



اندازه‌گیری نسبت کادمیم در راکتور صفر- قدرت آب سنگین اصفهان و مقایسه‌ی مقادیر به دست آمده در دو گام مختلف

اکبر عبدی‌سرای^۱، جمشید خورسندی^۲، محمدحسین استکی*^۳، پروین کاویانی^۲

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده‌ی علوم و فن‌آوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران

۲. پژوهشکده‌ی راکتور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۸۱۴۶۵-۱۵۸۹، اصفهان - ایران

۳. گروه مهندسی پزشکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران

چکیده: اندازه‌گیری نسبت کادمیم یکی از پارامترهای اساسی در راکتورهای هسته‌ای است. در این مقاله، مقدار نسبت کادمیم برای راکتور صفر- قدرت آب سنگین اصفهان (HWZPR) در دو گام ۱۸ و ۲۰ cm اندازه‌گیری شده است. از پولک‌های منگنز- نیکل برای اندازه‌گیری نسبت کادمیم استفاده شده است. پرتوایی پولک‌ها با آشکارساز سوسوزن پلاستیکی و یدور سدیم برای پرتوهای بتا و گاما به دست آمده است. هم‌چنین از تغییرات مقدار نسبت کادمیم در راستای محوری راکتور، ناحیه‌ی مجانبی یا طیف پایدار به دست آمده است. طیف ثابت راکتور، در گام ۲۰، تقریباً ۱۹ cm نسبت به گام ۱۸ افزایش یافته است، که این به دلیل کاهش تعداد میله‌های سوخت و افزایش ارتفاع بحرانی آب سنگین است. برای بررسی درستی مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده، راکتور صفر- قدرت آب سنگین اصفهان با کد MCNPX-2.6.0 شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی سازگاری خوبی با هم داشتند.

کلیدواژه‌ها: راکتور صفر- قدرت، نسبت کادمیم، پولک منگنز، ناحیه‌ی مجانبی، آب سنگین، فعال‌سازی نوترونی

Measurement of the Cadmium Ratio in Esfahan Heavy Water Zero Power Reactor and Comparison of the Values Obtained in Two Different Pitches

A. Abdi Saray¹, J. Khorsandi², M.H. Esteki*³, P. Kaviani²

1. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Advance Sciences and Technologies, University of Esfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan – Iran

2. Reactor Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute, P.O.Box: 81465-1589, Isfahan – Iran

3. Department of Biomedical Engineering, Faculty of Engineering, University of Esfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan – Iran

Abstract: Measurement of cadmium ratio is one of the basic parameters in nuclear reactors. In this paper, the amount of cadmium ratio for the Esfahan Heavy Water Zero Power Reactor (EHWZPR) in two pitches of 18 and 20cm have been measured. For the cadmium ratio measurements Mn-Ni foils were used. The activity of the Mn-Ni foils were obtained by plastic scintillator and NaI(Tl) detectors for beta and gamma rays. Also, changes of the cadmium ratio in the axial direction of the reactor, asymptotic region or stable spectrum were obtained. The length of stable spectrum of the reactor increased to approximately 19cm, in pitch of 20 to 18, due to the reduced number of fuel rods and critical height of heavy water. To verify the measured values, the Esfahan Heavy Water Zero Power Reactor was simulated with the MCNPX-2.6.0 code. The results of simulation were in good agreement with those of the experiments.

Keywords: Zero Power Reactor, Cadmium Ratio, Manganese Foil, Asymptotic Region, Heavy Water, Neutron Activation

*email: m.esteki@eng.ui.ac.ir



۱. مقدمه

راکتورهای هسته‌ای صفر-قدرت به دلیل داشتن شار نوترونی پایین، قدرت حرارتی بسیار کمی دارند. به دلیل پایین بودن شار نوترون در این راکتورها، می‌توان از مسائلی از قبیل مصرف سوخت، انتقال حرارت و مشکلات جدی فعال شدن میله‌های سوخت، صرف‌نظر کرد. راکتور صفر-قدرت آب سنگین اصفهان از جمله راکتورهای تحقیقاتی موجود در کشور است. این راکتور در سال ۱۳۷۴ با همکاری متخصصان ایرانی و کارشناسان چینی در بخش مهندسی هسته‌ای اصفهان به بهره‌برداری رسید [۱]. در این راکتور، امکان تغییر شبکه‌ی قلب راکتور و انجام آزمایش‌های گوناگون برای یافتن مناسب‌ترین و ایمن‌ترین نوع شبکه و پارامترهای فیزیکی مرتبط وجود دارد، که علت آن، خطی بودن پارامترهای قلب راکتور با مقدار قدرت است [۲، ۳]. یکی از آزمایش‌هایی که در بیش‌تر راکتورهای تحقیقاتی از قبیل راکتورهای کم‌توان و زیربحرانی وجود دارد، امکان‌پذیر بودن اندازه‌گیری نسبت کادمیم است [۴]. با اندازه‌گیری این پارامتر می‌توان ناحیه‌ی با طیف پایدار در راکتور را به دست آورد. هم‌چنین با اندازه‌گیری نسبت کادمیم می‌توان سطح مقطع انتگرالی رزونانسی را به دست آورد [۵-۸]. در این مقاله، با توجه به ضروری بودن مقدار نسبت کادمیم، این پارامتر برای دو گام شبکه‌بندی راکتور اندازه‌گیری شد و از روی آن ناحیه‌ی با طیف پایدار در هر دو گام به دست آمد.

۲. راکتور صفر-قدرت آب سنگین اصفهان

راکتور صفر-قدرت آب سنگین اصفهان از نوع راکتورهای تانکی با کندکننده‌ی آب سنگین است. تانک راکتور از جنس آلومینیم به شعاع ۱۲۰ cm با ضخامت ۱ mm و ارتفاع ۳۰۲ cm است. سوخت راکتور، اورانیم طبیعی فلزی و به شکل میله‌ای است. این راکتور دارای دو میله‌ی ایمنی از جنس کادمیم و دو میله‌ی کنترل از جنس فولاد ضدزنگ است. بازتابنده‌ی جانبی (شعاعی) راکتور از نوع گرافیت با درجه‌ی خلوص هسته‌ای و به ضخامت ۷۵ cm، و بازتابنده‌ی زیرین آن آب سنگین با ارتفاع ۳۰ cm است. فضای بالای قلب راکتور با گاز نیتروژن (برای جلوگیری از کم شدن خلوص آب سنگین) پر شده است، در نتیجه این راکتور بازتابنده‌ی روین ندارد. فشار گاز نیتروژن، بین ۲۵۰ تا ۴۰۰ Pa است. تعداد کانال‌های تابش‌دهی در قلب راکتور

۱۳ عدد است. حداکثر توان راکتور برابر با ۱۰۰ W در شار $10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ است [۹، ۱۰].

همان‌طور که بیان شد، این راکتور مجهز به سیستم میله‌های ایمنی، سیستم میله‌های کنترل و سیستم تخلیه‌ی اضطراری آب سنگین است که در هنگام بروز شرایط بحرانی، چهار میله‌ی کنترل و خروج اضطراری کندکننده، به طور خودکار وارد عمل می‌شوند و کنترل راکتور را به عهده دارند. این راکتور قابلیت انجام آزمایش‌های بحرانی در چهار گام مختلف را دارد. با استفاده از دو جفت شبکه‌ی مربعی (که در بالا و پایین قلب راکتور قرار دارند) می‌توان به چهار گام مختلف ۱۲/۷۳، ۱۸، ۱۴/۱۴ و ۲۰ cm دست یافت. راکتور در گام شبکه‌ی ۱۸ cm شامل ۱۲۴ میله‌ی سوخت، و در گام شبکه ۲۰ cm شامل ۱۱۲ میله‌ی سوخت است. لازم است اشاره نمود از این راکتور برای آموزش پرسنل سازمان انرژی اتمی، دانشجویان و پژوهش‌گران دانشگاه‌ها و مراکز علمی، با اهداف کسب دانسته‌های طراحی راکتور، برپایی مجموعه‌ای بحرانی، انجام آزمایش‌های پایه در زمینه‌ی فیزیک راکتور آب سنگین با سوخت اورانیم طبیعی، بررسی صحت و اعتبارسنجی کدهای هسته‌ای و محاسبات راکتورهای آب سنگین استفاده می‌شود. بنابراین انجام آزمایش‌های گوناگون و محاسبات مختلف با استفاده از این راکتور، سبب افزایش دانش و تجربه‌ی متخصصین در زمینه‌های مختلف می‌شود و پشتیبانی علمی و فنی از نیروگاه‌های هسته‌ساخت، بهره‌برداری و پشتیبانی علمی و فنی از نیروگاه‌های هسته‌ای قدرت و انتقال تکنولوژی هسته‌ای به کشور خواهد بود.

مشخصات غلاف آلومینیمی و سوخت راکتور آب سنگین صفر-قدرت اصفهان در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات غلاف آلومینیمی و سوخت راکتور

مشخصات غلاف آلومینیمی		
چگالی آلومینیم	۲٫۷	g/cm^3
فاصله‌ی بین سوخت و غلاف	۰٫۰۵	cm
شعاع درونی غلاف	۱٫۵۵۵	cm
شعاع بیرونی غلاف	۱٫۶۵۵	cm
مشخصات سوخت		
چگالی سوخت	۱۸٫۸	g/cm^3
قطر سوخت	۳٫۰۱	cm
طول کپسول سوخت	۲۰	cm
طول مؤثر سوخت	۱۶۰	cm
تعداد کپسول در هر میله سوخت	۲۰	عدد

۳. نسبت کادمیم



اندازه گیری شار مطلق نوترون برای تصحیح فعالیت مطلق پولک طلا به حالت نمونه ای که تابع قانون $1/V$ است، نیاز به اندازه گیری نسبت کادمیم طلا در طیف مورد نظر است. نسبت کادمیم از لحاظ ریاضی به صورت رابطه ی (۱) نوشته می شود [۴]:

$$(1) \quad R_{cd}(r) = \frac{A_{bare}(r)}{A_{cd}(r)}$$

که در رابطه ی (۱) داریم:

$$(2) \quad A_{bare}(r) = \int_0^\infty dE \Phi(r, E) \int_0^\infty d\mu \times \mu \times \left(1 - \exp \frac{-\Sigma_a - (E) \times d}{\mu} \right)$$

$$(3) \quad A_{cd}(r) = \int_0^\infty dE \Phi(r, E) \int_0^\infty d\mu \times \mu \times \exp \times \frac{-(\Sigma_{cd}(E) \times t)}{\mu} \left(1 - \exp \frac{-\Sigma_a - (E) \times d}{\mu} \right)$$

خطاهای تجربی در اندازه گیری مقدار نسبت کادمیم عبارتند از: خطای آماری، هندسی و تعیین مقدار فاکتور پراکندگی. خطای آماری معمولاً کمتر از ۲٪ است و خطای هندسی هم با تغییر ضخامت ۱mm به ۱٪ کاهش می یابد. در حالت کلی مقدار خطا در اندازه گیری نسبت کادمیم به ۴ تا ۵٪ می رسد. مقدار فاکتور پراکندگی نیز برای میله ی اورانیومی، با روش Ritchie-Eldridge کمتر از ۰/۸ محاسبه شده است، که قابل چشم پوشی است [۴]. در ضمن در این مقاله، به دلیل این که اندازه گیری های انجام شده با پولک های منگنز- نیکل و شرایط انجام آزمایش (از قبیل تابش دهی و شمارش نمونه ها) کاملاً یکسان است، خطای چندانی وجود ندارد و عمده ی منابع خطا مربوط به آزمایش با پوشش کادمیمی برای پولک های منگنز- نیکل است. در این مورد هم آزمایش دو و سه بار تکرار، و نتایج حاصل از آنها میانگین گیری شد. با این کار، خطا به زیر ۱٪ رسید.

عنصر کادمیم جاذب مناسب برای نوترون های حرارتی است، یعنی تقریباً تمام نوترون های حرارتی که به آن برخورد می کنند را جذب می کند و معمولاً بیش تر نوترون های فوق حرارتی^(۱) را از خود عبور می دهد. انرژی قطع کادمیم^(۲)، مقدار انرژی است که اگر نوترونی با انرژی کم تر از آن به کادمیم برخورد کند، کاملاً جذب آن می شود ولی نوترون هایی با انرژی بیش تر از این مقدار، از آن عبور می کنند. در عمل، انرژی قطع کادمیم بستگی به ضخامت فیلتر آن، طیف راکتور و نمونه ی مورد نظر دارد. به طور تقریبی می توان E_{cd} را حدود ۰/۵ تا ۰/۶eV فرض کرد. اگر نمونه ای با پوشش کادمیم به ضخامت ۰/۵ تا ۱mm در راکتور تحت تابش دهی قرار گیرد، نوترون های حرارتی جذب کادمیم می شوند و تنها برهم کنش نوترون های فوق حرارتی با نمونه صورت می گیرد و این اثر در واقع نشان دهنده ی اهمیت نسبت کادمیم در بررسی مسائل فیزیک راکتور است [۱۱]. البته کادمیم یک فیلتر کاملاً ایده آل نیست، یعنی احتمال عبور نوترون حرارتی از آن وجود دارد. هر چند که این احتمال بسیار کم و قابل صرف نظر است، ولی احتمال جذب نوترون با انرژی فوق حرارتی در آن قابل چشم پوشی نیست و لازم است با عامل F_{cd} تصحیح شود. فاکتور F_{cd} به صورت نسبت فعالیت ناشی از نوترون های فوق حرارتی بدون پوشش کادمیم به فعالیت ناشی از نوترون های فوق حرارتی با پوشش کادمیم تعریف می شود. مقادیر E_{cd} و F_{cd} به طیف نوترون، توزیع زاویه ای، سطح مقطع نمونه (پولک) و کادمیم بستگی دارند. چون در هر دو بهره برداری از راکتور، از پولک های یکسان با پوشش های کادمیم یکسان و با در نظر گرفتن نسبت ها استفاده می شود، بنابراین به فاکتور تصحیح F_{cd} نیازی نیست. البته مقدار F_{cd} بر حسب ضخامت و نوع پولک و ضخامت کادمیم، در مراجع هسته ای موجود است. نسبت کادمیم برای عناصر با رزونانس های مختلف می تواند گاهی اوقات به صورت یکی از پارامترهای اصلی طیف مطالعه قرار شوند. برای به دست آوردن خمیدگی شار نوترون (با کلینگ هندسی) در راستای شعاعی و محوری راکتور و شار مطلق نوترون، اندازه گیری توزیع فضایی نسبت کادمیم برای پولک های طلا، منگنز، ایندیم و غیره، جزء اساسی ترین نیازها است. با اندازه گیری توزیع فضایی نسبت کادمیم، می توان ناحیه ی فیزیکی راکتور را برای محاسبه ی با کلینگ تعیین کرد. هم چنین در

0.6×10^{-7} A تابش دهی شدند. شکل ۱، نحوه‌ی قرار دادن پولک‌ها بر روی یک نگه‌دارنده‌ی آلومینیمی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نحوه‌ی چیدمان پولک‌های منگنز-نیکل برای اندازه‌گیری نسبت کادمیم در راستای محوری راکتور.

در این راکتور، توان با خروجی آشکارساز اتاقک شکافت^(۳) برحسب مُد جریانی کالیبره شده است. مراحل رسیدن به این توان (0.6×10^{-7} A) مشابه آزمایش رسیدن به حالت بحرانی در یک راکتور انجام می‌شود. حدود ۴۰ min پس از پایان تابش دهی و خاموش کردن راکتور و انجام دزیمتری محیطی نوترون و گامای گروه فیزیک بهداشت در سالن راکتور، نمونه‌ها از راکتور خارج می‌شوند. سپس نمونه‌ها از داخل پوشش آلومینیمی خارج، و با سیستم اندازه‌گیری شار نسبی نوترون، شمارش پرتو گاما و بتای نمونه‌ها انجام می‌شود. برای شمارش ذرات بتا از آشکارساز سوسوزن پلاستیکی مدل ORTEC PD-282R با ابعاد $7.6 \times 7.6 \times 3$ cm و برای شمارش ذرات گاما از آشکارساز یدور سدیم NaI(Tl) مدل ORTEC NS 905-4 به ابعاد $7.6 \times 7.6 \times 3$ cm و با قدرت تفکیک انرژی ۸٪، استفاده شده است. شکل ۲، نشان‌دهنده‌ی نحوه‌ی چیدمان سیستم الکترونیکی به همراه آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی و یدور سدیم است.

سپس پولک‌های منگنز-نیکل را در همان موقعیت‌های بیان شده، ولی این بار با پوشش کادمیمی در داخل راکتور قرار داده شد. در بهره‌برداری دیگر از راکتور، نمونه‌های با پوشش کادمیمی به مدت ۲۰ min در توان 0.3×10^{-6} A تحت تابش دهی قرار داده شد. از آن‌جا که طیف راکتور به صورت توزیع ماکسولی، و بیش‌تر نوترون‌ها حرارتی هستند، با قرار دادن نمونه‌ها در پوشش کادمیمی، میزان شار در محل نمونه کاهش زیادی پیدا می‌کند و به منظور جبران این کاهش، باید توان یا به عبارتی شار راکتور را افزایش داد، که این کار با افزایش مقدار آب سنگین داخل راکتور امکان‌پذیر است. تفاوت سطح آب در این دو بهره‌برداری از راکتور، حدود ۳ تا ۴ cm است. این بار نیز ۱ h پس از پایان تابش -

۴. ناحیه‌ی مجانبی یا طیف پایدار

به علت وجود بازتابنده در راکتورها، شار نوترون حرارتی در نزدیکی مرز به میزان قابل توجهی تغییر می‌کند. بنابراین در هنگام برازش و درون‌یابی داده‌های تجربی با تابع توزیع شار راکتور برای پولک‌های برهنه، خطایی به وجود می‌آید. علت این خطا وجود نقاطی خارج از ناحیه‌ی پایداری طیف راکتور است. با حذف این نقاط (نقاطی که نزدیک به بازتابنده قرار دارند)، می‌توان از بروز آن خطا جلوگیری نمود. طبق تعریف، ناحیه‌ای که توزیع شار نوترون در آن، از تئوری پخش تک گروهی پیروی می‌کند، و بازتابنده در آن ناحیه تأثیری ندارد و طیف نوترون پایدار است، ناحیه‌ی مجانبی نامیده می‌شود. برای به دست آوردن این ناحیه، از روش نسبت کادمیم استفاده می‌شود. یعنی در صورتی که نسبت پرتو زایی پولک با پوشش آلومینیم را به فعالیت پولک با پوشش کادمیم را به دست آید [طبق رابطه‌ی (۱)]، مکان‌هایی که در آن این نسبت ثابت باشد، ناحیه مجانبی خواهند بود.

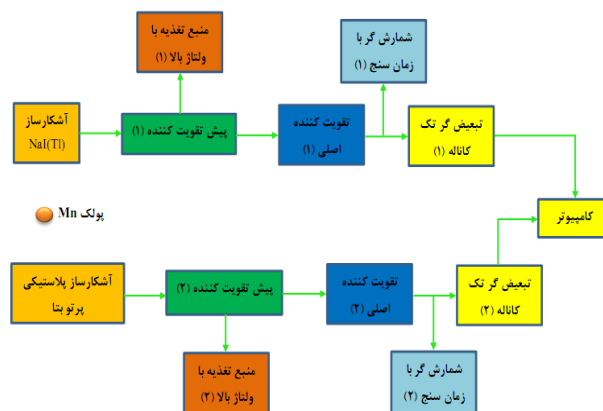
۵. روش اندازه‌گیری نسبت کادمیم

برای اندازه‌گیری نسبت کادمیم در راستای محوری در راکتور آب سنگین صفر-قدرت اصفهان، از تابش دهی دو دسته نمونه، با پوشش کادمیمی و بدون پوشش کادمیم استفاده شده است. برای جلوگیری از وارد شدن هر نوع آلودگی به داخل آب سنگین راکتور، نمونه‌های بدون پوشش کادمیمی درون ظرف‌های آلومینیمی کوچک با مشخصاتی مشابه کادمیم قرار می‌گیرند. از مزایای پوشش‌های آلومینیمی این است که باعث می‌شوند موقعیت مکانی پولک منگنز-نیکل در دو حالت دقیقاً یکسان باشند. هم‌چنین پراکندگی در اطراف نمونه نیز در دو حالت یکسان باشند.

برای شبکه‌بندی ۱۸ cm صفحه‌ی نگه‌دارنده‌ی میله‌های سوخت (گام ۱۸)، ۲۵ عدد پولک منگنز که به صورت آلیاژ منگنز-نیکل هستند، با پوشش آلومینیمی که در فاصله‌ی ۲۹ تا ۱۴۹ cm از کف تانک راکتور و به فاصله‌های مساوی (۵ cm) از هم در گاید تیوب قرار گرفته‌اند، به مدت ۲۵ min در توان



دهی و انجام دزیمتری محیطی نوترون و گاما، نمونه‌ها از راکتور خارج، و پس از برداشتن پوشش کادمیمی، شمارش شده‌اند.



شکل ۲. چیدمان سیستم شمارش برای اندازه‌گیری پرتوزایی پولک.

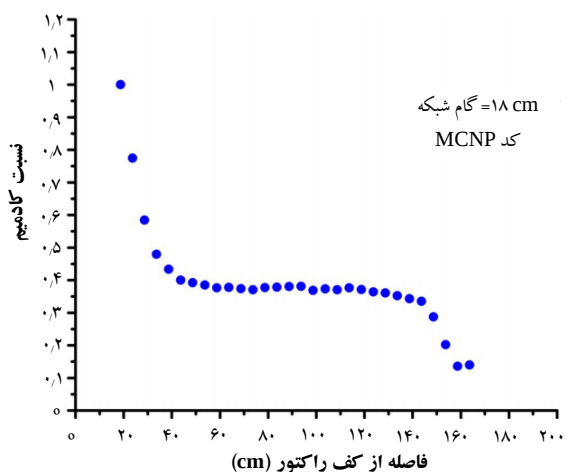
همین دو مرحله بهره‌برداری از راکتور برای شبکه‌بندی ۲۰ cm صفحه‌ی نگه‌دارنده‌ی میله‌های سوخت (گام شبکه‌ی ۲۰) نیز تکرار شد. برای در نظر گرفتن آثار ناشی از تغییر ارتفاع بحرانی راکتور، تغییر دما و سایر پارامترهای متغیر در دو بهره‌برداری راکتور، یعنی در گام‌های ۱۸ و ۲۰ cm از پولک مرجع منگنز- نیکل با پوشش آلومینیم استفاده شده است. لازم است بیان شود که بسته به نوع پوشش استفاده شده برای پولک منگنز، بهره‌برداری‌های متفاوت از راکتور را باید انجام داد. وقتی از پوشش آلومینیمی استفاده می‌شود توان راکتور 0.6×10^{-7} A (خروجی آشکارساز اتاقک شکافت)، معادل با ۶W است، در حالی که وقتی از پوشش کادمیمی استفاده می‌شود، توان راکتور 0.3×10^{-6} A است که معادل با ۳۰W است. علت افزایش توان راکتور در بهره‌برداری دوم به خاطر استفاده کردن پوشش‌های کادمیمی (جذب نوترون‌های حرارتی و کاهش شار نوترونی) و جبران کاهش شار نوترونی است. به همین دلیل است که وقتی از پوشش‌های کادمیمی استفاده می‌شود، میزان ارتفاع آب سنگین به اندازه‌ی ۳ تا ۴ cm افزایش می‌یابد. چون با افزایش ارتفاع آب سنگین میزان کندشدگی افزایش می‌یابد و به دنبال آن با افزایش کندکنندگی، شار نوترون نیز افزایش می‌یابد.

هم چنین برای به دست آوردن پرتوزایی ویژه‌ی هر پولک در پایان تابش دهی از رابطه‌ی (۴) استفاده شده است [۱۲]:

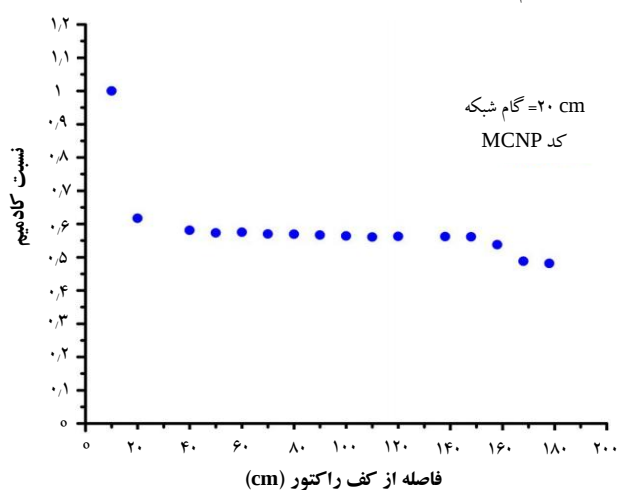
$$(۴) \quad A = \frac{\lambda \times (\text{count} - B.G) e^{\lambda t_d}}{m \times (1 - e^{-\lambda t_{ir}}) \times (1 - e^{-\lambda t_c})}$$

در رابطه‌ی (۴): A پرتوزایی ویژه، $B.G$ شمارش زمینه، m : جرم هر نمونه، λ ثابت واپاشی نمونه، t_d زمان واپاشی هر نمونه، t_c مدت زمان شمارش هر نمونه و t_{ir} مدت زمان تابش دهی نمونه‌ها هستند. لازم به بیان است که در هر بهره‌برداری از راکتور، زمان تابش دهی تمامی نمونه‌ها، t_{ir} یکسان است چون در شرایط یکسانی تحت تابش دهی قرار گرفته‌اند و به طور هم‌زمان نیز از قلب راکتور خارج می‌شوند. اما زمان واپاشی آن‌ها، t_d متفاوت است چون همه‌ی آن‌ها به‌طور هم‌زمان شمارش نمی‌شوند. بنابراین لازم است زمان واپاشی را زمان پایان شمارش تا زمان شروع شمارش برای هر یک در نظر گرفت. چون مدت زمان شمارش

همه‌ی نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است، نیازی به تصحیح مدت زمان شمارش، t_c نیست. طبق آزمایش‌هایی که در راکتور صفر- قدرت آب سنگین اصفهان برای رسیدن به حالت بحرانی انجام شده است، ارتفاع بحرانی آب سنگین، در دو گام ۱۸ و ۲۰ cm به ترتیب برابر با ۱۵۹ و ۱۷۱ cm است. دلیل افزایش ارتفاع ۱۲ cm آب سنگین در گام ۲۰ نسبت به گام ۱۸، افزایش فاصله‌ی سوخت‌ها از هم و کم شدن تعداد میله‌های سوخت است. همان‌طور که از شکل ۳ مشاهده می‌شود، ناحیه‌ی مجانبی که دارای شیب تقریباً ثابتی است، از فاصله‌ی حدود ۴۰ cm از کف تانک راکتور شروع می‌شود و تا ارتفاع ۱۴۰ cm ادامه می‌یابد. ولی در شکل ۴، برای گام ۲۰، ناحیه‌ی با طیف ثابت، همانند گام ۱۸ از فاصله‌ی ۴۰ cm از کف تانک راکتور شروع می‌شود و تا فاصله‌ی حدود ۱۵۹ cm ادامه دارد. یعنی ناحیه‌ی مجانبی در گام ۲۰ نسبت به گام ۱۸، حدود ۱۹ cm افزایش می‌یابد، علت این افزایش زیاد شدن فاصله‌ی سوخت‌ها از هم و افزایش ارتفاع آب سنگین است. هم چنین می‌توان نتیجه گرفت که بازتابنده، نقش کم-تری در گام ۲۰ نسبت به گام ۱۸ بر روی طیف ناحیه‌ی مجانبی دارد. راکتور صفر- قدرت آب سنگین اصفهان با کد مونته کارلوی MCNPX 2.6.0 شبیه‌سازی شد و مقدار نسبت کادمیم برحسب ارتفاع راکتور به دست آمد. شکل‌های ۵ و ۶ نتایج حاصل از شبیه‌سازی با کد MCNPX 2.6.0 برای مقدار نسبت کادمیم به



شکل ۵. مقدار شبیه‌سازی شده‌ی نسبت کادمیم برحسب فاصله از کف تانک راکتور در گام ۱۸ cm با کد MCNPX-0.2.6.

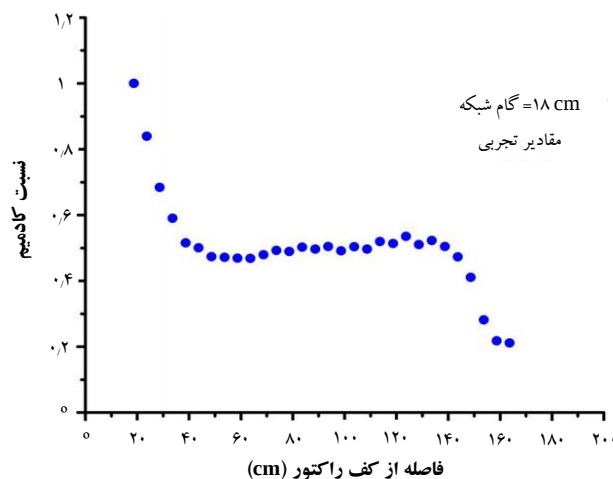


شکل ۶. مقدار شبیه‌سازی شده‌ی نسبت کادمیم برحسب فاصله از کف تانک راکتور در گام ۱۸ cm با کد MCNPX-2.6.0.

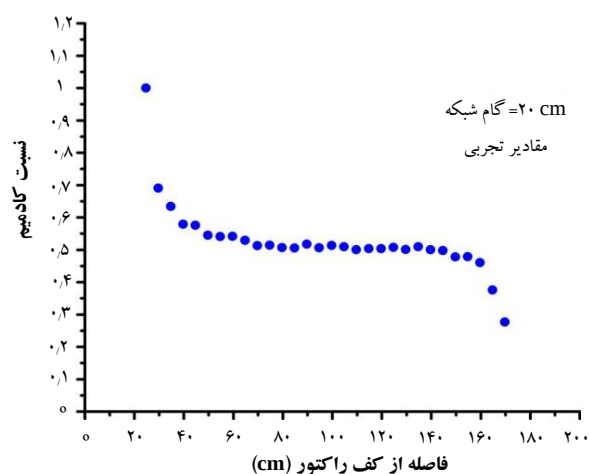
شکل‌های ۷ و ۸ نمای بالایی و جانبی از قلب راکتور صفر- قدرت آب سنگین اصفهان را با استفاده از شبیه‌سازی کد MCNPX-2.6.0 نشان می‌دهند.

شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان‌دهنده‌ی میزان پرتوزایی پولک‌های منگنز- نیکل با پوشش آلومینیمی و کادمیمی نسبت به فاصله از کف تانک راکتور است. این دو منحنی در هر دو گام شبکه‌بندی راکتور، رفتار یکسانی را از خود نشان می‌دهند. نکته‌ی دیگری که باید به آن اشاره کرد آن است که پولک‌های با پوشش کادمیمی به دلیل جذب نوترون‌های حرارتی، میزان پرتوزایی یا به عبارتی شار کم‌تری نسبت به پولک‌های با پوشش آلومینیمی دارند و در هر دو گام ۱۸ و ۲۰ این تفاوت پرتوزایی پولک‌ها با پوشش‌های آلومینیمی و کادمیمی کاملاً مشهود است. هم‌چنین

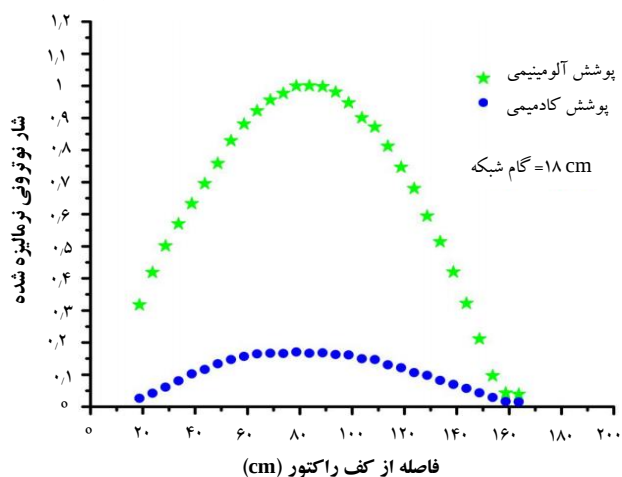
ترتیب برای هر دو گام شبکه‌ی راکتور یعنی ۱۸ و ۲۰ cm است. مقایسه‌ی شکل‌های ۳ تا ۶ نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی و تجربی، رفتار کاملاً یکسانی را از خود برای نسبت کادمیم برحسب ارتفاع راکتور نشان می‌دهند.



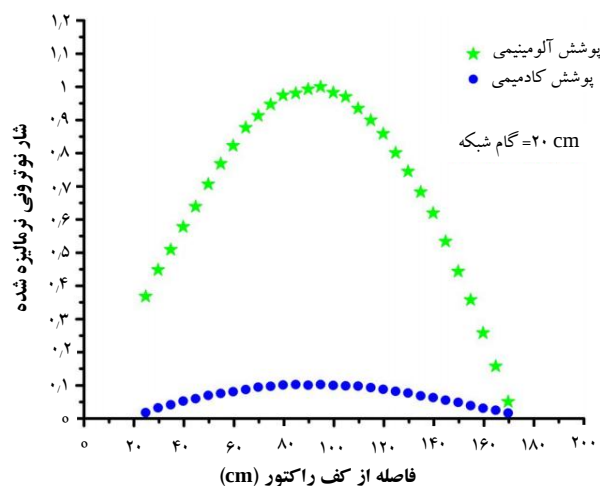
شکل ۳. مقدار تجربی نسبت کادمیم برحسب فاصله از کف تانک راکتور در گام ۱۸ cm.



شکل ۴. مقدار تجربی نسبت کادمیم برحسب فاصله از کف تانک راکتور در گام ۲۰ cm.



شکل ۹. شار نوترونی نرمالیزه شده برحسب فاصله از کف تانک راکتور در گام ۱۸ cm.

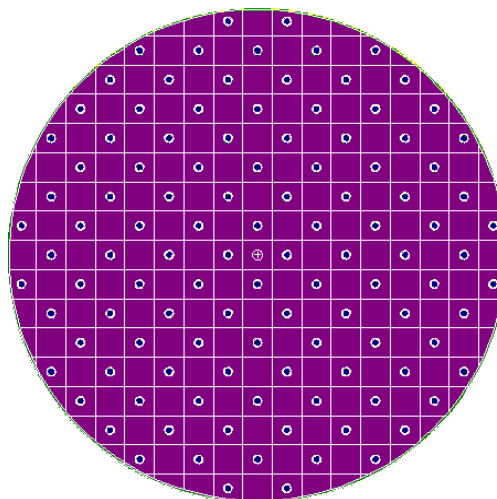


شکل ۱۰. شار نوترونی نرمالیزه شده برحسب فاصله از کف تانک راکتور در گام ۲۰ cm.

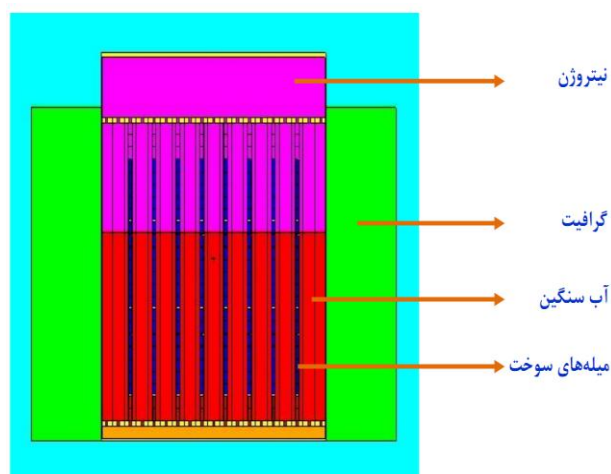
۶. نتیجه‌گیری

در قسمت پایین راکتور صفر- قدرت آب سنگین اصفهان (HWZPR)، نسبت کادمیم افزایش می‌یابد که به دلیل وجود بازتابانگر آب سنگین قرار گرفته در پایین راکتور است. در این ناحیه، جمعیت نوترون‌های حرارتی نزدیک مرز افزایش می‌یابد. همچنین در قسمت بالای راکتور چون بازتابانگری وجود ندارد و سوخت نیز خارج از آب سنگین قرار دارد (ارتفاع بحرانی آب سنگین در هر دو گام کم‌تر از ارتفاع سوخت‌های داخل راکتور است)، تعداد نوترون‌های حرارتی کاهش و جمعیت نوترون‌های سریع افزایش بیش‌تری از خود نشان می‌دهند. بنابراین، نسبت کادمیم در این ناحیه کاهش می‌یابد و رفتار نزولی از خود نشان می‌دهد. نتایج تجربی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی با کد

باید اشاره کرد که چون توان راکتور در هر دو بهره‌برداری متفاوت است، بنابراین شار نوترونی نیز متفاوت است. در این کار، برای این که آثار متفاوت بودن شار نوترونی نیز در نظر گرفته شود، از یک پولک منگنز با پوشش آلومینیمی به عنوان پولک پایش توان^(۴) در هر دو بهره‌برداری از راکتور در یک نقطه‌ی ثابت در داخل راکتور استفاده شده است. به منظور به دست آوردن نسبت کادمیم، تمام پرتوهای پولک‌ها با پوشش کادمیمی و آلومینیمی به پرتوایی پولک پایش توان که برای هر توان متفاوت است تقسیم شده است تا پرتوایی پولک‌ها مستقل از توان راکتور و شار نوترونی باشد.



شکل ۷. نمای بالایی از قلب راکتور صفر- قدرت آب سنگین اصفهان در گام ۲۰ cm با استفاده از کد مونت کارلو MCNPX-2.6.0.



شکل ۸. نمای جانبی از قلب راکتور صفر- قدرت آب سنگین اصفهان در گام ۲۰ cm با استفاده از کد MCNPX-2.6.0.



MCNPX-2.6.0 که تطابق بسیار خوبی با هم دارند، نشان-
دهنده‌ی درستی مطالب بیان شده است.

پی‌نوشت‌ها

مراجع

1. Epi-Thermal
 2. Cadmium Cut-Off Energy
 3. Fission Chamber
 4. Power Monitoring Foil
- [1] AEOI, Safety Analysis Report for Esfahan Heavy Water Reactor, (2013).
 - [2] M. Jalali, M.R. Abdi, M. Mostajaboddavati, Reactor power measurement by gamma and neutron radiation in Heavy Water Zero Power Reactor (HWZPR), *Ann. Nucl. Energy*. **57** (2013) 368–374.
 - [3] M. Jalali, M.R. Abdi, M. Mostajaboddavati, Prompt gamma radiation as a new tool to measure reactor power, *Radiat. Phys. Chem.* **91** (2013) 19-27.
 - [4] H. Kadotani, Measurements of Spatial Distribution of Cadmium Ratio in Heterogeneous lattices, *J. Nucl. Sci. Technol.* **3** (1966) 27-31.
 - [5] M. Karadag, H. Yücel, Measurement of thermal neutron cross section and resonance integral for the $^{174}\text{Yb}(n,\gamma)^{175}\text{Yb}$ reaction by the cadmium ratio method, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B.* **266(11)** (2008) 2549–2555.
 - [6] M. Karadag, Thermal neutron cross section and resonance integral measurements for the $^{133}\text{Cs}(n,\gamma)^{134\text{m}}\text{Cs}$ reaction, *Ann. Nucl. Energy* **62** (2013) 178–183.
 - [7] M.G. Budak, M. Karadag, H. Yücel, Experimental determination of effective resonance energies for $^{158}\text{Gd}(n,\gamma)^{159}\text{Gd}$ and $^{179}\text{Hf}(n,\gamma)^{180\text{m}}\text{Hf}$ reactions, *Ann. Nucl. Energy* **38** (2011) 2550–2556.
 - [8] M.G. Budak, H. Yücel, M. Karadag, M. Tan, Experimental determination of effective resonance energies for the (n,γ) reactions of ^{71}Ga , ^{75}As , ^{164}Dy , ^{170}Er by the cadmium ratio method, *Ann. Nucl. Energy* **35** (2008) 1433–1439.
 - [9] M.N. Nasrabadi, B. Teimouri, A. Moosakhani, Critical heavy water level and some parameters for the HWZPR reactor core using MCNP4c code, *Ann. Nucl. Energy*. **73** (2014) 496–499.
 - [10] A. Moosakhani, M.N. Nasrabadi, B. Timuri, Monte Carlo calculation of the core of the heavy water zero power reactor (HWZPR) using MCNP4c, *Nucl. Eng. Des.* **241** (2011) 1459–1462.
 - [11] J.R. Lamarsh, Introduction to Nuclear Reactor Theory, Addison-Wesley Publishing Company (1966).
 - [12] N. Tsoulfanidis, S. Landsberger, Measurement and Detection of Radiation, CRC Press is a member of Taylor & Francis Group (2015).