J. of Nucl Sci. and Tech.
83, 2018, 17-22

مجله‌ی علوم و فنون هسته‌ای
۸۳، ۱۳۹۷، ۱۷-۲۲

اندازه‌گیری مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌های کنترل در رآکتور صفر- قدرت آب سنگین (HWZPR) با سوخت ترکیبی

پروین کاویانی[۱]، محمد مشایخ*[۱]، جمشید خورسندی[۱]، حسین خلفی[۲]
۱. پژوهشکده‌ی راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۵۸۹-۸۱۴۶۵، اصفهان ـ ایران
۲. پژوهشکده‌ی راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران ـ ایران

چکیده: میله‌های کنترل و ایمنی، سیستم تخلیه‌ی اضطراری آب سنگین، سیستم اندازه‌گیری سطح آب و سیستم‌های مربوط به تنظیم توان رآکتور، سیستم‌هایی هستند که در رآکتور صفر- قدرت آب سنگین (HWZPR) برای کنترل رآکتیویته مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌های کنترل و ایمنی باید معیارهای لازم برای ایمنی رآکتور را فراهم نمایند. کاربرد میله‌های ایمنی، در خاموش کردن رآکتور به صورت معمول و نیز در هنگام بروز حادثه است. طبق معیارهای ایمنی بهره‌برداری از رآکتور، مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌ها باید بیش از رآکتیویته‌ی مثبت اضافی ذاتی رآکتور باشد، در هنگام بروز حادثه سریعاً وارد قلب شده و رآکتیویته‌ی مثبت را جبران نماید. میله‌های کنترل به منظور کنترل گذر از حالت زیربحرانی به حالت فوق‌بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. طبق راهنمای ایمنی رآکتور به منظور بهره‌برداری ایمن از رآکتور، در شرایط نزدیک به حالت بحرانی، آهنگ اعمال رآکتیویته‌ی مثبت نباید بیش از 2×10^{-4} $(\Delta k/k)/s$ بوده و مقدار رآکتیویته‌ی معادل هر میله‌ی کنترل نیز باید کم‌تر از ۰٫۲ درصد $\Delta k/k$ باشد. طبق محاسبات و اندازه‌گیری‌های انجام شده، این شرایط در رآکتور صفر- قدرت آب سنگین فراهم شده است. با تغییر سوخت رآکتور از فلزی به ترکیب فلزی و اکسید، مقدار رآکتیویته‌های معادل میله‌های کنترل اندازه‌گیری و طبق نتایج به دست آمده امکان برآورده شدن معیارهای ایمنی پیش‌گفته، در ترکیب سوخت جدید تأیید شد.

کلیدواژه‌ها: رآکتور صفر- قدرت آب سنگین، رآکتیویته، سوخت ترکیبی

Control Rods Reactivity Worth Measurement in a Mixed Core Heavy Water Zero Power Reactor (HWZPR)

P. Kaviani[1], M. Mashayekh*[1], J. Khorsandi[1], H. Khalafi[2]
1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 81465-1589, Esfahan – Iran
2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran-Iran

Abstract: Systems related to reactivity control in a heavy water zero power reactor (HWZPR) consist of safety rod, control rod, emergency dump, and water level measurement and regulation systems. The control rod reactivity worth and safety rods should, therefore, meet the necessary safety criteria. The safety rods are used to shutdown the reactor through rapid falls in the emergency of the reactor and for a normal shutting down condition. According to the safety criteria, the equivalent rod reactivity worth must be appreciably greater than the maximum excess of reactivity which occurs in a reactor. The main applications of the control rods are to control the power rising period and the transition from subcritical to supercritical states. According to the safety guide for a HWZPR when a reactor is close to the critical state, the reactivity insertion rate should not exceed 2×10^{-4} $(\Delta k/k)/s$ and the reactivity worth of each control rod should be less than 0.2% $\Delta k/k$ to ensure the safety of the reactor operation. According to the obtained calculational and experimental results, these conditions are satisfied for HWZPR. By changing the reactor fuel from natural metal uranium to mixed fuel (natural metal uranium fuel and natural oxide uranium), the control rod reactivity worth is measured and according to the obtained results, the control rod reactivity worth can meet the above provisions.

Keywords: ***HWZPR, Reactivity, Mixed fuel***

*Email: mmashayekh@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۳/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۹/۴

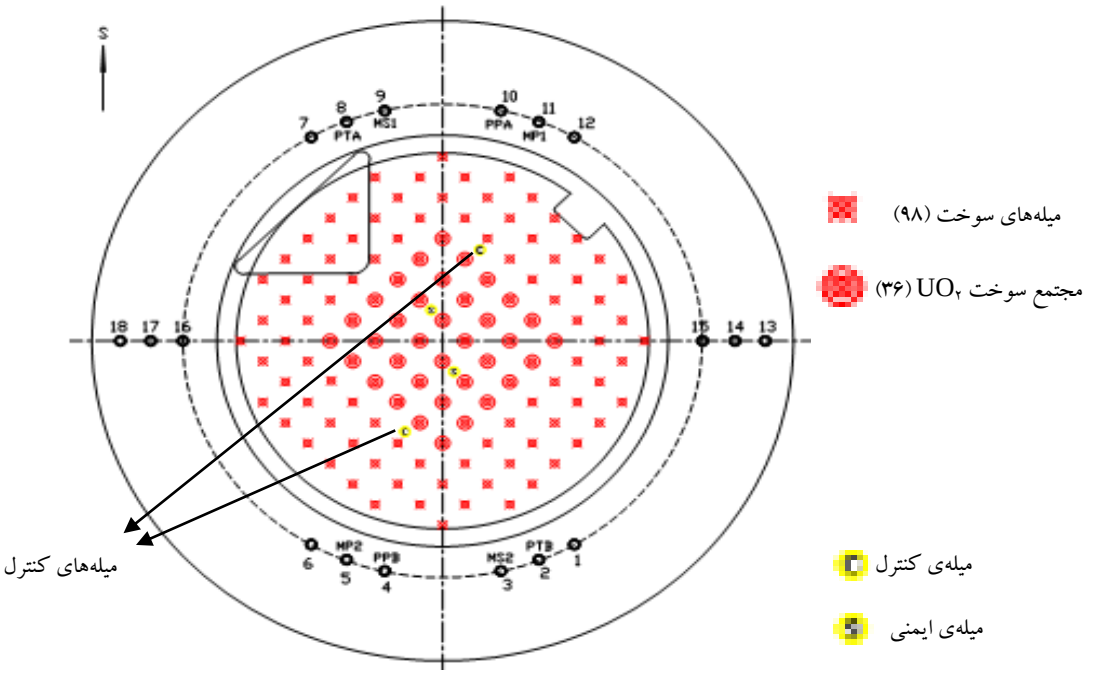
Archive of SID
www.SID.ir

۱. مقدمه

در صنعت هسته‌ای، رآکتورها با میله‌های کنترل، که غالباً استوانه‌ای شکل هستند، کنترل می‌شوند. مقدار رآکتیویته‌ی معادلی که باید میله‌های کنترل قادر به فراهم نمودن آن باشند بسته به ماهیت و طراحی قلب رآکتورها متفاوت است. اصولاً در رآکتورهای کم- قدرت و صفر- قدرت، میله‌های کنترل دو دسته‌اند: دسته‌ی اول میله‌هایی هستند که برای رسیدن به توان مناسب و یا تنظیم توان رآکتور مورد استفاده قرار می‌گیرند (میله‌های کنترل) و دسته‌ی دوم میله‌هایی که همواره در بیرون قلب هستند و در حالت اضطراری و بروز حادثه برای خاموش کردن آنی رآکتور و یا خاموش کردن عادی رآکتور وارد قلب می‌شوند (میله‌های ایمنی). در حالت کلی باید میله‌های ایمنی، رآکتیویته‌ی اضافی به علاوه حاشیه‌ی ایمنی آن را کنترل نمایند [۱]. بنابراین در اکثر رآکتورهای هسته‌ای، مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌های ایمنی باید بیش از رآکتیویته‌ی اضافی قلب باشد [۲].

در رآکتور صفر- قدرت آب سنگین[۱] (HWZPR) میله‌های کنترل از جنس آهن ضدزنگ هستند که سطح مقطع جذب نسبتاً بالایی دارد. در این نوع رآکتور، گذر از حالت زیربحرانی به حالت فوق- بحرانی و رسیدن به توان مناسب به وسیله‌ی میله‌های کنترل، کنترل می‌شود.

در رآکتور با سوخت ترکیبی، پس از جای‌گزین نمودن ۳۶ مجتمع سوخت اکسیدی با میله‌های سوخت فلزی مرکزی مطابق با شکل ۱، ساختار و موقعیت میله‌های کنترل و ایمنی تغییر نمی‌یابد ولی به علت تغییر نوع و چگالی سوخت، ارتفاع بحرانی رآکتور و در نتیجه ارتفاع مؤثر میله‌ها تغییر می‌کند. علاوه براین شار نوترون در محل میله‌ها نیز تغییر یافته و مجموع این عوامل، منجر به تغییر مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌ها می‌شود. از آن‌جا که اندازه‌گیری مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌های کنترل و ایمنی در رآکتور از اهمیت بالایی برخوردار است، این کار برای رآکتور (HWZPR) با سوخت فلزی انجام و نتایج آن به صورت گزارش و مقاله ارایه شده است. بنابراین، قبل از رسیدن به حالت بحرانی و فوق- بحرانی، باید مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌ها را در شرایط زیربحرانی اندازه‌گیری نمود. مقدار رآکتیویته‌ی معادل هر میله‌ی کنترل به ساختار رآکتور، موقعیت میله در رآکتور و موقعیت آن نسبت به میله‌های دیگر، توزیع فضایی و طیف انرژی نوترون بستگی دارد [۳]. لازم به ذکر است در رآکتور صفر- قدرت آب سنگین سطح ارتفاع آب نقش مهمی در کنترل رآکتور دارد. ارتفاع آب رآکتور از روی ستون آب کنار قلب و هم‌چنین از کف تانک رآکتور به صورت رقمی بر روی کنسول اتاق کنترل رآکتور قابل مشاهده است.



شکل ۱. سطح مقطع افقی قلب رآکتور صفر- قدرت آب سنگین با سوخت ترکیبی.

www.SID.ir

۲. مشخصات پارامترهای پویای (دینامیکی) قلب

۱.۲ مشخصات ساختاری رآکتور (HWZPR)اصفهان

رآکتور تحقیقاتی صفر- قدرت آب سنگین اصفهان مجموعه‌ای بحرانی با سوخت اورانیم طبیعی فلزی، کندساز آب سنگین و بازتاباننده‌ی شعاعی گرافیتی با حداکثر توان ۱۰۰ وات است. در این بررسی محاسباتی به دلیل پایین بودن شار نوترون (حداکثر 10^9 نوترون در سانتی‌متر مربع در ثانیه) از مسائل مصرف سوخت و انتقال حرارت صرف‌نظر شده است. این رآکتور، که برای آموزش، انجام مطالعات پایه در زمینه‌ی فیزیک رآکتور آب سنگین با سوخت اورانیم طبیعی، اعتبارسنجی کدهای محاسباتی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد، قابلیت انجام آزمایش‌های بحرانی در چهار گام (فاصله بین دو سوخت مجاور در رآکتور) مختلف را دارد. با استفاده از دو جفت شبکه‌ی مربعی (که در بالا و پایین قلب رآکتور قرار دارند) می‌توان به چهار گام مختلف ۱۲٫۷۳، ۱۸، ۱۴٫۱۴ و ۲۰ سانتی‌متر دست یافت. در گام ۱۸ سانتی‌متر، تعداد ۱۲۴ میله‌ی سوخت در داخل رآکتور قرار می‌گیرد.

در پروژه‌ی سوخت ترکیبی رآکتور، ۳۶ عدد مجتمع سوخت اورانیم اکسید طبیعی با چگالی $10٫14\ g/cm^3$ جای‌گزین میله‌های سوخت اورانیم طبیعی فلزی با چگالی $18٫95\ g/cm^3$ شد. چیدمان جدید در شکل ۱ نشان داده شده است.

در مرحله‌ی طراحی، با شبیه‌سازی رآکتور با سوخت ترکیبی توسط کدهای محاسباتی WIMS D4 و CITATION و MCNPX [۴-۹] ارتفاع بحرانی، مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌های کنترل و ایمنی و سایر پارامترهای فیزیکی رآکتور به دست آمد.

۲.۲ مشخصات میله‌های کنترل

سیستم کنترل رآکتور به منظور دست‌یابی به سه هدف عمده طراحی می‌شود:

- ایجاد تغییر در رآکتیویته برای رسیدن به حالت بحرانی با توان مناسب. در رآکتور (HWZPR) این عمل توسط میله‌های کنترل انجام می‌شود.
- جذب رآکتیویته‌ی ذاتی منفی اضافی و جبران تغییرات خودبه‌خود رآکتیویته در اثر مصرف سوخت، مسمومیت ناشی از محصولات شکافت و اثرات دمایی.

از آن‌جا که رآکتور صفر- قدرت آب سنگین با تغییر ارتفاع آب سنگین بحرانی می‌شود و توان اسمی آن صفر است، بنابراین در این نوع رآکتور نیازی به این دسته از میله‌های جاذب نیست.

- ایجاد وسیله‌ای برای خاموش نمودن تدریجی و سریع رآکتور در شرایط اضطراری. در رآکتور (HWZPR) این عمل به وسیله‌ی میله‌های ایمنی انجام می‌شود.

۳. عملکرد رآکتور

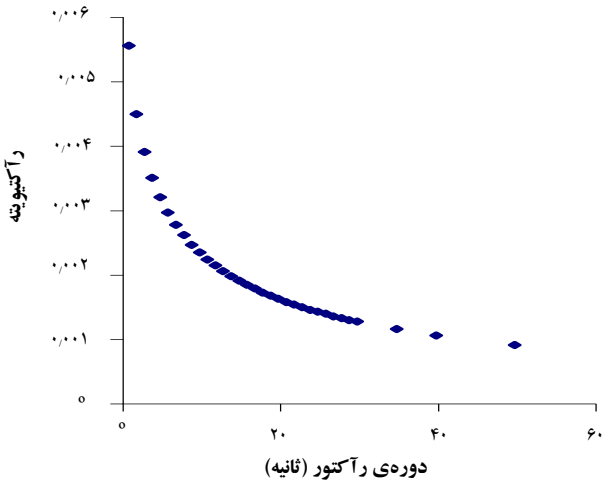
در رآکتور صفر- قدرت آب سنگین، گذر از حالت زیربحرانی به حالت فوق- بحرانی و رسیدن به توان مناسب به وسیله‌ی میله‌های کنترل، کنترل می‌شود. سیستم ایمنی این نوع رآکتور به گونه‌ای طراحی شده است که اگر دوره‌ی تناوب رآکتور کم‌تر از ۱۵ ثانیه و یا اگر توان به دست آمده بیش از ٪۱۲۰توان تنظیم شده باشد، میله‌های ایمنی به طور خودکار و سریعاً داخل قلب رآکتور شده و با اعمال سریع رآکتیویته‌ی غیرذاتی منفی زیاد، از بروز حادثه جلوگیری می‌کنند. طبق گزارش تحلیل ایمنی رآکتور صفر- قدرت آب سنگین، مقدار رآکتیویته‌ی معادل هر یک از میله‌های کنترل باید کم‌تر از ۲mK باشد. از تغییرات دوره(ی تناوب) برحسب رآکتیویته برای رآکتور صفر- قدرت آب سنگین مطابق (شکل ۲)، مشاهده می‌شود که دوره‌ی ۱۵ ثانیه متناظر با رآکتیویته‌ی مثبت $\Delta k/k$ ۰٫۰۰۱۸۹ است که تقریباً معادل با رآکتیویته‌ی معادل یک میله‌ی کنترل است. بنابراین اگر رآکتور در حالت بحرانی باشد با خارج‌سازی تنها یک میله‌ی کنترل از قلب، توان رآکتور با دوره‌ی ۱۵ ثانیه افزایش می‌یابد ولی برای جلوگیری از بروز حادثه، میله‌های ایمنی سریعاً به داخل رآکتور سقوط می‌کنند.

۱.۳ روش‌های تجربی اندازه‌گیری رآکتیویته

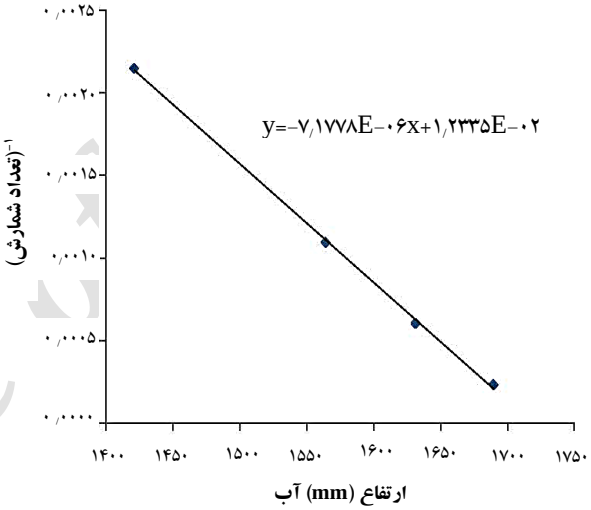
به منظور اندازه‌گیری مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌های کنترل رآکتور با سوخت ترکیبی، پس از انجام آزمون سیستم‌های حفاظتی رآکتور، بهره‌برداری به صورت عادی انجام و با شمارش نوترون‌ها برحسب ارتفاع آب سنگین داخل رآکتور، ارتفاع بحرانی برون‌یابی می‌شود. مراحل تا k_{eff} =۰٫۹۹۶ یعنی ارتفاعی برابر با $H_\circ$ ادامه می‌یابد. از رسم تغییرات عکس تعداد نوترون برحسب ارتفاع آب (شکل ۳) معادله‌ی خط مربوطه به دست می‌آید.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲. رابطه بین رآکتیویته و دوره‌ی رآکتور HWZPR.



شکل ۳. برون‌یابی ارتفاع بحرانی آب سنگین در آزمایش اندازه‌گیری مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌های کنترل.

اندازه‌گیری مقدار رآکتیویته‌ی معادل دو میله‌ی کنترل. در ارتفاع ثابت آب در H_0 دو میله‌ی کنترل را کاملاً در رآکتور داخل نموده و پس از ثابت شدن شرایط، شمارش نوترون‌ها را ثبت می‌کنیم. با وارد نمودن معکوس میانگین تعداد شمارش در معادله‌ی خطی به دست آمده در مرحله‌ی قبل، ارتفاع متناظر با شمارش (H_1) به دست می‌آمد. با کم کردن این دو ارتفاع آب سنگین و ضرب آن در مقدار رآکتیویته‌ی معادل آب سنگین به ازای هر میلی‌متر می‌توان مقدار رآکتیویته‌ی معادل دو میله‌ی کنترل (ρ_{12}) را به دست آورد. از آن‌جا که رآکتور در حالت زیربحرانی است تغییر دمایی صورت نگرفته است، یعنی اندازه‌گیری‌ها در دمای ثابت انجام شده است.

$$\Delta H = (H_1 - H_0)$$
$$\rho_{12} = \Delta H \times \frac{\partial \rho}{\partial H}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial H} = 1{,}16 \times 10^{-4}\left(\frac{\Delta k / k}{mm}\right)$$
$$\rho_{12} = \Delta H\left[1{,}16 \times 10^{-4}\left(\frac{\Delta k / k}{mm}\right)\right]$$

در مرحله‌ی دوم در حالی‌که ارتفاع آب در H_0 ثابت است میله‌ی کنترل اول از رآکتور کاملاً خارج و پس از ثابت شدن شرایط، تعداد شمارش نوترون‌ها ثبت می‌شود. با انجام محاسباتی نظیر محاسبات مرحله‌ی پیشین می‌توان مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌ی کنترل دوم را به دست آورد.

در مرحله‌ی سوم در حالی‌که ارتفاع آب در H_0 ثابت است میله‌ی کنترل دوم از رآکتور کاملاً خارج و میله‌ی کنترل اول وارد می‌شود. پس از ثابت شدن شرایط، تعداد شمارش نوترون‌ها ثبت می‌شود. با تکرار مرحله‌های پیشین می‌توان مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌ی کنترل اول را نیز به دست آورد.

۴. نتایج و بحث

همان‌گونه که در مرحله‌ی پیشین گفته شد با شمارش تعداد نوترون‌ها در ارتفاع‌های مختلف آب سنگین داخل رآکتور و رسم تغییرات عکس تعداد نوترون برحسب ارتفاع آب، ارتفاع بحرانی برون‌یابی شده، معادله‌ی خط به دست می‌آید. شمارش تعداد نوترون‌ها، با دو آشکارساز BF_3 قرار گرفته در بازتاباننده‌ی گرافیتی اطراف قلب رآکتور (موقعیت‌های ۳ و ۹ در شکل ۱) به انجام رسید. نتایج به دست آمده، حاصل این چهار شمارش است و میانگین شمارش‌ها در جدول ۱ درج شده است. با توجه به کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار رآکتیویته‌ی اندازه‌گیری شده در هر ردیف می‌توان درصد خطای نسبی مقدار اندازه‌گیری شده را به دست آورد. سطر اول مقدار رآکتیویته‌ی معادل مربوط به ورود هم‌زمان میله‌های کنترل به داخل رآکتور و سطر چهارم مجموع مقدار مربوطه به دو میله به طور مجزا است. در ستون آخر جدول مقدار محاسبه شده با کد MCNPX برای مقایسه درج شده است.

www.SID.ir

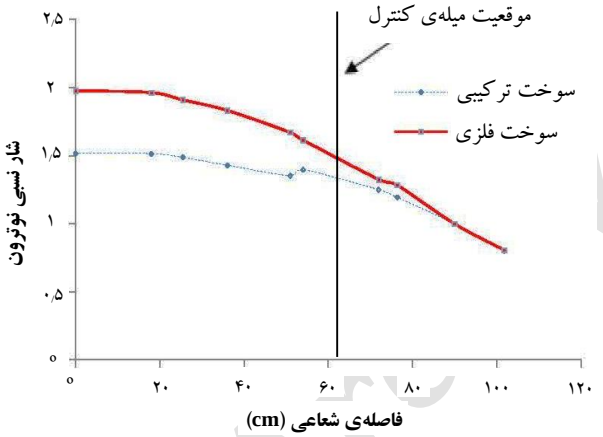
جدول ۱. نتایج اندازه‌گیری مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌های کنترل

محاسبه با (MCNPX)	درصد خطای نسبی	میانگین	دستی (BF_3(II))	دستی (BF_3(I))	کامپیوتر (BF_3(II))	کامپیوتر (BF_3(I))	مقدار رآکتیویته‌ی معادل (Δk/k) of
۰٫۰۰۳۳۸±۵٪	±۵٪	۰٫۰۰۳۲۸	۰٫۰۰۳۱۲	۰٫۰۰۳۲۱	۰٫۰۰۳۴۵	۰٫۰۰۳۳۳	دو میله‌ی کنترل
۰٫۰۰۱۶۹±۵٪	±۱۱٪	۰٫۰۰۱۶۸	۰٫۰۰۱۴۷	۰٫۰۰۱۹۰	۰٫۰۰۱۵۶	۰٫۰۰۱۸۰	میله‌ی کنترل ۲
۰٫۰۰۱۶۸±۵٪	±۱۱٪	۰٫۰۰۱۶۹	۰٫۰۰۱۸۰	۰٫۰۰۱۵۳	۰٫۰۰۱۸۹	۰٫۰۰۱۵۲	میله‌ی کنترل ۱
۰٫۰۰۳۳۷±۵٪	±۲٫۳٪	۰٫۰۰۳۳۸	۰٫۰۰۳۲۸	۰٫۰۰۳۴۴	۰٫۰۰۳۴۵	۰٫۰۰۳۳۳	میله‌ی کنترل ۱ + میله‌ی کنترل ۲

آشکارسازهای BF_3(I) و BF_3(II) مطابق با شکل ۱، در موقعیت‌های ۳ و ۹ در داخل گرافیت اطراف قلب رآکتور قرار گرفته و میله‌ی کنترل ۱ به آشکارساز BF_3(I) و میله‌ی کنترل ۲ به آشکارساز BF_3(II) نزدیک‌تر است. براساس نتایج جدول ۱، رآکتیویته‌ی معادل به دست آمده برای هر میله‌ی کنترل بستگی به موقعیت آن نسبت به آشکارساز دارد و این مسئله منجر به افزایش خطای اندازه‌گیری مقدار رآکتیویته‌ی معادل هر میله می‌شود. به عبارت دیگر، آشکارسازی که در نزدیکی یک میله قرار دارد تأثیر بیش‌تری از آن گرفته و مقدار بیش‌تری را در مقایسه با آشکارساز دورتر، برآورد می‌کند. با قرار دادن چندین آشکارساز در نقاط مختلف قلب و میانگین‌گیری از نتایج آن‌ها می‌توان مقدار معادل میله‌ها را با دقت قابل‌قبولی اندازه‌گیری کرد. براساس نتایج «اندازه‌گیری توزیع شار شعاعی و محوری رآکتور با سوخت ترکیبی» [۹]، توزیع شار شعاعی نوترون در محل تغییر سوخت دارای شکستگی قابل توجهی است و میله‌ی کنترل در مرز بین دو سوخت اکسیدی و فلزی قرار دارد (شکل ۴). بنابراین انتظار می‌رود که به علت کاهش شار نسبی نوترون در محل میله‌ی کنترل در رآکتور با سوخت ترکیبی، مقدار معادل میله‌ها کاهش یابد. اما از طرفی به علت افزایش ارتفاع بحرانی در رآکتور با سوخت ترکیبی، ارتفاع مؤثر میله‌های کنترل نیز افزایش می‌یابد که این مسئله باعث افزایش رآکتیویته‌ی معادل میله‌های کنترل می‌شود. در نهایت، تأثیر این دو عامل، منجر به کاهش مقدار رآکتیویته‌ی معادل میله‌های کنترل در رآکتور با سوخت ترکیبی شده است. از آن‌جا که میله‌های کنترل تنها برای کنترل گذار رآکتور از حالت زیربحرانی به فوق‌بحرانی استفاده شده و نقشی در کنترل توان رآکتور ندارند، مقدار دیفرانسیلی رآکتیویته‌ی معادل میله‌ها در این‌جا مورد نظر نیست.

۵. نتیجه‌گیری

براساس نتایج جدول ۱ و با در نظر گرفتن مقدار خطای آزمایش، مقدار رآکتیویته‌ی معادل هر میله‌ی کنترل کم‌تر از ۰٫۲ درصد Δk/k بوده و با توجه به ارتفاع مؤثر و سرعت حرکت ۶ cm/s میله‌های کنترل، آهنگ اعمال رآکتیویته‌ی مثبت در نزدیکی ارتفاع بحرانی نیز کم‌تر از مقدار توصیه شده‌ی ۲×۱۰^{-۴} Δk/k.s است. بنابراین میله‌های کنترل در رآکتور با سوخت ترکیبی نیز معیارهای ایمنی را برآورده می‌سازند. در جدول ۲ مقدار راکتیویته‌ی معادل میله‌های کنترل برای رآکتور با سوخت ترکیبی و رآکتور با سوخت فلزی مقایسه شده است. از جدول ۲ دیده می‌شود که مقدار معادل هر یک از میله‌های کنترل و نیز مجموع آن‌ها در رآکتور با سوخت ترکیبی در مقایسه با رآکتور با سوخت فلزی کاهش یافته است زیرا به علت کاهش چگالی و تغییر در هندسه‌ی سوخت ترکیبی اکسیدی در مقایسه با سوخت فلزی، شار نوترون در محل میله‌ها به رغم افزایش ارتفاع مؤثر میله‌های کنترل کاهش یافته است.



شکل ۴. مقایسه‌ی توزیع شار نوترون در راستای شعاعی در رآکتور با ۱۲۴ میله‌ی سوخت فلزی و با سوخت ترکیبی.

جدول ۲. مقادیر رآکتیویته‌ی میله‌های کنترل در رآکتور با سوخت فلزی و با سوخت ترکیبی

رآکتور با ۱۲۴ میله‌ی سوخت فلزی	سوخت ترکیبی	مقدار رآکتیویته‌ی معادل (Δk/k)
۰٫۰۰۳۳۷۵	۰٫۰۰۳۲۸۳±۵٪	دو میله‌ی کنترل
۰٫۰۰۱۷۵۵	۰٫۰۰۱۶۸۸±۱۱٪	میله‌ی کنترل ۲
۰٫۰۰۱۶۶	۰٫۰۰۱۶۹۱±۱۱٪	میله‌ی کنترل ۱
۰٫۰۰۳۴۱۵	۰٫۰۰۳۳۸۰±۲٫۳٪	میله‌ی کنترل ۱ + میله‌ی کنترل ۲

پی‌نوشت

1. HWZPR: Heavy water zero power reactor

Archive of SID
www.SID.ir

مرجع‌ها

[1] Preliminary Safety Analysis Report on heavy Water Zero Power Reactor, China Institute of Atomic Energy, (1992).

[2] John R. Lamarsh Introduction to Nuclear Reactor Theory, New York University, (1972).

[3] J.S. Glaston, Nuclear Reactor Engineering, Van Nostrand Reinhold Company, (1994).

[4] F. Briesmeister, MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code System (version C), Los Alamos, National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, (2000).

[5] M.J. Halsall, A Summary of WIMSD4 Input Options, (1967).

[6] M.J. ROTH, The Preparation of Input Data for WIMSD4, General Reactor Physics Division, Atomic Energy Establishment, (1967).

[7] T.B. Fowler, D.R. Vondy, G.W. Cunningham, National Energy Software Center Note, CITATION, NESC, 387 (1980).

[8] Z. Nasr, R. Salimi, J. Khorsandi, Neutronic design of HWZPR mixed core, Reactor school, NSTRI, AEOI, internal report, in Farsi, (2012).

[9] P. Kaviani, M. Jalali, J. Khorsandi, Measurement of Relative Neutron Flux Distribution in HWZPR mixed core, Reactor school, NSTRI, AEOI, internal report, in Farsi, (2013).

Archive of SID

www.SID.ir