



ارزیابی پارامترهای جریان دوفازی و عملکرد جداساز افقی بخار در نیروگاه‌های هسته‌ای به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

امیرحسین وثوقی^۱، رضا صابری^{۲*}، کامران سپانلو^۲

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، صندوق پستی: ۷۲۹۶۴-۸۴۳۳۴، شیراز- ایران

۲. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

*Email: saberinuc@gmail.com

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۳/۲۹

چکیده

در این تحقیق، به کارگیری فرایند متداول جداسازی رطوبت توسط جداساز افقی بخار، در نیروگاه‌های رایج سیکل بخار، برای نیروگاه‌های هسته‌ای پیشنهاد و به کمک CFD، جریان دوفازی در این فرایند، شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش بارگذاری نیروگاه، افت فشار جداساز افزایش یافته، به طوری که رابطه خطی بین افت فشار و چگالی انرژی جنبشی جریان ورودی برقرار است. همچنین بررسی تأثیر تغییرات ابعاد جداساز، نسبت به طراحی پایه آن بر افت فشار و بازدهی جداساز، نشان داد که با افزایش عرض ورودی، افت فشار کاهش و بازدهی جداساز افزایش می‌یابد. هرچند افزایش بی‌رویه عرض ورودی به کاهش دبی در خروجی‌های جانبی منجر می‌گردد. مطالعه تغییر قطر خروجی جانبی، حاکی از آن است که تغییر پارامتر یاد شده تأثیر چندانی بر افت فشار و بازدهی ندارد؛ اما افزایش آن کسر جرمی بخار در خروجی جانبی را افزایش می‌دهد. براساس ارزیابی صورت گرفته، جداساز افقی بخار، با بازدهی و افت فشاری مطلوب، می‌تواند گزینه مناسبی جهت به کارگیری در نیروگاه‌های هسته‌ای کوچک و پیشران‌های هسته‌ای باشد. برای راستی‌آزمایی، جریان دوفازی یک جداساز قائم آنالیز شد که نتایج توافق خوبی با داده‌های تجربی دارند.

کلیدواژه‌ها: جداساز بخار، افت فشار، بازدهی، کسر جرم بخار، مولد بخار

Assessment of Horizontal Steam Separator Two Phase Flow Parameters and Performance in NPPs with Utilization of Computational Fluid Dynamic

A.H. Vosoughi¹, R. Saberi^{2*}, K. Sepanloo²

1. School of Mechanical Engineering, Shiraz University, P.O.Box: 72964-84334, Shiraz, Iran

2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran

Research Article

Received 18.4.2021, Accepted 19.6.2021

Abstract

In this research, utilization of typical moisture separation process in conventional steam cycle power plants, for NPPs are recommended; and by applying CFD, two-phase flow of this process is simulated. Results show that with increasing of loading, the pressure drop across the separator increases, and a linear relationship between pressure drop and inlet flow kinetic energy density is established. Also, with increasing inlet width, pressure drop decreases and the efficiency increases. However, excessive increasing of input width leads to a decrease in mass flow at lateral outputs. Study on the variation of lateral outlet diameter show that variation of mentioned parameter does not affect pressure drop and efficiency significantly, but reducing of that lead to increasing lateral out let steam mass fraction. Based on the performed assessment, horizontal steam separator as a component with desirable efficiency and pressure drop, can be recognized as a suitable option for utilization in small and low power NPPs as well as propulsion systems. For validation, an analysis of two phase flow in a vertical cylinder cyclone is performed and results show good agreement with experimental data.

Keywords: Steam separator, Pressure drop, Efficiency, Steam mass fraction, Steam generator



۱. مقدمه

از الزامات اصلی در فرایند تولید بخار در نیروگاه‌های هسته‌ای می‌توان به ضرورت حذف رطوبت از بخار ورودی به توربین اشاره کرد. وجود قطرات آب در بخار هر چند با ابعاد بسیار کوچک (در حد میکرون)، به علت سرعت بالایی که دارند مومنتوم زیادی را به پره منتقل می‌کنند و چون سطح انتقال مومنتوم خیلی کوچک است (در حد ابعاد قطرات) تنش وارد شده به سطح پره در محل برخورد زیاد بوده و سبب خوردگی و آسیب سطح پره توربین می‌شود. برای جلوگیری از خوردگی، بخار ورودی می‌بایستی از کیفیت بالایی برخوردار باشد. استانداردهای پذیرفته شده به طور معمول میزان حداکثر ۰/۲۵ درصد جرمی را برای میزان قطرات آب در جریان بخار ورودی به توربین، تعیین کرده است [۱].

در مولدهای بخار عمودی نیروگاه‌های هسته‌ای نوع PWR غربی، جدایش براساس سه نوع جدایش ثقلی، جدایش بر اثر نیروی گریز از مرکز (از طریق جداسازهای محوری پره‌دار)، و جدایش در صفحات کنگره‌ای شکل^۱ و صورت می‌پذیرد [۲]. در مولدهای بخار رآکتورهای طرح VVER، اساس فرایند جداسازی بر جدایش ثقلی و جدایش در صفحات فوقانی مولد بخار استوار است [۳-۵]. در این نوع مولدهای بخار برای تقویت اثر جدایش ثقلی، صفحه‌ی شناور سوراخ‌داری^۲ در داخل مولد تعبیه شده است [۴، ۵].

هر کدام از انواع افقی و عمودی مولد بخار، مزایا و معایبی دارند. مزیت اصلی مولد بخار عمودی، افزایش اثر جدایش ثقلی به دلیل ارتفاع زیاد آن است. همچنین فضای زیاد در قسمت فوقانی این مولدها امکان تعبیه جداسازهای نوع محوری پره‌دار^۳، جهت دستیابی به خلوص بخار بیش‌تر، و امکان اجرای برنامه افزایش توان خروجی نیروگاه در آینده را فراهم می‌سازد [۶، ۷]. در مقابل مولدهای بخار عمودی نقاط ضعفی نیز دارند که مانع از استفاده آن‌ها برای رآکتورهای کوچک و سیستم‌های پیشران می‌شود. از جمله این نقاط ضعف می‌توان به ابعاد بسیار بزرگ (ارتفاع حدود ۲۵ متری)، بالا بودن نرخ خوردگی و استهلاک به ویژه در تیوب‌ها [۷]، هزینه تعمیر و نگهداری بالا [۷]، و نصب و اجرای پرهزینه و دشوار [۶] اشاره نمود.

در مورد مولدهای افقی بخار رآکتورهای VVER، نقاط ضعف اصلی، عبارتند از: ضعف بودن اثر جدایش ثقلی، عدم امکان ارتقای توان در آینده، و عدم بهره‌مندی از فرایند جدایش

گریز از مرکز و در نتیجه نیاز به اعمال افت فشار بیش‌تر برای دستیابی به کیفیت بخار مورد نیاز [۶]. از طرفی مزایای اصلی مولدهای افقی طراحی و ساخت ساده‌تر [۶]، امکان استفاده از ریل در حمل و جابه‌جایی و نصب راحت‌تر [۶]، استهلاک کم‌تر و طول عمر بیش‌تر [۶]، و نهایتاً تعمیر و نگهداری ساده‌تر و کم هزینه‌تر می‌باشد.

با در نظر گرفتن موارد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت استفاده از مولدهای بخار افقی برای رآکتورهای با سطح قدرت بالا و ابعاد بزرگ مناسب نیست [۷]. اما با توجه به این‌که اخیراً طراحی و ساخت رآکتورهای با ابعاد کوچک مورد توجه قرار گرفته است [۸]، و این موضوع که اساساً یکی از اهداف این رویکرد جدید کاهش پیچیدگی‌های رآکتورهای بزرگ، به کارگیری اصول ساده طراحی، و نهایتاً دستیابی به قابلیت اطمینان و ایمنی بالاتر با هزینه ساخت کم‌تر می‌باشد [۸]، استفاده از مولدهای بخار افقی در این نوع رآکتورها مقرون به صرفه‌تر و مناسب‌تر است. در برخی طرح‌ها مولد بخار افقی شامل یک مبدل حرارتی ساده shell & tube می‌شود که خنک‌کننده مدار اول به عنوان منبع گرم در قسمت tube آن جریان دارد. بخار ایجاد شده در shell به یک درام بخار در یک ارتفاع بالاتر رفته که فرایند جدایش بخار در آن‌جا صورت می‌پذیرد. استفاده از درام بخار برای فرایند جدایش، که در نیروگاه‌های متعارف سیکل بخار امروزی امری متداول است، در برخی نیروگاه‌های هسته‌ای، نظیر رآکتورهای Indian Point [۹]، Shipping Port، Pickering و Douglass Point [۱۰] نیز به کار رفته است. همچنین استفاده از این نوع مولدهای بخار دومرحله‌ای افقی دارای درام، در سیستم‌های پیشران و زیردریایی‌های هسته‌ای نیز مرسوم است [۱۰، ۱۱].

با توجه به ضعف بودن اثر جدایش ثقلی در مولدهای بخار افقی، برای ارتقای کل فرایند جدایش نیز می‌توان فرایند جدایش گریز از مرکز را نیز دخیل نمود. برای این کار می‌توان جداسازهای مرسوم و متداول در صنایع نیروگاهی و تولید بخار را به کار بست. نوع خاصی از جداسازهای بخار، موسوم به جداساز افقی بخار، به‌طور گسترده در درام بویلرها، برای جدایش بخار از مایع اشباع، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آن‌جایی‌که دبی آب تغذیه، فشار و دمای کاری مدار دوم نیروگاه‌های هسته‌ای مشابه نیروگاه‌های رایج سیکل بخار است، در فرایند جدایش رطوبت، می‌توان از جداسازهای افقی بخار استفاده نمود.

اساس کار این نوع جداساز، جدایش فاز مایع از بخار، توسط نیروی گریز از مرکز است، که بر اثر جریان چرخشی به‌وجود

1. Chevron Type Separator
2. Submersible Perforated Plate
3. Axial Vane Type Separator



برخلاف جداساز افقی بخار، تحقیقات زیادی بر روی سایر سیکلون‌های رایج و همچنین جداسازهای محوری پره‌دار متداول در PWRها، صورت گرفته است. از مطالعات صورت گرفته بر روی سیکلون‌ها، می‌توان به تحقیق فرچی [۱۲] اشاره کرد؛ که توزیع سرعت مماسی را برای ۴ مقطع در یک جداساز استونهای قائم به دست آورد. در تحقیق حاضر، از نتایج وی برای راستی‌آزمایی و مقایسه با داده‌های به دست آمده از حل عددی استفاده شده است. در شکل ۳ شماتیکی از این جداساز آورده شده است.

مطالعه عددی ژائو تیان و لیخین یانگ [۱۳] بر روی نوع جدیدی از جداسازهای دو مرحله‌ای مورد استفاده در رآکتورهای PWR، نشان داد که مدل توربولانس موسوم به SST k- ω ، نسبت به مدل رایج k- ϵ ، منجر به توافق بهتر با داده‌های تجربی می‌شود. همچنین افزایش جریان ورودی منجر به افزایش افت فشار می‌گردد. از طرفی کاهش قطر جداساز، هرچند سبب تقویت اثر جدایش در مرحله دوم گردیده، اما افت فشار را به شدت افزایش داده است.

مطالعه تجربی جدایش در جداساز محوری مقیاس ۱:۱، در یک مولد بخار رآکتور PWR، توسط لی لیو و همکاران [۱۴]، نشان داد که برای بارگذاری‌های ۲۵٪ تا ۱۴۵٪، بازدهی جداساز بین ۹۷٪ تا ۹۹٪، نرخ استحصال رطوبت بین ۲٪ تا ۱۶٪ و افت فشار بین ۲ تا ۲۴ کیلو پاسکال متغیر است. در این تحقیق نیز مقادیر مشابهی برای افت فشار به دست آمده است. به گونه‌ای که برای جداساز افقی بخار در بارگذاری‌های مختلف، از ۲۵٪ تا ۱۱۰٪، افت فشار بین ۵ تا ۲۵ کیلو پاسکال متغیر بوده و از طرفی بازدهی در رنج ۹۰٪ تا ۹۲٪ تغییر می‌کند.

۲. جداساز بخار افقی

شکل ۴ شمای کلی و ابعاد جداساز افقی بخار را، که موضوع شبیه‌سازی این تحقیق است، نشان می‌دهد. پهنای این جداسازها ۱۸۴ mm است. شرایط کاری این جداساز نیز در جدول ۱ آورده شده است.

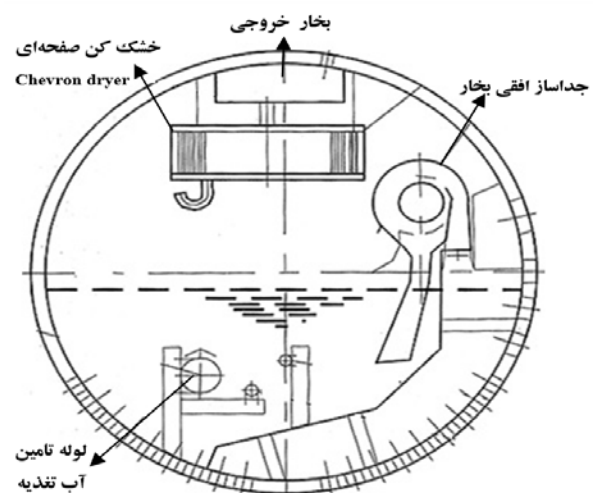
رابطه‌ی بازدهی برای این جداسازها مطابق زیر تعریف می‌شود [۱۵]:

$$\eta = 1 - \frac{\dot{m}_{wout}}{\dot{m}_{win}} \quad (1)$$

که در آن \dot{m}_{wout} دبی خروجی مایع از خروجی جانبی و \dot{m}_{win} دبی ورودی مایع می‌باشد. قسمت بالایی این نوع جداسازها از قسمت پایینی آن توسط یک صفحه‌ی سوراخ‌دار^۱ به ضخامت دو میلی‌متر، جدا شده است.

می‌آید. این فرایند جدایش مبتنی بر نیروی گریز از مرکز در کنار جدایش ثقلی، اساس فرایند جدایش بخار در درام بویلرها می‌باشند. رطوبت باقی‌مانده در خشک‌کن‌های صفحه‌ای در بالای درام گرفته می‌شود، تا کیفیت بخار لازمه حاصل آید. این نوع جداسازها به صورت یک مجموعه موازی در درام نصب می‌گردند. در شکل‌های ۱ و ۲ این نوع جداساز و موقعیت قرارگیری آن در درام نشان داده شده است.

متأسفانه مرجع خاصی که به بررسی عملکرد این نوع جداساز و الگوی جریان در آن پرداخته باشد، در دسترس نیست. در واقع پیچیدگی هندسه، جریان دوفازی با کسر حجمی بالا مدل‌سازی عددی را دشوار و دبی، فشار و دمای بالای مخلوط اشباع، مانع از انجام آزمایشات تجربی بر روی جداساز افقی شده است.



شکل ۱. موقعیت قرارگیری جداساز افقی بخار در نمایی از یک مقطع برش خورده درام.



شکل ۲. جداساز افقی بخار.



۳. معادلات حاکم

بخار به عنوان فاز اولیه تراکم‌ناپذیر فرض شده است، که به دلیل کم بودن سرعت جریان و همچنین تغییرات کم فشار منطقی است.

بالا بودن کسر خلأ (کسر حجمی) در ورودی جداساز (که در حدود ۵۰٪ می‌باشد) مانع از به کارگیری روش‌های محاسباتی ساده‌تر، نظیر روش لاگرانژی برای حل جریان دو فازی می‌شود. در دیدگاه لاگرانژی فاز ثانویه به صورت ذراتی که تحت تأثیر حرکت فاز اولیه هستند، در نظر گرفته می‌شوند. در این رویکرد برای فاز اول معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی، و برای فاز ثانویه معادله حرکت ذره حل می‌شود. این روش برای جریان‌هایی که در آن‌ها کسر حجمی فاز دوم بالای ۱۰٪ است، توصیه نمی‌شود [۱۶، ۱۷].

در این تحقیق برای حل عددی جریان دوفازی از مدل مخلوط^۲ استفاده شده است.

اگر فاز اولیه (بخار) را با پسوند q نشان دهیم. معادله‌ی مومنوم برای آن به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\rho v_{q_i} \frac{\partial v_{q_i}}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_{q_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_{q_j}}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

که در آن v_q سرعت، p فشار و μ ویسکوزیته‌ی سیال می‌باشد. τ_{ij} تانسور تنش رینولدز می‌باشد که اثر توربولانس را بر روی جریان نشان می‌دهد:

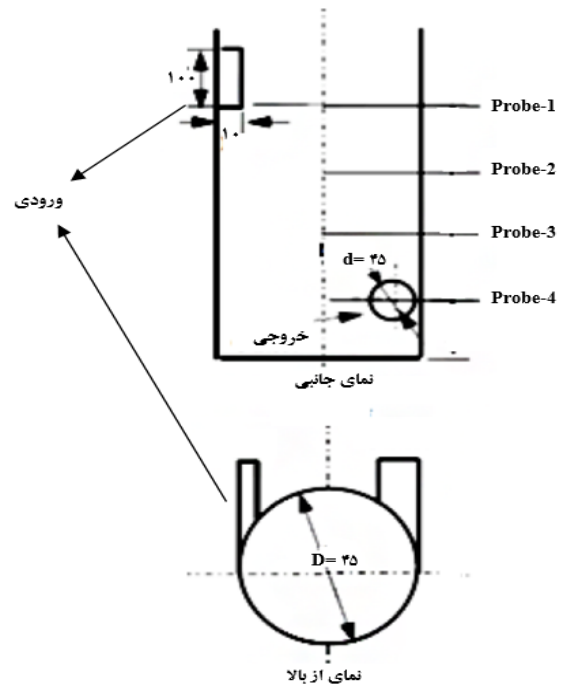
$$\tau_{ij} = -\rho \overline{v'_{q_i} v'_{q_j}} \quad (3)$$

معادله‌ی پیوستگی نیز به صورت زیر می‌باشد:

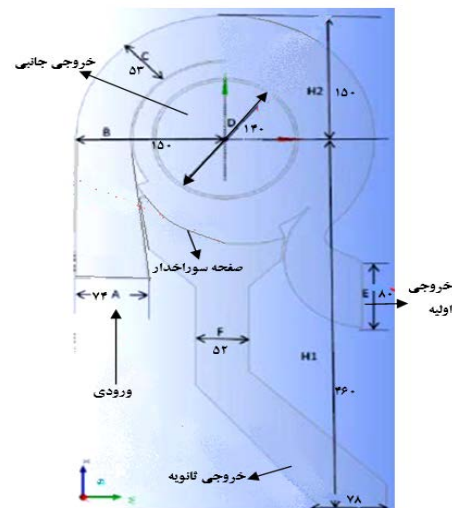
$$\frac{\partial v_{q_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

برای مدل‌سازی آشفتگی جریان از مدل RSM^3 استفاده شده است. در این روش برای هر یک از تنش‌های رینولدز یک معادله‌ی انتقال حل می‌شود.

مدل مخلوط معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی را برای مخلوط دو فازی، و یک معادله‌ی کسر خلأ برای فاز ثانویه حل می‌کند. در همه‌ی این معادلات سرعت، چگالی و ویسکوزیته



شکل ۳. جداساز گاز-مایع (تمامی ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند).



شکل ۴. جداساز افقی بخار؛ تمامی ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند [۱۵].

جدول ۱. شرایط کاری جداساز افقی در بارگذاری‌های مختلف [۱۵]

Load	فشار کاری (bar g)	دبی ورودی مایع (kg/s)	ورودی بخار (kg/s)
۰.۲۵	۴۴.۲	۲۲.۳۵	۰.۳۴۷
۰.۳۴۴	۴۴.۳	۲۲.۳۵	۰.۴۸
۰.۷۵	۴۵.۶	۳۳.۱	۱.۰۴۵
۰.۸۰	۴۵.۸	۳۷.۱۶	۱.۲۲۵
۰.۱۰۰	۴۶.۸	۳۷	۱.۳۸۲
۰.۱۱۰	۴۷.۴	۳۸.۷۷	۱.۵۲

1. Volume Fraction

2. Mixture Model

3. Reynolds Stress Model

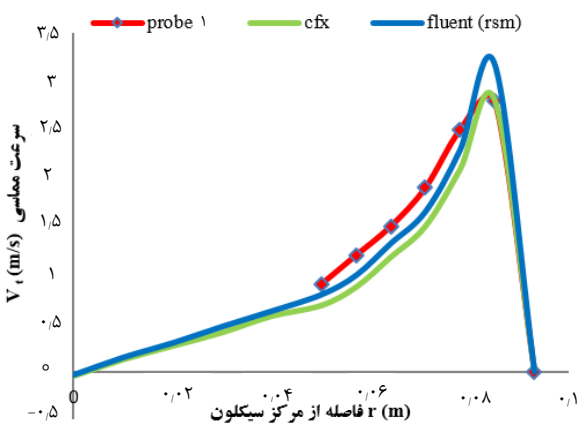


دبی آب ورودی ۲/۶۶ کیلوگرم بر ثانیه و دبی هوا ۰/۰۰۲ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. ادرال و همکاران، در یک پژوهش جداگانه سرعت مماسی را برای این ۴ مقطع، به کمک نرم‌افزار CFX به دست آوردند [۱۸].

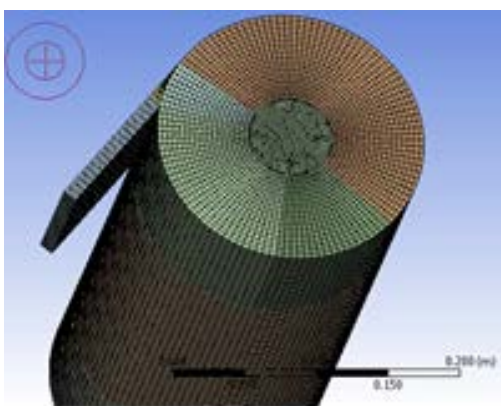
در این تحقیق نیز به کمک Fluent و مدل‌های جریان دوفازی مخلوط و توربولانس RSM توزیع سرعت مماسی دو مقطع ۱-probe، ۳-probe به دست آمده است. نتایج به دست آمده توافق خوبی با داده‌های فرچی و ادرال دارد.

۵. شبکه‌ی محاسباتی ایجاد شده

در شکل‌های ۶ و ۷، شبکه محاسباتی ایجاد شده برای هر دو نمونه افقی و قائم نشان داده شده است. این شبکه‌ها که در آن‌ها سلول‌های محاسباتی در سطوح مشترک کاملاً برهم منطبق هستند، از کیفیت بسیار بالایی برخوردار بوده به طوری که متوسط اعوجاج^۲ برای مدل جداساز استوانه‌ای قائم ۰/۰۳۷ و برای مدل جداساز افقی ۰/۰۵۷ است.



شکل ۵. پروفایل سرعت مماسی در مقطع ۱-probe.



شکل ۶. شبکه محاسباتی ایجاد شده برای جداساز قائم.

برای مخلوط جای‌گذاری می‌شوند. اگر مخلوط را با پسوند m و هر فاز را با پسوند k نمایش دهیم، برای سرعت و چگالی مخلوط خواهیم داشت:

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (5)$$

و

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (6)$$

سایر خواص مخلوط مانند ویسکوزیته همانند چگالی (رابطه‌ی ۶) به دست می‌آیند. در معادلات بالا v ، ρ و α به ترتیب سرعت، چگالی و کسر حجمی می‌باشند. اگر بین فازها اختلاف سرعت (لغزش) باشد، به همراه این معادلات یک سری معادلات جبری برای سرعت‌های نسبی در نظر گرفته می‌شود که در زیر رابطه‌ی آن آورده شده است:

$$\vec{v}_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{\rho_p - \rho_m}{\rho_p} \vec{a} \quad (7)$$

پسوند p ، q و m به ترتیب معرف فاز ثانویه، فاز اولیه و مخلوط دو فاز می‌باشند. τ_p زمان مشخصه و a شتاب ذرات فاز دوم می‌باشد. f_{drag} در معادله‌ی ۷ تابع دراگ است، که بر اساس رینولدز جریان از روابط تجربی به دست می‌آید. یکی از متداول‌ترین مدل‌ها برای تبیین تابع درگ، رابطه تجربی Schiller-Naumann می‌باشد، که در زیر آورده شده است [۲۲].

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re^{0.687}, & Re \leq 1000 \\ 0.175 Re, & Re > 1000 \end{cases} \quad (7)$$

در گسسته‌سازی تمامی معادلات اندازه حرکت، توربولانس و کسر خلأ روش quick برای کوپلینگ سرعت- فشار الگوریتم SIMPLE اعمال شده است.

برای اعتبارسنجی روش حل محاسباتی، شبیه‌سازی دیگری برای یک نمونه‌ی مشابه صورت پذیرفته است.

۴. جداساز استوانه‌ای شکل قائم

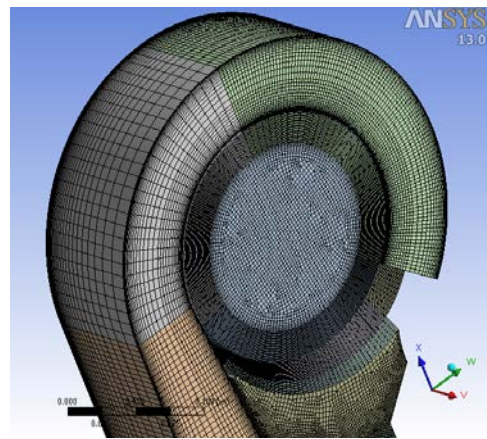
شکل ۵، شمای کلی از جداساز استوانه‌ای شکل قائم را به تصویر می‌کشد. مخلوط آب و هوا در شرایط اتمسفریک از ورودی تعبیه شده در قسمت فوقانی، وارد این جداساز استوانه‌ای می‌شود. برای این نمونه اندازه سرعت مماسی در چهار مقطع زیر ورودی، و ۹۵ mm، ۱۹۰ mm و ۲۸۵ mm پایین‌تر از ورودی ثبت گردیده‌اند [۱۴]؛ که در شکل به ترتیب با ۱-probe، ۲-probe، ۳-probe و ۴-probe نشان داده شده‌اند.

1. Conformal Mesh
2. Skew Ness

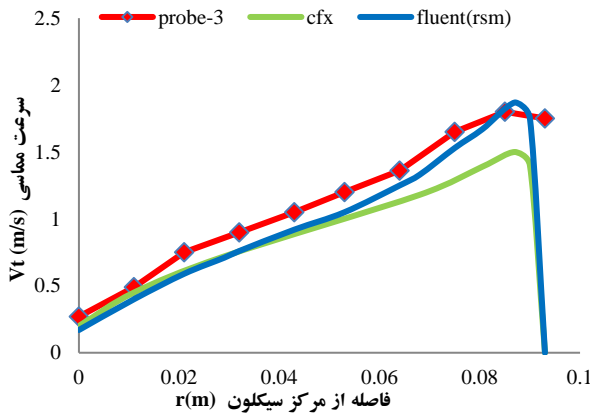


از خود نشان می‌دهد. شیب این خط، یا در واقع همان ضریب افت فشار ۱/۹۷ می‌باشد.

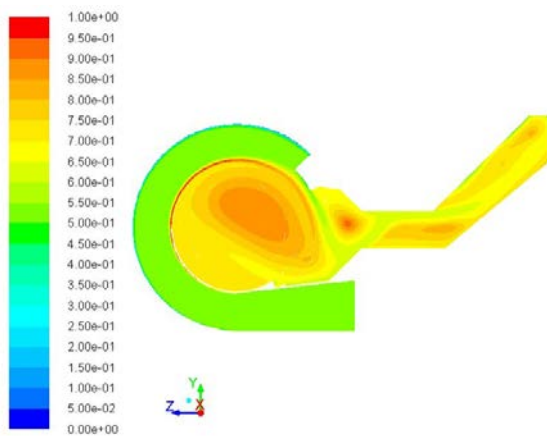
در شکل ۱۳ نمودار تغییرات بازدهی و کسر حجم بخار در خروجی جانبی برای حالات بارگذاری مختلف آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، کسر حجمی بخار و بازدهی به ترتیب حول مقادیر ۹۳٫۵٪ و ۹۰٪ تقریباً ثابت مانده‌اند. اعلام شده برای جداساز از سوی شرکت سازنده در حدود ۹۵٪ پیش‌بینی شده است [۲۰].



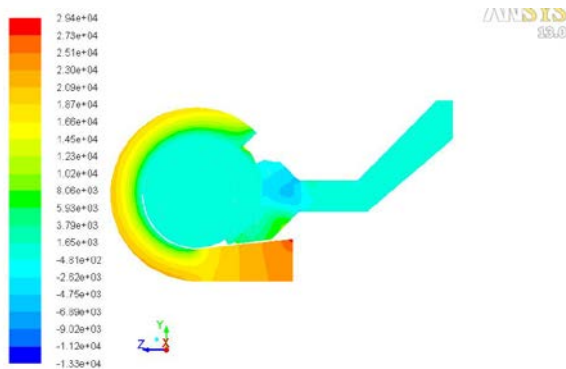
شکل ۷. شبکه محاسباتی ایجاد شده برای جداساز افقی.



شکل ۸. پروفایل سرعت مماسی در مقطع ۳-probe.



شکل ۹. کانتور کسر حجم بخار آب در صفحه‌ی تقارن جداساز افقی بخار.



شکل ۱۰. کانتور فشار استاتیک در صفحه‌ی تقارن جداساز افقی بخار.

طور تقریبی تعداد مش‌های محاسباتی برای جداساز قائم ۳۳۰۰۰۰ و برای مدل پایه‌ی جداساز افقی ۱۱۵۰۰۰۰ می‌باشد. در ایجاد شبکه محاسباتی تماماً از مش‌های شش وجهی استفاده شده است.

۶. نتایج

۱۰۶ جداساز استوانه‌ای شکل قائم

در شکل‌های ۷ و ۸، پروفایل تغییرات سرعت مماسی بر حسب فاصله، برای جداساز قائم در دو مقطع ۱-probe، ۳-probe آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود توافق خوبی بین داده‌های تجربی فرچی [۱۴، ۲۳] و نتایج Fluent وجود دارد. هم‌چنین به علت استفاده از مدل آشفتگی RSM، نتایج Fluent از CFX [۲۳] دقیق‌تر است.

۲۰۶ جداساز بخار افقی

در این جداسازها قطر قطرات آب از ۱۰ میکرون تا حداکثر ۱ میلی‌متر متغیر است. در شبیه‌سازی صورت گرفته و اعمال مدل دوفازی مخلوط، قطر قطرات ۱۰ میکرون فرض می‌شود. در واقع این محافظه‌کارانه‌ترین فرض ممکن است، زیرا واضح است که بازدهی برای قطرات بزرگ‌تر، به علت افزایش نیروی گریز از مرکز، بیش‌تر است. در شکل‌های ۹ و ۱۰، کانتور کسر حجمی و فشار در صفحه تقارن جداساز نشان داده شده‌اند.

۳۰۶ اثر تغییرات بارگذاری بر افت فشار و بازدهی جداساز بخار

تغییرات افت فشار در بارگذاری‌های مختلف، و هم‌چنین بر حسب انرژی جنبشی واحد جرم سیال، در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است.

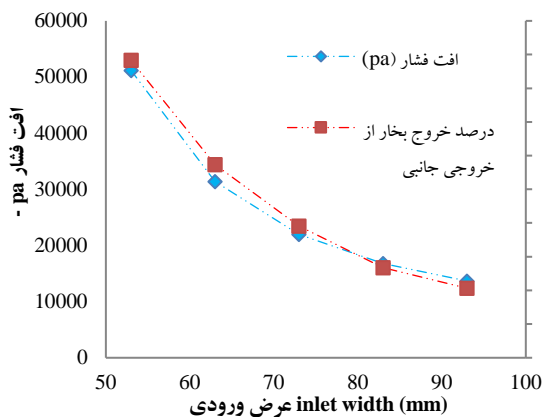
همان‌طور که مشاهده می‌شود افت فشار با افزایش میزان بارگذاری به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. تغییرات افت فشار بر حسب چگالی انرژی جنبشی سیال نیز رفتار تقریباً خطی



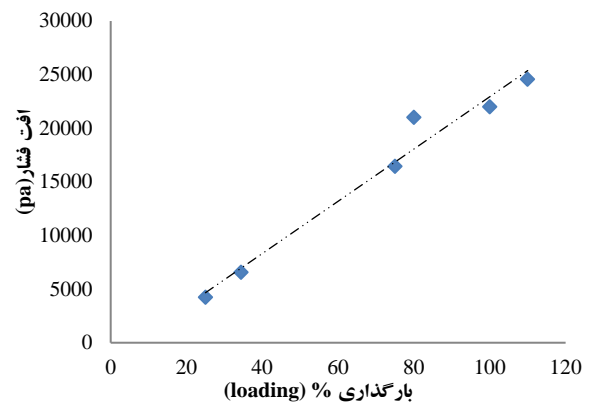
افقی بخار برای ۵ عرض ورودی مختلف ۷۴ mm، ۵۴ mm، ۶۴ mm، ۸۴ mm و ۹۴ mm باز تولید و حل عددی جریان دوفازی با مدل مخلوط مجدداً برای آن‌ها صورت گرفت. سایر ابعاد مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

در بررسی صورت گرفته مشخص شد، با کاهش عرض مقطع ورودی، افت فشار افزایش شدیدی می‌یابد. ولی روند کاهش افت فشار با افزایش عرض ورودی کند است. همین رفتار در مورد درصد جرمی بخار در خروجی جانبی هم دیده می‌شود. به گونه‌ای که با عریض‌تر شدن ورودی، به یک مقدار کم (در حدود ۱۰٪) میل کرده و ثابت می‌ماند. نمودار اثر تغییر عرض ورودی بر پارامترهای مذکور، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در مورد بازدهی، روند برعکس است؛ به گونه‌ای که کاهش آن بر اثر کاهش عرض ورودی، نسبت به افزایش آن بر اثر عریض‌تر شدن ورودی شدیدتر است (شکل ۱۵).

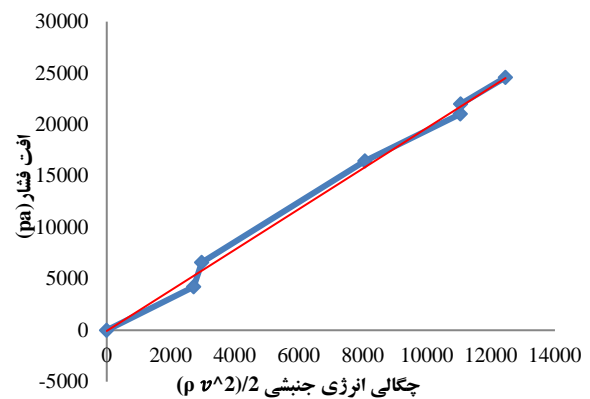
بررسی صورت گرفته نشان می‌دهد که کاهش عرض مقطع ورودی اثر نامطلوبی روی افت فشار و بازدهی خواهد داشت. از طرفی هرچند با عریض شدن ورودی، بازدهی افزایش یافته و افت فشار کاهش می‌یابد؛ اما کسر جرمی بخار در خروجی جانبی نیز نسبت به مقداری که برای عرض ۷۴ mm دارد، به میزان چشم‌گیری کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند باعث ناپایداری جریان در جداساز و ایجاد جریان برگشتی با کوچک‌ترین اغتشاشی در خروجی جانبی شود.



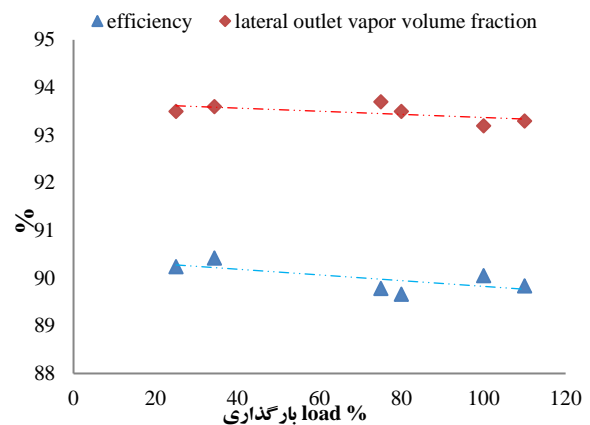
شکل ۱۴. اثر عرض مقطع ورودی بر روی افت فشار و کسر جرمی بخار در خروجی جانبی.



شکل ۱۱. افت فشار جداکننده بخار در بارگذاری‌های مختلف.



شکل ۱۲. افت فشار جداکننده برحسب انرژی جنبشی واحد جرم سیال.

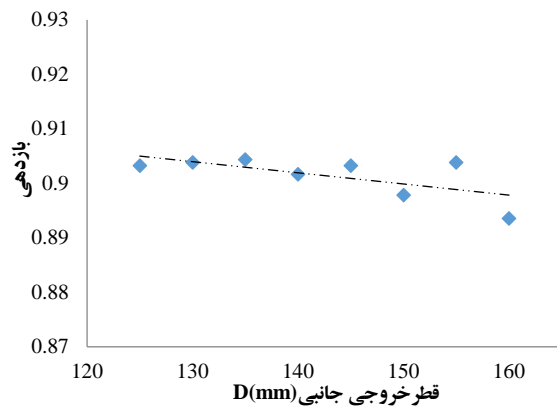


شکل ۱۳. کسر حجمی بخار خروجی جانبی و بازدهی در بارگذاری‌های مختلف.

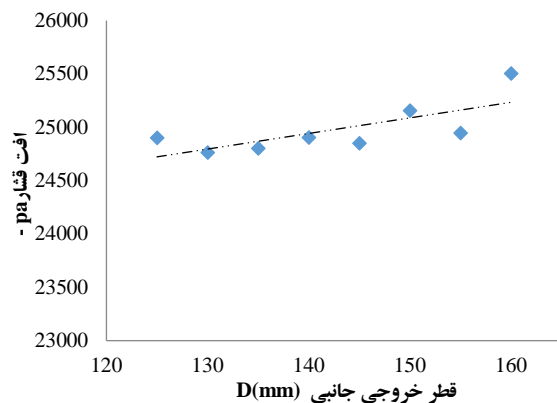
۴.۶ اثر تغییرات عرض ورودی بر افت فشار، بازدهی و کسر جرمی بخار در خروجی جانبی

در بررسی دیگری اثر تغییر عرض مقطع ورودی بر افت فشار، کسر جرمی بخار در خروجی جانبی و بازدهی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این بررسی مدل و شبکه محاسباتی جداساز

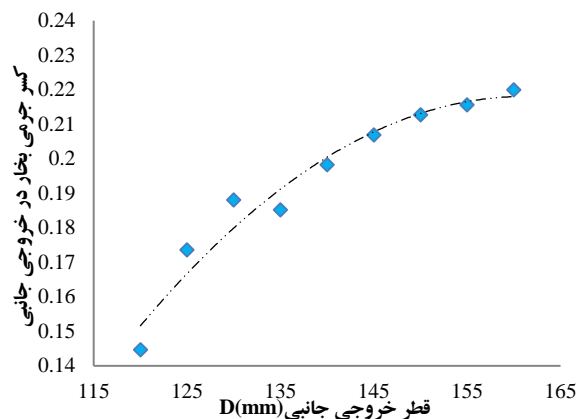




شکل ۱۶. تغییرات بازدهی بر حسب تغییرات قطر خروجی جانبی.

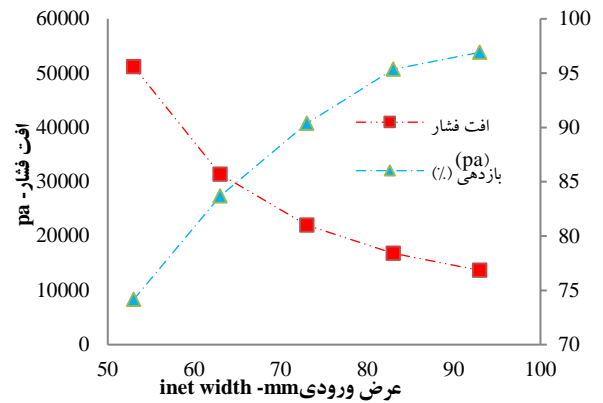


شکل ۱۷. تغییرات افت فشار بر حسب تغییرات قطر خروجی جانبی.



شکل ۱۸. کسر جرمی بخار در خروجی جانبی بر حسب تغییرات قطر خروجی جانبی.

آنالیز عددی صورت گرفته نشان داد که، با افزایش بارگذاری درام بخار، افت فشار افزایش می‌یابد. هم‌چنین مشخص گردید بین افت فشار جداکننده و چگالی انرژی جنبشی جریان در ورودی رابطه‌ای خطی با ضریب ۱/۹۷ برقرار است. بازدهی و کسر حجمی بخار در خروجی جانبی تقریباً مستقل از بارگذاری



شکل ۱۵. اثر عرض مقطع ورودی بر روی افت فشار و بازدهی.

۵.۶ اثر تغییرات قطر خروجی جانبی بر افت فشار، بازدهی و کسر جرمی بخار در خروجی جانبی

مطالعه دیگری بر روی اثر قطر خروجی جانبی بر عملکرد جداساز صورت گرفته است. در این مرحله، برای ۸ قطر مختلف خروجی جانبی، از ۱۲۵ mm تا ۱۶۰ mm (با فاصله ۵ mm) مدل و شبکه محاسباتی باز تولید و جریان دوفازی برای هر کدام به صورت جداگانه حل شده است. قطر اصلی خروجی جداساز ۱۴۰ میلی‌متر می‌باشد.

نتایج مربوط به بازدهی و افت فشار در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر قطر خروجی جانبی جداساز بازدهی تقریباً ثابت مانده است. هم‌چنین با افزایش قطر خروجی جانبی، افت فشار اندکی افزایش یافته است. مقدار تقریبی بازدهی ۹۰٪ و مقدار تقریبی افت فشار در حدود ۲۵ kpa می‌باشد. علت عدم تأثیر عملکرد جداساز از قطر خروجی می‌تواند به این موضوع برگردد که بخش بزرگی از جریان از خروجی اولیه خارج می‌شود.

در ادامه کسر جرمی بخار در خروجی جانبی برای قطرهای مختلف خروجی به تصویر درآمده است (شکل ۱۸).

همان‌طور که دیده می‌شود درصد خروج بخار از خروجی جانبی برای قطرهای کوچک‌تر، کم‌تر است. با افزایش قطر این مقدار افزایش یافته و به ۰/۲۲ میل می‌کند.

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به کمک ANSYS Fluent، جدایش بخار در یک جداساز افقی بخار شبیه‌سازی شد و اثر تغییر ابعاد بر روی پارامترهای کلیدی نظیر افت فشار، بازدهی، کسر جرمی و کسر حجمی بخار در خروجی جانبی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای مدل‌سازی جریان دوفازی از روش مخلوط و برای آشفتگی جریان مدل RSM به کار گرفته شدند. برای راستی‌آزمایی روش‌های به کار بسته‌شده، جریان دوفازی در یک جداساز نوع سیکلون قائم استوانه‌ای شکل، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عددی توافق خوبی با داده‌های تجربی داشتند.



مراجع

1. G. Mauro, M. Sala, G. Hetsroni, *Improved Italian Moisture Separator (IIMS)*, *Nuc. Eng. & Desi.*, **118**, 179 (1990).
2. J. Riznic, *Steam Generator for Nuclear Power Plants*, 1st ed. (Elsevier, 2017).
3. A. Safavi, et al, *The Model of Boiling Water Flow in the VVER-1000 Steam Generator*, *J. of Nuclea Sci. and Tech.* **65**, 101 (2013) (in Persian).
4. V.I. Gorburov, A.Yu. Petrov, I.S. Suslov, *Gravitational Separation in Horizontal PGV-1000 Steam Generators in Nuclear Power Plants with VVER Reactors*, *Atom. Ener.*, **98**, 406 (2005).
5. J. Barbaud, et al, *WWER-1000 Steam Generator Integrity*, *IAEA-EBP-WWER-07*. (IAEA, Vienna, 1997).
6. M. Egorov, et al, *Russian and Foreign Steam Generators for NPP Power Units with Wet Steam Turbines*, *E3S W. of Con.* **178**, 01007 (2020).
7. M.J. Banic, et al, *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators*, *IAEA-TECDOC-982*. (IAEA, Vienna, 1997).
8. R. Rosner, S. Goldberg, J.S. Hezir, *Small Modular Reactors- Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S. (The university of Chicago & Energy policy institute at Chicago, funded by U.S.DOE, Chicago, 2011)*.
9. M.M. El-Wakil, *Nuclear Energy Conversion*, (In text Educational Publishers, Wisconsin, 1971).
10. D.J. Stelliga, J.M. Dyke, *Nuclear Heated Steam Generators*, Bobcock & Wilcox Canada LTD. Presentation for Canadian electrical association. (Ontario, 1970), <https://canteach.candu.org>.
11. W. Davis, *Steam generators: Design and Detail*, (2012). <http://atomicpowerr.blogspot.com/2012/03/steam-generators-design-and-details.html?m=1>.
12. Farchi, M.S. thesis, *A Study of Mixers and Separators for Two Phase Flow in M.H.D. Energy Conversion System*, Ben-Gurion University, (1990).
13. Z. Tian, L. Yang, *Numerical Investigation on a New Type of Two-Stage Steam Separator in Pressurized Water Reactors*, *Ener. Proce.*, **142**, 3962 (2017).
14. L. Liu, et al, *Experimental Study on The Separation Performance of A Full-Scale SG Steam-Water Separator*, *Ann. Nuc. Ene.*, **141** (2020).
15. MAPNA Boiler Co. technical Spec., *Steam Drum Internals*, document no: vp-1516-121-b101-004.
16. M. Ghiaasiaan, *Two- Phase Flow, Boiling and Condensation*, (Cambridge university press, Edinburgh building, Cambridge, 2008).
17. *Fluent 6.3 User's Guide*, (Fluent Inc. 2006).
18. F.M. Erdal, S.A. Shirazi, O. Shoham, In: *SPE Annual Technical Conference; CFD simulation of Single-Phase and two-phase flow in gas-liquid cylindrical cyclone separators*, (SPE, Denver, USA, 1997).

درام بوده و به ترتیب مقادیر حدودی ۹۰ و ۹۳ درصد را دارا می‌باشند. بازدهی اعلام شده از سوی سازنده ۹۵٪ است [۱۵].

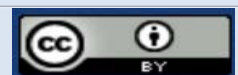
نتایج بررسی عددی اثر عرض ورودی بر عملکرد جداساز نشان داد که تغییرات افت فشار، بازدهی و کسر جرمی بخار خروجی جانبی، با کاهش عرض ورودی، شدید می‌باشد. با عریض شدن ورودی، روند تغییرات این پارامترها کند بوده و در نهایت به یک مقدار خاص میل می‌کند. با عریض تر شدن ورودی هر چند بازدهی افزایش یافته و افت فشار کاهش می‌یابد، ولی در عمل کسر جرمی بخار در خروجی جانبی به میزان چشم گیری کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش بیش از حد عرض مقطع ورودی نسبت به طراحی اصلی توصیه نمی‌شود.

مطالعه عددی اثر تغییر قطر خروجی جانبی، نشان می‌دهد که بازدهی و افت فشار، تقریباً مستقل از قطر خروجی جانبی جداساز است. از طرفی با افزایش قطر خروجی جانبی کسر جرمی بخار خارج شده از آن افزایش یافته تا در نهایت به مقدار ثابت میل می‌کند. بنابراین افزایش قطر خروجی جانبی نسبت به طراحی اصلی می‌تواند اثر مطلوبی بر عملکرد کلی جداساز داشته باشد.

در مجموع ارزیابی صورت گرفته نشان داد که جداساز افقی پیشنهادی، علاوه بر داشتن بازدهی مطلوب از افت فشاری در محدوده جداسازهای متداول در PWRها (حدود ۲۰ تا ۲۵ کیلوپاسکال) برخوردار است [۱۹]. با توجه به معایب و مزایای مولدهای بخار افقی [۷، ۸]، به کارگیری این جداسازها در درام بخار، می‌تواند گزینه مناسبی برای جدایش بخار در مدار دوم رآکتورهای با ابعاد کوچک و پیشران‌های هسته‌ای محسوب شود. به ویژه در مورد پیشران‌های هسته‌ای که محدودیت فضا، مانع از به کارگیری مولدهای بخار عمودی حجیم و مرتفع می‌گردد، استفاده از مولدهای بخار افقی و کوچک تر توجیه پذیر است. در این خصوص می‌توان کل فرایند جدایش و جریان دوفازی درام بخار را با در نظر گرفتن اثر جدایش ثقلی، و جدایش گریز از مرکز ثانویه (در صفحه‌ی قوس‌دار بعد از خروجی)، به همراه جدایش در خشک‌کن‌های تعبیه شده در قسمت فوقانی تحلیل نمود. این موضوع می‌تواند در تحقیقی دیگر مورد مطالعه قرار گیرد.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

امیرحسین وثوقی، رضا صابری، کامران سپانلو (۱۴۰۱)، ارزیابی پارامترهای جریان دوفازی و عملکرد جداساز افقی بخار در نیروگاه‌های هسته‌ای به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، ۱۰۰، ۷۱-۷۹

DOR: 20.1001.1.17351871.1401.43.2.8.3

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1385.html

