



Sci. and Tech. note
یادداشت علمی و فنی

مدل سازی جریان آب جوش در مولد بخار VVER-1000

امیر صفوی*^۱، محمدرضا عبدی^۲، منصور طالبی^۳، محمدحسین استکی^۴

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده‌ی علوم و فن آوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران
۲. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران
۳. گروه مهندسی پزشکی، دانشکده‌ی فنی - مهندسی، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران
۴. پژوهشکده‌ی علوم و فن آوری‌های هسته‌ای، صندوق پستی: ۸۱۴۶۵-۱۵۸۹، اصفهان - ایران

چکیده: مدل عددی دو بعدی و سه بعدی مولد بخار VVER-1000، که در صنعت هسته‌ای کشور از آن استفاده می‌شود، در این مقاله ارائه شده است. برای مدل‌سازی انتقال حرارت جوشان، جوشش و میعان از روش اویلر-اویلر در مدل‌سازی سه بعدی طرف ثانویه‌ی مولد بخار از یک مدل فضای متخلخل پیش از این گزارش شده توسط استوسیک و استوانوویچ برای مولد بخار VVER-440، استفاده شده است. مدل فضای متخلخل به این معنی است که بسته لوله‌های طرف ثانویه به طور جزئی و دقیق مدل‌سازی نمی‌شوند، بلکه به صورت منبع‌های تکانه و انتالپی فرض می‌شوند. مدل‌های ساخته شده به کمک تابع‌هایی که در ANSYS-CFX تعریف شده‌اند، بهبود یافته‌اند. نتایج این مدل‌سازی مربوط به حالتی است که مولد در حداکثر توان کار می‌کند. نتایج به دست آمده، توزیع درصد حجمی بخار و نقش جداکننده‌ی شناور را، که تنها در VVER-1000 وجود دارد، نشان می‌دهد. برای راستی آزمایی نتایج، از نتایج آزمایشگاهی استوانوویچ (۱۹۹۷) استفاده شد. مقایسه بین نتایج به دست آمده از مدل عددی و نتایج تجربی تطابق قابل قبولی را نشان داد. در مدل دو بعدی، توزیع سرعت بخار در مکان‌های مختلف به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: مولد بخار VVER-1000، مدل عددی دو بعدی و سه بعدی، مدل فضای متخلخل

The Model of Boiling Water Flow in the VVER-1000 Steam Generator

A. Safavi*¹, M.R. Abdi², M. Talebi⁴, M.H. Esteki³

1. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Advanced Sciences & Technologies, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan - Iran
2. Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan - Iran
3. Department of Biomedical, Faculty of Engineering, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan - Iran
4. Nuclear Science & Technology Research Institute (NSTRI), P.O.Box: 81465-1589, Isfahan - Iran

Abstract: 2D and 3D numerical models of a steam generator for VVER-1000 type nuclear reactors used in the nuclear industry is presented. For the calculation Euler-Euler approach is applied for modeling the boiling heat transfer, boiling and recondensation. In the 3D model, the secondary side of the steam generator is simulated by the porosity model presented earlier by Stosic and Stevanovic. In the Porosity model, the tubes of the primary circuit are not described in detail, but they are modeled as sources of enthalpy and pressure loss. The physical models were implemented by user-defined programs in ANSYS-CFX12.1 computational fluid dynamics software. The results of the 3D thermal-hydraulic modeling of the steam generator in the Russian type VVER-1000 NPP for the full load operating condition are presented. The results clearly illustrate a void fraction distribution. Moreover, the role of submerged perforated sheet is investigated. The results are compared with a published paper in 1999 by Stevanovic. There is a good agreement between the introduced calculation. In addition, in the 2D model, the superficial velocity of water vapor is calculated as well.

Keywords: VVER-1000 Steam Generator, 2D and 3D Model, Porous Media Model

*email: amir.safavi.1365@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۷/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۴/۳۰



جدول ۱. مشخصات گرم‌آبی مولد بخار VVER-1000

توان گرمایی (MW)	طرف اولیه			طرف ثانویه	
	دما (°C)	دمای آب تغذیه (°C)	بخار (kg s ⁻¹)	آب تغذیه (kg s ⁻¹)	فشار (مگاپاسکال)
۷۵۰	۳۲۰،۲۹۰	۲۰۰	۴۰۸	۴۰۸	۷،۸۴

پس از محاسبه‌ی درصد حجمی بخار در مکان‌های مختلف مدل سه بعدی و بررسی نقش جداکننده‌ی شناور، یک مدل دو بعدی از مولد بخار آورده شد. در مدل دو بعدی که در آن دسته لوله‌ها برای اولین بار نسبت به کارهای قبلی به طور کامل مدل‌سازی شد، معادله‌های جریان حل، و سرعت بخار در نواحی مختلف، و سرعت بیشینه و کمینه‌ی بخار در مولد بخار محاسبه شد. محاسبه‌ی سرعت دقیق که در این مدل صورت گرفت، در تحلیل ارتعاشاتی و عمر خستگی لوله در مولد بخار قابل استفاده است.

۲. مدل‌سازی مولد بخار VVER-1000 و شبکه‌بندی آن

برای شبکه‌بندی مدل، از ۴۵۰۰۰۰۰ عنصر شش وجهی و منشوری استفاده شد. در شکل ۱ نمایی از مدل رسم، و تراکم مش‌بندی آورده شده است. دواير قرمز رنگ، مربوط به مدل‌سازی منبع آب تغذیه هستند که با منابع حجمی شبیه‌سازی شده‌اند. از عنصرهای منشوری در نواحی مرزی، که در آن تغییرهای پارامترهای سیالی شدید است، استفاده شده است.

۳. مدل‌سازی جداکننده‌ی شناور

جداکننده‌ی شناور در واقع یک جداکننده‌ی بخار است که در وسط مولد بخار قرار دارد، و در آب موجود در مولد، شناور است. در صورت مدل‌سازی این صفحه به صورت کامل، حل عددی بسیار پیچیده و زمان‌بر می‌شود، در نتیجه، به جای مدل‌سازی هندسی این صفحه، نقش این صفحه مدل‌سازی شد، به این صورت که در مکان جداکننده‌ی شناور یک شرط مرزی از نوع شرط مرزی باز^(۲) در نظر گرفته شد.

۴. جریان‌های دو فازی

مدل‌سازی جریان دو فازی به دو دسته‌ی همگن و ناهمگن تقسیم شد.

۱. مقدمه

تحلیل مشخصات جریان از جمله سرعت، درصد حجمی و میزان رسوبات از اهمیت به‌سزایی در طراحی و نگهداری مولد بخار برخوردار است. استوانویچ (۱۹۹۹) به کمک یک کد سه بعدی، درصد حجمی بخار در مکان‌های مختلف مولد بخار VVER-1000 را محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه کرد [۱]. کریستف (۲۰۰۸) جریان‌های طرف ثانویه‌ی مولد بخار VVER-440 را بررسی و نواحی با رسوب‌گذاری بیش‌تر و بهترین مکان برای تعبیه‌ی سیستم تعویض آب مولد بخار را تعیین نمود [۲]. پاتینگانگاس (۲۰۱۰) طرف ثانویه و اولیه‌ی مولد بخار را شبیه‌سازی کرد، به این صورت که ابتدا به کمک کد آپروس^(۱) دمای خارجی لوله‌ها در مکان‌های مختلف را تعیین، و با برهم نهی این مقادیر در شبکه‌بندی طرف ثانویه، شکل جریان‌ها و درصد حجمی در مکان‌های مختلف را محاسبه کرد [۳]. فرننگ (۲۰۰۷) تأثیر توان‌های مختلف رآکتور بر پارامترهای گرم‌آبی مولد بخار عمودی را به دست آورد [۴]. مولد بخار بررسی شده در این مقاله، مولد بخار VVER-1000 است که با مولد بخار VVER-440 متفاوت است. مولد بخار بررسی شده شامل ۱۰۰۰۰ لوله‌ی U شکل به قطر ۱۶ میلی‌متر بود. گام عمودی لوله‌ها، ۳۸ میلی‌متر و گام افقی آن‌ها ۲۳ میلی‌متر بود. مشخصات گرم‌آبی این مولد بخار در جدول ۱ ارائه شده است. مهم‌ترین اختلاف مولد بخار ۱۰۰۰ مگاواتی با نوع ۴۴۰ مگاواتی وجود جداکننده‌ی شناور است. این جداکننده‌ی شناور نقش مهمی در همگنی پارامترهای گرم‌آبی در مولد بخار دارد.

درون مولد بخار دو جداکننده وجود دارد: جداکننده‌ی اول به صورت شناور روی جریان قرار دارد و جداکننده‌ی دوم در بالای مولد بخار است و بخار عبوری از آن کیفیت تقریباً ۱۰۰٪ دارد. در این مقاله از دو مدل دو بعدی و سه بعدی استفاده شده است تا نقش جداکننده‌ی شناور و همچنین مشخصات جریان‌های موجود در مولد بخار بررسی شود. در هیچ کار مشابهی تاکنون نقش جداکننده‌ی شناور در مولد بخار بررسی نشده است. به همین منظور، ابتدا یک لوله از دسته لوله‌های شار گرمایی طرف اولیه به ثانویه به کمک یک تابع یک بعدی تعریف و در مدل طرف ثانویه سه بعدی وارد شد. برای تعریف افت فشار ناشی از دسته لوله‌ها نیز از ناحیه‌ی متخلخل با یک جمله‌ی منبع تکانه استفاده شد.

سرعت سیال و فرمول پایستگی تکانه برای این مدل چنین اند

$$U_\alpha = U \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U - \mu(\nabla U + (\nabla U)^T)) = S_M - \nabla p \quad (7)$$

که در آن،

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \rho_\alpha \quad (8)$$

$$\mu = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \mu_\alpha \quad (9)$$

فرمول پایستگی جرم این است

$$\frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha U) = S_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (10)$$

و قانون محدودیت درصد حجمی چنین است

$$\sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha = 1 \quad (11)$$

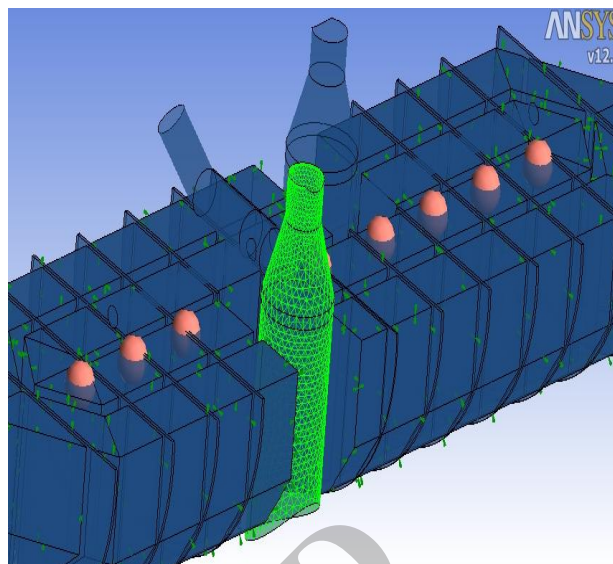
که در آن، $\Gamma_{\alpha\beta}$ مقدار منبع جرمی فاز α بر یکای حجم است که در اثر انتقال فاز به این فاز می‌آید.

از این مدل بهتر است در جریان‌های چند فاز، که فازهای مستقل دارند، استفاده نشود. مدل همگن، حالت محدود جریان دوفازی اویلر-اویلر است و در جریان‌های دوفازی، که انتقال جرم بالایی صورت می‌گیرد، از این روش استفاده می‌شود. این روش در حالت‌های زیر به کار می‌رود:

- در جریان‌هایی که فازها کاملاً طبقه طبقه هستند، یعنی مرز بین فازها معلوم است و همه جا به غیر از نواحی مرزی درصد حجمی یا ۱ است یا صفر و منطقی است که در هر نقطه یک بردار سرعت فرض شود.

- در جریان‌هایی که نیروی کشش نیروی غالب نیست، یا اگر هم نیروی کشش قابل ملاحظه‌ای وجود دارد، باید با باقی نیروها در حالت تعادل باشد، به صورتی که اختلاف سرعت بین فازها کم باشد.

در این مقاله برای مدل‌سازی جریان‌های دوفازی طرف ثانویه مولد از این مدل ناهمگن جریان دوفازی استفاده شد. در



شکل ۱. مدل مولد بخار VVER-۱۰۰۰ و تراکم شبکه‌بندی آن.

در مدل جریان دو فاز همگن، بعضی مشخصه‌های دو جریان مانند سرعت و مشخصه‌های اغتشاشی جریان، برای هر دو جزء، مشترک فرض شد. این مدل، باعث ساده‌سازی روند حل مساله شد. در مدل همگن فرض شد که تمام خواص انتقالی به جزء درصد حجمی برای تمام فازهای جریان یکی است

$$\varphi_\alpha = \varphi \quad 1 \leq \alpha \leq N_p \quad (1)$$

از آنجا که خواص انتقالی در معادله‌های همگن، بین فازها مشترک است، مناسب است که به جای حل تک تک فازها به طور مستقل از معادله‌های انتقالی برآیند استفاده شود.

معادله‌های انتقال حجمی را می‌توان از مجموع معادله‌های انتقال مستقل بر روی همه‌ی فازها استخراج کرد تا یک معادله انتقال برآیند برای فاز Q به دست آید

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Phi) + \nabla \cdot (\rho U \Phi - \Gamma \nabla \Phi) = S \quad (2)$$

که در آن،

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \rho_\alpha \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{\rho} \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha \quad (4)$$

$$\Gamma = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \Gamma_\alpha P \quad (5)$$



لوله‌های موجود در مبدل برابر ۰٫۷۲ بود. معادله‌های پایستگی برای فاز q در جدول ۲ آورده شده است که در آن α_q درصد حجمی، ρ_q چگالی، h_q انتالپی بر یکای جرم و V_q سرعت فاز q است. جرم منتقل شده بین فازها که به وسیله تباخیر و میعان انجام می‌شود، به وسیله ضریب Γ_c و Γ_e نشان داده شده، و M_{fw} آهنگ جریان آب تغذیه است. جمله‌ی منبع تکانه در سمت راست معادله‌ی تکانه با $S_{m,q}$ نشان داده شده است و شامل شیب فشار، انتقال تکانه بین فازها، نیروی بالابر، نیروهای گرانشی و آشفستگی است.

۶. جمله‌ی منبع تکانه^(۳)

در قانون پایستگی تکانه، جمله‌ی منبع تکانه عبارت است از

$$S_{M,q} = -\alpha_p \nabla p + \nabla \cdot \tau_q + \alpha_p \rho_g g + R_{pq} + F_{CE,q} + F_{lift,q} + F_{vm,q} + F_{DF,q} \quad (15)$$

که در آن P و g، به ترتیب، فشار و شتاب گرانشی، τ_q تانشر تنش، R_{pq} نیروی استهلاکی بین فازها، $F_{DF,q}$ نیروی استهلاکی ایجاد نشده به وسیله دسته لوله‌های طرف اولیه و $F_{CE,q}$ نیروی انتقال تکانه بین فازها است. در حالتی که بین فازها انتقال جرم وجود ندارد، نیروی بالابر^(۴) و نیروی جرم مجازی^(۵) در نظر گرفته نمی‌شود. مهم‌ترین نیرویی که باعث چرخش جریان دوفازی در مولد بخار می‌شود، نیروی گرانشی، اصطکاک بین دیوارها و بین دو سیال است. نیروی اصطکاک بین فازها نسبت مستقیم با اختلاف سرعت بین فازها دارد

$$R_{\tau_1} = K_{\tau_1} (V_{\tau} - V_1) \quad (16)$$

این مدل، هر فاز، معادله‌های مربوط به خود را دارد و دو فاز با جمله‌های انتقال بین فاز با هم در ارتباط هستند. در این مدل برای هر سیال یک زمینه‌ی مجزای حل در نظر گرفته می‌شود. برای مثال دو سیال ممکن است بردارهای سرعت و یا دماهای متفاوت در یک نقطه داشته باشند. فرمول پایستگی تکانه برای این مدل این است

$$\frac{\partial(\rho_\alpha U_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_\alpha U_\alpha \otimes U_\alpha) = -r_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot (r_\alpha \mu_\alpha (\nabla U_\alpha + (\nabla U_\alpha)^T)) + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ U_\beta - \Gamma_{\alpha\beta}^- U_\alpha) + S_{M\alpha} + M_\alpha \quad (12)$$

که در آن، M_α اثر بین فاز است، به این معنی که اثر و نیرویی که فازهای دیگر بر فاز α دارند

$$M_\alpha = \sum_{\alpha=\beta} M_{\alpha\beta} \quad (13)$$

و معادله‌ی پایستگی جرم چنین است

$$\frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) = S_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (14)$$

قانون محدودیت درصد حجمی یعنی معادله‌ی (۱۱) در این مدل هم صادق است.

۵. مدل‌سازی دسته لوله‌ها

برای مدل‌سازی دسته لوله‌ها از مدل فضای متخلخل استوسیک و استوانویچ استفاده شد [۵]، به این صورت که دسته لوله‌ها به عنوان یک ناحیه‌ی متخلخل با یک ضریب تولیدکننده‌ی تکانه تعریف شد تا اثرات افت فشار جریان بخار و آب طی عبور از دسته لوله‌ها شبیه‌سازی شود. میزان تخلخل حجم برای دسته

جدول ۲. معادله‌های پایستگی برای فاز

بخار	آب	
$\frac{\partial(\alpha_v \rho_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \bar{u}_v) = +\Gamma_e - \Gamma_c$	$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \bar{u}_l) = -\Gamma_e + \Gamma_c + M_{fw}$	پایستگی جرم
$\frac{\partial(\alpha_v \rho_v \bar{u}_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \bar{u}_v \bar{u}_v) = S_{M,v,q}$	$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l \bar{u}_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \bar{u}_l \bar{u}_l) = S_{M,l,q}$	پایستگی تکانه
$\frac{\partial(\alpha_v \rho_v h_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v h_v \bar{u}_v) = S_{E,v,q}$	$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l h_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l h_l \bar{u}_l) = S_{E,l,q}$	پایستگی انرژی
	$\alpha_l + \alpha_v + \alpha_r = 1$	پایستگی حجم



۷. منبع جرم

آب تغذیه، روی لوله‌ها پاشیده شده و با آب اشباع با دمای ۲۷۸٫۴۱ درجه‌ی سانتی‌گراد مخلوط می‌شود. با ترکیب آب تغذیه با آب جوشان، دمای آب تغذیه به دمای اشباع می‌رسد و شروع به جوشیدن می‌کند. برای مدل‌سازی تغییر فاز، دو روش مختلف در مسایل گوناگون استفاده شده است: در روش اول، سه فاز- فاز آب زیر سرد، آب با دمای اشباع و فاز- فاز بخار اشباع در نظر گرفته می‌شود. آهنگ‌های جریان تغییر فاز مختلف به کمک معادله‌های ساده در مدل‌سازی استفاده می‌شود. مزیت این روش این است که حل معادله‌ی گرما در مدل‌سازی لازم نیست. در روش دوم که در این مقاله از آن استفاده شده است، در هر عنصر، در صورت بیش‌تر از انتالی بیخار اشباع بودن انتالی سیال، تغییر فاز صورت می‌گیرد و در صورت کم‌تر از انتالی سیال زیر سرد بودن، که این حالت در ترکیب با آب تغذیه مشاهده می‌شود، میعان رخ می‌دهد. حل معادله‌ی گرما در این حالت ضروری است [۶].

۸. سیستم کنترل سطح آب

در مولد بخار نیروگاه هسته‌ای، یک سیستم آب تغذیه‌ی بحرانی وجود دارد، که در صورتی که سطح آب در مولد بخار از حد معینی پایین‌تر رود، این سیستم به کار افتاده و آب تغذیه با دمای محیط به درون مولد بخار فرستاده می‌شود. این سیستم در محیط زبان برنامه‌نویسی فرتن مدل‌سازی شده و در مدل اصلی به عنوان تابع‌های تعریف شده توسط کاربر^(۱۰) وارد شدند. در هنگام حل معادله‌های جریان، این تابع‌ها نیز در نظر گرفته شدند و در صورتی که در طی حل، سطح آب از میزان تعریف شده کم‌تر می‌شد، از مکان‌هایی که در مدل تعریف شده‌اند آب با دمای محیط به مولد وارد می‌شد.

۹. مدل‌سازی شار گرمایی منتقل شده از طرف اولیه‌ی

مولد به طرف ثانویه‌ی آن

در مولدهای بخار برای انتقال حرارت سیال خنک‌کننده‌ی رآکتور به سیال ثانویه از دسته لوله‌ها (شکل ۱) استفاده می‌شود. به این ترتیب، ابتدا سیال اولیه یا همان سیال خنک‌کننده‌ی رآکتور با عبور از اطراف دسته لوله‌ها، گرمای میله‌های سوخت

برای ضریب تغییر تکانه بین دو فاز، K_{21} ، از مدل متقارن^(۶) استفاده شد. نیروی کشش^(۷) بر سیال شامل دو جز است: (۱) جمله‌ی گران‌رو^(۸)، که متناسب با سرعت سیال است؛ (۲) ضریب اتلاف ماندی که متناسب با مجذور سرعت است. در سرعت‌های بالا، قسمت خطی یعنی عبارت گران‌رو را می‌توان در نظر نگرفت. نیروی اصطکاک حاصل از لوله‌ها این است

$$F_{DF,q} = -\mu_q D_q V_q \frac{1}{\rho_q} \left| V_q \right| C_q V_q \quad (17)$$

که در آن، ضریب اتلاف ناگران‌رو، μ_q گران‌روی پویا و D_q ضریب اتلاف گران‌رو است. جمله‌ی اتلاف گران‌رو صفر در نظر گرفته می‌شود یعنی، $D_q = 0$.

با توجه به مدل استوسیک و استوانویچ [۵] اتلاف‌های اصطکاکی جریان متقاطع در لوله‌ها از ترکیب ضریب اتلاف اصطکاکی یک لوله و مجموع اثرهای تمام لوله‌ها به دست می‌آید

$$f_{\text{Cross Flow}} = A \text{Re}_m^{-n} \quad (18)$$

$$C_{\text{Cross Flow}} = \frac{f_{\text{Cross Flow}}}{P} \quad (19)$$

که در آن، گام لوله‌ها در جهتی است که جریان آن را قطع می‌کند، و Re عدد رینولدز است که به کمک مشخصه‌های جریان محاسبه می‌شود؛ برای این مدل مقادیر $A=3.29$ و $n=0.18$ در نظر گرفته شد و در جهت موازی لوله‌ها از همبستگی بلازیوس^(۹) استفاده شد

$$f_{\text{CoFlow}} = \frac{0.3165}{\text{Re}_m^{0.25}} \quad (20)$$

$$C_{\text{CoFlow}} = \frac{f_{\text{CoFlow}}}{d_e}$$

که d_e در آن قطر معادل است.



۱۰. نتایج

بررسی عملکرد مولد بخار نیازمند درصد حجمی بخار در هر ناحیه است، زیرا در صورتی که درصد بخار در مکان‌هایی که دسته لوله‌ها هستند، از مقدار معینی بیش‌تر باشد، لوله‌ها آسیب می‌بینند. برای نمونه درصد حجمی بخار در صفحه‌ی $x = 0$ یعنی صفحه‌ی گذرنده از مرکز مولد بخار در شکل ۴ نشان داده شده است. وجود جداکننده‌ی شناور باعث می‌شود بخار در سمت داغ مولد بخار پایین نیاید زیرا در نبود این جداکننده، پاشش آب تغذیه بر روی دسته لوله‌ها بخار را پایین می‌کشد و باعث می‌شود بخار در سمت داغ مولد بخار پایین بیاید.

به جز قسمت بالای مولد بخار که جریان در آن ماهیت سه بعدی دارد در پایین مولد بخار به دلیل وجود جداکننده‌ها ماهیت جریان دو بعدی است و می‌توان جریان را در دو بعد بررسی کرد. مدل دو بعدی شامل ۸۵۴۰۰۰ مش است و به جای ناحیه‌ی متخلخل، کل دسته لوله‌ها را مورد بهره‌برداری قرار می‌دهد. در شکل ۵ سرعت جریان بخار در مکان‌های مختلف مولد آورده شده است.

۱۱. مقایسه با نتایج تجربی

آزمایش‌های محدودی در ارتباط با مولد بخار ۱۰۰۰ مگاواتی انجام شده است. از نتایج این آزمایش‌ها برای راستی آزمایی حل عددی در این مقاله استفاده شد. این داده‌های آزمایشی مربوط به ۱۵ نقطه هستند که در شکل ۶ نشان داده شده‌اند [۱]. در جدول ۳ این داده‌ها با مقادیر به دست آمده از حل عددی به کمک کد 3D-ANA و مقدار شبیه‌سازی شده به وسیله‌ی CFX مقایسه شده‌اند. مقدار محاسبه شده با هر دو کد در اکثر نقاط از دقت قابل قبولی برخوردار است و اختلاف مشاهده شده مربوط به تفاوت‌های جزئی در نوع مولد بخار، خطای احتمالی آزمایش و یا خطای حل عددی است.

۱۲. بحث و نتیجه‌گیری

مقادیر محاسبه شده برای درصد حجمی بخار در مکان‌های مختلف با مقادیر محاسبه شده در آزمایش مرجع [۱۰] تطابق دارد و این نشان از درست بودن حل عددی است.

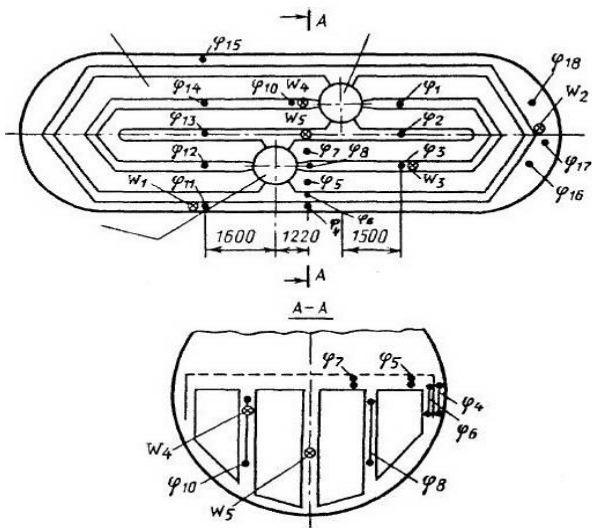
وجود جداکننده‌ی شناور باعث می‌شود بخار به همراه آب تغذیه‌ی پاشیده شده، پایین نیاید و جریان در مولد بخار تقریباً یکنواخت شود. در صورت آسیب دیدن این جداکننده، بخار در سمت داغ مولد پایین می‌آید و آب در سمت سرد بالا می‌رود (شکل ۴).

را می‌گیرد و سپس این سیال با عبور از دسته لوله‌های مولد بخار گرمای خود را به سیال ثانویه انتقال می‌دهد. شار عبوری بین طرف اولیه و ثانویه در نقاط اطراف جمع‌کننده‌ی ورودی، به دلیل گرمای بالای سیال اولیه، بالا و در اطراف جمع‌کننده‌ی خروجی به دلیل کاهش گرمای سیال اولیه، پایین‌تر است. برای شبیه‌سازی جریان‌های سیال طرف ثانویه، مدل‌سازی این وابستگی شار به فضای هندسه‌ای مولد بخار الزامی است. در پژوهش‌های پیشین در این زمینه، برای مدل‌سازی شار گرمایی از طرف اولیه به ثانویه از دمای سیال اولیه‌ی شارنده در دسته لوله‌ها استفاده می‌شده است، به این صورت که چرخه‌ی اولیه یعنی همان چرخه‌ی بین رآکتور و مولد بخار به کمک کدهای مختلف شبیه‌سازی شده و توزیع دمای سیال خنک‌کننده در درون دسته لوله‌ها به دست می‌آمده است، سپس با نسبت دادن این دما به شبکه‌های حل عددی، طرف ثانویه‌ی شار گرمایی بین چرخه‌ی اولیه و ثانویه مدل‌سازی می‌شده است.

در این مقاله برای مدل‌سازی این چینی از وابستگی یک بعدی شار در راستای لوله‌ها استفاده شد، به این صورت که یک لوله از بین دسته لوله‌ها انتخاب، رسم و شبکه‌بندی شده و شرایط مرزی مطلوب در ورودی و خروجی و پوسته‌ی لوله در نظر گرفته شد (شکل‌های ۲ و ۳). دمای خنک‌کننده در ورودی و خروجی لوله، به ترتیب، 320°C و 290°C و فشار 15.7 MPa در نظر گرفته شد. برای پوسته‌ی لوله نیز به دلیل پدیده‌ی تبخیر، فشار و دمای تبخیر، به ترتیب، 6.27 MPa و 278.41°C در نظر گرفته شد. سیال داغ از ناحیه‌ی ورودی وارد، و پس از گذشتن از لوله و تبادل گرما با سیال خارج لوله، که دمای ثابتی دارد، از سمت خروجی خارج می‌شود. پس از مدل‌سازی لوله‌ی انتخابی از دسته لوله‌ها، جریان در این لوله به طور عددی حل، و بر شارهای گرمایی به دست آمده در فواصل مختلف، مناسب‌ترین تابع گرمایی برازش شد. تابع به دست آمده، در مدل اصلی به عنوان تابع تعریف شده توسط کاربر وارد شد.

$$q_i \left(\frac{\text{kWatt}}{\text{m}^2} \right) = 1410 \cdot \exp(-4I_i) \quad (21)$$

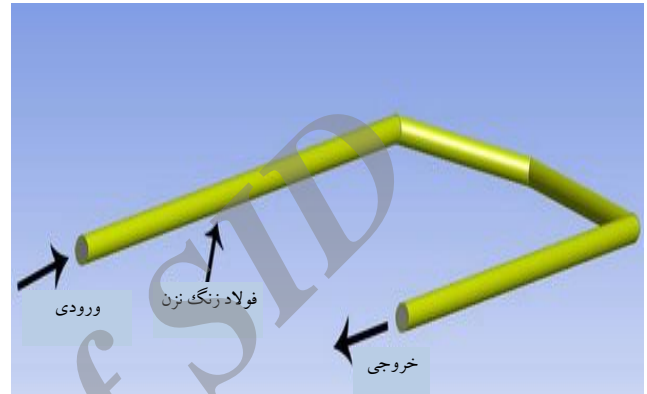
که I_i در آن طول عنصر لوله است. برای مثال شار گرمایی ویژه‌ی عنصر لوله در طول ۲ متری، 25.82 kWatt/m^2 است.



شکل ۱. نقاط مربوط به داده‌های تجربی [۱].



شکل ۲. نمایی از یک دسته لوله.

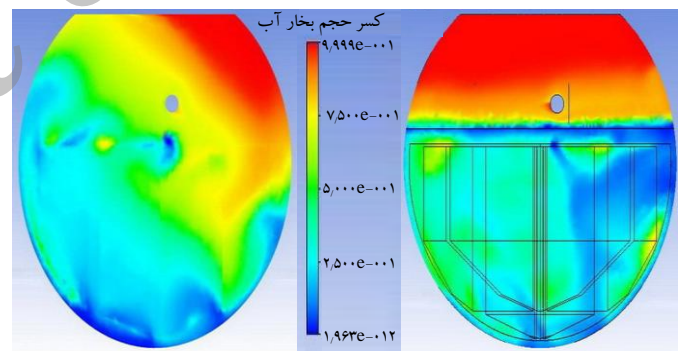


شکل ۳. لوله‌ی انتخابی از بین دسته لوله‌ها برای تعیین تابع شار گرمایی بین طرف اولیه و ثانویه لوله.

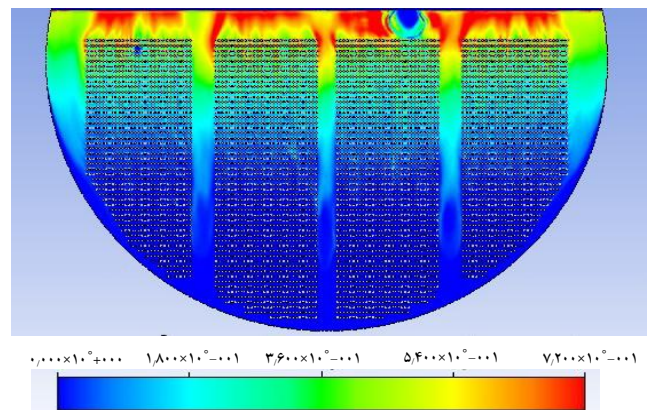
جدول ۳. درصد حجمی بخار در نقاط تعیین شده در شکل ۶

کار مورد بحث	استوانه‌ویچ با کد 3D-ANA [1]	STEG-۰۰۱ ملیخو و همکاران (۱۹۹۵)	تجربی کارپینن [۹] (۱۹۹۴)	تجربی آجیو و همکاران [۸، ۷] (۱۹۸۷)	خلا
۰٫۴۴	۰٫۴۸	۰٫۵۵	۰٫۵۰	۰٫۳۰	φ _۱
۰٫۵۶	۰٫۵۱	۰٫۶۳	۰٫۱۸	۰٫۴۵	φ _۲
۰٫۵۱	۰٫۵۴	۰٫۵۴	۰٫۴۲	۰٫۴۵	φ _۳
۰٫۷۶	۰٫۶۱	-	-	۰٫۸۰	φ _۴
۰٫۹۲	۰٫۷۰	۰٫۸۴	-	۱٫۰۰	φ _۵
۰٫۷۶	۰٫۷۰	۰٫۷۷	۱٫۰۰	۰٫۷۰	φ _۶
۰٫۸۰	۰٫۷۱	۰٫۸۹	۰٫۹۸	۱٫۰۰	φ _۷
۰٫۶۲	۰٫۵۷	۰٫۵۵	۰٫۴۸	۰٫۵۵	φ _۸
۰٫۴۲	۰٫۴۸	۰٫۵۶	-	۰٫۴۷	φ _{۱۰}
۰٫۶۱	۰٫۵۷	۰٫۵۱	۰٫۵۴	۰٫۵۲	φ _{۱۲}
۰٫۴۹	۰٫۵۳	۰٫۶۳	۰٫۱۵	۰٫۵۰	φ _{۱۳}
۰٫۵۲	۰٫۵۰	۰٫۵۴	۰٫۵۶	۰٫۵۵	φ _{۱۴}
۰٫۴۸	۰٫۴۳	-	-	۰٫۳۸	φ _{۱۵}

در مدل دو بعدی، سرعت جریان در مکان‌های مختلف مولد بخار محاسبه شد. با توجه به شکل ۵ در نواحی بین دسته لوله‌ها سرعت بخار بیش‌تر است که این موضوع به دلیل افت فشاری است که لوله‌ها ایجاد می‌کنند. از سرعت بخار در طی عبور از دسته لوله‌ها کاسته می‌شود. این سرعت در نزدیکی جداکننده‌ی شناور به مقدار بیشینه‌ی ۰٫۷۲ متر بر ثانیه رسید. طبق نتایج شبیه‌سازی، لوله‌هایی که در ردیف‌های بالایی دسته لوله‌ها هستند نسبت به باقی لوله‌ها بیش‌تر در معرض آسیب ناشی از ارتعاش هستند و در نتیجه عمر خستگی این لوله‌ها نیز کم‌تر است.



شکل ۴. اثر جداکننده‌ی شناور بر درصد حجمی بخار.



شکل ۵. سرعت بخار آب در مکان‌های مختلف مولد بخار.



پی‌نوشت‌ها

۱. Apros
۲. Opening Boundary Condition
۳. Momentum Source Terms
۴. $F_{DF,q}$
۵. $F_{vm,q}$
۶. Symmetric Model
۷. Drag Force
۸. Viscous Loss Term
۹. Blasius Correlation
۱۰. User-Defined Function

مرجع‌ها

1. V. Stavanovic, M. Studovic, 3D modelling as a support to thermal-hydraulic safety analyses with standard codes, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade (1999).
2. G. Kristof, K. Szabo, T. Regert, Modeling of boiling water flow in the horizontal steam generator of the paks nuclear power plant, CFD. HU Ltd, Budapest, Hungry (2008).
3. T. Pättikangas, J. Niemi, V. Hovi, SGEN summary report: CFD modeling of horizontal steam generators (2010).
4. Y. M. Ferng, H. J. Chang, CFD investigation the impacts of changing operating conditions on the thermal-hydraulic characteristics in a steam generator, Nuclear Science and Technology Development Center, National Tsing Hua University (2007).
5. Z. V. Stosic and Stevanovic, V.D. advanced three-dimensional two-fluid porous media method for transient two-phase flow thermal-hydraulics in complex geometries. Numerical Heat Transfer, Part B, 41 (2002) 263–289.
6. C. Vallee, T. Honne, H. M. Prasser, T. Suhnel, Experimental investigation and CFD simulation of horizontal stratified two-phase flow phenomena, Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e.V., Dresden, Germany (2007).
7. N. G. Rassohin, Nuclear Power Plant Steam Generators, Atomizat, Moskva, 106 (1980).
8. A. G. Ageev, Elektricheskie stancii, 6 (1987).
9. I. Karppinen, Third Int. Sem. Horizontal Steam Generators-Lappeenranta (1994).
10. V. I. Melikhov, O. I. Melikhov, B. I. Nigmatulin, Proc. Int. Conf. Two-phase flow modelling and experimentation, 1 (1995).