

Sci. and Tech. note یادداشت علمی و فنی

مدلسازی جریان آب جوش در مولد بخار ۷۷ER-۱۰۰۰

امیر صفوی*^۱، محمدرضا عبدی^۲، منصور طالبی^٤، محمدحسین استکی^۳ ۱. گروه مهندسی هستهای، دانشکدهی علوم و فن آوریهای نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۷۳٤٤۱–۱۷۷۵۸ اصفهان ـ ایران ۲. گروه فیزیک، دانشکدهی علوم، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۷۳٤٤۱-۱۷۷۶۸، اصفهان ـ ایران ۳. گروه مهندسی پزشکی، دانشکدهی فنی- مهندسی، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۱۷۶۱-۱۷۶۲۸، اصفهان ـ ایران ۶. پژوهشکدهی علوم و فن آوریهای هستهای، صندوق پستی: ۱۵۹۱-۱۱۷۶۵، اصفهان ـ ایران

چکید؟: مدل عددی دو بعدی و سه بعدی مولد بخار ۲۰۰۰-VVER، که در صنعت هسته ای کشور از آن استفاده می شود، در این مقاله ارایه شده است. برای مدل سازی انتقال حرارت جوشان، جوشش و میعان از روش اویلر- اویلر و در مدل سازی سه بعدی طرف ثانویه ی مولد بخار از یک مدل فضای متخلخل پیش از این گزارش شده توسط استوسیک و استوانوویچ برای مولد بخار ۴۴۰-VVER، استفاده شده است. مدل فضای متخلخل به این معنی است که بسته لوله های طرف ثانویه به طور جزیی و دقیق مدل سازی نمی شوند، بلکه به صورت منبع های تکانه و انتالبی فرض می شوند. مدل های ساخته شده به کمک تابع هایی که در ANSYS-CFX تعریف شده اند، بهبود یافته اند. نتایج این مدل سازی مربوط به حالتی می شوند. مدل های ساخته شده به کمک تابع هایی که در ANSYS-CFX تعریف شده اند، بهبود یافته اند. نتایج این مدل سازی مربوط به حالتی می شوند. مدل های ساخته شده به کمک تابع هایی که در ANSYS-CFX تعریف شده اند، بهبود یافته اند. نتایج این مدل سازی مربوط به حالتی می شوند. مدل های ساخته شده به کمک تابع هایی که در ANSYS-CFX تعریف شده اند، بهبود یافته اند. نتایج این مدل سازی مربوط به حالتی می شوند. مدل های ساخته شده به کمک تابع هایی که در ANSYS-CFX تعریف شده اند، بهبود یافته اند. نتایج این مدل سازی مربوط به حالتی است که مولد در حداکثر توان کار می کند. نتایج به دست آمده، توزیع درصد حجمی بخار و نقش جداکننده ی شناور را، که تنها در VVER-۱۰۰۰ وجود دارد، نشان می دهد. 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 مکان های مختلف به دست آمد.

کلیدواژه ها: مولد بخار ۱۰۰۰-VVER، 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

Department of Nuclear Engineering, Faculty of Advanced Sciences & Technologies, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan – Iran
 Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan – Iran
 Department of Biomedical, Faculty of Engineering, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan – Iran
 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

۱. مقدمه

تحليل مشخصات جريان از جمله سرعت، درصد حجمي و ميزان رسوبات از اهمیت بهسزایی در طراحی و نگهداری مولد بخار برخوردار است. استوانوویچ (۱۹۹۹) به کمک یک کد سه بعدی، درصد حجمی بخار در مکان های مختلف مولد بخار VVER-۱۰۰۰ را محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه کرد [۱]. کریستف (۲۰۰۸) جریانهای طرف ثانویهی مولد بخار VVER-۴۴۰ را بررسی و نواحی با رسوبگذاری بیشتر و بهترین مکان برای تعبیهی سیستم تعویض آب مولد بخار را تعیین نمود [۲]. پاتیگانگاس (۲۰۱۰) طرف ثانویه و اولیهی مولد بخار را شبیه سازی 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]. فرنگ (۲۰۰۷) تأثیر توانهای مختلف رآکتور بر پارامترهای گرماآبی مولد بخار عمودی را به دست آورد [۴]. مولد بخار بررسی شده در این مقاله، مولد بخار VVER-۱۰۰۰ است که با مولد بخار VVER-۴۴۰ متقاوت 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 گرماآبی این مولد بخار در جدول ۱ ارایه شده است. مهمترین اختلاف مولد بخار ۱۰۰۰ مگاواتی با نوع ۴۴۰ مگاواتی وجود جداکنندهی شناور است. این جداکنندهی شناور نقش مهمی در همگنی پارامترهای گرماآبی در مولد بخار دارد.

درون مولد بخار دو جداکننده وجود دارد: جداکننده ی اول به صورت شناور روی جریان قرار دارد و جداکننده ی 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 جداکننده ی شناور و همچنین مشخصات جریانهای موجود در مولد بخار بررسی شود. در هیچ کار مشابهی تاکنون نقش جداکننده ی 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 ثانویهی سه بعدی وارد شد. برای تعریف افت فشار ناشی از دسته لولهها نیز از ناحیه ی متخلخل با یک جمله ی منبع تکانه استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات گرماآبی مولد بخار VVER-1000

طرف ثانويه				طرف اوليه	
فشار	آب	بخار	دمای آب	دما	توان
(مگاپاسکال)	تغذيه	(kg s ⁻¹)	تغذيه	(ورودي/خروجي)	گرمايي
	(kg s ⁻¹)		(°C)	(°C)	(MW)
٧٫٨۴	4.4	۴۰۸	۲.,	21.74.	۷۵۰

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 ۷۷ER-۱۰۰۰ و شبکهبندی آن برای شبکهبندی مدل، از ۴۵۰۰۰۰ عنصر شش وجهی و منشوری استفاده شد. در شکل ۱ نمایی از مدل رسم، و تراکم مش بندی آورده شده است. دوایر 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. مدل سازی جداکنندهی شناور

جداکننده ی شناور در واقع یک جداکننده ی 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 می شد، در نتیجه، به جای مدلسازی هندسی این صفحه، نقش این صفحه مدلسازی شد، به این صورت که در مکان جداکننده شناور یک شرط مرزی از نوع شرط مرزی باز^(۲) در نظر گرفته شد.

٤. جريانهاي دو فازي

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



شکل ۱. مدل مولد بخار ۷۷ER-۱۰۰۰ و تراکم شبکهبندی آن.

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

$$\varphi_{\alpha} = \varphi \quad \mathbf{N} \le \alpha \le \mathbf{N}_{p} \tag{1}$$

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 استنتاج کرد تا یک معادلهی انتقال برآیند برای فاز Q به دست آید

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \nabla \bullet (\rho U\phi - \Gamma \nabla \Phi) = S \tag{(1)}$$

که در آن،

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{N_{p}} r_{\alpha} \rho_{\alpha} \tag{(7)}$$

$$\mathbf{U} = \frac{\mathbf{i}}{\rho} \sum_{\alpha=\mathbf{i}}^{N_{p}} \mathbf{r}_{\alpha} \boldsymbol{\rho}_{\alpha} \mathbf{U}_{\alpha} \tag{(f)}$$

$$\Gamma = \sum\nolimits_{\alpha=\nu}^{N_{\rm p}} r_{\alpha} \Gamma_{\alpha} P \tag{(d)}$$

$$\mathbf{U}_{\alpha} = \mathbf{U} \tag{9}$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho U \otimes U - \mu (\nabla U + (\nabla U)^{T})) = S_{M} - \nabla p^{(V)}$$

$$\rho = \sum\nolimits_{\alpha=1}^{N_{p}} r_{\alpha} \rho_{\alpha} \tag{(A)}$$

$$\mu = \sum_{\alpha=1}^{N_{\rm p}} r_{\alpha} \mu_{\alpha} \tag{9}$$

فرمول پایستگی جرم این است

$$\frac{\partial (\mathbf{r}_{\alpha} \boldsymbol{\rho}_{\alpha})}{\partial t} + \nabla \bullet (\mathbf{r}_{\alpha} \boldsymbol{\rho}_{\alpha} \mathbf{U}) = \mathbf{S}_{\mathrm{MS}\alpha} + \sum_{\beta=1}^{\mathrm{N}_{\mathrm{p}}} \Gamma_{\alpha\beta} \qquad (1.)$$

و قانون محدودیت درصد حجمی چنین است

$$\sum\nolimits_{\alpha=1}^{N_{p}} r_{\alpha} = 1 \tag{11}$$

که در آن، _{۲_{αβ} 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 فازی، که فازهای مستقل دارند، استفاده نشود. مدل همگن، حالت محدود جریان دوفازی اویلر – اویلر است و در جریانهای دوفازی، که انتقال جرم بالایی صورت می گیرد، از این روش استفاده میشود. این روش در حالتهای زیر به کار می رود:

- در جریان هایی 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 جریان هایی که نیروی کشش نیروی غالب نیست، یا اگر
 هم نیروی کشش قابل ملاحظه ای 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 ثانویهی مولد از این مدل ناهمگن جریان دوفازی استفاده شد. در

www.SID.ir

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

$$\frac{\partial (\mathbf{r}_{\alpha} \boldsymbol{\rho}_{\alpha} \mathbf{U}_{\alpha})}{\partial t} + \nabla \bullet \mathbf{r}_{\alpha} (\boldsymbol{\rho}_{\alpha} \mathbf{U}_{\alpha} \otimes \mathbf{U}_{\alpha})) = -\mathbf{r}_{\alpha} \nabla \boldsymbol{p}_{\alpha} + \nabla \bullet (\mathbf{r}_{\alpha} \boldsymbol{\mu}_{\alpha} (\nabla \mathbf{U}_{\alpha} + (\nabla \mathbf{U}_{\alpha})^{\mathrm{T}})) + \sum_{\beta=i}^{N_{p}} (\Gamma_{\alpha\beta}^{+} \mathbf{U}_{\beta} - \Gamma_{\alpha\beta}^{+} \mathbf{U}_{\alpha}) + \mathbf{S}_{M\alpha} + \mathbf{M}_{\alpha}$$
(11)

$$\mathbf{M}_{\alpha} = \sum_{\alpha = \beta} \mathbf{M}_{\alpha\beta} \tag{17}$$

و معادلهی پایستگی جرم چنین است

$$\frac{\partial (\mathbf{r}_{\alpha} \boldsymbol{\rho}_{\alpha})}{\partial t} + \nabla \bullet (\mathbf{r}_{\alpha} \boldsymbol{\rho}_{\alpha} \mathbf{U}_{\alpha}) = \mathbf{S}_{\mathrm{MS}\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_{\mathrm{p}}} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (1\mathfrak{F})$$

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

٥. مدلسازي دسته لولهها

برای مدلسازی دسته لولهها از مدل فضای متخلخل استوسیک و استوانوویچ 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	
$\frac{\partial(\alpha_{v}\rho_{v})}{\partial t} + \nabla (\alpha_{v}\rho_{v}\vec{u}_{v}) = +\Gamma_{e} - \Gamma_{C}$	$\frac{\partial(\alpha,\rho_{\rm v})}{\partial t} + \nabla .(\alpha,\rho_{\rm v}\vec{u}_{\rm v}) = -\Gamma_{\rm e} + \Gamma_{\rm C} + M_{\rm fw}$	پايستگى جرم
$\frac{\partial(\alpha_{\tau}\rho_{\tau}\vec{u}_{\tau})}{\partial t} + \nabla .(\alpha_{\tau}\rho_{\tau}\vec{u}_{\tau}\vec{u}_{\tau}) = S_{M,q}$	$\frac{\partial(\alpha,\rho,\vec{u},)}{\partial t} + \nabla .(\alpha,\rho,\vec{u},\vec{u},) = S_{M,q}$	پايستگى تكانە
$\frac{\partial(\alpha_{\tau}\rho_{\tau}h_{\tau})}{\partial t} + \nabla .(\alpha_{\tau}\rho_{\tau}h_{\tau}\vec{u}_{\tau}) = S_{E,q}$	$\frac{\partial(\alpha,\rho,h_{,})}{\partial t} + \nabla .(\alpha,\rho,h,\vec{u}_{,}) = S_{E,q}$	پايستگى انرژى
	$\alpha_1 + \alpha_r + \alpha_r = 1$	پايستگى حجم

$$\begin{split} S_{M,q} = -\alpha_p \nabla p + \nabla . \tau_q + \alpha_p \rho_g g + R_{pq} + F_{\text{CE},q} + F_{\text{lift},q} + F_{\text{vm},q} + F_{\text{DF},q} \end{split} \label{eq:SMq}$$

که در آن P و g، به ترتیب، فشار و شتاب گرانشی، _T تانشور تنش، R_{pq} نیروی استهلاکی بین فازها، F_{DF,q} نیروی استهلاکی ایحاد نشده به وسیلهی 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 نمی شود. مهم ترین نیرویی که باعث چرخش جریان دوفازی در مولد بخار می شود، نیروی گرانشی، اصطکاک بین دیوارها و بین دو سیال است. نیروی اصطکاک بین فازها نسبت مستقیم با اختلاف سرعت بین فازها دارد

$$\mathbf{R}_{\mathbf{y}_1} = \mathbf{K}_{\mathbf{y}_1} (\mathbf{V}_{\mathbf{y}} - \mathbf{V}_{\mathbf{y}}) \tag{19}$$

برای ضریب تغییر تکانه بین دو فاز، ۲_۱، از مدل متقارن^(*) 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 می توان در نظر نگرفت. نیروی اصطکاک حاصل از لولهها این است

$$F_{DF,q} = -\mu_q D_q V_q \frac{1}{\gamma} \rho_q |V_q| C_q V_q \qquad (1V)$$

 D_q که D_q در آن، ضریب اتلاف ناگران و، μ_q گران روی پویا و D_q ضریب اتلاف گران رو است. جمله ی اتلاف گران رو صفر در نظر گرفته می شود یعنی، $O_q = 0$. با توجه به مدل استوسیک و استوانوویچ [۵] اتلاف های

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

$$f_{\text{Cross Flow}} = A \ Re_{m}^{-n}$$
(1A)

$$C_{\text{Cross Flow}} = \frac{f_{\text{Cross Flow}}}{P}$$
(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 ۹۸٫۳۹ و n=۰٫۱۸ در نظر گرفته شد و در جهت موازی لولهها از همبستگی بلازیوس^(۹) استفاده شد

$$f_{\text{CoFlow}} = \frac{\gamma r \gamma s}{R e_{\text{m}}^{\gamma s}}$$
$$C_{\text{CoFlow}} = \frac{f_{\text{CoFlow}}}{d_{\text{e}}} \qquad (\gamma \cdot)$$

که de در آن قطر معادل است.

۷. منبع جرم

آب تغذیه، روی لوله ها پاشیده شده و با آب اشباع با دمای ۲۷۸٬۴۱ درجهی سانتی گراد مخلوط می شود. با ترکیب آب تغذیه با آب جوشان، دمای آب تغذیه به دمای اشباع می رسد و شروع به جوشیدن می کند. برای مدل سازی 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 می شود. آهنگ های جریان تغییر فاز مختلف به روش این است که حل معادله ی گرما در مدل سازی لازم نیست. در روش دوم که در این مقاله از آن استفاده شده است، در هر تغییر فاز صورت بیش تر از انتالیی بخار اشباع بودن انتالی سیال، تغییر فاز صورت می گیرد و در صورت کم تر از انتالی سیال زیر می شود، میعان رخ می دهد. حل معادله ی گرما در این تایی میال، می شود، میعان رخ می دهد. حل معادله ی گرما در این حالت می شود، میعان رخ می دهد. حل معادله ی گرما در این حالت

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 پایین تر رود، این سیستم به کار افتاده و آب تغذیه با دمای محیط به درون مولد بخار فرستاده میشود. این سیستم در محیط زبان برنامهنویسی فرترن مدل سازی شده و در مدل اصلی به عنوان تابع های تعریف شده توسط کاربر^(۱۰) وارد شدند. در هنگام حل معادله های جریان، این تابع ها نیز در نظر گرفته شدند و در صورتی که در طی حل، سطح آب از میزان تعریف شده کم تر میشد، از مکان هایی 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 خنک کنندهی رآکتور به سیال ثانویه از دسته لولهها (شکل ۱) استفاده می شود. به این ترتیب، ابتدا سیال اولیه یا همان سیال خنک کنندهی رآکتور با عبور از اطراف دسته لولهها، گرمای میلههای سوخت

را می گیرد و سپس این سیال با عبور از دسته لولههای مولد بخار گرمای خود را به سیال ثانویه انتقال می دهد. شار عبوری بین طرف اولیه و ثانویه در نقاط اطراف جمع کننده ی ورودی، به دلیل گرمای بالای سیال اولیه، بالا و در اطراف جمع کننده ی خروجی به دلیل کاهش گرمای سیال اولیه، پایین تر است. برای شبیه سازی جریان های سیال طرف ثانویه، مدل سازی این وابستگی شار به فضای هندسه ای مولد بخار الزامی است. در پژوهش های پیشین در این زمینه، برای مدل سازی شار گرمایی از طرف اولیه به ثانویه از دمای سیال اولیه ی شارنده در دسته لوله ها استفاده می شده است، به این صورت که چرخه ی اولیه یعنی همان شبیه سازی شده و توزیع دمای سیال خنک کننده در درون دسته لوله ها به دست می آمده است، سپس با نسبت دادن این دما به شبکه های حل عددی، طرف ثانویه ی شار گرمایی بین چرخه ی اولیه و ثانویه مدل سازی می شار گرمایی بین چرخه ی اولیه و ثانویه مدل سازی می شده است.

در این مقاله برای مدلسازی این چنینی 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 خنک کننده در ورودی و خروجی لوله، به ترتیب، ۳۲۰ و ۲۰۰۲ و فشار ۱۵۸۷ در نظر گرفته شد. برای پوستهی لوله نیز به دلیل پدیدهی تبخیر، فشار و دمای تبخیر، به ترتیب، ۴۲۷ماک و ۲۰۱۴ 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 نظرها، جریان در این لوله به طور عددی حل، و بر شارهای گرمایی به دست آمده در فواصل مختلف، مناسب ترین تابع نمایی برازش شد. تابع به دست آمده، در مدل اصلی به عنوان تابع تعریف شده توسط کاربر وارد شد

$$q_{i}\left(\frac{kwatt}{m'}\right) = 161 \cdot exp(-6l_{i})$$
(11)

که l_i در آن طول عنصر لوله است. برای مثال شار گرمایی ویژهی عنصر لوله در طول ۲ متری، ۲۵٬۸۲ kwatt/m^۲ است.

10. نتايج

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 بیش تر باشد، لولهها آسیب میینند. برای نمونه درصد حجمی بخار در صفحهی ٥= x 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

آزمایش های محدودی در ارتباط با مولد بخار ۱۰۰۰ مگاواتی انجام شده است. از نتایج این آزمایش ها برای راستی آزمایی حل عددی در این مقاله استفاده شد. این داده های آزمایشی مربوط به ۱۵ نقطه هستند که در شکل ۶ نشان داده شدهاند [۱]. در جدول ۳ این داده ها با مقادیر به دست آمده از حل عددی به کمک کد 3D-ANA و مقدار شبیه سازی 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 تفاوت های جزیی در نوع مولد بخار، خطای احتمالی آزمایش و یا خطای حل عددی است.

۱۲. بحث و نتیجه گیری

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 می شود 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 می آید و آب در سمت سرد بالا می رود (شکل ۴).



شکل ۲. نمایی از یک دسته لوله.



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



شکل ٤. اثر جداکننده ی شناور بر درصد حجمی بخار.







شکل ٦. نقاط مربوط به دادههای تجربی [1].

بن شده در شکل ۶	حجمی بخار در نقاط تعیی	جدول ۳. درصد
-----------------	------------------------	---------------------

کار	استوانوويچ	STEG-+1	تجربى كارپينن	تجربى	خلا
مورد	با کد	مليخو و همكاران	[9](1994)	آجيو و همكاران	
بحث	3D-ANA [1]	(1990)		[A .V] (19AV)	
•_44	• ٬۴۸	۵۵٫ •	• ،۵۰	• /*•	φ,
• ۵۶	۰٫۵۱	• ,8٣	• /۱۸	۰٬۴۵	φ _r
0١ د.	• ۵۴	• ،۵۴	•,44	۰٬۴۵	$\phi_{\tt r}$
• ,٧۶	• /81	-	-	۰,۸۰	$\phi_{\mathfrak{F}}$
•,91	• ⁄ • •	۰ _/ ۸۴	-	١,	φ _۵
• ,٧۶	• ⁄ • •	• , VV	١,	· /V·	φ۶
۰,۸۰	۰ _/ ۷۱	۰,۸۹	• ٫٩٨	•••	ϕ_v
•,91	• ,۵۷	۵۵٫ •	• ,41	· ,00	φ _A
• ,44	۰,۴۸	۰ _/ ۵۶	-	• /4	φ
• ٫۶١	• ,۵۷	۰٫۵۱	•,54	· ,0Y	φ,,
• /44	۰,۵۳	•_%	•,10	•۵۰	$\phi_{\imath r}$
• ،۵۲	• ۵٫	• ,۵۴	•,69	۵۵, ۰	$\phi_{\mathfrak{l}^{\mathfrak{k}}}$
•_۴٨	۰٫۴۳	_		• /**	$\phi_{\iota \flat}$

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 بیش تر 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 ۷۲، متر بر ثانیه رسید. طبق نتایج شبیهسازی، لولههایی که در ردیفهای بالایی دسته لولهها هستند نسبت به باقی لولهها بیش تر در معرض آسیب ناشی از ارتعاش هستند و در نتیجه عمر خستگی این لولهها نیز کم تر است.



- ۱. Apros
- Y. Opening Boundary Condition
- ۳. Momentum Source Terms
- ۴. F_{DF,q}
- ${\tt d}.\,F_{vm,q}$
- 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).
- 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 thermalhydraulics in complex geometries. Numerical Heat Transfer, Part B, 41 (2002) 263–289.

- 9. Symmetric Model
- V. Drag Force
- A. Viscous Loss Term
- Blasius Correlation
- **\.** User-Defined Function

مرجعها

پینوشتھا

- 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).