

تحلیل ترموهیدرولیکی مولد بخار ماریپچی در رآکتور ماژولار پیشرفته SMART

ظریفی، احسان* (۲۹۱) - سپانلو، کامران (۲۹۱)

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای
نظام ایمنی هسته‌ای کشور، دفتر ایمنی هسته‌ای

چکیده:

هدف از این تحقیق، تحلیل ترموهیدرولیکی مولد بخار ماریپچی در رآکتور ماژولار پیشرفته SMART می‌باشد. رفتار مولدهای بخار ماریپچی در مقایسه با نوع کلاسیک آن، خصوصاً در مکانیزم برداشت حرارت، مشکل و پیچیده تر می‌باشد. در این مقاله با استفاده از قابلیت‌های کد RELAP5 یک مدل ترموهیدرولیکی از مولد بخار ماریپچی ارائه شده است. از مزایای مدل پیشنهادی، در نظر گرفتن الگوی واقعی جریان و نزدیکی مدل با هندسه واقعی مولد بخار می‌باشد.

کلمات کلیدی: مولد بخار ماریپچی، رآکتور ماژولار SMART، تحلیل ترموهیدرولیکی، کد RELAP5

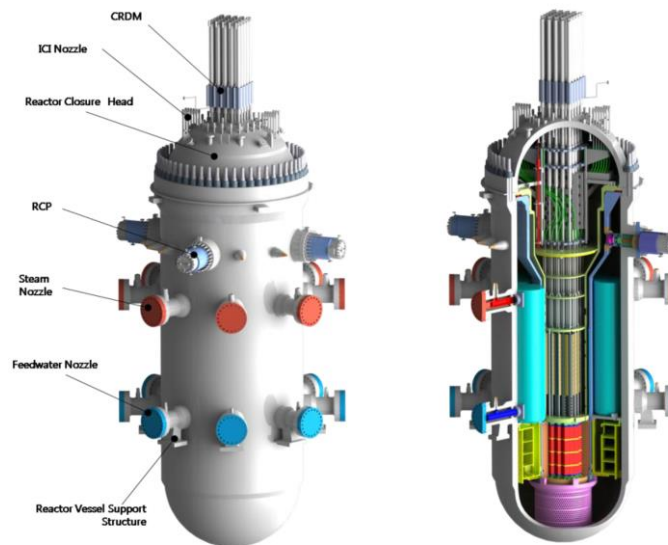
مقدمه :

یکی از مسائل مهم در تمامی نیروگاه‌های هسته‌ای با رآکتور آب تحت فشار، بحث بر روی واحدهای تولید بخار خصوصاً مولد بخار می‌باشد. مولد بخار از لحاظ ایمنی در یک رآکتور نقش مهمی را ایفا نموده و به عنوان سدی بین سیکل اولیه رادیواکتیو و سیکل ثانویه غیر رادیواکتیو عمل می‌کند. رآکتورهای پیشرفته ماژولار کلاس جدیدی از رآکتورهای نسل ۳ پلاس بوده که مهمترین تمایز آنها نسبت به رآکتورهای کلاسیک این است که در آنها واحدهای تولید بخار به داخل محفظه تخت فشار رآکتور منتقل شده است. انتقال مولدهای بخار به داخل محفظه تحت فشار رآکتور باعث کاهش اثرات حوادثی که مرتبط با نقص سیستم مدار اول از جمله حادثه LOCA می‌گردد. و همکارانش افت فشار در مولدهای بخار لوله ماریپچی را بررسی کرده اند و به تحلیل فرآیندهای ترموهیدرولیکی موجود در این مولدهای بخار پرداختند [۱]. Colorad و همکارانش مولدهای بخار لوله ماریپچ مورد بررسی قرار دادند [۲]. برای این کار آنها از مدل ریاضی و مدل آزمایشگاهی به صورت همزمان استفاده کردند و جریانهای تک فاز، جریانهای دوفاز و ناحیه بخار سوپریت در مولدهای بخار را تحلیل نمودند. Sooyun فرآیندهای انتقال حرارت و دینامیک سیالات مولد بخار لوله ماریپچ را مورد بررسی قرار داد [۳]. او برای این کار از نرم افزارهای CFD استفاده نمود و رژیمهای جریان در مدار اولیه و ثانویه را مورد مطالعه قرار داد. Hoffer و همکارانش از آزمایشگاه ملی آیداهو با استفاده از کد RELAP5 به بررسی مولدهای بخار ماریپچی در نسل جدید رآکتور پیشرفته گازی

دما بالا پرداختند [۴]. همچنین Prabhanjan و همکارانش طی پژوهشی میزان انتقال حرارت در لوله های مبدل حرارتی مستقیم را با لوله های مبدل حرارتی مقایسه نمودند. نتایج بررسی هایشان نشان داد که مبدلهای حرارتی ماریچی نسبت به مبدلهای حرارتی افقی کارایی بیشتر داشته و نرخ انتقال حرارت را به میزان قابل توجهی افزایش می دهند [۵]. در این مقاله به آنالیز و بررسی نتایج محاسبات مولد بخار ماریچی رآکتور ماژولار SMART با بکارگیری بُندی مناسب از کد RELAP5 پرداخته شده است.

روش کار :

در سالهای اخیر تمایل به ساخت رآکتورهایی با ابعاد کوچک و ایمنی بالا به دلیل نیاز به واحدهای کوچک در شبکه های برق بخصوص در مناطق دورافتاده و شهرهای کم جمعیت در حال افزایش می باشد. از مشخصه های اصلی این رآکتورها می توان به ایمنی ذاتی بالا، سادگی تجهیزات، زمان بهره برداری بیشتر (عدم نیاز به سوختگذاری در حدود ۲ تا ۳ سال)، کارایی بالاتر، هزینه بهره برداری کمتر نسبت به رآکتورهای بزرگتر اشاره نمود. این امر و بسیاری دلایل دیگر سبب گردید که بسیاری از کشورهای توسعه یافته و برخی از کشورهای درحال توسعه، طرحهای مفهومی و ابتکاری بسیاری را در این زمینه ارائه نمایند. SMART (System Integrated Modular Advanced Reactor) یک رآکتور سایز کوچک از نوع آب تحت فشار به صورت مجتمع و یکپارچه بوده که تمامی تجهیزات مدار اول آن در داخل محفظه تحت فشار رآکتور قرار داده شده است. توان حرارتی این رآکتور ۳۳۰ MW(th) و توان الکتریکی آن در حدود ۱۰۰ MW(e) می باشد. در شکل (۱) نمایی از محفظه تحت فشار این رآکتور نشان داده شده است.



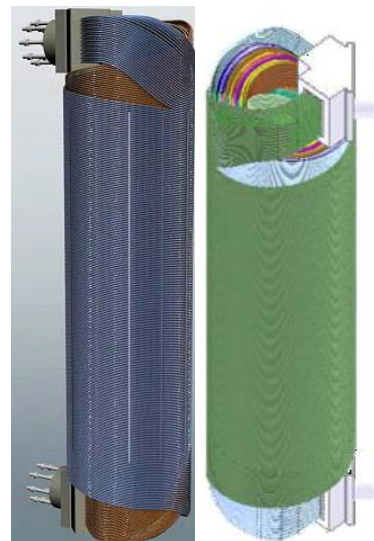
شکل (۱) نمایی از محفظه تحت فشار رآکتور SMART [۱۶]

نحوه تولید بخار در این راکتور به اینگونه است که سیال خنک کننده راکتور پس از عبور از میله های سوخت و جذب گرما، وارد رایزر می گردد. به علت گرم شدن سیال خنک کننده، دانسیته آن کاهش می یابد و سیال از طریق مجرای رایزر به سمت بالا حرکت می کند. در انتهای رایزر، جریان وارد صفحه بالایی راکتور شده و سپس وارد مولد بخار می گردد. آب تغذیه از قسمت پایین مولد بخار وارد لوله های مولد بخار شده و سیال خنک کننده راکتور از بالا وارد مولد بخار می گردد. آب تغذیه با جذب گرمای سیال خنک کننده، بخار شده و از قسمت بالایی مولد بخار به صورت سوپرهیت خارج می گردد. بخار خارج شده از مولد بخار وارد توربین شده و برای تولید برق استفاده می گردد. در راکتور SMART هشت مولد بخار جداگانه و مستقل بین دیواره بیرونی مجرای رایزر و دیواره داخلی محفظه راکتور وجود دارد. این مولدهای بخار از نوع لوله مارپیچی هستند. آب تغذیه از پایین وارد لوله های مارپیچ شده و خنک کننده راکتور از بالا وارد مولد بخار می گردد؛ بنابراین مولد بخار به صورت یک مبدل حرارتی با جریان مخالف عمل می کند (شکل ۲). در جدول (۱) مشخصات هندسی مولد بخار مارپیچی در راکتور SMART آورده شده است.

جدول (۱) مشخصات هندسی مولد بخار مارپیچی در

راکتور SMART [۶]

Parameter	Value	Unit measure
Pipes inner diameter	12	mm
Pipes outer diameter	17	mm
Pipes length	24.7	mm
Pipes material	Inconel 690	
Number of pipes	375	
Number of rows	17	
Radial pitch	22.5	mm
Axial pitch	20	mm
Cassette external diameter	1.35	m

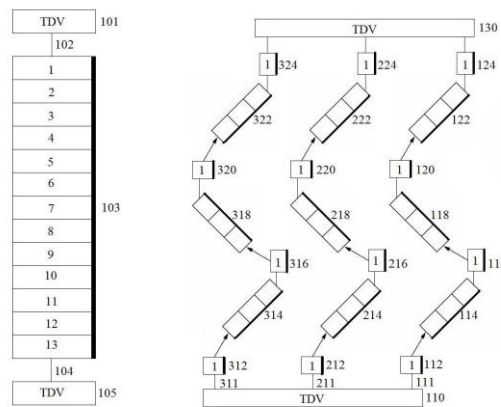


شکل (۲) نمایی از مولد بخار مارپیچی در

راکتور SMART [۶]

کد تحلیل حالت گذرای راکتورهای راکتورهای آب سبک، RELAP (Reactor Excursion and Leak Analysis Program) [۷] در آزمایشگاه ملی آیداهو در آمریکا توسعه یافته است. در این کد مدل سیال بر اساس معادلات توازن جرم و انرژی در هر حجم کنترل بوده، که این حجم ها توسط اتصالات به یکدیگر متصل می باشند. مدل ترموهیدرولیکی سیال دوفازی نیز شامل فرآیندهای ترانسپورت بین مرزی در معادلات جرم، ممنتوم و انرژی می باشد.

با توجه به اینکه این نوع مولد بخار به شکل ماریپیچی می باشد باید با استفاده از روشهایی حالت ماریپیچی که باعث افت فشار شدید می گردد در مدل اعمال گردد. برای رسیدن به این هدف با بکارگیری چند ماریپیچ و تغییر جهت چرخش آنها سعی گردید تا حد امکان مدل ارائه شده به هندسه واقعی نزدیک گردد. در مدلسازی انجام شده طرف اولیه مولد بخار با یک لوله شامل ۱۳ حجم کنترلی مدلسازی شده است. قسمت ثانویه مولد بخار در سه دسته لوله شامل دسته لوله خارجی، میانی و داخلی مدلسازی شده است. در شکل (۳) نُدبندی مولد بخار ماریپیچی رآکتور ماژولار SMART در کد RELAP5 نشان داده شده است. همچنین در جدول (۲) شرایط مرزی بکار رفته در این مدلسازی آورده شده است.



شکل (۳) نُدبندی طرف اولیه و ثانویه مولد بخار لوله ماریپیچی در رآکتور SMART

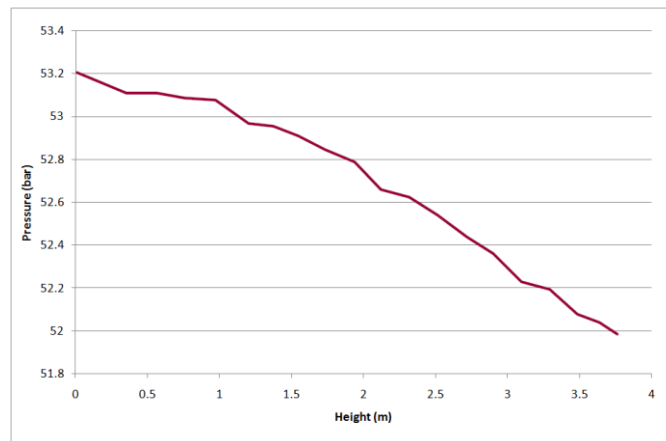
نتایج

در جدول ۱ نتایج محاسبات انجام شده با کد RELAP5 و مقادیر طراحی رآکتور [۶] مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می گردد نتایج حاصل از مدلسازی با مقادیر طراحی تقریباً انطباق دارد و تفاوتها را می توان مربوط به خطای مدلسازی دانست.

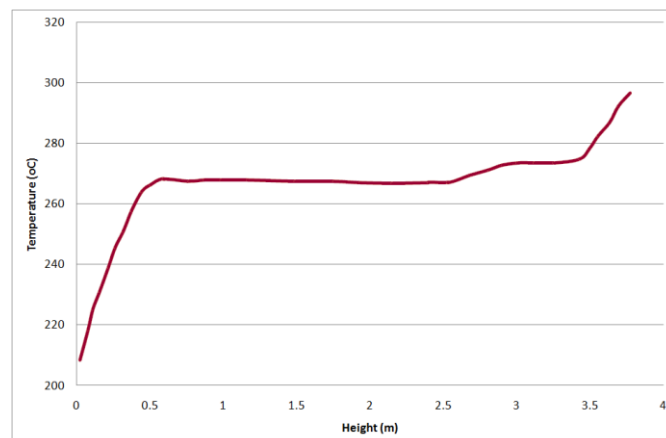
جدول (۲) مقایسه بین مقادیر طراحی [۶] و مقادیر محاسبه شده از کد RELAP5

مقدار محاسبه شده	مقدار طراحی	پارامتر
۴۴/۷	۴۵	توان حرارتی، (MW)
۲۰/۳	۲۰/۱	ظرفیت بخار، (Kg/s)
۲۹۶/۵۵	۳۰۰	دمای بخار خروجی، (°C)
۱	۱	کیفیت بخار خروجی

در شکل (۴) نمودار تغییرات فشار در لوله های مارپیچی نشان داده شده است. مطابق نمودار ملاحظه می گردد که در طول کانال فشار مولد بخار کاهش می یابد و همچنین نوساناتی به علت افت فشار در محل پیچ ها مشاهده می گردد. در نمودار ۴ تغییرات دمای سیال در لوله های مارپیچ ارائه شده است، همانطور که ملاحظه می گردد در طول لوله دما افزایش می یابد و سپس تغییرات تقریباً به دلیل تغییر فاز از مایع به بخار ثابت می گردد و در انتهای لوله به دلیل عبور از فاز اشباع به بخار سوپر هیت دما دوباره افزایش می یابد.

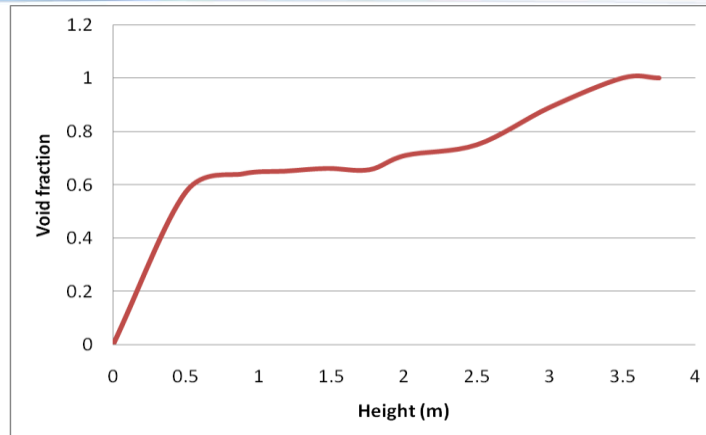


شکل (۴) تغییرات فشار در لوله های مارپیچی در سیکل ثانویه



شکل (۴) تغییرات فشار در لوله های مارپیچی در سیکل ثانویه

در شکل (۵) میانگین توزیع کسر خلأ در لوله های مارپیچ را نشان می دهد. ملاحظه می گردد که توزیع کسر خلأ با در طول کانال افزایش می یابد و در ناحیه ای که تغییر فاز به ناحیه اشباع رخ می دهد تغییرات آن کندتر شده و سپس در انتهای کانال مقدار آن به ۱ نزدیک می گردد.



شکل (۵) تغییرات کسر خلأ در لوله های مارپیچی در سیکل ثانویه

بحث و نتیجه گیری

هدف از این تحقیق، ارائه مدل ترموهیدرولیکی مولد بخار مارپیچی بوده است. از مزایای مدل ارائه شده در نظر گرفتن لوله مارپیچی در ناحیه بسته لوله های مبدل حرارتی می باشد، که بدون لحاظ نمودن آن دستیابی به نتایج قابل قبول و نزدیک شدن به الگوی جریان واقعی در مولد بخار وجود ندارد. مقایسه نتایج حاصل با داده های طراحی نشان دهنده صحت و دقت شبیه سازی می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از کد RELAP5، در کارهای آینده، امکان آنالیز حوادث (سناریوهای) مختلف بر روی مدل اجرا شده و آنالیز رفتار دینامیکی سیستم قابل بررسی خواهد بود.

مراجع

- 1- S. Lorenzo, A. Cioncolini, C. Lombardi and M. Ricotti, "Two-phase pressure drops in a helically coiled steam generator", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, PP. 4926-4939, 2008
- 2- D. Colorado, D. Papini, J.A. Hernández, L. Santini and M.E. Ricotti, "Development and experimental validation of a computational model for a helically coiled steam generator", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 50, PP. 569-580, 2011.
- 3- J. Sooyun , "Thermal Hydraulic Studies on Helical Coil Steam Generator by CFD", Proceedings of the ASME Pressure Vessels & Piping Division Conference, 2011.
- 4- Nathan V. Hoffer, Piyush Sabharwall, Nolan A. Anderson, "Modeling a Helical-coil Steam Generator in RELAP5-3D for the Next Generation Nuclear Plant", Idaho National Laboratory Next Generation Nuclear Plant Project Idaho Falls, Idaho 83415, 2013.
- 5- D.G. Prabhanjan, G.S.V. Ragbavan, and T.J. Rennie, "Comparison of Heat Transfer Rates Between a Straight Tube Heat Exchanger and a Helically Coiled Heat Exchanger," International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 29 No. 2, pp. 185-191, 2002.
- 6- Lee, J., Hyuck Won, J., Zin Cho N., Ho Ryu, Y. and Yeop Park, J. (2010). A Preliminary Analysis of SMART Reactor Core Using the COREMAX Code. Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting. Jeju. Korea.