



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

علی شهبایی نژاد<sup>۱\*</sup>، احمد پیروزمند، عطاءاله ربیعی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>بخش مهندسی هسته ای، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

### مکیده

طراحی و استفاده از سیستم های ایمنی پسیو به عنوان یکی از راهکارهای موثر افزایش قابلیت اطمینان سیستم های ایمنی و در نتیجه بهبود سطح ایمنی نیروگاه های هسته ای قدرت در راکتورهای نسل جدید مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در این مقاله آنالیز ترموهیدرولیکی سیستم پسیو برداشت حرارت (PHRS) راکتور VVER-1000 برای اطمینان از کفایت عملکرد این سیستم در شرایط کارکرد عادی با استفاده از کد محاسباتی RELAP5 مورد بررسی قرار می گیرد. به این منظور ابتدا نود بندی این سیستم با در نظر گرفتن مدارک موجود تعیین و سپس مدلسازی آن در کد RELAP5 صورت می گیرد. نتایج نشان می دهد که این سیستم قادر است در فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی گراد، ۹۵/۵۲ مگاوات برداشت حرارت انجام دهد.

**واژه های کلیدی:** راکتور VVER-1000، سیستم پسیو برداشت حرارت (PHRS)، کد RELAP5.

### ۱- مقدمه

در نتیجه، استفاده از سیستم های ایمنی پسیو در راکتورهای متعددی (از جمله در نسل سوم و III<sup>+</sup> مورد توجه قرار گرفته است. (Aksan, N.et.al.,2009) همانطور که بیان شده اهمیت سیستم های ایمنی پسیو در بهبود قابلیت اطمینان عملکردها و در نتیجه افزایش سطح ایمنی راکتورهای هسته ای مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در ادامه به صورت اجمالی به پیشینه مدلسازی و آنالیز سیستم PHRS در تحقیقات اخیر پرداخته می شود. در سال ۲۰۰۹ جیا و همکاران تجزیه و تحلیل ترموهیدرولیکی سیستم پسیو برداشت حرارت برای یک راکتور 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

از شروع تاسیس اولین نیروگاه های هسته ای تا به حال، ایمنی هسته ای بخشی از مهمترین اهدافی است که مورد پژوهش دانشمندان و فعالان این حوزه قرار گرفته است. پایداری سیستم، کنترل زنجیره شکافت در قلب راکتور و همچنین حفظ خنک کنندگی قلب راکتور و یکپارچگی پوش راکتور جزء اهداف اصلی می باشند. استفاده از سیستم های ایمنی پسیو<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۱ در کنفرانس آژانس بین المللی انرژی اتمی تحت عنوان "امنیت انرژی هسته ای: استراتژی برای آینده" مورد توجه قرار گرفت. رویکرد استفاده از سیستم های پسیو می تواند منجر به ساده سازی و مزایای کلی اقتصادی برای سیستم ها شود و همچنین سیستم های پسیو میزان خطای انسانی کمتری نسبت به سیستم های اکتیو دارند.

ویژگی‌های ترمو هیدرولیک نوع جدیدی از سیستم PRHRS پرداخته شده است. (Gou, J.et.al.,2009)

در سال ۲۰۱۵ ژو و همکارانش مطالعه‌ای تجربی در مورد ویژگی‌های مدار ثانویه سیستم پسیو برداشت حرارت برای رآکتور آب تحت فشار چینی انجام داده‌اند، 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. (Wu, J.et.al.,2015)

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.

(Ayhan, H., & Sökmen, C. N., 2016)

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.

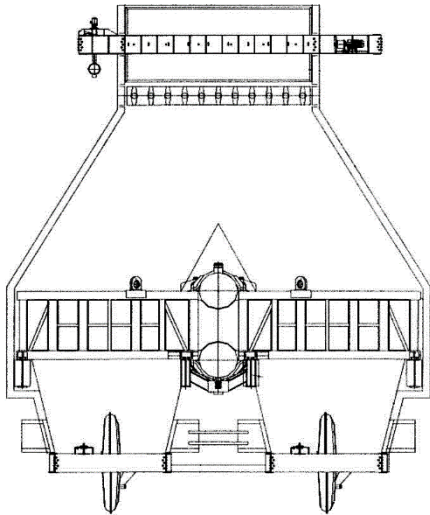
## ۲- روش انجام تحقیق

در این بخش ابتدا به معرفی سیستم PHRS رآکتور VVER-1000، سپس به نحوه مدلسازی و نودبندی یک سیستم PHRS رآکتور VVER-1000 پرداخته می‌شود.

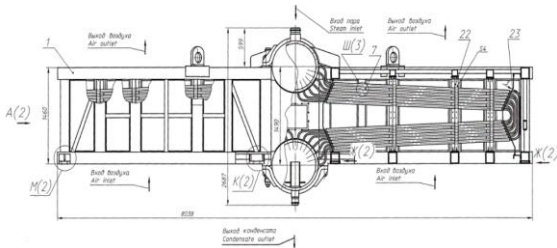
### ۲-۱- سیستم PHRS رآکتور VVER-1000

رآکتور VVER-1000 شامل چهار سیستم PHRS است هر سیستم PHRS از سه کانال مشابه مستقل از

هم تشکیل شده و در هر یک از کانال‌های هوا یک مبدل حرارتی<sup>۲</sup> قرار دارد. در شکل ۱ شماتیکی از خطوط جریان یک سیستم PHRS با سه مبدل حرارتی را نشان می‌دهد هر کدام از کانال‌های حلقه مربوطه رآکتور از طریق طرف ثانویه مولد بخار متصل می‌گردد. هر مبدل حرارتی دارای خطوط لوله برای انتقال سیال و چگالش بخار می‌باشد. همچنین در خطوط جریان یک سیستم PHRS، دریچه-های ورودی و خروجی کانال هوای سه مبدل حرارتی گنجانده شده است و از طریق گردش هوای طبیعی درون این کانال‌ها خنک سازی در خارج از پوش رآکتور انجام می‌گیرد. بخار تولید شده در مولد بخار با توجه به گرمای آزاد شده در رآکتور، توسط لوله‌های بخار سیستم PHRS به مبدل‌های حرارتی می‌رسد سپس وارد مبدل حرارتی شده و به تیوب‌هایی که دارای زاویه بسیار کم، قطر کوچک اما طول بلندی دارند تقسیم شده و به سمت پایین هدایت می‌شوند. نحوه قرارگیری تیوب‌ها در هر مبدل حرارتی در شکل ۲ نمایش داده شده است. جریان گردش طبیعی هوا در سمت ثانویه مبدل حرارتی از سمت پایین به سمت بالا بر خلاف جهت عبور بخار درون تیوب‌ها می‌باشد. این امر موجب برداشت حرارت و تغییر فاز بخار به آب (چگالش) صورت می‌گیرد. در اواسط مدار جریان، میعان صورت گرفته از طریق تیوب‌های مبدل حرارتی به لوله‌های که به صورت عمومی وجود دارند، منتقل می‌شوند و میعان پس از طی ارتفاعی به سمت پایین به لوله‌ی جمع آوری میعان در جهت افقی قرار دارد به مولد بخار باز می‌گردد. لازم به ذکر است که حرکت خنک کننده به صورت جابجایی طبیعی صورت می‌گیرد. شکل ۳ نحوه قرار گرفتن یک مبدل حرارتی در مسیر هوای یک سیستم PHRS را نشان می‌دهد مطابق

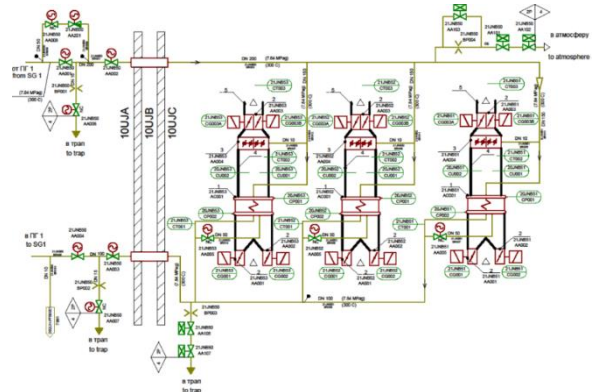


شکل ۲: نحوه قرار گیری تیوب‌های عمودی متصل به یک مبدل حرارتی افقی



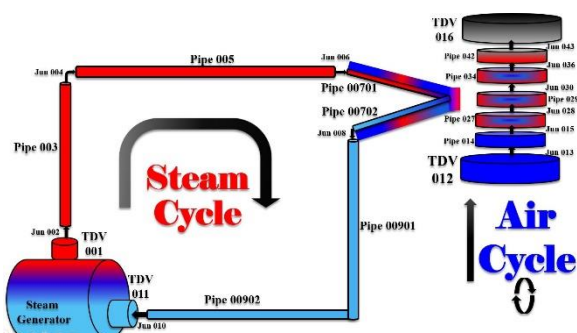
شکل ۳: نحوه قرار گرفتن یک مبدل حرارتی افقی در مسیر هوای عمودی مختص به خود.

شکل هر مبدل حرارتی دارای یک کانال هوا می‌باشد همچنین کانال‌های هوای<sup>۴</sup> سیستم PHRS دارای دو دریچه ورودی هوا که در انتها شکل قرار گرفته‌اند توسط دو بازوی کنترلی اکتیو و پسیو کنترل می‌شوند. عملکرد دریچه‌های ورودی هوا، زمان باز شدن به گونه‌ی یک صفحه برش هوا عمل می‌کنند و جریان هوای طبیعی از سمت پایین به سمت بالا مکش می‌شود و پس از مجاورت قرار گرفتن هوا طبیعی با تیوب‌های دو سمت مبدل حرارتی عمل خنک‌کنندگی سیال در بین تیوب‌ها صورت می‌گیرد سپس هوای طبیعی تحت تاثیر حرارت تیوب‌ها قرار گرفته و به واسطه برداشت حرارت از تیوب‌ها تغییرات دمایی چشمگیری دارد و در آخر هوای خروجی از یک دریچه خروجی کانال هوا در بیرون از پوش رآکتور به جو منتقل می‌شود و این چرخه جریان طبیعی هوا به همین صورت انجام می‌گیرد.



شکل ۱: خطوط جریان سیال یکی از چهار سیستم PHRS رآکتور VVER-1000 با سه مبدل حرارتی

تیوب شماره 007 با شماره لوله 034 شبیه‌سازی شده است و از قسمت اول تیوب 007 برداشت حرارت انجام می‌دهد.



شکل ۴: نودبندی یک سیستم PHRS با یک مبدل حرارتی

### ۳- نتایج و بحث

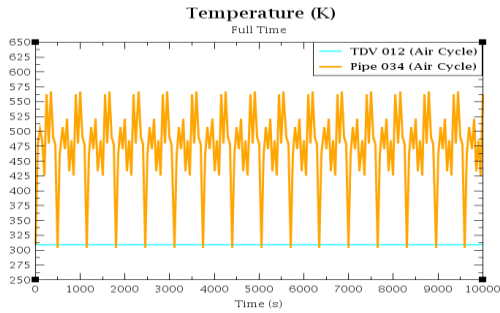
در این بخش نتایج حاصل از مدل توسعه داده شده در کد RELAP5 برای فشار مولد بخار مرجع و دمای هوا ارائه می‌گردد. همچنین برای ارزیابی سیستم PHRS، نتایج حاصل از آن با داده‌های مرجع در شرایط مختلف کاری تطبیق داده می‌شوند. با توجه به شکل ۵ تغییرات زمانی دما در دو سیکل بخار و هوا برای فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال مولد بخار و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی‌گراد در حالت پایدار نشان داده شده است به ترتیب در قسمت‌های الف و ب دما در زمان اولیه سیکل بخار و کل زمان شبیه‌سازی به علت دمای تعیین شده در شرایط مرزی ابتدا و انتها سیکل بخار، دما تا ۵۴۶ درجه کلوین مربوط به قسمت دوم تیوب شماره 007 افت پیدا می‌کند.

همچنین در قسمت‌های پ و ت مشاهده می‌شود دما در زمان اولیه سیکل هوا و کل زمان شبیه‌سازی نوسانات بسیار محسوسی نسبت به شرایط مرزی دارد این نوسانات دمایی برگرفته از جریان چرخشی طبیعی هوا به این صورت می‌باشد که هوای مجاور تیوب شماره 00701 در سیکل هوا با نود 034 شبیه‌سازی شده و کاملاً درگیر برداشت حرارت از قسمت اول تیوب شماره 007 می‌شود و با چرخش هوای تازه در سیکل هوا این

### ۲-۲- نودبندی سیستم PHRS و مدل‌سازی در کد RELAP5

همانطور که در بخش‌های گذشته ذکر شده است رآکتور VVER-1000 دارای چهار لوپ مدار دوم می‌باشد شایان ذکر است که هر لوپ ثانویه رآکتور VVER-1000 دارای یک مولد بخار<sup>۵</sup> است و مجموعاً چهار مولد بخار دارد که هر مولد بخار دارای یک سیستم PHRS می‌باشد. برای مدل‌سازی سیستم PHRS رآکتور VVER-1000 در کد RELAP5 لازم است چهار سیستم PHRS با سه مبدل حرارتی مجموعاً دوازده مبدل حرارتی با ۱۲ کانال هوا و چهار سیکل بخار در RELAP5 شبیه‌سازی شود. با توجه به شبیه‌سازی کامل سیستم PHRS و نودبندی آن از جنبه زمانی پاسخ دهی در RELAP5 بسیار زمان‌بر است و ما را برای رسیدن به نتیجه مطلوب از منظر زمان شبیه‌سازی سیستم PHRS دور خواهد کرد همچنین طبق پیشینه پژوهش سیستم PHRS و خلاصه‌سازی در امر نودبندی جواب مطلوبی همانند شبیه‌سازی کامل نودبندی به ما می‌دهد و همچنین ما را در پاسخ گرفتن از سیستم تسریع می‌بخشد به این منظور ابتدا به نودبندی یک سیستم PHRS که شامل یک سیکل بخار و یک سیکل هوا می‌باشد می‌پردازیم سپس مدل‌سازی و نودبندی سیکل بخار و بعد از آن مسیر مبدل حرارتی (ساختار گرمایی<sup>۶</sup>) و در آخر سیکل هوا در کد RELAP5 پرداخته می‌شود. همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، نودبندی سیکل بخار شامل دو حجم وابسته به زمان<sup>۷</sup> و شامل چهار لوله<sup>۸</sup> است که لوله‌ها از طریق پنج اتصال<sup>۹</sup> به همدیگر متصل می‌شوند همچنین در قسمت ساختار گرمایی تیوب شماره 007 از دو قسمت تشکیل شده است این تیوب دو قسمتی معادل ۶۳۰ تیوب یک مبدل حرارتی مدل‌سازی می‌شود در آخر سیکل هوا از دو حجم وابسته به زمان، پنج لوله و شش اتصال تشکیل شده که در سیکل هوا، هوا با شماره لوله 027 شبیه‌سازی شده و از قسمت دوم تیوب شماره 007 مبدل حرارتی برداشت حرارت انجام می‌دهد و هوای مجاور قسمت اول

نوسانات به طور پیوسته مادام برداشت حرارت از تیوب شکل خواهند گرفت.

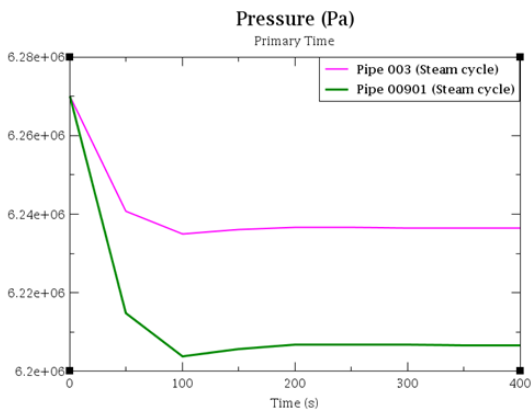


ت) دما در کل زمان شبیه سازی سیکل هوا

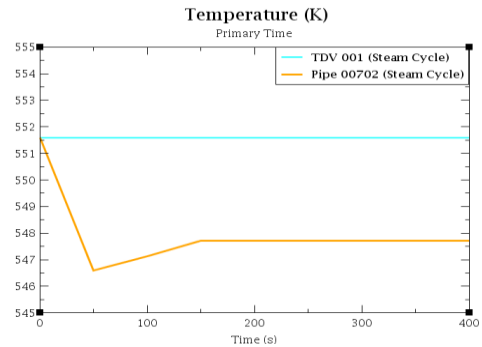
شکل ۵: تغییرات زمانی دما در دو سیکل بخار و هوا برای فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال مولد بخار و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی گراد

مطابق با شکل ۶ تغییرات زمانی فشار در دو سیکل بخار و هوا برای فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال مولد بخار و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی گراد در حالت پایدار نشان داده شده است به ترتیب در قسمت‌های الف و ب فشار در زمان اولیه سیکل بخار و کل زمان شبیه‌سازی همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به فشار معین شده در شرایط مرزی، فشار بخار (میعان) تا مقدار ۶/۲ مگاپاسکال افت پیدا می‌کند.

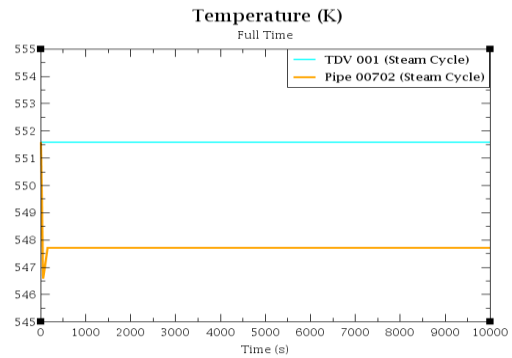
در ادامه قسمت‌های پ و ت فشار در زمان اولیه سیکل هوا و کل زمان شبیه‌سازی همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به شرایط مرزی، فشار هوا در همان زمان اولیه تا مقدار 0.097 مگاپاسکال افت می‌یابد و همچنین به دلیل حساسیت کد ترموهیدرولیکی RELAP5 به تغییرات فشار در سیکل هوا، تا انتهای زمان شبیه‌سازی این نوسانات پیوسته فشار به وجود می‌آیند.



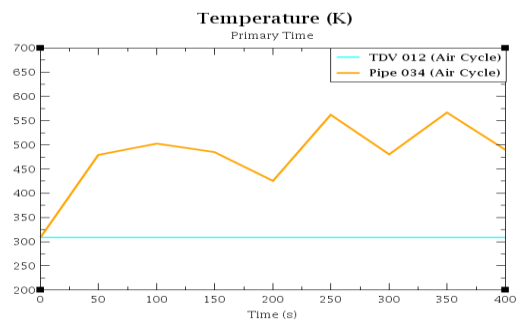
الف) فشار در زمان اولیه سیکل بخار



الف) دما در زمان اولیه سیکل بخار

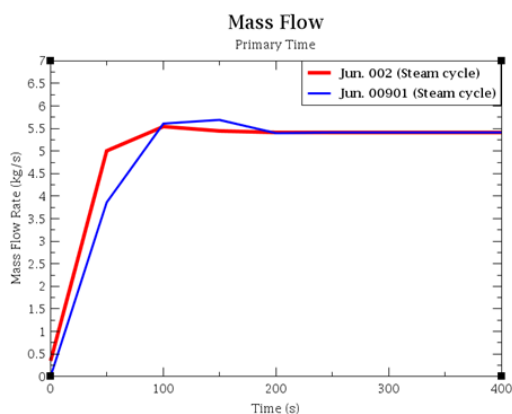


ب) دما در کل زمان شبیه سازی سیکل بخار

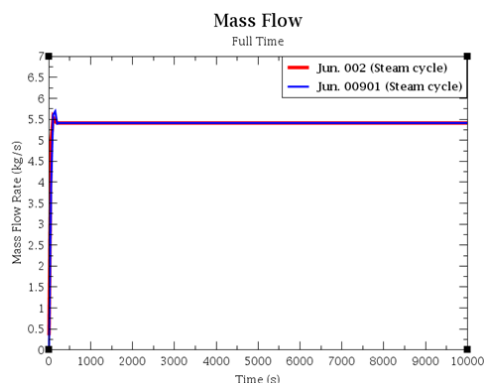


پ) دما در زمان اولیه سیکل هوا

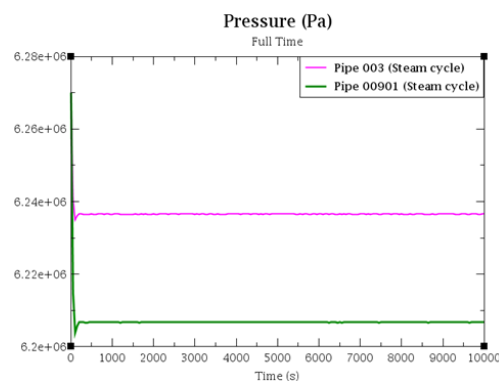
این میزان کسر یک دوازدهم از کل مبدل‌های حرارتی است. در نتیجه برای ۱۲ مبدل حرارتی رآکتور VVER-1000 دبی بخار در سیکل بخار معادل با ۶۴/۸ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. و با توجه به قسمت‌های پ و ت دبی هوا در زمان اولیه سیکل هوا و کل زمان شبیه سازی، همان‌طور که مشخص است پس از گذشت ۵۰ ثانیه به حالت تقریباً ثابتی به طور میانگین برای یک مبدل حرارتی به ۳۹/۵ کیلوگرم بر ثانیه می‌رسد و این میزان کسر یک دوازدهم از تمامی مبدل‌های حرارتی رآکتور VVER-1000 است. در نتیجه برای ۱۲ مبدل حرارتی رآکتور VVER-1000 دبی هوا در سیکل هوا معادل با ۴۷۴/۰ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد.



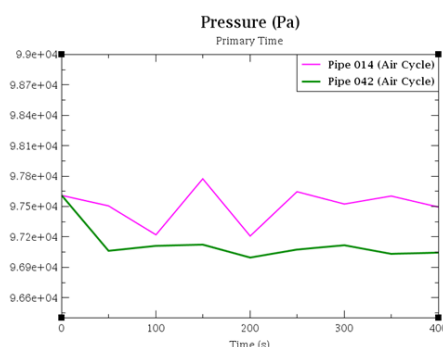
الف) دبی بخار در زمان اولیه سیکل بخار



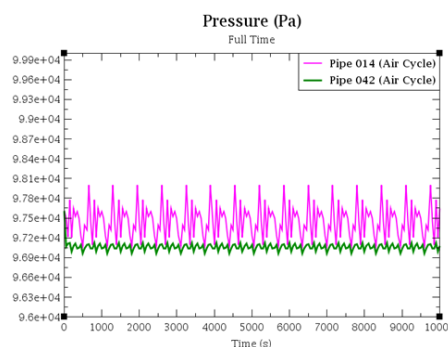
ب) دبی بخار در کل زمان شبیه سازی



ب) فشار در کل زمان شبیه سازی سیکل بخار



ب) فشار در زمان اولیه سیکل هوا

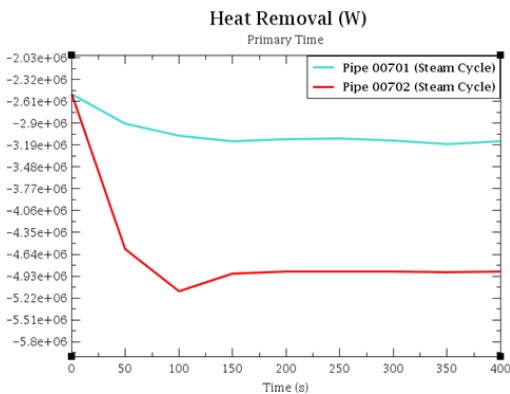


ت) فشار در کل زمان شبیه سازی سیکل هوا

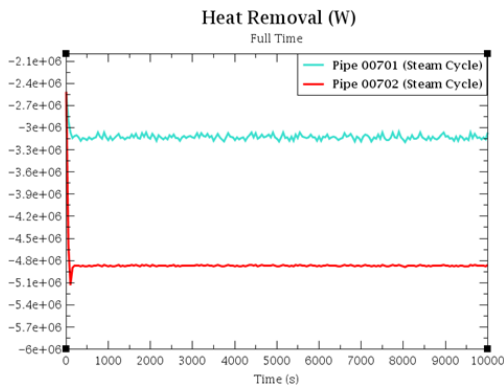
شکل ۶: تغییرات زمانی فشار در دو سیکل بخار و هوا برای فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال مولد بخار و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی گراد

با ملاحظه شکل ۷ تغییرات زمانی دبی در دو سیکل بخار و هوا برای فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال مولد بخار و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی گراد در حالت پایدار نشان داده شده است. به این ترتیب در قسمت‌های الف و ب دبی بخار در زمان اولیه سیکل بخار و کل زمان شبیه سازی همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از گذشت ۲۰۰ ثانیه به حالت پایدار به میزان ۵/۴ کیلوگرم بر ثانیه می‌رسد و

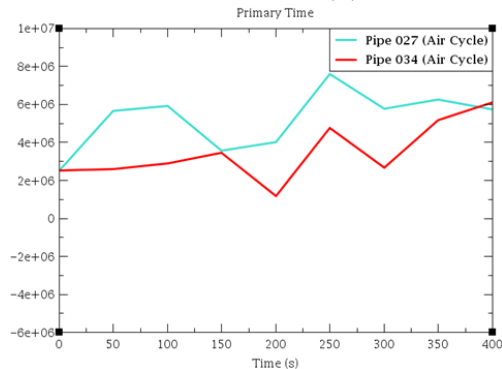
اضاف شده در زمان اولیه سیکل هوا و کل زمان شبیه سازی، همان طور که مشخص است بلافاصله پس از ثانیه صفر توان حرارتی در سیکل هوا با نوسانات شدیدی به صورت افزایشی اضافه شده است و این نوسانات توان حرارتی به واسطه برداشت توان حرارتی از سیکل بخار می باشد.



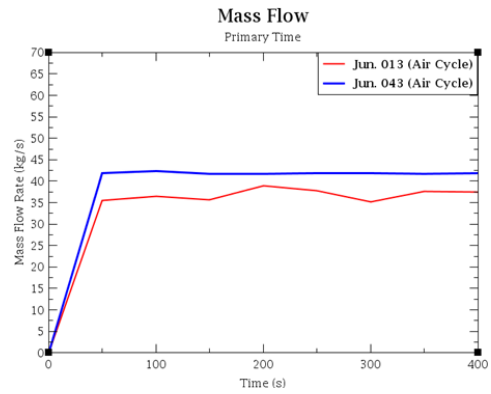
الف) برداشت توان حرارتی در زمان اولیه سیکل بخار



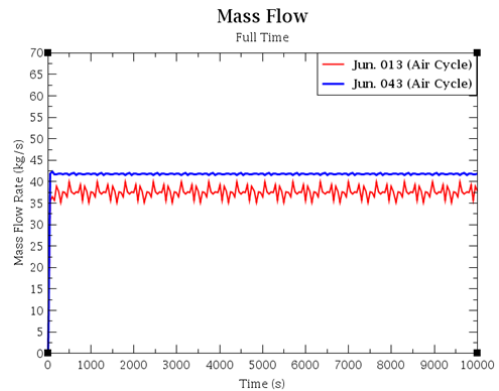
ب) برداشت توان حرارتی در کل زمان شبیه سازی، سیکل بخار



پ) توان حرارتی اضافه شده در زمان اولیه سیکل هوا



پ) دبی هوا در زمان اولیه سیکل هوا

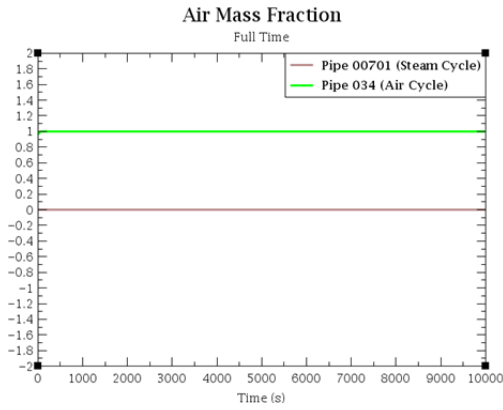


ت) دبی هوا در کل زمان شبیه سازی

شکل ۷: تغییرات زمانی دبی در دو سیکل بخار و هوا برای فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال مولد بخار و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی گراد

با مشاهده شکل ۸ تغییرات توان حرارتی در دو سیکل بخار و هوا برای فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال مولد بخار و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی گراد در حالت پایدار نشان داده شده است. به این ترتیب در قسمت های الف و ب برداشت توان حرارتی در زمان اولیه سیکل بخار و کل زمان شبیه سازی در سیکل بخار، همان طور که مشاهده می شود پس از گذشت ۱۵۰ ثانیه به حالت پایدار در قسمت اول تیوب شماره ۰۰۷، ۳/۱ مگاوات و در قسمت دوم تیوب ۴/۸۶ مگاوات که مجموعاً ۷/۹۶ مگاوات حرارت توسط یک مبدل حرارتی برداشت می شود. و این میزان کسر یک دوازدهم از کل مبدل های حرارتی است. در نتیجه برای ۱۲ مبدل حرارتی رآکتور VVER-1000 توان حرارتی برداشت شده در سیکل بخار معادل با ۹۵/۵۲ مگاوات می باشد. با توجه به قسمت های پ و ت توان حرارتی



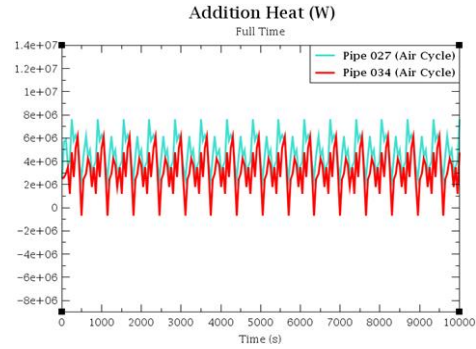


(ب) کسر جرمی هوا در کل زمان شبیه سازی

شکل ۹: تغییرات زمانی کسر جرمی هوا در دو سیکل بخار و هوا برای فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال مولد بخار و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی گراد

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

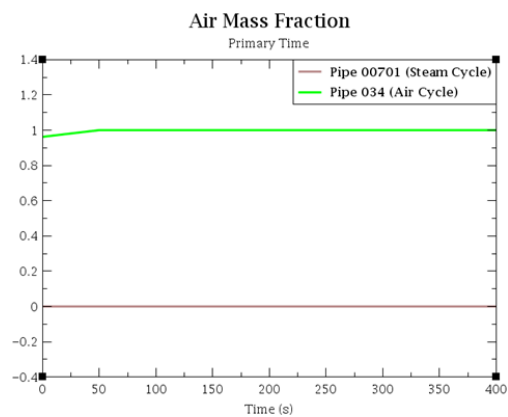
Air temp. (°C)	SG pressure (MPa)	RELAP5	Ref.	% Error
۴۵	۸	۴۳۶/۳	۴۴۱/۸	-۱/۲
۳۶	۸	۴۸۲/۴	۴۶۷/۲	+۳/۱
۲۰	۸	۴۵۹/۶	۴۹۷/۸	-۷/۶
۴۵	۷	۴۴۴/۰	۴۳۹/۱	+۱/۱
۱۰	۷	۴۷۲/۵	۵۲۰/۸	-۹/۲۷
۳۶	۶/۲۷	۴۷۴/۰	۴۶۲/۵	+۲/۴
۱۰	۶/۲۷	۴۶۴/۴	۵۱۹/۴	-۱۰/۵
۲۰	۵	۴۸۶/۰	۴۹۰/۱	۰/۸
۱۰	۴	۴۹۹/۲	۵۱۱/۹	-۲/۴



(ت) توان حرارتی اضافی شده در کل زمان شبیه سازی، سیکل هوا

شکل ۸: تغییرات توان حرارتی در دو سیکل بخار و هوا برای فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال مولد بخار و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی گراد

در شکل ۹ تغییرات زمانی کسر جرمی هوا در دو سیکل بخار و هوا برای فشار ۶/۲۷ مگاپاسکال مولد بخار و دمای هوای ۳۶ درجه سانتی گراد مشاهده می شود در قسمت های الف و ب میزان کسر جرمی هوا در زمان اولیه و کل زمان شبیه سازی در سیکل بخار صفر می باشد و همچنین در سیکل هوا این میزان برابر با یک شده است. در آخر با عنایت به جدول های ۱ تا ۳ به ترتیب مقادیر دبی هوا، دبی بخار و میزان کل حرارت برداشت شده توسط سیستم PHRS را برای شرایط مختلف کارکرد در رآکتور VVER-1000 نشان داده شده اند. همچنین در جدول های ذکر شده، مقایسه ای با داده های مرجع صورت گرفته است که به جمع بندی نتایج پژوهش ارائه شده در این بخش پرداخته می شود.



(الف) کسر جرمی هوا در زمان اولیه



کفایت عملکرد این سیستم در شرایط مختلف کارکرد با استفاده از کد محاسباتی RELAP5 مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ضمن آشنایی با ساختار فیزیکی و مشخصات عملکردی این سیستم یک مدل در کد RELAP5 توسعه داده شده است. مقایسه نتایج حاصل از مدل با داده‌های موجود در مرجع نشان می‌دهد که این مدل شبیه‌سازی از دقت قابل قبولی برای بررسی رفتار این سیستم در شرایط مختلف عملکردی برخوردار است. به طور 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 عملکرد این سیستم در فشارهای مختلف مولد بخار و دمای هوای بیرون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که از مدل حاصل می‌توان برای بررسی کفایت عملکرد این سیستم در زمان وقوع حوادث از جمله SBO استفاده کرد.

#### پی‌نوشت‌ها

- <sup>1</sup> Containment
- <sup>2</sup> Passive safety systems
- <sup>3</sup> Heat exchanger
- <sup>4</sup> Air ducts
- <sup>5</sup> Steam Generator (SG)
- <sup>6</sup> Heat Structure
- <sup>7</sup> Time Dependent Volume (TDV)
- <sup>8</sup> Pipe
- <sup>9</sup> Junction

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

Air temp. ( $^{\circ}C$ )	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 ۳: توان حرارتی ( $MW$ ) برداشت شده از سیکل بخار در فشارهای مختلف مولد بخار و دماهای مختلف هوا

Air temp. ( $^{\circ}C$ )	SG pressure (MPa)	RELAP 5	Ref.	% Error
۴۵	۸	۹۷/۲	۸۹/۸	+۷/۶
۳۶	۸	۹۴/۲	۹۷/۳	-۳/۱
۲۰	۸	۹۶/۹۶	۱۰/۶	-۱۰/۷
			۸	
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

#### ۴- نتیجه‌گیری

د در این مقاله آنالیز ترموهیدرولیکی سیستم پسیو برداشت حرارت رآکتور VVER-1000 برای اطمینان از

۵- مراجع

- Aksan, N., Choi J, H., Chung Y, J., [۱]  
Cleveland, J., D'Auria, F. S., Fil, N., &  
Woods, B. (2009). **Passive safety systems  
and natural circulation in water cooled  
.nuclear power plants**
- Gou, J., Qiu, S., Su, G., & Jia, D. [۲]  
(2009). **Thermal hydraulic analysis of a  
passive residual heat removal system for  
an integral pressurized water reactor.  
Science and Technology of Nuclear  
.Installations**
- Wu, J., Bi, Q., & Zhou, C. (2015). [۳]  
**Experimental study on circulation  
characteristics of secondary passive heat  
removal system for Chinese pressurized  
water reactor. Applied Thermal  
.Engineering, 77, 106-112**
- Ayhan, H., & Sökmen, C. N. (2016). [۴]  
**Design and modeling of the passive  
residual heat removal system for VVERs.  
.Annals of Nuclear Energy, 95, 109-115**



## Thermo-Hydraulic Analysis of Passive Heat Removal System (PHRS) in VVER-1000 Nuclear Reactor Using RELAP5 Code

A. Shahabinejad<sup>\*a</sup>, A. Pirouzmand<sup>a</sup>, A. Rabiee<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Department of Nuclear Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

Received: 08 - 05 - 2021

Accepted: 05 - 09 - 2021

---

### Abstract

The design and use of passive safety systems as one of the effective ways to increase reliability and safety level of nuclear power plants in new generation reactors has received much attention. In this paper, using RELAP5 computational code, the thermo-hydraulic analysis of the Passive Heat Removal System (PHRS) in the VVER-1000 reactor is investigated to ensure the capability of its performance under various conditions. For this purpose, the system nodalization is first extracted according to the available documentation and then the RELAP5 code input is developed. The results show that for 6.27 MPa pressure in steam generators and air temperature of 36 ° C, the system is able to remove 95.52 MW heat.

**Keywords:** Passive Heat Removal System (PHRS), RELAP5 code, VVER-1000 reactor

---