



## آنالیز ترموهیدرولیکی سیستم ایمنی پسیو برداشت حرارت رآکتور VVER-1000 با استفاده از کد RELAP5

شهابی نژاد، علی- پیروزمند، احمد\* - ربیعی، عطاءاله

(<sup>۱</sup>) دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته‌ای

### چکیده:

با توجه به بهبود سطح ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای قدرت در رآکتورهای نسل جدید، استفاده از سیستم‌های ایمنی پسیو به عنوان یکی از راهکارهای موثر افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در این مقاله آنالیز ترموهیدرولیکی سیستم پسیو برداشت حرارت (PHRS) رآکتور VVER-1000 برای اطمینان از کفایت عملکرد این سیستم در شرایط طبیعی با استفاده از کد محاسباتی RELAP5 مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور ابتدا نودبندی این سیستم با در نظر گرفتن مدارک موجود تعیین و سپس مدل‌سازی آن در کد RELAP5 صورت می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم قادر است در فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی‌گراد، ۹۵/۵۲ مگاوات برداشت حرارت انجام دهد.

**کلمات کلیدی:** رآکتور VVER-1000، سیستم پسیو برداشت حرارت (PHRS)، کد RELAP5

### مقدمه:

از شروع تاسیس اولین نیروگاه‌های هسته‌ای تا به حال، ایمنی هسته‌ای بخشی از مهمترین اهدافی است که مورد پژوهش دانشمندان و فعالان این حوزه قرار گرفته است. پایداری سیستم، کنترل زنجیره شکافت در قلب رآکتور و همچنین حفظ خنک‌کنندگی قلب رآکتور و یکپارچگی پوش رآکتور جزء اهداف اصلی می‌باشند. استفاده از سیستم‌های ایمنی پسیو<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۱ در کنفرانس آژانس بین‌المللی انرژی اتمی تحت عنوان "امنیت انرژی هسته‌ای: استراتژی برای آینده" مورد توجه قرار گرفت. رویکرد استفاده از سیستم‌های پسیو می‌تواند منجر به ساده‌سازی و مزایای کلی اقتصادی برای سیستم‌ها شود و همچنین سیستم‌های پسیو میزان خطای انسانی کمتری نسبت به سیستم‌های اکتیو دارند. در نتیجه، استفاده از سیستم‌های ایمنی پسیو در رآکتورهای متعددی (از جمله در نسل سوم و III<sup>+</sup>) مورد توجه قرار گرفته است [۱].

همانطور که بیان شد اهمیت سیستم‌های ایمنی پسیو در بهبود قابلیت اطمینان عملکردها و در نتیجه افزایش سطح ایمنی رآکتورهای هسته‌ای مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در ادامه این بخش به صورت اجمالی به پیشینه مدل‌سازی و

<sup>1</sup> Containment

<sup>2</sup> Passive safety systems



آنالیزسیستم PHRS در تحقیقات اخیر پرداخته می‌شود. در سال ۲۰۰۹ جیا و همکاران تجزیه و تحلیل ترموهیدرولیکی سیستم پسیو برداشت حرارت برای یک رآکتور آبی تحت فشار را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق ابتدا از یک مدل یک بعدی و سپس توسط کد شبیه سازی (SCPRHRS) به بررسی ویژگی‌های ترموهیدرولیک نوع جدیدی از سیستم PRHRS پرداخته شده است [۲]. در سال ۲۰۱۵ ژو و همکارانش مطالعه‌ای تجربی در مورد ویژگی‌های مدار ثانویه سیستم پسیو برداشت حرارت برای رآکتور آب تحت فشار چینی انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که انتقال حرارت بین لوله خنک کننده SPHRS و مخزن آب خنک کننده برای گردش طبیعی در حلقه تست سیستم SPHRS جهت خنک نگه داشتن قلب رآکتور کفایت می‌کند. همچنین مشخص شد که گردش طبیعی می‌تواند در فشارهای مختلف از یک نقطه فشار به فشارهای دیگر در حالت‌های افت توان رآکتور نیز حفظ شود [۳]. در سال ۲۰۱۶ آیهان و همکاران به طراحی و مدل‌سازی سیستم برداشت حرارت باقیمانده برای رآکتورهای VVER با استفاده از کد RELAP5 پرداختند، پارامترهای طراحی برای سیستم برداشت حرارت باقیمانده برای ظرفیت گرمایشی ۵/۵۰ مگاوات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج رفتار حالت پایدار به دست آمده با استفاده از کد RELAP5 نشان می‌دهد که سیستم PHRS قادر است حرارت باقیمانده را از سیستم خنک کننده اولیه قلب رآکتور برداشت کند [۴].

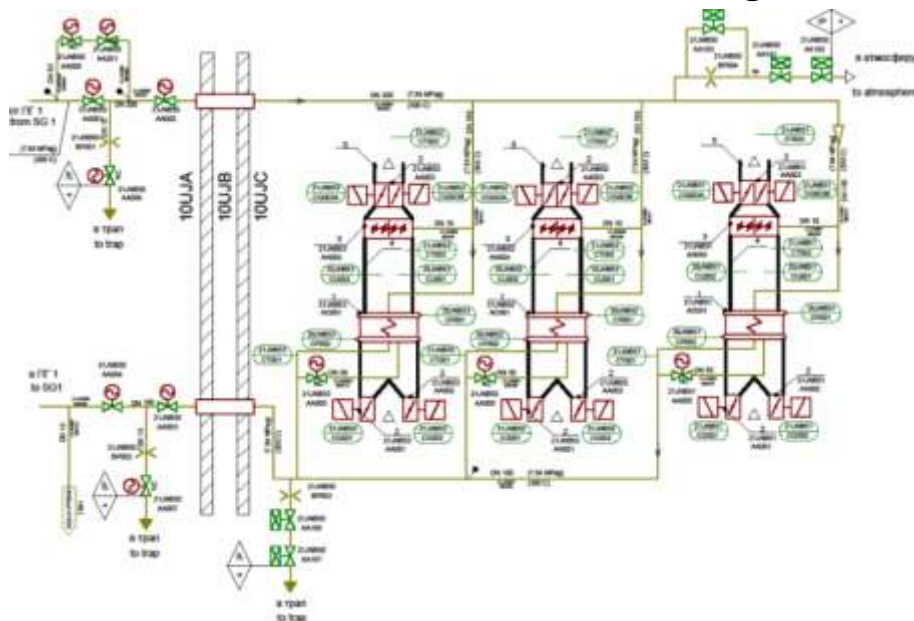
در این مقاله آنالیز ترموهیدرولیکی سیستم پسیو برداشت حرارت رآکتور VVER-1000 برای اطمینان از کفایت عملکرد این سیستم در شرایط طبیعی با استفاده از کد محاسباتی RELAP5 مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## روش انجام کار

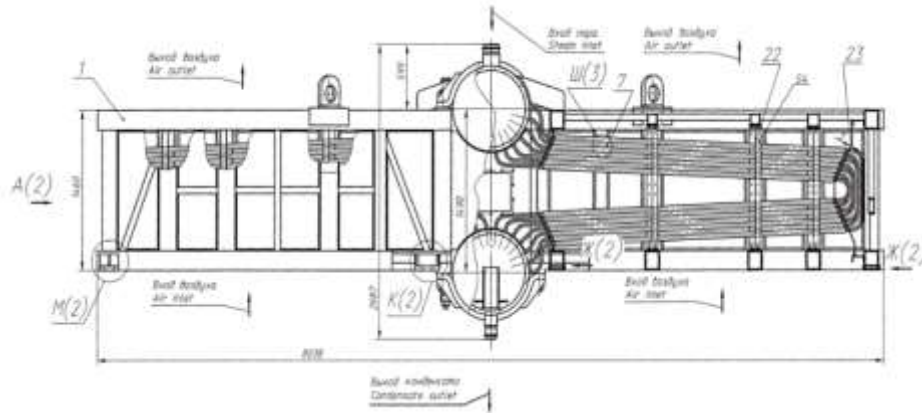
### -آشنایی با سیستم PHRS

در این قسمت به معرفی سیستم PHRS پرداخته می‌شود. سیستم PHRS رآکتور VVER-1000 شامل چهار کانال مشابه مستقل از هم می‌باشد. شکل شماره (۱) شماتیکی از خطوط جریان در یک کانال سیستم PHRS با سه مبدل حرارتی را نشان می‌دهد. هر کدام از کانال‌ها به حلقه مربوطه رآکتور از طریق طرف ثانویه مولد بخار متصل می‌گردد. هر کانال دارای خطوط لوله برای انتقال و چگالش بخار، دریچه‌های هوا و سه مبدل حرارتی خنک کننده از طریق گردش هوای طبیعی در خارج از پوش رآکتور می‌باشد. بخار تولید شده در مولد بخار با توجه به گرمای آزاد شده در رآکتور، توسط لوله‌های بخار سیستم به مبدل‌های حرارتی می‌رسد سپس وارد مبدل حرارتی شده و بخار درون مبدل‌های حرارتی به تیوب‌هایی که دارای زاویه بسیار کم، قطر کوچک اما طول بلندی دارند تقسیم شده و به سمت پایین هدایت می‌شود. نحوه قرارگیری تیوب‌ها در هر مبدل حرارتی در شکل شماره (۲) نمایش داده شده است. جریان گردش طبیعی هوا در سمت ثانویه مبدل حرارتی از سمت پایین به بالا برخلاف مسیر عبور بخار درون تیوب‌ها باعث برداشت گرما و تغییر فاز بخار به آب (چگالش) می‌گردد. در انتها مبدل حرارتی میعان که از طریق تیوب‌های انتهای مبدل حرارتی به لوله‌ای

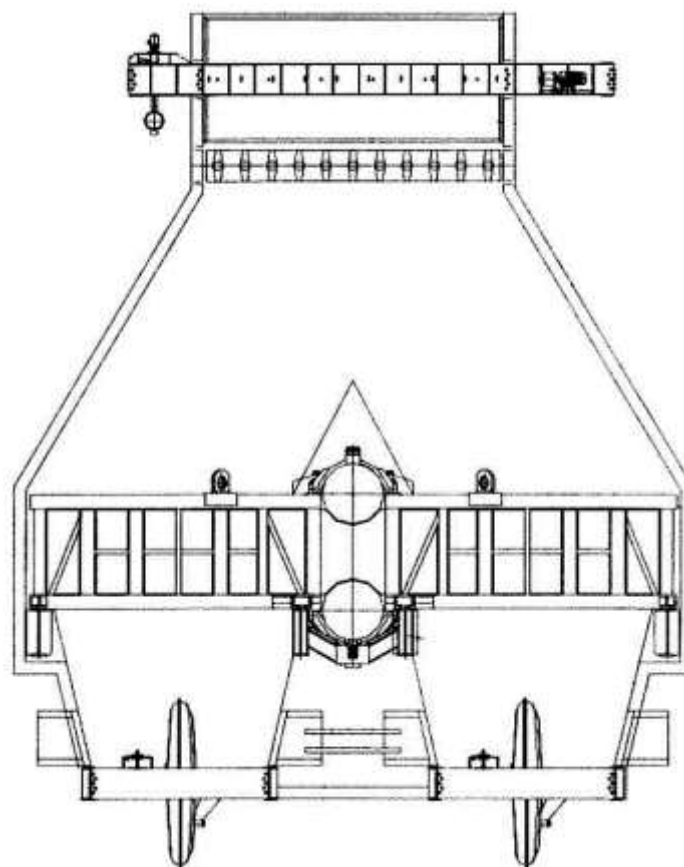
که به صورت عمودی قرار گرفته شده است منتقل می‌شود و پس از طی ارتفاعی به سمت پایین به لوله‌ی انتهایی که در جهت افقی قرار دارد به مولد بخار باز می‌گردد. لازم به ذکر است که حرکت خنک‌کننده به صورت جابجایی طبیعی صورت می‌گیرد. شکل شماره (۳) نحوه قرار گرفتن یک مبدل حرارتی در مسیر هوا در سیستم PHRS را نشان می‌دهد. مطابق شکل هر مبدل حرارتی دارای یک کانال هوا می‌باشد. همچنین دو دریچه که در انتها شکل قرار گرفتند توسط دو بازوی کنترلی اکتیو و پسیو کنترل می‌شوند. باز شدن دریچه‌ها به صورت یک صفحه برش هوا عمل می‌کند و جریان هوا از سمت پایین به سمت بالا مکش می‌شود و در مجاورت تیوب‌های دو سمت مبدل حرارتی قرار گرفته و عمل خنک‌کنندگی در بین تیوب‌ها صورت می‌گیرد سپس هوای حرارت دیده به واسطه برداشت حرارت از تیوب‌ها از دریچه بالایی مبدل حرارتی خارج می‌شود.



شکل شماره (۱): شماتیک خطوط جریان یک سیستم PHRS با سه مبدل حرارتی



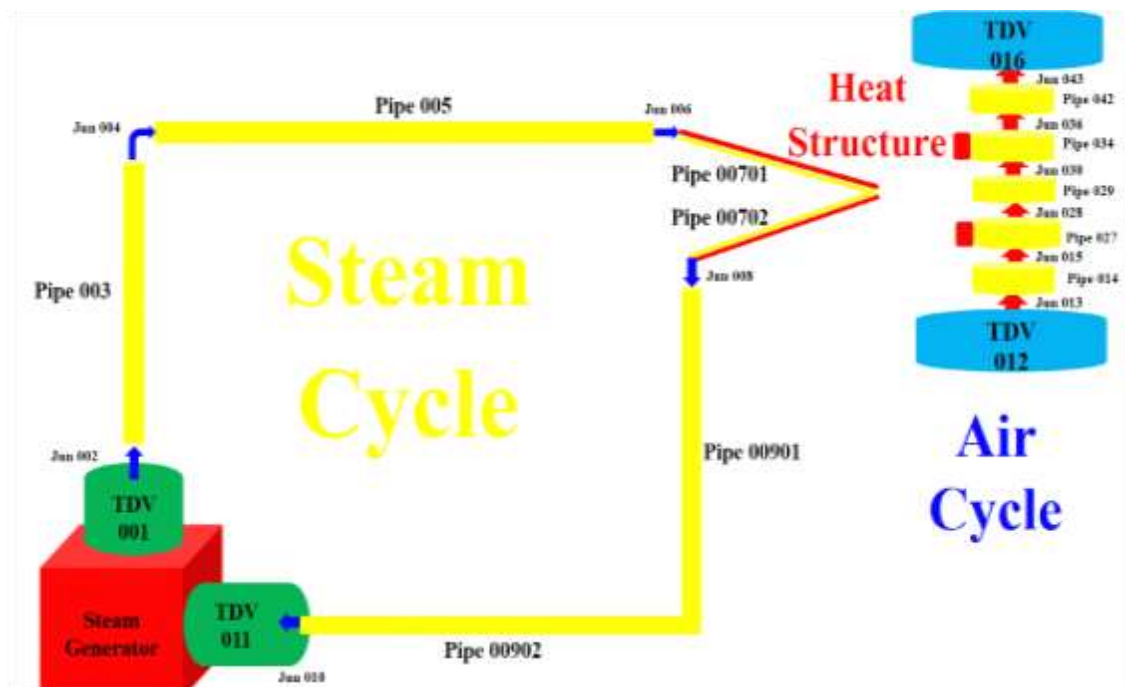
شکل شماره (۲): شماتیک تیوب‌های عمودی یک مبدل حرارتی



شکل شماره (۳): نحوه قرار گرفتن یک مبدل حرارتی در مسیر هوا در سیستم PHRS

## نودبندی سیستم و مدل‌سازی در کد RELAP5

در این بخش ابتدا به نحوه مدل‌سازی و نودبندی سیکل بخارسیپس مسیر مبدل حرارتی و در آخر سیکل هوا در کد RELAP5 پرداخته می‌شود. نود بندی سیکل بخار شامل دو حجم (TDV) و شامل چهار لوله (PIPE) است که لوله‌ها از طریق ۵ اتصال (JUNCTION) به هم دیگر متصل می‌شوند. در شکل شماره (۴) نحوه نودبندی یک سیستم PHRS با یک مبدل حرارتی برای دو سیکل بخار و هوا نمایش داده شده است. برای اعمال شرایط مرزی از حجم‌های کنترلی در سیکل‌های هوا و بخار استفاده شده است. همچنین سطح انتقال حرارت بین دو سیکل هوا و بخار با محاسبه سطح موثر تیوپها بصورت ساختارهای گرمایی در کد مدل شده است.



شکل شماره (۴): نودبندی یک سیستم PHRS با یک مبدل حرارتی

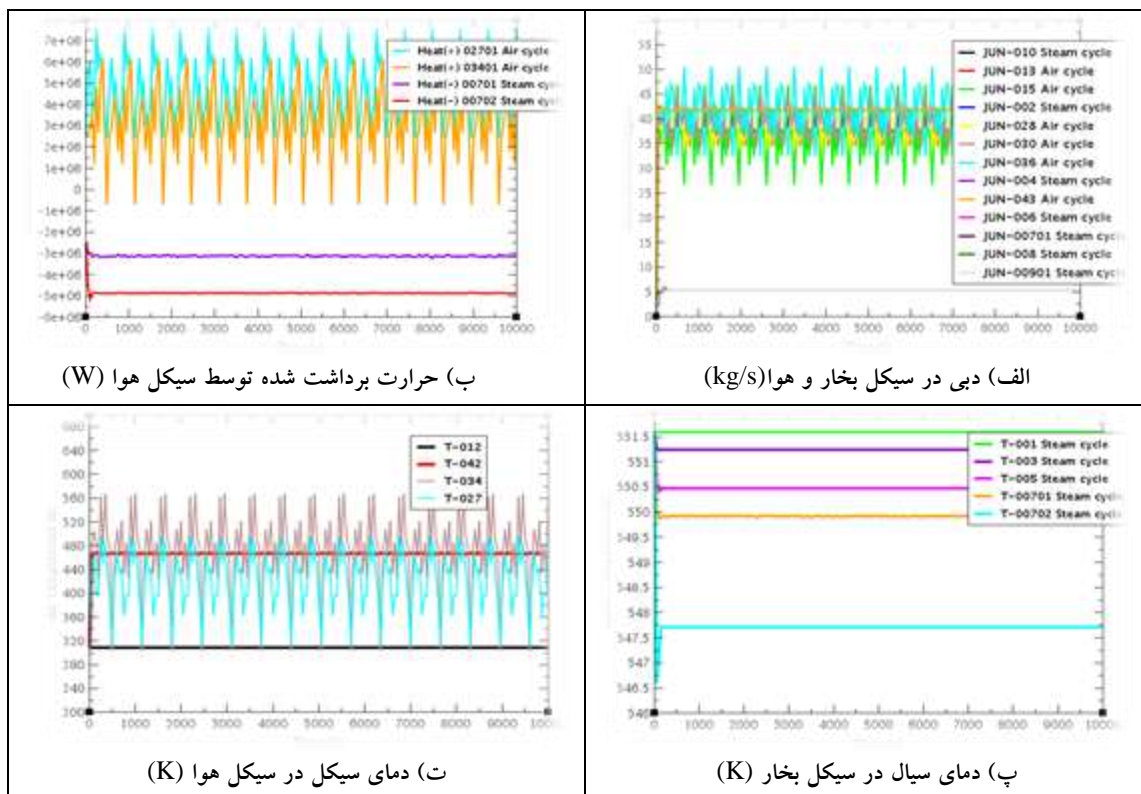
### نتایج:

در این بخش نتایج حاصل از مدل توسعه داده شده در کد RELAP5 برای فشار مولد بخار مرجع و دمای هوا ارائه می‌گردد. همچنین برای ارزیابی مدل، نتایج حاصل از آن با داده‌های مرجع در شرایط مختلف کاری مقایسه می‌شود.



با توجه به شکل شماره (۵) دبی سیکل بخار و دبی هوا یک مبدل حرارتی در فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال مولد بخار و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی گراد در حالت پایدار، به ترتیب برابر با ۵/۴ و ۳۹/۵ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. ضمناً مقادیر دبی بخار و هوا کسر یک دوازدهم از دبی تمام مبدل‌های حرارتی است و دبی بخار و هوا برای تمامی مبدل‌های حرارتی رآکتور VVER-1000 به ترتیب برابر با ۶۴/۸ کیلوگرم بر ثانیه و ۴۷۴/۰ کیلوگرم خواهد بود.

همچنین میزان برداشت توان حرارتی از تیوب دو قسمتی یک مبدل حرارتی در فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال مولد بخار و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی گراد، مجموعاً برابر با ۷/۹۶ مگاوات می‌شود و این مقدار کسر یک دوازدهم از تمامی برداشت حرارت مبدل‌های حرارتی است و برداشت حرارت توسط تمامی مبدل‌های حرارتی رآکتور VVER-1000 در شرایط ذکر شده برابر با ۹۵/۵۲ مگاوات می‌باشد.



شکل شماره (۵) تغییرات زمانی پارامترها در دو سیکل بخار و هوا برای فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال مولد بخار و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی گراد

جدول شماره (۱): دبی هوا (kg/s) در فشارهای مختلف مولد بخار و دماهای مختلف هوا

Air temp. (°C)	SG pressure (MPa)	RELAP5	Ref.	% Error
----------------	-------------------	--------	------	---------



۴۵	۸	۴۳۶/۳	۴۴۱/۸	-۱/۲
۳۶	۸	۴۸۲/۴	۴۶۷/۲	+۳/۱
۲۰	۸	۴۵۹/۶	۴۹۷/۸	-۷/۶
۴۵	۷	۴۴۴/۰	۴۳۹/۱	+۱/۱
۱۰	۷	۴۷۲/۵	۵۲۰/۸	-۹/۲۷
۳۶	۶/۲۷	۴۷۴/۰	۴۶۲/۵	+۲/۴
۱۰	۶/۲۷	۴۶۴/۴	۵۱۹/۴	-۱۰/۵
۲۰	۵	۴۸۶/۰	۴۹۰/۱	۰/۸
۱۰	۴	۴۹۹/۲	۵۱۱/۹	-۲/۴

جدول شماره (۲): دبی بخار (kg/s) در فشارهای مختلف مولد بخار و دماهای مختلف هوا

Air temp. (°C)	SG pressure (MPa)	RELAP5	Ref.	% Error
۴۵	۸	۷۱/۴	۶۲/۲	+۱۲/۸
۳۶	۸	۶۹/۱	۶۷/۵	+۲/۳
۲۰	۸	۷۰/۸	۷۵/۲	-۵/۸
۱۰	۸	۷۱/۷	۸۰/۹	-۱۱/۳
۱۰	۷	۶۶/۳	۷۴/۷	-۱۱/۲
۳۶	۶/۲۷	۶۴/۸	۵۸/۱	+۱۰/۳
۱۰	۶/۲۷	۶۲/۲	۷۰/۳	-۱۱/۵
۲۰	۵	۵۸/۸	۵۷/۷	+۱/۸
۱۰	۴	۵۲/۸	۵۶/۲	-۶/۰



جدول شماره (۳): توان حرارتی (MW) برداشت شده از سیکل بخار در فشارهای مختلف مولد بخار و دماهای مختلف هوا

Air temp. (°C)	SG pressure (MPa)	RELAP5	Ref.	% Error
۴۵	۸	۹۷/۲	۸۹/۸	+۷/۶
۳۶	۸	۹۴/۲	۹۷/۳	-۳/۱
۲۰	۸	۹۶/۹۶	۱۰۸/۶	-۱۰/۷
۴۵	۷	۹۶/۰	۸۶/۰	+۱۰/۴
۶۲	۶/۲۷	۸۱/۴۸	۷۱/۸	+۱۱/۸
۳۶	۶/۲۷	۹۵/۵۲	۹۰/۲	+۵/۵
۲۰	۵	۹۱/۲	۹۸/۴	-۷/۳
۱۰	۴	۹۷/۴۴	۹۶/۴	+۱/۰
۶۲	۳	۵۷/۶	۵۴/۳	+۵/۷

جدول های (۱) تا (۳) به ترتیب مقادیر دبی هوا، دبی بخار و میزان کل حرارتی برداشت شده توسط سیستم PHRS را برای شرایط مختلف کارکرد نشان می دهند. همچنین در این جدول ها مقایسته ای با داده های مرجع صورت گرفته است.

### بحث و نتیجه گیری:

در این تحقیق آنالیز ترموهیدرولیکی سیستم پسیو برداشت حرارت رآکتور VVER-1000 برای اطمینان از کفایت عملکرد این سیستم در شرایط مختلف کارکرد با استفاده از کد محاسباتی RELAP5 مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ضمن آشنایی با ساختار فیزیکی و مشخصات عملکردی این سیستم یک مدل در کد RELAP5 توسعه داده شد. مقایسه نتایج حاصل از مدل با داده های داده شده در مرجع نشان می دهد که این مدل از دقت قابل قبولی برای بررسی رفتار این سیستم در شرایط مختلف عملکردی برخوردار است. بطور خاص در شرایط فشار مولد بخار ۶/۲۷ مگاپاسکال و دمای





هوای ۳۶ درجه سانتی‌گراد این سیستم قادر است ۹۵/۵۲ مگاوات از قلب رآکتور برداشت حرارت انجام دهد. همچنین از مدل حاصل می‌توان برای بررسی کفایت عملکرد این سیستم در زمان وقوع حوادث از جمله حادثه SBO استفاده کرد.

#### مراجع :

- [1] N. Aksan *et al.*, "Passive safety systems and natural circulation in water cooled nuclear power plants," 2009.
- [2] J. Gou, S. Qiu, G. Su, and D. Jia, "Thermal hydraulic analysis of a passive residual heat removal system for an integral pressurized water reactor," *Science and Technology of Nuclear Installations*, vol. 2009.
- [3] J. Wu, Q. Bi, and C. Zhou, "Experimental study on circulation characteristics of secondary passive heat removal system for Chinese pressurized water reactor," *Applied Thermal Engineering*, vol. 77, pp. 106-112, 2015.
- [4] Ayhan, H., & Sökmen, C. N., Design and modeling of the passive residual heat removal system for VVERs. *Annals of Nuclear Energy*, 95, 109-115, 2016.