ_2	چگالی بخار (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
σ	کشش سطحی ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Δp_1	افت فشار مایع ناشی از دسته لوله‌ها ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Δp_2	افت فشار بخار ناشی از دسته لوله‌ها ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Γ_{c}	نرخ انتقال جرم در میعان ($kgm^{-3}s^{-1}$)
Γ_{e}	نرخ انتقال جرم در تبخیر ($kgm^{-3}s^{-1}$)
τ_{c}	زمان آسایش میعان (s)
τ_{e}	زمان آسایش تبخیر (s)
γ	تخلخل

8- مراجع

[1] V. Stavanovic, M. Studovic, 3D modeling as a support to thermal-hydraulic safety analyses with standard codes, *7th International Conference on Nuclear Engineering,* Japan, Tokyo, 1999.

[2] Z. V. Stosic, V. D. Stevanovic, Advanced three-dimensional two-fluid porous media method for transient two-phase flow thermal-hydraulics in complex geometries, *Numerical Heat Transfer,* Vol. 41, No. 3, pp. 263–289, 2002.

[3] U. C. Kapale, S. Chand, Modeling of shell-side pressure drop for liquid flow in shell-and-tube heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 49, No. 3, pp. 601–610, 2006.

[4] M. Pezo, V. Stevanovic, Z. Stevanovic, A two-dimensional model of the kettle reboiler shell side thermal–hydraulics, *International Journal of Heat Mass Transfer,* Vol. 49, No. 8, pp. 1214–1224, 2006.

[5] Z. Simovic, S. Ocokoljic, V. Stevanovic, Interfacial friction correlation for two phase flow across tube bundle, *International journal of Multiphase Flow,* Vol. 33, No. 2, pp. 217–226, 2007.

[6] V. F. Strizhov, M. A. Bykov, A. Y. Kiselev A.V. Shishov, A. A. Krutikov, D.A. Posysaev, D.A. Mustafina, development of a 3D model of tube bundle of VVER reactor steam generator, *Ibraeran, Moscow,* Russia, pp. 200-206, 2007.

[7] K. Bamardouf, D. A. McNeil, Experimental and numerical investigation of two-phase pressure drop in vertical cross-flow over a horizontal tube bundle, *Applied Thermal Engineering,* Vol. 29, No. 7, pp. 1356-1365, 2009.

[8] T. Pattikangas, J. Niemi, V. Hovi, T. Toppila, T. Rama, Three- Dimensional porous media model of a horizontal steam generator, *The finnish research report on nuclear power plant safety,* pp. 4-8, 2010.

[9] D. A. McNeil, K. Barmardouf, B. M. Burnside, M. Almeshaal, Investigation of flow phenomena in a kettle reboiler, *International Journal of Heat Mass Transfer,* Vol. 53, No. 5, pp. 836–848, 2010.

[10] V. Melikhov, O. Melikhov, A. Nerovnov, Simulation of the thermal hydraulic processes in the horizontal steam generator with the use of the different interfacial friction correlations, *Hindawi Publishing Corporation Science and Technology of Nuclear Installations,* Vol. 20, No. 3, pp. 80-89, 2011.

[11] D. A. McNeil, K. Bamardouf, B. M. Burnside, Two-dimensional flow modelling of a thin slice kettle reboiler, *International Journal of Heat Mass Transfer,* Vol. 54, No. 3, pp. 1907– 1923, 2011.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.25.3]

[12] C. Tenglong, T. Wenxi, Q. Suizheng, S. Guanghui, Study on secondary side flow of steam generator with coupled heat transfer from primary to secondary side, *Applied Thermal Engineering,* Vol. 61, No. 4, pp. 519-530, 2013.

[13] A. Dehbi, H. Badreddine, CFD prediction of mixing in a steam generator mock-up: Comparison between full geometry and porous medium approaches, *Annuals of nuclear energy,* Vol. 58, No. 6, pp. 178-187, 2013.

[14] A. Safavi, M. R. Abdi, M. Aghaie, M. H. Esteki, A. Zolfaghair, A. F. Pilevar, A. Daryabak, Study of perforated plate effect in horizontal VVER1000 steam generator, *Nuclear Engineering and design,* Vol. 256, No. 3, pp. 249-255, 2013.

[15] 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,* Vol. 75,No. 3, pp. 109–121, 2014..

[16] J. Yang , L. Maa, J. Bock, A. M. Jacobi, W. Liu, A comparison of four numerical modeling approaches for enhanced shell-and-tube heat exchangers with experimental validation, *Applied Thermal Engineering,* Vol. 65, No. 7, pp. 369-383, 2014.

[17] *Final Saftey Analysis Report* (FSAR), Atomic Energy Organization of Iran, Chapter 1, pp.400-440, 2008.

[18] N. G. Rasohin, *Nuclear power plant steam generators*, Energoatomizdat Moskva, pp. 60–64, 1980.

[19] N. Seto, K. Yuki , H. Hashizume, A. Sagara, Heat transfer enhancement in sphere-packed pipes under high reynolds number ondition, *Fusion Engineering and Design,* Vol. 58, No. 2, pp. 1102-1107, 2008.

[20] A. H. Kamalinia, A. Rabiee, K. Haddad, Numerical analysis of the fusion reactor cooling improvement with porous media, *23th Annual International Conference on Mechanical Engineering,* Tehran, Iran, 2015.

[21] 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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.25.3]