

شبیه سازی عددی رفتار ترموهیدرولیک مولد بخار نیروگاه هسته ای VVER-1000

محمد نظیفی فرد* - محمدرضا رسولی

دانشگاه کاشان، پژوهشکده انرژی، گروه مهندسی سیستمهای انرژی

چکیده

مدل عددی دو بعدی مولد بخار نیروگاه بوشهر VVER ۱۰۰۰ در این مقاله ارایه شده است. به منظور مدل سازی انتقال حرارت از روش اویلر-اویلر استفاده شده است. نتایج عددی حاضر مربوط به عملکرد مولد در حداکثر توان (توان نامی) می باشد. از توزیع درصد حجمی بخار در مولد برای راستی آزمایی نتایج عددی در مقایسه با نتایج تجربی و سایر مطالعات عددی استفاده شد. نتایج عددی حاضر در مقایسه با نتایج تجربی تطابق قابل قبولی دارند. همچنین توزیع سرعت بخار در نواحی مختلف مولد بخار محاسبه شد. از نتایج این مقاله می توان در تحلیل ارتعاشاتی و عمر خستگی لوله ها در مولد بخار استفاده نمود.

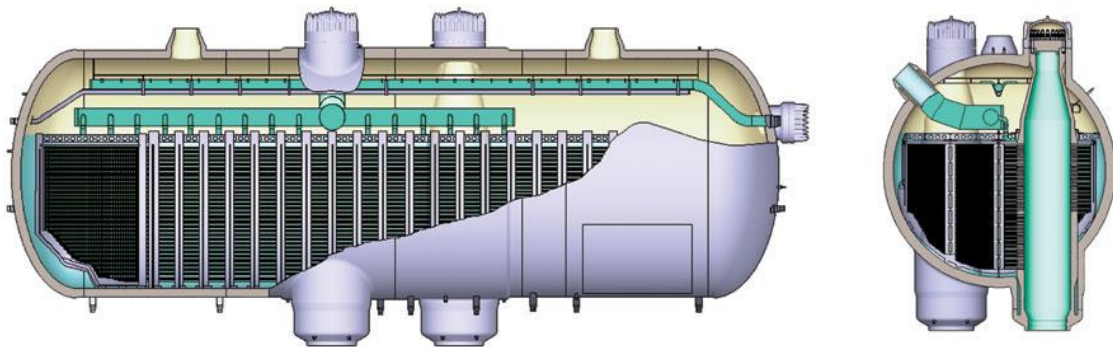
کلمات کلیدی: شبیه سازی عددی، راکتور آبی تحت فشار، مولد بخار، صفحه سوراخ دار، مدل محیط متناخل.

مقدمه :

مولد بخار در راکتور VVER-1000 از نوع افقی است (شکل ۱). مولد بخار وظیفه تولید بخار اشباع با دبی 1500 Tn/hr تحت فشار $6/3 \text{ MPa}$ را بر عهده دارد بطوریکه رطوبت مجاز بخار خروجی این مولدها کمتر از $0/2$ درصد می باشد [۱-۱۰]. مولد بخار از یک پوسته، کلکتور گرم و کلکتور سرد مدار اول و سطوح انتقال دهنده حرارت به آب مدار دوم تشکیل شده است و تعداد 11000 عدد لوله در هر مولد بخار تعبیه شده که از کلکتور گرم شروع می شوند و به کلکتور سرد ختم می گردند (جدول شماره ۱). در داخل این لوله ها سیال خنک کننده مدار اول جریان دارد و حرارت از سطح خارجی لوله ها، بوسیله آب مدار دوم برداشت می شود و در نهایت باعث تبخیر آب مدار دوم می گردد. بخار تولیدی در مولد بخار بوسیله کلکتوری جمع آوری شده و سپس توسط لوله هایی به طرف توربین هدایت می گردد. به منظور عملکرد ایمن نیروگاه های هسته ای، شبیه سازی اجزا مختلف نیروگاه بسیار حائز اهمیت است [۲-۱۰] و می تواند به عنوان مبنای طراحی در نیروگاه های هسته ای و مدیریت پیشگیرانه حادثه مورد استفاده قرار گیرد. آنچه در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است، شبیه سازی دوفازی سیال درون مولد بخار یک نیروگاه از نوع VVER-1000 با استفاده از نرم افزار ANSYS-CFX 15 می باشد.

جدول ۱: مشخصات مولد بخار نیروگاه هسته ای VVER-1000 [۱۱]

۱۱۰۰۰-۱۶	تعداد-قطر لوله ها (عدد- mm)	۴۰۰۰	قطر درونی پوسته (mm)
۱۱۰۶۰	متوسط طول لوله ها (mm)	۱۵۰۰۰	طول پوسته (mm)
۱۶	فشار خنک ساز (MPa)	۴/۸۹	سرعت خنک ساز درون لوله ها (m/s)
۲۲۰۰	ارتفاع بیشینه مجموع لوله ها (mm)	۸۵۰	قطر درونی کلکتور خنک ساز (mm)
۲۶۵	جرم مولد بخار بدون آب (Tn)	۱۶۰	ضخامت دیواره کلکتور خنک ساز (mm)



شکل شماره (۱) نمای داخلی مولد بخار VVER-1000 [۱۲]

روش انجام کار :

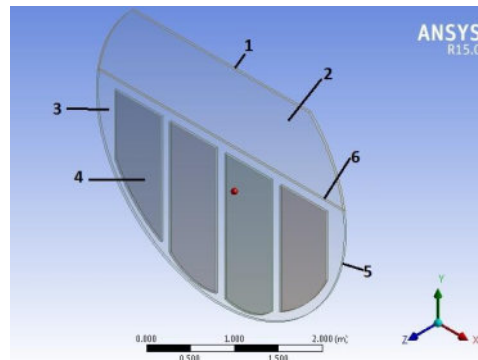
مدلسازی مولد بخار با استفاده از مدل محیط متخلخل انجام گرفت و از مدل استوسیک و استوانیچ [۴] جهت مدلسازی دسته لوله ها استفاده شد. میزان تخلخل حجم برای دسته لوله ها معادل ۰/۷۲ می باشد. توان حرارتی منتقل شده از طرف اولیه به طرف ثانویه در مولد بخار ۷۵۳ MW می باشد. این شار حرارتی به عنوان یک چشمه ی حرارتی در فضای متخلخل تعریف شد و به عنوان تابعی یک بعدی از فاصله از پایه ی داغ مدلسازی گردید. در این شبیه سازی از مدل ارایه شده در معادله ۱ استفاده شده است که پارامتر L_i در این رابطه فاصله ی هر المان تا کلکتور داغ است [۲].

$$q_i \text{ [KW/m}^2\text{]} = 1410 \text{ Exp}(-4L_i)$$

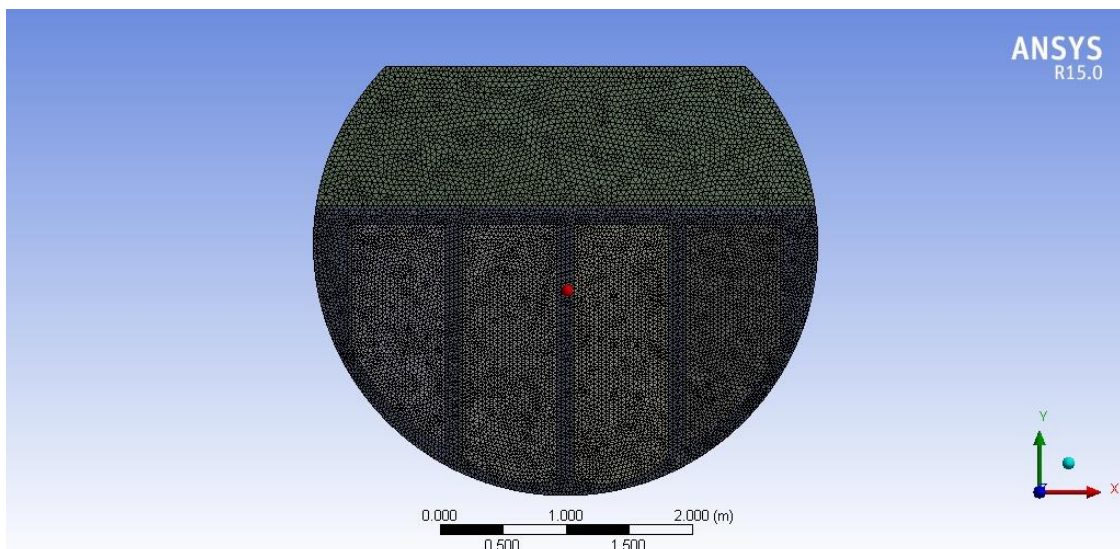
مساحت صفحه سوراخدار بالای دسته لوله‌ها حدود 48 m^2 است و قطر متوسط سوراخ‌ها حدود 13 mm می‌باشد. محیط مولد بخار به دو بخش، یکی بخش بالایی صفحه‌ی سوراخ‌دار (حاوی بخار تکفاز) و دیگری بخش پایینی صفحه (حاوی سیالی دوفاز) تقسیم بندی شد (شکل ۲). مطابق شکل شماره (۲) جداکننده‌ی شناور در واقع یک جداکننده‌ی بخار است که در وسط مولد بخار قرار دارد، و بوسیله سیستم‌های کنترل کننده در سیال دوفاز شناور است. این صفحه به صورت یک شرط مرزی در مدل عددی حاضر در نظر گرفته شد و برای ناحیه‌ی پایینی به عنوان مرز خروجی (outlet) و برای ناحیه‌ی بالایی به عنوان مرز باز (opening) تعریف شد. در مدل عددی حاضر از ۲۸۰۰۰ گره‌ی محاسباتی و بیش از ۱۰۰،۰۰۰ المان به منظور مستقل بودن پاسخ عددی از تراکم شبکه مش بندی استفاده شده است. در شکل شماره (۳) تراکم مش بندی مشخص است.

شرایط مرزی و دیواره‌ها

- ۱- جداکننده ثانویه (شرط مرزی)
- ۲- محیط تکفاز بخار؛
- ۳- محیط دوفاز سیال (بخار و مایع)؛
- ۴- دسته لوله‌ها؛
- ۵- پوسته مولد بخار؛
- ۶- جداکننده اولیه (شناور- صفحه سوراخدار) (شرط مرزی)



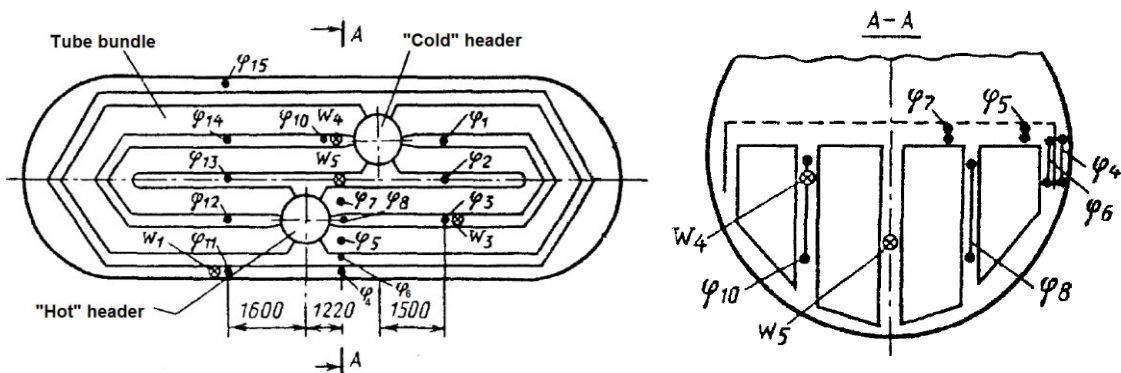
شکل شماره (۲) مدل محاسباتی مولد بخار و شرایط مرزی



شکل شماره (۳) تراکم مش بندی

نتایج :

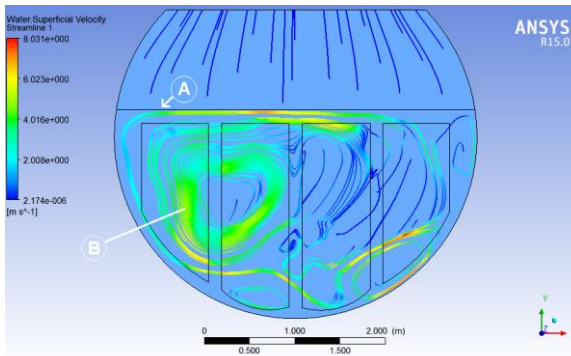
یکی از پارامترهای مهم در بررسی عملکرد مولد بخار، درصد حجمی بخار در نواحی مختلف درون محفظه مولد بخار می باشد، زیرا چنانچه درصد حجم بخار در نواحی که دسته لوله ها قرار دارند، از مقدار معینی بیشتر باشد، ممکن است لوله ها دچار آسیب فیزیکی شوند. درصد حجمی بخار در صفحه ی گذرنده از مرکز مولد بخار - مطابق ناحیه بندی شکل شماره (۴) - در شکل ۵ نشان داده شده است. در جدول شماره ۲ نیز درصد حجمی بخار در نقاط مختلف مولد محاسبه شد و با نتایج تجربی معتبر [۵ و ۶ و ۹] و سایر تحلیل های عددی مشابه [۲ و ۷ و ۸ و ۱۰] مقایسه شده است. مطابق شکل ۵ تولید بیشتر بخار در سمت راست مولد (یعنی سمت پایه ی داغ) نسبت به سمت چپ مولد (یعنی سمت پایه ی سرد) پیش بینی شده است. چنانچه انتظار می رفت صفحه شناور مانع از عبور سیال از خود شده و تنها اجازه ی عبور بخارات تولیدی را از خود می دهد. همچنین آب تغذیه نیز از این ناحیه به دسته لوله ها وارد می شود. خطوط جریان سیال درون مولد بخار در شکل ۶ نمایش داده شده است. تفاوت در شار حرارتی دو طرف داغ و سرد مولد بخار و تزریق آب جبرانی منجر به ایجاد جریان چرخشی سیال درون مولد بخار می شود. ناحیه (A) درون شکل شماره ۶ نشان می دهد صفحه ی سوراخدار مانع عبور آب از صفحه سوراخدار است. توزیع دمای آب و بخار در مولد بخار در شکل شماره ۷ نشان داده شده است. دمای آب طرف راست مولد از دمای طرف چپ آن بیشتر است (ناحیه A نسبت به B). دما در زیر صفحه ی سوراخ دار نسبت به سایر نواحی پایین تر است؛ زیرا آب جبرانی از این محدوده وارد مولد بخار می شود و دمای سیال در این ناحیه نزدیک به دمای آب جبرانی است (ناحیه C). شکل شماره ۸ تغییرات دمای بخار را نمایش می دهد. تقریباً در تمام نواحی مولد، بخار در دمای اشباع خود حدود ۵۵۱ k قرار دارد.



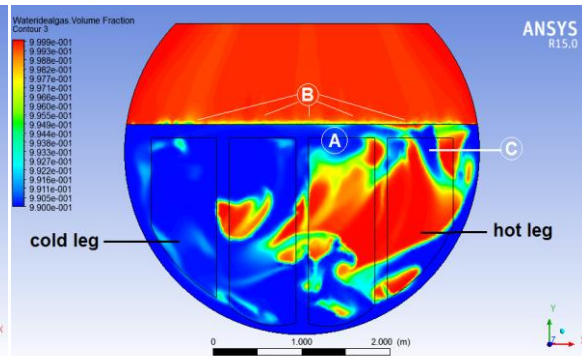
شکل شماره (۴) مکان نقاط مورد نظر برای محاسبه درصد حجمی بخار

جدول شماره (۲) مقایسه درصد حجمی بخار در مطالعه حاضر در مقایسه با سایر مطالعات

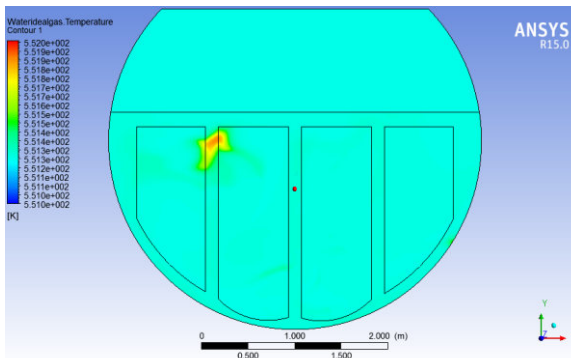
ضریب	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[9]	[2]	[10]	مطالعه عددی
۱Φ	۰,۳۰	۰,۵۰	۰,۵۵	۰,۴۸	۰,۳۰	۰,۲۷	۰,۴۴	۰,۳۲	۰,۴۸
۲Φ	۰,۴۵	۰,۱۸	۰,۶۳	۰,۵۱	۰,۴۳	۰,۴۳	۰,۵۶	۰,۴۵	۰,۴۲
۳Φ	۰,۴۵	۰,۴۲	۰,۵۴	۰,۵۴	۰,۴۵	۰,۴۶	۰,۵۱	۰,۴۸	۰,۸۸
۴Φ	۰,۸۰	-	-	۰,۶۱	۰,۷۶	۰,۵۳	۰,۹۰	۰,۶۸	۰,۸۱
۵Φ	۱,۰۰	-	۰,۸۴	۰,۷۰	-	-	-	-	۰,۷۶
۶Φ	۰,۷۰	۱,۰۰	۰,۷۷	۰,۷۰	۰,۷۰	۰,۷۸	۰,۷۶	۰,۶۶	۰,۸۴
۷Φ	۱,۰۰	۰,۹۸	۰,۸۹	۰,۷۱	-	-	۰,۸۰	-	۰,۶۱
۸Φ	۰,۵۵	۰,۴۸	۰,۵۵	۰,۵۷	۰,۵۵	۰,۶۰	۰,۶۲	۰,۶۱	۰,۶۰
۱۰Φ	۰,۴۷	-	۰,۵۶	۰,۴۸	۰,۴۵	۰,۴۱	۰,۴۲	۰,۴۶	۰,۶۲
۱۳Φ	۰,۵۰	۰,۱۵	۰,۶۳	۰,۵۳	۰,۵۰	۰,۵۶	۰,۴۹	۰,۴۸	۰,۴۵
۱۴Φ	۰,۵۵	۰,۵۶	۰,۵۴	۰,۵۰	۰,۵۲	۰,۴۴	۰,۵۲	۰,۴۶	۰,۵۹
۱۵Φ	۰,۳۸	-	-	۰,۴۳	-	-	-	-	۰,۲۶



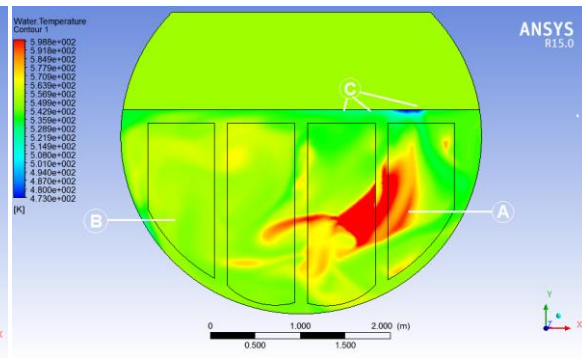
شکل شماره (۶) خطوط جریان سیال



شکل شماره (۵) درصد حجمی بخار



شکل شماره (۸) توزیع دمای بخار آب



شکل شماره (۷) توزیع دمای آب

نتیجه گیری :

مدل عددی دو بعدی مولد بخار نیروگاه بوشهر ۱۰۰۰ VVER در این مقاله ارائه شده است. به منظور مدل‌سازی انتقال حرارت از روش اویلر-اویلر استفاده شده است. نتایج عددی حاضر مربوط به عملکرد مولد در حداکثر توان (توان نامی) می باشد. از توزیع درصد حجمی بخار در مولد برای راستی آزمایی نتایج عددی در مقایسه با نتایج تجربی و سایر مطالعات عددی استفاده شد. نتایج عددی حاضر در مقایسه با نتایج تجربی تطابق قابل قبولی دارند. در این شبیه سازی عددی تغییرات درصد حجمی بخار در نقاط مختلف و توزیع دما درون مولد بخار، به خوبی اثرات تفاوت شار حرارتی در دو طرف مولد را نشان می دهد. میزان تولید بخار در سمتی که شار حرارتی بالاتر است، بیشتر از طرف مقابل می باشد. تفاوت در شار حرارتی دو طرف مولد باعث چرخش جریان بخار می شود و هرچه میزان این تفاوت در یک مقطع بیشتر باشد، سرعت بخار در آن مقطع بیشتر شده و در نتیجه نیرو و تنش بیشتری به لوله ها وارد می گردد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان در انجام این مطالعه قدردانی می نمایند.

مراجع :

- [1] http://www.gidropress.podolsk.ru/English/v407_k.html
- [2] Safavi, A., Abdi, M. R., Aghaie, M., Esteki, M. H., Zolfaghair, A., Pilevar, A. F., & Daryabak, A. (2013). Study of perforated plate effect in horizontal WWER1000 steam generator. *Nuclear Engineering and design*, 256, 249-255.
- [3] Bushehr Nuclear Power Plant Final Safety Analysis Report.
- [4] Stosic, Z. V., & Stevanovic, V. D. (2002). Advanced three-dimensional two-fluid porous media method for transient two-phase flow thermal-hydraulics in complex geometries. *Numerical Heat Transfer: Part B: Fundamentals*, 41(3-4), 263-289.
- [5] Ageev, A.G., 1987. Elektricheskie stancii, No. 6, 19.
- [6] Safavi, A., Abdi, M. R., Aghaie, M., Esteki, M. H., Zolfaghair, A., Pilevar, A. F., & Daryabak, A. (2013). Study of perforated plate effect in horizontal WWER1000 steam generator. *Nuclear Engineering and design*, 256, 249-255.
- [7] Melikhov, V.I., Melikhov, O.I., Nigmatulin, B.I., 1995. Two phase flow modeling and experimentation. Proc. Int. Conf. 1, 115.
- [8] Stavanovic, V., & Studovic, M. (1999). 3D modeling as a support to thermalhydraulic safety analyses with standard codes. In *7th International Conference on Nuclear Engineering*.
- [9] Kroshilin, A. E., Kroshilin, V. E., & Smirnov, A. V. (2008). Numerical investigation of three-dimensional flows of steam-water mixture in the housing of the PGV-1000 steam generator. *Thermal Engineering*, 55(5), 372-379.
- [10] Ghazanfari, V., Ansarifar, G. R., & Esteki, M. H. (2014). Drift flux modeling of the VVER-1000 horizontal nuclear steam generator. *Progress in Nuclear Energy*, 76, 36-43.
- [11] FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT FOR BNPP, chapter15: Accident Analysis, book 4, Revision 0". Moscow: Federal Agency on Nuclear Energy of Russia, Federal state unitary enterprise scientific research, design and engineering survey institute. 2005.
- [12] <http://www.gidropress.podolsk.ru/English/PGV1500.html>