



## تأثیر بهینه‌سازی نسل سوم رآکتور هسته‌ای روسی مدل V-446 بر ایمنی هسته‌ای

اصغر جانی‌پور\*<sup>۱،۲</sup>، کریم رحیم‌زاده<sup>۱</sup>

۱. مرکز آموزش نیروگاه اتمی بوشهر، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۷۵۱۸۱-۱۱۱، بوشهر - ایران  
۲. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات بوشهر، صندوق پستی: ۷۵۱۳۹۳۸۴۸۷، بوشهر - ایران

**چکیده:** مجموعه رآکتور هسته‌ای V-446 به کار گرفته شده در طرح AES-91/99 به منزله‌ی پروژه‌ی بهینه‌سازی شده‌ی رآکتور WWER-1000 بر مبنای رآکتور مدل V-320 است. بهبود خواص نوترونی- فیزیکی قلب رآکتور همراه با تجدید ساختار قسمت‌های اصلی آن که امکان به‌کارگیری سوخت اورانیم- گادولینیوم را فراهم ساخته است و مد نظر قرار دادن ضریب‌های منفی واکنش‌پذیری دمایی قرص سوخت، توان رآکتور و سیال خنک‌کننده، طراحی خط کنترل تکمیلی در سیستم بازدارنده‌ی افزایش فشار مدار اول هنگام بروز حوادث ماورای طراحی و در خلال آزمون هیدرولیک و هم‌چنین پژوهش مفهوم «نشت قبل از شکستگی» به کمک سیستم‌های جدید کنترل و عیب‌یابی ویژه‌ی تجهیزات، شیرآلات و خط لوله‌های مدار اولیه تنها بخشی از اقداماتی است که باعث افزایش سطح ایمنی نسل جدید، در مقایسه با مدل‌های پیشین WWER-1000 شده است. به‌کارگیری تجربیات حاصل از اجرای طرح V-428 (رآکتور تیان وان چین) هنگام طراحی مدل V-446 و استفاده از عایق حرارتی جدا شونده در کنار اتخاذ تصمیم‌های فنی جدید از جمله برنامه‌ی جدید نمونه‌های فلز شاهد، محدود نمودن مقدار نیکل در خطوط جوش و ناخالصی‌های مضر در فلز پایه و خطوط جوش که امکان افزایش مدت زمان بهره‌برداری رآکتور را تا ۶۰ سال فراهم نموده است، اقدام‌های دیگری هستند که افزایش ایمنی نسل جدید را فراهم آورده‌اند. رعایت الزام‌های استانداردها و مدارک فنی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، اتحادیه‌ی اروپا، روسیه، قوانین و استانداردهای تدوین شده توسط نظام ایمنی هسته‌ای کشورهای مقصد و تجارب بین‌المللی در زمینه‌ی طراحی، ساخت و بهره‌برداری از رآکتورهای هسته‌ای موجب شده است که نسل جدید رآکتورهای روسی از سطح ایمنی بالایی برخوردار باشند.

**کلیدواژه‌ها:** ایمنی هسته‌ای، نسل سوم رآکتور V-446، بهینه‌سازی

## Effect of Modernization of the Third Generation Nuclear Reactors (Model V-446) on Nuclear Safety

A. Janipour\*<sup>1,2</sup>, K. Rahimzadeh<sup>1</sup>

1. BNPP Training Center, AEOI, P.O.Box: 75181-111, Bushehr - Iran

2. Sciences and Researches Branch, Bushehr Islamic Azad University, P.O.Box: 7513938487, Bushehr - Iran

**Abstract:** A set of Nuclear Reactor model V-446 applied in design AES-91/99 is regarded as an optimized project of reactor VVER-1000 on the basis of reactor model V-320. Improving the neutron-physic characteristics of the active core along with the reconstruction of reactor basic sections made the implementation of uranium- gadolinium fuel possible. Furthermore, by taking into consideration the negative coefficients of thermal reactivity for fuel pellet, reactor power and coolant liquid, as well as by designing the supplementary control line special for beyond-design accidents and also by carrying out hydraulic tests in the system of preventing an increase in the pressure of the primary circuit and also by ensuring the concept "Jeakage before breakage" with the help of the new control systems and special trouble-shooting of primary circuit equipment, valves and lines, we have opened up a new vista which will increase the safety coefficient of new generation contrary to the old models of VVER-1000.

**Keywords:** Nuclear Safety, Third Generation of V-446 Reactor, Modernization

\*email: Janipour19@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۷/۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۴/۳۰

## ۱. مقدمه

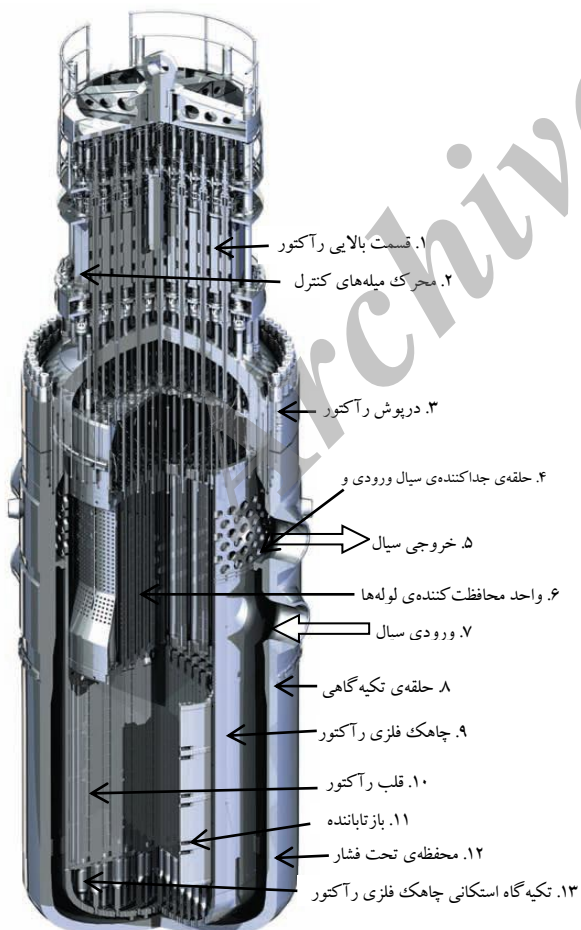
اولیه، افزایش یافته است. به عنوان نمونه، دمای بحرانی شدن مجدد رآکتور WWER-۱۰۰۰ نیروگاه «خملین» اکرین، ۱۷۸ درجه‌ی سانتی‌گراد است.

در طراحی رآکتور V-۴۴۶ (شکل ۱) وسایل کنترلی پیشرفته‌ی امروزی برای کنترل پارامترهای درون رآکتور از قبیل جابه‌جایی، توزیع انرژی آزاد شده در مجتمع سوخت، دمای سیال در ورودی و خروجی به و از مجتمع سوخت و علامت سطح سیال درون رآکتور در صورت بروز حوادث ماورای طراحی به کار گرفته شده است. در جدول ۱ پارامترهای مدل V-۳۲۰ با رآکتور نسل جدید مقایسه شده‌اند [۳، ۴].

## ۳. تفاوت‌های ساختاری قسمت‌های مختلف رآکتور

### ۱.۳. محفظه‌ی تحت فشار رآکتور

طول محفظه‌ی تحت فشار رآکتور طرح جدید نسبت به مدل V-۳۲۰ به اندازه‌ی ۳۰۰ میلی‌متر افزایش یافته است. این افزایش طول در ناحیه‌ی نیم- استوانه‌ی تکیه گاهی پوسته‌ی رآکتور اعمال شده است (شکل ۲) [۳].



شکل ۱. رآکتور V-۴۴۶ و اجزای تشکیل دهنده‌ی آن.

شروع طراحی پروژه‌ی AES-۹۱ (نسل سوم) برای اولین بار در سال ۱۹۸۹ میلادی با هم‌کاری شرکت بین‌المللی فنلاندی ایماتران و اما<sup>(۱)</sup> آغاز شد. با توجه به این که طرح جدید روسی از سطح ایمنی بالایی برخوردار بود، دولت روسیه برای برنده شدن در مناقصه‌ی ساخت نیروگاه اتمی در فنلاند از شانس بالایی برخوردار بود، اما در ادامه به دلیل این که دولت فنلاند تصمیم گرفت به مدت ده سال پروژه‌های هسته‌ای خود را مسکوت بگذارد، اجرای این پروژه از دستور کار خارج شد. در کشور روسیه نیز در ابتدای برنامه‌ی «اصلاحات» و بعد از حادثه‌ی تلخ چرنوبیل ساخت و بهره‌برداری واحدهای جدید از دستور کار خارج شد. پس از انصراف فنلاند از ساخت نیروگاه، دولت چین در سال ۱۹۹۳ خواستار ساخت این نیروگاه در کشور خود شد. انستیتوی طراحی سن پترزبورگ (AEP)<sup>(۲)</sup> طرح جدید AES-۹۱/۹۹ را تدوین نمود و بر مبنای آن رآکتور جدید AES-WWER-۱۰۰۰/۴۲۸ پایه‌ریزی شد. این طرح، پروژه‌ی جدیدی محسوب نمی‌شود، بلکه در آن رآکتور و دیگر تجهیزات مدل V-۳۲۰ در راستای افزایش ضریب ایمنی بهره‌برداری، بهبود ویژگی‌های اقتصادی و فنی و هم‌چنین برای بالا بردن قابلیت رقابت آن، به روز و بهینه شده‌اند.

از سال ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۹ میلادی کارهای کارشناسی آژانس بین‌المللی بر روی این مدل جدید انجام شد و پس از انجام این فعالیت‌ها، آژانس بین‌المللی، فعالیت طرح جدید AES-۹۱/۹۹ را مطابق با استانداردها و الزام‌های جهانی دانست [۱، ۲].

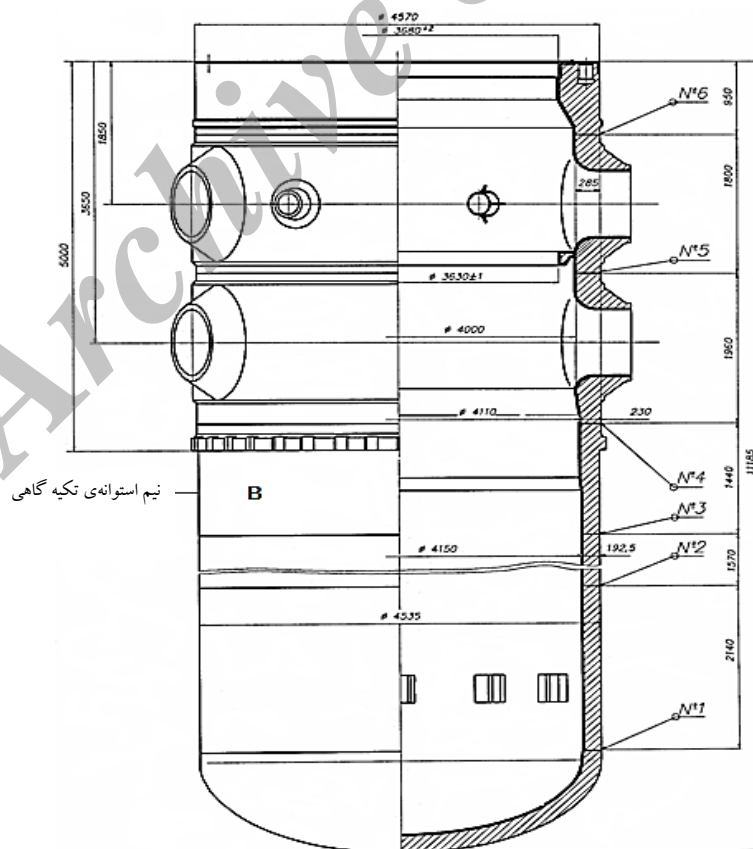
## ۲. مقایسه‌ی تجهیزات رآکتور مدل V-۳۹۲ (نسل سوم) با V-۳۲۰ (نسل دوم)

تفاوت‌های موجود بین نسل سوم رآکتورهای WWER-۱۰۰۰<sup>(۳)</sup> به کار گرفته شده در پروژه‌های ایران (V-۴۴۶)، چین (V-۴۲۸)، هند (V-۴۱۲) و واحدهای جدید شهر «نووارنژ» روسیه با رآکتور مدل V-۳۲۰ عبارت از بالاتر بودن ایمنی هسته‌ای و قابلیت اطمینان آن، بهبود ویژگی‌های نوترونی- فیزیکی قلب رآکتور، بهبود ویژگی‌های بهره‌برداری رآکتور هستند. در طرح‌های جدید، کارآیی میله‌های جاذب نوترون سیستم کنترل و حفاظت رآکتور از طریق افزایش تعداد آن‌ها به منظور نگه داشتن رآکتور در وضعیت زیر بحرانی در طی فرایند خنک‌سازی آن تا دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و بدون تزریق بوریکن اسید به مدار



**جدول ۱.** مقایسه‌ی پارامترهای اصلی رآکتور V-320 و رآکتور نسل جدید (مقادیر نامی طراحی)

مقدار		پارامتر
رآکتور جدید	V-320	
(نسل سوم) V-392	(نسل دوم)	
۳۰۰۰	۳۰۰۰	توان گرمایی رآکتور (MW)
۸۴۸۰۰	۸۴۸۰۰	نرخ جریان سیال خنک‌کننده‌ی عبوری از رآکتور ( $M^3/h$ )
۱۵,۷	۱۵,۷	فشار در خروجی قلب رآکتور (Mpa)
۳۲۱	۳۲۰	متوسط دمای سیال خنک‌کننده در خروجی رآکتور ( $^{\circ}C$ )
۲۹۱	۲۸۹,۷	متوسط دمای سیال خنک‌کننده در ورودی رآکتور ( $^{\circ}C$ )
۰,۳۸	۰,۳۸	اختلاف فشار در ورودی و خروجی رآکتور (Mpa)
۴۰	۳۰	مدت زمان عمر تعیین شده برای رآکتور (سال)
۷۰۰۰	۷۰۰۰	فاصله‌ی زمانی فعالیت رآکتور در تو ان نامی بین سوخت‌گذاری (h)
۳-۴	۳	زمان ماند مجتمع سوخت در درون قلب رآکتور (سال)
	۳,۵۳	ارتفاع ستون سوخت در قلب رآکتور (m)
	۳,۱۶	قطر معادل منطقه‌ی فعال (قلب رآکتور) (m)
۴,۱۴	۴,۱۷	سطح مقطع قلب رآکتور ( $M^2$ )
۴۳,۰	۴۰,۱	میزان متوسط سوختن سوخت (در حالت پایا) (MW day/kg)
۱۶۶,۶	۱۶۶,۲	توان متوسط خطی آزاد شده از میله‌ی سوخت در شرایط نامی ( $W/cm$ )
	۴۴۸	حداکثر توان خطی آزاد شده از میله‌ی سوخت در شرایط نامی ( $W/cm$ )
۱۲۱	۶۱	تعداد میله‌های جاذب سیستم کنترل
از ۱,۲ تا ۴,۰		زمان پایین آمدن میله‌ی کنترل و حفاظت رآکتور (s)
۳۵۰	۳۵۰	فاصله‌ی موقعیت استقرار میله‌ی کنترل (mm)
۲۰	-	- ناحیه‌ای - گام به گام
$۴,۹ \times 10^{13}$	$۵,۷ \times 10^{13}$	حداکثر شار محاسباتی نوترون‌های تند با انرژی بیش از $0,5 MeV$ در برخورد با پوسته‌ی رآکتور در مدت ۴۰ سال ( $n/m^2$ )



**شکل ۲.** محفظه‌ی تحت فشار رآکتور V-446 (پوسته‌ی رآکتور).



- بر روی سطح بیرونی چاهک فلزی رآکتور، نوار حلقوی شکل و قابل ارتجاعی، در مقابل حلقه‌ی جداکننده‌ی سیال ورودی و خروجی پوسته‌ی رآکتور، نصب شده است تا فاصله‌ی بین چاهک فلزی و حلقه‌ی جداکننده در هنگام سوار کردن، به راحتی تنظیم شود. هنگام گرم کردن پوسته‌ی رآکتور و تجهیزات درون آن، این فاصله کاهش می‌یابد و باعث می‌شود که چاهک رآکتور در محل تماس خود با حلقه فشرده شود و نیرو به طور متوازن در تمام محیط چاهک توزیع شود، این بدین معنی است که دیگر چاهک فلزی رآکتور دچار حرکات نوسانی و ارتعاشی نمی‌شود (شکل ۱).

- در طرح جدید رآکتور، عنصر عملیاتی تنظیم فشار ارتجاعی بر روی لبه‌ی چاهک فلزی رآکتور قرار دارد (این حلقه در طرح‌های پیشین بر روی لبه‌ی واحد محافظت‌کننده‌ی لوله‌ها قرار داشت)، این امر باعث می‌شود بهتر و راحت‌تر آن را مورد بازرسی و سرویس‌دهی فنی قرار داد و واحدهای مجتمع‌های سوخت را که تحت وزن واحد محافظت‌کننده‌ی لوله‌ها قرار دارد آزاد نمود (نیروهای ناشی از وزن واحد محافظت‌کننده‌ی لوله‌ها بر مجموعه فرهای مجتمع سوخت کاهش می‌یابد).

- شیارهای ویژه‌ی خنک کاری موجود بر روی سطح بیرونی بازتاباننده بهینه شده‌اند. این امر سبب شده است تنش‌های گرمایی - تابشی بر این قطعه کاهش یابد، در واقع بهینه‌سازی شیارها موجب شده است تورم ناشی از تابش و آسیب‌دیدگی فلز بازتاباننده کاهش یابد.

- با توجه به این که مجتمع سوخت به اندازه‌ی ۳۰۰ میلی‌متر پایین‌تر رفته است، واحد محافظت‌کننده‌ی لوله‌ها نیز به همین اندازه طویل‌تر شده است. با این وجود، فاصله‌ی بین صفحه‌های پایینی و میانی آن به اندازه‌ی ۵۰ میلی‌متر افزایش یافته است، اما طول اسکلت هادی آن بدون تغییر باقی مانده است (شکل ۱).

- فاصله‌ی بین صفحات بالایی و پایینی واحد محافظت‌کننده‌ی لوله‌ها به اندازه‌ی ۲۵۰ میلی‌متر افزایش یافته است. این امر افزایش شعاع‌های خمیدگی کانال‌های هادی را، که درون آن‌ها سیستم‌های کنترل داخلی و عیب‌یابی رآکتور قرار

افزایش طول رآکتور باعث پایین‌تر آمدن تراز بالای قلب رآکتور نسبت به تراز صفحه‌ی تکیه گاهی شده است. بدین ترتیب میزان پرتو دریافتی پرسنل در هنگام اجرای عملیات فنی بر روی رآکتور، پمپ‌های اصلی مدار اولیه و مولدهای بخار کاهش می‌یابد، چون چگالی شار نوترون در ناحیه‌ی تکیه گاهی رآکتور در ضمن عبور مستقیم از قلب رآکتور به واسطه‌ی پوسته به اندازه‌ی ۸ برابر کاهش می‌یابد.

محل استقرار و قرارگیری نمونه‌های فلز شاهد پوسته‌ی رآکتور بر روی سطح داخلی آن قرار دارد، در صورتی که در طرح ۷-۳۲۰ این نمونه‌ها روی سطح بالایی بازتاباننده<sup>(۴)</sup> قرار داشتند. با توجه به استقرار نمونه‌ها بر روی سطح داخلی پوسته‌ی رآکتور، شرایط تأثیرگذاری شار نوترون بر فلز نمونه‌های شاهد نسبت به شرایط واقعی پرتوگیری پوسته‌ی رآکتور واقعی‌تر است. نمونه‌های گرمایی کماکان (هم در طرح ۷-۳۲۰ و هم در طرح‌های جدید) در زیر سطح واحد لوله‌های محافظت‌کننده قرار دارند، چرا که دمای سیال در خروجی رآکتور بیشینه است. نتایج حاصل از بررسی نمونه‌های فلز شاهد نقش مهمی در مشخص نمودن اثر دما و پرتوها، تعیین وضعیت واقعی و تجزیه و تحلیل مدت استفاده از محفظه‌ی تحت فشار رآکتور ایفا می‌نماید [۵].

### ۲.۳ تجهیزات درون رآکتور

- طول چاهک فلزی رآکتور به اندازه‌ی ۳۰۰ میلی‌متر افزایش یافته است و محل قرارگیری و استقرار سوراخ‌های موجود بر روی آن برای پایا نمودن سرعت سیال و توزیع آن در خروجی تغییر یافته است. افزایش طول چاهک فلزی متناسب با افزایش طول محفظه‌ی تحت فشار است (شکل ۱).

- تعبیه‌ی پایه‌ها در قسمت پایین چاهک فلزی رآکتور و نصب تکیه‌گاه در قسمت بازتاباننده در نزدیکی چاهک فلزی، این امکان را فراهم ساخته است، که در صورت بریده شدن چاهک فلزی رآکتور (فرض محال) در سطح مقطع کلی، مقداری سیال خنک‌کننده از آن‌جا عبور نماید. هم‌چنین وجود تکیه‌گاه‌های موجود بر روی بازتاباننده باعث می‌شوند که بازتاباننده با قسمت پایین واحد محافظت‌کننده‌ی لوله‌ها قفل شود و از واژگونی آن در صورت بریده شدن چاهک فلزی رآکتور جلوگیری کند.



جریان‌ها و گرمای آزاد شده بر روی آهن‌رباهای الکتریکی کاهش یافته‌اند. در ساختار محرک‌ها از آهن‌رباهای الکتریکی و کابل‌های تغذیه‌ی مقاوم در برابر گرما استفاده شده است، که این امر باعث کاهش نرخ جریان هوای خنک‌کننده‌ی محرک‌های سیستم کنترل و حفاظت از ۴۵۰ به ۲۵۰ مترمکعب بر ساعت شده است.

طول میله به اندازه‌ی ۳۰۰ میلی‌متر افزایش یافته است زیرا مجتمع‌های سوخت هم نسبت به سطح کلاهک رآکتور همین اندازه پایین‌تر واقع شده‌اند (با این وجود سازوکار درگیر شدن و قفل‌شدگی میله‌ی محرک با ابزار کنترلی تغییری ننموده است).

حس‌گرهای جدید کنترل موقعیت میله‌های کنترل به صورت گام به گام هستند و به کمک این حس‌گرها می‌توان هر جابه‌جایی به اندازه‌ی ۲۰ میلی‌متر را اندازه‌گیری نمود، در طرح قبلی، کنترل به صورت ناحیه‌ای بود، بدین صورت که منطقه‌ی فعال به ۱۰ ناحیه‌ی ۳۵۰ میلی‌متری تقسیم‌بندی شده بود و در ضمن ورود میله‌ی کنترل به ناحیه، حس‌گر می‌توانست تنها محل استقرار آن در ناحیه‌ی موردنظر را ارسال نماید. در این نوع کنترل (جدید) می‌توان به صورت دقیق‌تر موقعیت میله را گزارش کرد. حس‌گرهای جدید، تعیین زمان پایین آمدن و موقعیت دقیق میله‌ها را در صورت افتادن ناگهانی آن‌ها، با توجه به علامت حفاظت اضطراری رآکتور امکان‌پذیر نموده است. ساختار حس‌گر طوری آب‌بندی شده است که در صورت شکسته شدن لوله، بدنه‌ی محکم آن مانع خارج شدن سیال به بیرون از مدار اولیه می‌شود.

امکان سرویس فنی آن‌ها بهتر شده است، شیوه‌نامه‌ی نصب و باز کردن محرک‌ها ساده‌تر شده است، سیستم جدید پردازش و ارایه‌ی اطلاعات به متصدی به کار گرفته شده است.

در ساختار میله‌ی سنگین شده و مشبک، امکان چرخش قسمت بالایی میله نسبت به قسمت پایینی آن وجود دارد. این امر سبب شده است در فرایند بهره‌برداری، سایش مقطع میله در محل تماس با بادامک‌های جاروبکی کاهش یابد.

می‌گیرند، سبب شده است. هم‌چنین می‌توان همه‌ی کانال‌ها را از طریق پایه‌های سیستم کنترل داخلی رآکتور از لوله‌های پیرامونی واحد بالایی رآکتور خارج نمود.

در رآکتور ۷-۳۲۰ یکپارچگی کانال‌های اندازه‌گیری دما و توزیع انرژی در سیستم کنترل داخلی و عیب‌یابی رآکتور باعث شده است که کانال‌های ویژه‌ی استقرار دما در واحد محافظت‌کننده لوله‌ها حذف شود.

مسیر لوله‌های هادی ویژه‌ی آشکارسازهای درون رآکتور با توجه به نحوه‌ی اتصال مجموعه کابل‌ها به لوله‌های پیرامونی تغییر نموده است، هم‌چنین تعداد محرک‌های سیستم کنترل و حفاظت رآکتور افزایش یافته‌اند.

### ۳.۳ واحد بالایی رآکتور

تعداد لوله‌های هادی سیستم کنترل و حفاظت رآکتور از ۶۱ به ۱۲۱ عدد افزایش یافته است که این امر باعث شده است با انتخاب تعداد بیش‌تری از آن‌ها، توزیع نوترون در درون منطقه‌ی فعال بهینه‌تر شود.

همه‌ی لوله‌های سیستم کنترل داخلی رآکتور در اطراف درپوش رآکتور قرار گرفته‌اند. این امر، دسترسی به آن‌ها را آسان‌تر نموده است.

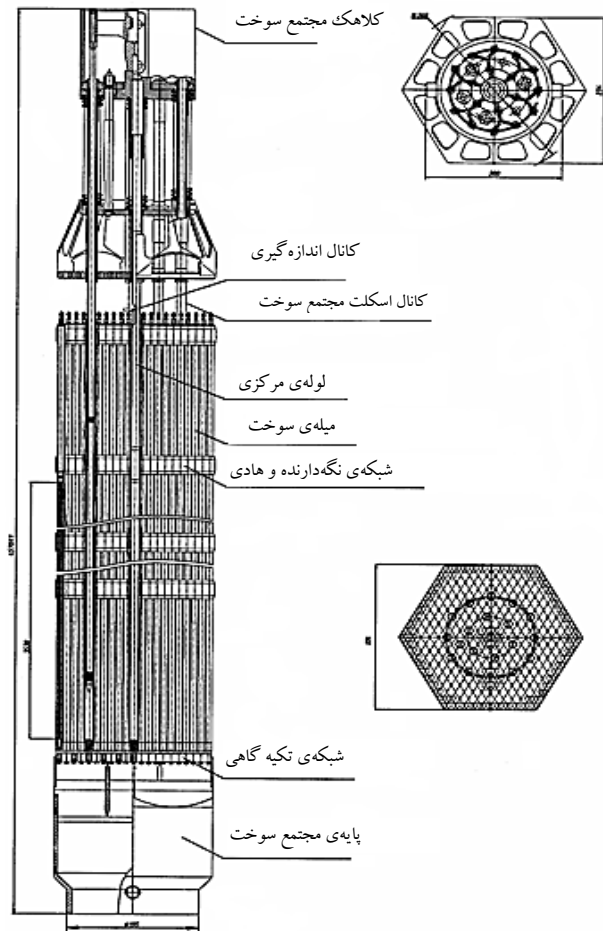
تعداد لوله‌های موجود بر روی درپوش از ۹۱ به ۱۴۱ عدد افزایش یافته است. با این وجود با توجه به کارگیری سیستم کنترل داخلی و عیب‌یابی، تعداد واحدهایی که باید آب‌بندی شوند کاهش یافته‌اند.

### ۴.۳ محرک‌های سیستم کنترل و حفاظت رآکتور

جریان‌های آهن‌رباهای الکتریکی بهینه شده و میزان پویایی آن‌ها در ضمن جابه‌جا شدن و حرکت آن‌ها افزایش یافته است.

طول مدت بهره‌برداری محرک‌ها به ۳۰ سال افزایش یافته است در صورتی که در طرح قدیم ۲۰ سال بوده است (طول مدت بهره‌برداری آهن‌رباهای الکتریکی ۱۰ سال و حس‌گر کنترل موقعیت میله‌های کنترل ۵ سال است).

نیروی کششی محرک‌ها دو برابر شده است.



شکل ۳. مجتمع سوخت رآکتور V-320 (نسل جدید) [۳].

### ۶.۳ میله‌های جاذب سیستم کنترل و حفاظت رآکتور

در طرح رآکتور V-320 از بور کاربرد به عنوان جاذب استفاده می‌شد ولی از سال ۱۹۹۶ از ترکیب جدید  $Dy_2O_3 + TiO_2 + B_4C$  به عنوان جاذب استفاده می‌شود. جنس میله‌های جاذب از آلیاژ ۴۶XNMU (آلیاژ روسی) است. مدت زمان بهره‌برداری از این میله‌ها، اگر به عنوان سیستم حفاظت اضطراری به کار گرفته شوند، ۱۰ سال و در صورت استفاده شدن به عنوان گروه کنترل توان رآکتور، ۳ سال است.

طول لبه‌ی کلاهک میله‌ی جاذب از ۲۵ میلی‌متر به ۳۵ میلی‌متر افزایش یافته است. به منظور جلوگیری از گیر کردن آن در طول سقوط آزاد در هنگام عملکرد علامت حفاظت اضطراری رآکتور، وزن میله‌ها از ۱۶ به ۱۸٫۵ کیلوگرم افزایش یافته است.

تعداد میله‌های جاذب در طرح جدید افزایش یافته است. این امر باعث شده است ضریب ایمنی و قابلیت اطمینان این نوع

### ۵.۳ مجتمع‌های سوخت رآکتور

میزان جابه‌جایی مجموعه فنرهای مجتمع سوخت (شکل ۳) [۳] تقریباً به دو برابر افزایش، و سختی واحد فنرها تقریباً ۲٫۴ برابر کاهش یافته است. هم‌چنین از موادی که قابلیت کشسانی بهتری دارند استفاده شده است، در نتیجه پایداری (نسبت به زمان) نیروی فشرده‌گی مجتمع سوخت با کاهش مقدار اسمی آن افزایش یافته است.

فنرهای موجود بر روی هر کانال هادی به صورت جداگانه تحت فشار قرار می‌گیرند. این امر، باعث جبران عدم یکنواختی ناشی از پرتودهی و انبساط دمایی کانال‌های هادی می‌شود.

کانال‌های هادی و شبکه‌ی نگه‌دارنده در طرح رآکتور V-320 از جنس فولاد ضدزنگ بود در صورتی که در طرح جدید از آلیاژ زیرکیم استفاده شده است. این خود منجر به افزایش شاخص‌های اقتصادی چرخه‌ی سوخت شده است.

قطر سوراخ‌های موجود در انتهای کانال‌های هادی به منظور کاهش افت هیدرولیکی در میله‌های جاذب سیستم کنترل و حفاظت رآکتور کم‌تر شده است.

در طرح رآکتور V-320 تعداد میله‌های سوخت ۳۱۲ عدد است ولی در طرح جدید یکی از میله‌های سوخت حذف، و به جای آن یک کانال ویژه‌ی سیستم کنترل داخلی و عیب‌یابی رآکتور نصب شده است. این امر امکان کنترل توزیع انرژی و دما در آن دسته از مجتمع‌های سوختی را که در آن‌ها میله‌های کنترل قرار دارند فراهم می‌آورد.

کلاهک مجتمع سوخت از نوعی است که قابلیت جدا شدن از دسته میله‌های سوخت را دارد. به این ترتیب، میله‌ی سوخت به راحتی می‌تواند از میان دسته میله‌های سوخت بیرون کشیده شود.



روش مکانیکی برای آب‌بندی قسمت‌های انتهایی بهره‌گرفته می‌شود.

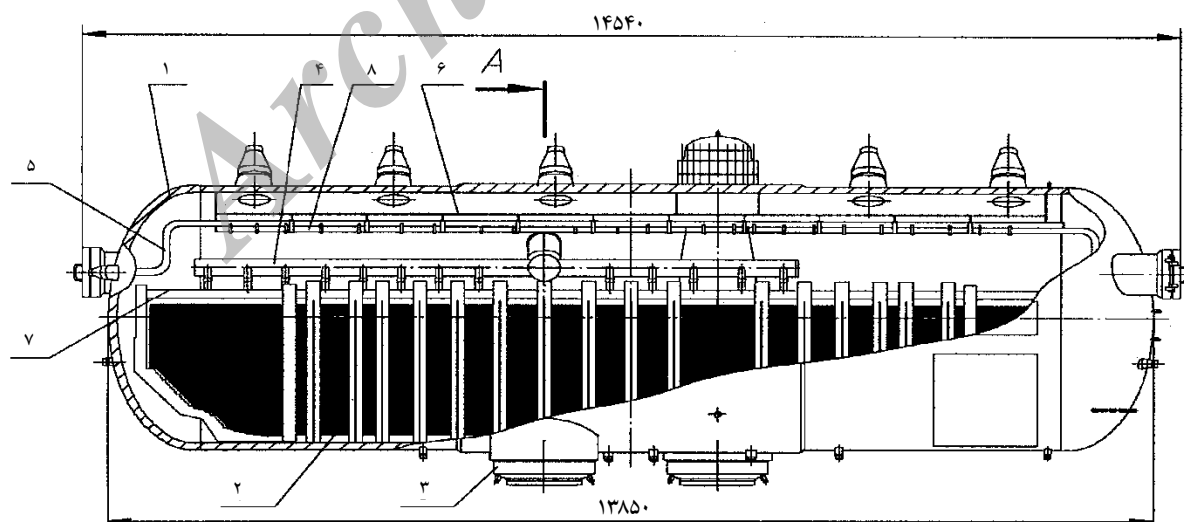
- از فن آوری خاص سوراخ‌کاری توأم با لبه‌برداری انتهایی برای برداشتن لایه‌ی داغ استفاده شده است.
- پس از سوراخ‌کاری جمع‌کننده‌ها و هم‌چنین آب‌بندی لوله در جمع‌کننده، ناحیه‌ی مشبک جمع‌کننده‌ی مورد عملیات حرارتی در دمای پایین قرار می‌گیرد.
- زاویه‌ی قرارگیری سوراخ‌ها بر روی جمع‌کننده کمی از حالت تند به صورت باز تغییر حالت داده شده است.
- به کارگیری روش جریان گردابی در فرایند ساخت لوله‌ها و اتصال‌های مولد بخار در کارخانه و هم‌چنین برای کنترل کارآمدی در هنگام بهره‌برداری از روش جریان گردابی استفاده می‌شود.
- معیارهای سخت‌گیرانه‌تر نظام شیمیایی آب از جمله مقدار pH اعمال می‌شود.
- سازمان‌دهی تخلیه‌ی آب مولد بخار از نواحی‌ای که در آن غلظت نمک‌ها بیشینه است.
- به کمک اقدامات فنی - طراحی و سازه‌ای تنش‌های باقی‌مانده‌ی جمع‌کننده به اندازه‌ی قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته‌اند. کاهش این تنش‌های باقی‌مانده نقش مهمی در افزایش قابلیت اطمینان و مدت زمان بهره‌برداری از مولد بخار ایفا می‌کند.

رآکتور نسبت به طرح رآکتور V-320 افزایش یابد. در اولین سوخت‌گذاری رآکتور جدید (V-392) از ۸۵ میله‌ی جاذب استفاده می‌شود و در اولین بار پس از تعویض سوخت این تعداد به ۱۰۳ عدد افزایش می‌یابد، در صورتی که در طرح رآکتور V-320 این تعداد در هر حالت ۶۱ عدد است.

### ۷.۳ مولد بخار

در طرح‌های جدید، نسل جدید مولدهای بخار PGV-1000 به کار گرفته شده‌اند (شکل ۴) [۳]. البته از این نوع مولدهای بخار در واحدهای قدیمی نسل V-320، که مولدهای آن‌ها دچار آسیب‌دیدگی شده بودند، نیز استفاده شده است. در نسل جدید مولدهای بخار، بهینه‌سازی‌های زیر صورت گرفته است:

- جنس جمع‌کننده از آلیاژ فولاد نوع ۱۰GN۲MFA (آلیاژ روسی) است، این نوع فولاد از درجه‌ی خلوص بالایی نسبت به ناخالصی‌های غیرفلزی برخوردار است. توجه ویژه‌ای به کاهش مقدار گوگرد تا ۰/۰۵٪ و فسفر تا ۰/۰۰۸٪ معطوف شده است.
- روش آب‌بندی لوله‌های U- شکل، که پیش از این روش انفجاری بود، کنار گذاشته شده است و به جای آن از روش هیدرولیکی استفاده می‌شود و در انتهای عملیات آب‌بندی از



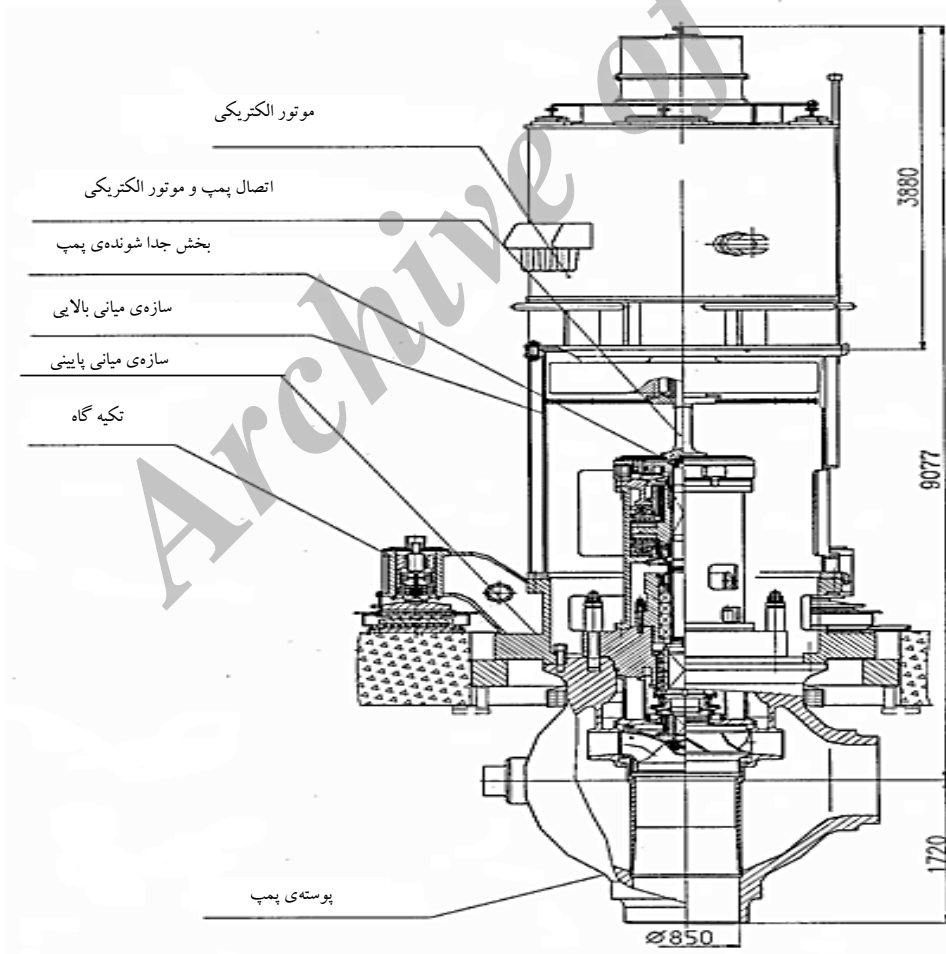
شکل ۴. مولد بخار PGV-1000

۱. محفظه‌ی مولد بخار، ۲. سطح تبادل حرارت، ۳. جمع‌کننده‌ی سرد، ۴. جمع‌کننده‌ی توزیع آب تغذیه، ۵. خط لوله‌ی تزریق آب تغذیه‌ی اضطراری، ۶. خط لوله‌ی تزریق محلول شیمیایی برای شستشو، ۷. صفحه‌ی مشبک زیر سطح آب تغذیه، ۸. صفحه‌ی مشبک قرار گرفته در فضای بخار.

### ۸.۳ پمپ اصلی مدار اولیه

- سیستم خنک‌سازی یاتاقان پایینی مستقل بوده و در هنگام توقف پمپ با توجه به اصل جریان طبیعی کار می‌کند. این امر باعث می‌شود که نیازی به پمپ کمکی برای خنک‌سازی یاتاقان نباشد.
- کاهش تعداد حفاظت‌ها و علامت‌های متوقف‌کننده‌ی عملکرد پمپ؛ این امر مربوط به کارگیری الزام‌های فنی بالا است و در نهایت باعث افزایش قابلیت اطمینان از بهره‌برداری دستگاه شده است.
- آب‌بندی محور پمپ، نشت سیال خنک‌کننده‌ی مدار اولیه را در ضمن بی‌برقی به مدت ۲۴ ساعت منتفی می‌نماید، هم‌چنین در صورت عدم تغذیه‌ی آب برای آب‌بندی (از دست دادن سیستم آب‌بندی پمپ) نشتی سیال مدار اولیه از پمپ رخ نخواهد داد و پمپ هم‌چنان غیرقابل نشت خواهد ماند.

- در طرح جدید، از پمپ‌های چرخاننده‌ی سیال مدار اولیه‌ی RCP-۱۳۹۱<sup>(۵)</sup> که نسخه‌ی بهینه و امروزی شده‌ی RCP-۱۹۵M است، با سطح ایمنی بالا و توان ۱۰۰۰ مگاوات، استفاده شده است (شکل ۵) [۳]. RCP-۱۳۹۱ نسبت به نوع قبلی دارای مزایای زیر است:
- از آب به عنوان ماده‌ی روان‌کننده و خنک‌کننده‌ی یاتاقان مرکب (تراست) اصلی پمپ استفاده می‌شود، که یک مایع خنک‌کننده‌ی غیرقابل اشتعال است. هم‌چنین اتصال صفحه‌ای به کار گرفته شده، به گونه‌ای است که ماده‌ی روان‌کننده لازم ندارد و این باعث می‌شود که سیستم روغن‌کاری بیرونی حذف و به کلی احتمال آتش‌سوزی منتفی شود.
- پمپ دارای موتور الکتریکی دو سرعت است، که این امر باعث تسهیل شرایط راه‌اندازی می‌شود.



شکل ۵. پمپ چرخاننده‌ی سیال مدار اولیه.



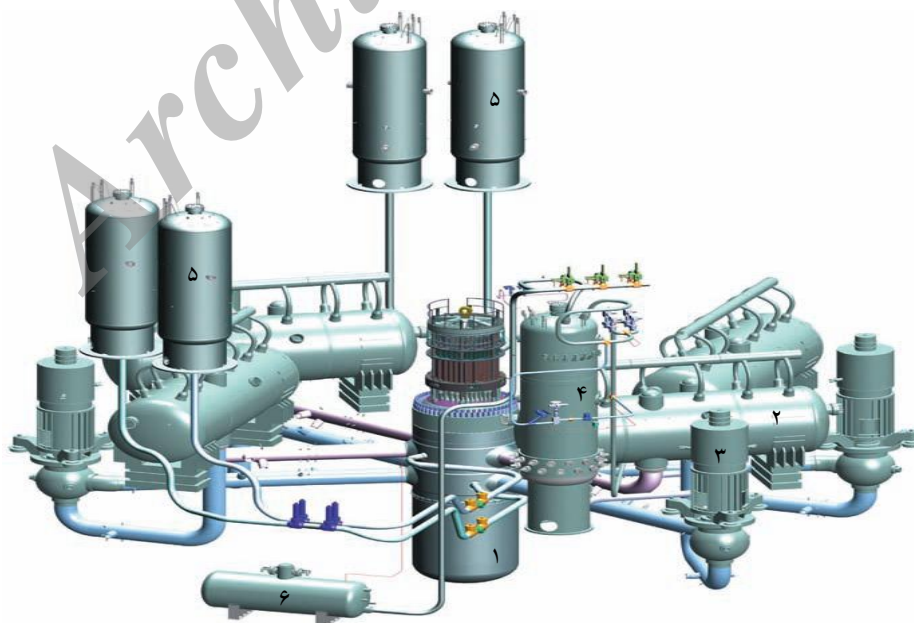


آن، باعث می‌شود که اقدام‌های لازم برای جلوگیری از به وجود آمدن شکستگی خط‌های لوله به عمل آید، هم‌چنین باعث می‌شود که تمام قسمت‌های لوله‌ها برای کنترل در زمان بهره‌برداری قابل دسترسی باشند. این امر باعث افزایش قابلیت اطمینان شده و میزان دز دریافتی کاهش یافته و کنترل نشت سیال مدار اولیه و هم‌چنین وضعیت فلز بهبود می‌یابد [۷، ۸].

- طراحی سیستم‌ها و تجهیزات مجموعه‌ی رآکتور و نیروگاه اتمی از جمله سیستم کنترل و ابزار دقیق به گونه‌ای است که امکان کار واحد را در حالت‌های ناپایدار (تغییر توان) فراهم کرده است.
- استفاده از شیوه‌نامه‌ی سیستم تغذیه و تزریق به مدار اولیه به مثابه اقدام در راستای کنترل و مدیریت حوادث ماورای طراحی برای جلوگیری از ذوب قلب رآکتور و خروج مواد پرتوزا به خارج از پوسته‌ی رآکتور.
- استفاده از عایق‌های حرارتی دارای قابلیت جداشوندگی. طراحی عایق حرارتی تجهیزات و لوله‌های مدار به گونه‌ای است که نسبت به تخریب در مقابل عامل‌هایی که منجر به بروز حوادث توأم با شکستگی لوله‌ها می‌شوند مقاوم هستند. به دلیل مقاوم بودن عایق، گرفتگی آب راه‌های چاهک پایین و اطراف رآکتور به وسیله‌ی قطعه‌های آن به وجود نمی‌آید (این مطلب هم به وسیله‌ی محاسبه و هم در آزمایشگاه به تأیید رسیده است) [۹، ۱۰].

#### ۴. بهینه‌سازی در مجموعه‌ی رآکتور بوشهر V-۴۴۶

- بهبود خواص نوترونی- فیزیکی قلب رآکتور (شکل ۶) [۴] و ساختار قسمت‌های مهم آن (استفاده از سوخت اورانیوم-گادولینیم).
  - استحکام بالای ساختگاه نیروگاه در برابر زلزله؛
  - فراهم نمودن ضرایب منفی واکنش‌پذیری دمایی سیال خنک‌کننده، قرص سوخت و توان رآکتور؛
  - استفاده از سیستم‌های جدید کنترلی و عیب‌یاب ویژه‌ی تجهیزات، خط لوله‌های مدار اولیه و شیر آلات.
  - بهینه‌سازی شیر اطمینان‌های فشارنده‌ی مدار اولیه (سیستم تنظیم‌کننده و بازدارنده‌ی افزایش فشار مدار اولیه) با خط کنترل تکمیلی که امکان کاهش فشار مدار اولیه در صورت بروز حوادث ماورای طراحی را فراهم می‌نماید و هم‌چنین تأیید کارایی خط لوله‌ها و شیرهای اطمینان مبنی بر کارکرد آن‌ها با بخار [۶] و آب؛
  - محدود نمودن ناخالصی‌های مضر در فلز پایه و خطوط جوش؛
  - به کارگیری مفهوم اصل نشت قبل از شکستگی؛
- این مفهوم در هنگام طراحی برای خطوط لوله‌ی مدار اولیه در نظر گرفته شده است. به کارگیری این اصل باعث کاهش احتمال شکستگی لوله‌ها می‌شود زیرا مشاهده‌ی نشت قبل از بروز



شکل ۶. مجموعه‌ی رآکتور V-۴۴۶.

۱. رآکتور، ۲. مولد بخار، ۳. پمپ اصلی مدار اولیه، ۴. تنظیم‌کننده‌ی فشار، ۵. مخزن‌های سیستم خنک‌کننده‌ی اضطراری قلب رآکتور، ۶. مخزن جمع‌آوری سیال‌ها (مخزن چگالش).



نیروگاه اتمی بوشهر از ایمنی بالایی برخوردار بوده و سطح فنی و ایمنی آن‌ها قابل رقابت با نیروگاه‌های پیشرفته و مدرن غربی از همین نوع و توان باشد.

### تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری و مساعدت صمیمانه‌ی آقای مهندس سیدعلی اکبر بصری سپاس‌گزاری و قدردانی می‌شود.

### پی‌نوشت‌ها

۱. Imatran- Voima
۲. AEP: Atomenergoproect
۳. WWER: Water Cooled Water Moderated Power Reactor
۴. Reflector
۵. RCP: Reactor Coolant Pump

- از سیستم تزریق سریع بور به مدار اولیه (سیستم تزریق اضافی بور) یک خط لوله‌ی پاشش به تنظیم‌کننده‌ی فشار مدار اولیه کشیده شده است تا در صورت بروز نشتی بتوان به کمک کاهش دادن فشار مدار اولیه، بهتر و مؤثرتر حادثه را از مدار اولیه به مدار ثانویه هدایت و کنترل نمود.
- در مجموعه‌ی رآکتور بوشهر پمپ‌های خنک‌کننده‌ی استخر سوخت‌های مصرف شده، الزام‌های مربوط به سیستم‌های ایمنی را برآورده می‌سازند (سیستم چهار کاناله بوده، و دارای تغذیه‌ی الکتریکی مطمئن مولد دیزل است).
- به منظور یکسان‌سازی و یکنواخت نمودن دما در درازای جمع‌کننده‌ی مولد بخار در قسمت بالای آن خط لوله‌ی تخلیه‌ی هوا تعبیه شده است.
- به منظور کاهش احتمال تشکیل مخلوط قابل انفجار هیدروژن در درون جمع‌کننده‌ی مولد بخار، قبل از باز نمودن مدار اولیه، تهویه‌ی هوا از قسمت بالای جمع‌کننده‌ی مولد بخار از طریق سیستم گاز زدایی اضطراری انجام می‌شود.
- لوله‌های سیستم تزریق بوریک اسید، سیستم خنک‌کننده‌ی طبیعی و اضطراری رآکتور به گونه‌ای هستند که می‌توان هم به خطوط لوله‌ی سرد و هم به خطوط لوله‌ی گرم مدار اولیه، بور تزریق نمود. این امر منجر به افزایش کیفیت و کارایی خنک‌سازی قلب رآکتور به هنگام حوادث طراحی می‌شود.
- استفاده از مخازن تحت فشار ازت حاوی بوریک اسید به غلظت ۱۶ گرم بر کیلوگرم، با عنوان «مخازن مرحله‌ی دوم سیستم خنک‌کننده‌ی اضطراری قلب رآکتور».
- طراحی و به کارگیری سیستم غیرعامل پایش و حذف هیدروژن در کره‌ی فلزی [۱۱].

### ۵. نتیجه‌گیری

بهبودسازی و تغییرات انجام شده در مجموعه‌ی جدید رآکتورهای هسته‌ای روسی، به کارگیری الزام‌های استانداردها و مدرک‌های فنی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، اتحادیه‌ی اروپا، روسیه و قوانین و استانداردهای تدوین شده توسط نظام ایمنی هسته‌ای جمهوری اسلامی ایران و تجارب بین‌المللی در زمینه‌ی طراحی، ساخت و بهره‌برداری از رآکتورهای هسته‌ای موجب شده است که نسل جدید رآکتورهای روسی از جمله رآکتور



1. Атомная стратегия ноябрь, (2005), XXI.
2. AES-92 for Belene: The Mystery Reactor by Antonia Wenisch, (2007), www.ecology.at.
3. Основные технические решения по повышению безопасности и экономичности оборудования реакторных установок для АЭС «Тяньвань», «Бушер» и II очереди НВ АЭС, А.И. Репин, С.Б. Рыжов, Ю.Л. Бочаров, А.Я. Веденьев, Е.В. Барамыков, Д.Н. Ермаков, М.П. Бурляев, О.В. Титов ОКБ «Гидропресс», г. Подольск (2001).
4. ОКБ «ГИДРОПРЕСС» РУ с ВВЭР-1000 (2008).
5. Контроль свойств металла корпуса реактора РУ с ВВЭР в процессе эксплуатации по образцам-свидетелям. В.М.Комолов, Г.Ф.Банюк, Ю.Л.Бочаров, Е.И.Капралов, Ю.М.Максимов, В.С.Резников, И.О.Трегубов, В.И.Цофин ОКБ «Гидропресс» г.Подольск (2001).
6. Модернизация ИПУ КД УФ 50024-100 АЭС ВВЭР-1000 для работы в условиях запроектной аварии В.А. Ананьевский, В.О. Садовников КЦКБА, г. Киев; ОКБ «Гидропресс» г. Подольск Московская обл.
7. ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ «ТЕЧЬ ПЕРЕД РАЗРУШЕНИЕМ» К ГЛАВНЫМ ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ ТРУБОПРОВОДАМ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 Л. Соков, В. Пиминов (2001).
8. Концепция безопасности «течь перед разрушением для сосудов трубопроводов давления» А.Ф. Гетман Москва (1999).
9. Скобелкина Татьяна Николаевна МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЫСТРОСЪЕМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ МНОГОРАЗОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ С РЕАКТОРОМ ВВЭР, Москва (2007).
10. БЛОЧНАЯ ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1000 В.А. Лукьянов, Р.Г. Иванов, Н.Н. Климов, Подшибякин А. К. О. П. Архипов ОКБ «Гидропресс» 142103, г. Подольск, Московская область, ул. Орджоникидзе, 21.
11. 49BU.1 0.0.00. FSAR.RDR001, Revision 1.