

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

اکبر عبدیسرای<sup>۱</sup>، جمشید خورسندی<sup>۲</sup>، محمدحسین استکی<sup>۳</sup>، پروین کاویانی<sup>۲</sup> ۱. گروه مهندسی هستهای، دانشکدهی علوم و فن آوریهای نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷٤۱–۱۷۷٤۸ اصفهان ـ ایران ۲. پژوهشکدهی راکتور، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، صندوق پستی: ۱۵۸۹–۸۱٤۲۵، اصفهان ـ ایران ۳. گروه مهندسی پزشکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۱۳۵۱–۸۱۷۵۸، اصفهان ـ ایران

چکید: اندازه گیری 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 ۲۰۰۳ اندازه گیری شده است. از پولک های منگنز – نیکل برای اندازه گیری نسبت کادمیم استفاده شده است. پرتوزایی پولک ها با آشکارساز سوسوزن پلاستیکی و یدور سدیم برای پرتوهای بتا و گاما به دست آمده است. هم چنین از تغییرات مقدار نسبت کادمیم در راستای محوری راکتور، ناحیهی مجانبی یا طیف پایدار به دست آمده است. طیف ثابت راکتور، در گام ۲۰، تقریبا این مقدار نسبت کادمیم در راستای محوری راکتور، ناحیهی مجانبی یا طیف پایدار به دست آمده است. طیف ثابت راکتور، در گام ۲۰، تقریبا ۱۹۵۳ نسبت به گام ۱۸ افزایش یافته است، که این به دلیل کاهش تعداد میله های سوخت و افزایش ارتفاع بحرانی آب سنگین است. برای بررسی درستی مقادیر تجربی اندازه گیری شده، راکتور صفر – قدرت آب سنگین اصفهان با کد MCNPX-2.6.0 شبیه سازی شد. نتایج حاصل از شبیه سازی و تجربی ساز گاری خوبی با هم داشتند.

**کلیدواژه ها:** را کتور صفر - قدرت، نسبت کادمیم، پولک منگنز، ناحیه ی مجانبی، آب سنگین، فعال سازی 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 Saray<sup>1</sup>, J. Khorsandi<sup>2</sup>, M.H. Esteki<sup>\*3</sup>, P. Kaviani<sup>2</sup>

Department of Nuclear Engineering, Faculty of Advance Sciences and Technologies, University of Esfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan – Iran
 Reactor Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute, P.O.Box: 81465-1589, Isfahan – Iran
 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

m.estaki@eng.ui.ac.ir



#### ۱. مقدمه

راکتورهای هستهای صفر – قدرت به دلیل داشتن شار نوترونی پايين، قدرت حرارتي بسيار كمي دارند. به دليل پايين بودن شار نوترون در این راکتورها، می توان 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. ایس راکتور در سال ۱۳۷۴ با همکاری متخصصان ایرانی و کارشناسان چینی در بخش مهندسی هستهای اصفهان به بهره-برداري رسيد [۱]. در اين راکتور، امکان تغيير شبکهي قلب راکتور و انجام آزمایش های گوناگون برای یافتن مناسب تـرین و ايمن ترين نوع شبكه و پارامترهاي فيزيكي مرتبط وجود دارد، كه علت آن، خطی بودن پارامترهای قلب راکتور با مقدار قدرت است [۲، ۳]. یکی از آزمایش هایی که در بیش تر راکتورهای تحقيقاتي از قبيل راكتورهاي كم توان و زيربحراني وجود دارد، امکان پذیر بودن اندازه گیری نسبت کادمیم است [۴]. با اندازه-گیری این پارامتر می توان ناحیهی با طیف پایدار در راکتور را به دست آورد. همچنین با اندازه گیری نسبت کادمیم می توان سطح مقطع انتگرالی رزونانسی را به دست آورد [۵–۸]. در این مقاله، با توجه به ضروري بودن مقدار نسبت كادميم، اين يارامتر براي دو گام شبکهبندی راکتور اندازه گیری 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 کندکننده یآب سنگین است. تانک راکتور از جنس آلومینیم به شعاع ۲۰۰۳ با ضخامت ۱۳۳ و ارتفاع ۳۰۲ س است. سوخت راکتور، اورانیم طبیعی فلزی و به شکل میله ای است. این راکتور دارای دو میله یایمنی از جنس کادمیم و دو میله یکنترل از جنس فولاد ضدزنگ است. بازتابنده ی جانبی (شعاعی) راکتور از نوع گرافیت با درجه ی خلوص هسته ای و به ضخامت ۷۵۲۳ و بازتابنده ی زیرین آن آب سنگین با ارتفاع ۲۰ cm است. فضای بالای قلب راکتور با گاز نیتروژن (برای جلو گیری از کم شدن خلوص آب سنگین) پر شده است، در نتیجه این راکتور بازتابنده ی رویین ندارد. فشار گاز نیتروژن، بین

۱۳ عـدد است. حـداکثر تـوان راکتـور برابـر بـا ۱۰۰%در شـار ۱۰<sup>۹</sup> n/cm<sup>۲</sup>.s.

همانطور که بیان شد، این راکتور مجهز به سیستم میلـههـای ایمنی، سیستم میله های کنترل و سیستم تخلیهی اضطراری آب سنگين است كه در هنگام بروز شرايط بحراني، چهار ميلهي کنترل و خروج اضطراری کندکننده، به طور خودکار وارد عمل می شوند و کنترل راکتور را به عهده دارند. این راکتور قابلیت انجام آزمایش های بحرانی در چهار گام مختلف را دارد. با استفاده از دو جفت شبکهی مربعی (که در بالا و پایین قلب راکتور قرار دارند) می توان به چهار گام مختلف ۱۲٬۷۳، ۱۸، ۱۴٬۱۴ و ۲۰cm دست یافت. راکتور در گام شبکهی ۱۸cm شامل ۱۲۴ میلهی سوخت، و در گام شبکه ۲۰cm شامل ۱۱۲میلهی سوخت است. لازم است اشاره نمود از این راکتور برای آموزش پرسنل سازمان انرژی اتمی، دانشجویان و پژوهش-گران دانشگاهها و مراکز علمی، با اهداف کسب دانسته های طراحي راكتور، برپايي مجموعهاي بحراني، انجام آزمايش هاي پایه در زمینهی فیزیک راکتور آب سنگین با سوخت اورانیم طبیعی، بررسی صحت و اعتبارسنجی کیدهای هستهای و محاسبات راکتورهای آب سنگین استفاده می شود. بنابراین انجام آزمایش های گوناگون و محاسبات مختلف با استفاده از این راکتور، سبب افزایش دانش و تجربهی متخصصین در زمینههای مختلف میشود و پشتوانهی بسیار خوبی در زمینهی طراحی، ساخت، بهرهبرداری و پشتیبانی علمی و فنی از نیروگاههای هسته-ای قدرت و انتقال تکنولوژی هستهای به کشور خواهد بود. مشخصات غلاف آلومينيمي و سوخت راكتور آب سنگين صفر – قدرت اصفهان در جدول ۱ ارائه شده است.

و سوخت راکتور	، آلومینیمی	مشخصات غلاف	۱.	جدول
---------------	-------------	-------------	----	------

مشخصات غلاف آلومينيمي				
g/cm <sup>°</sup>	۲٫۷	چگالی آلومینیم		
cm	۰٬۰۵	فاصلهی بین سوخت و غلاف		
cm	۱,۵۵۵	شعاع دروني غلاف		
cm	1,800	شعاع بيروني غلاف		
مشخصات سوخت				
g/cm <sup>*</sup>	۱۸٫۸	چگالی سوخت		
cm	۳٬۰۱	قطر سوخت		
cm	۲.	طول كپسول سوخت		
cm	18.	طول مؤثر سوخت		
عدد	۲.	تعداد کپسول در هر میله سوخت		

۳. نسبت کادمیم

عنصر کادمیم جاذب مناسب بـرای نـوترون.هـای حرارتـی است، يعنى تقريباً تمام نوترونهاي حرارتي كه به آن برخورد مي كنند را جذب می کند و معمولاً بیش تر نو ترون های فوق حرار تی (۱) را از خود عبور میدهد. انرژی قطع کادمیم (۲)، مقدار انرژی است که اگر نوترونی با انرژی کم تر از آن به کادمیم برخورد کند، کاملاً جذب آن میشود ولی نوترونهایی با انرژی بیش تر از این مقدار، از آن عبور میکنند. در عمل، انرژی قطع کادمیم بستگی به ضخامت فیلتر آن، طیف راکتور و نمونهی مورد نظر دارد. به طور تقریبی می توان E<sub>cd</sub> را حدود ۰٫۵ تا ۶eV فرض کرد. اگر نمونهای با پوشش کادمیم به ضخامت ۰٫۵ تا nm ۱ 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 [11]. البته کادمیم يك فيلتر كاملاً ايده آل نيست، يعنى احتمال عبور نوترون حرارتی از آن وجود دارد. هر چند که این احتمال بسیار کم و قابل صرف نظر است، ولى احتمال جذب نوترون با انرژى فوق حرارتی در آن قابل چشمپوشی نیست و لازم است با عامل F<sub>cd</sub> تصحيح شود. فاكتور F<sub>cd</sub> به صورت نسبت فعاليت ناشي از نوترونهای فوق حرارتی بدون پوشش کادمیم به فعالیت ناشی از نوترونهای فوقحرارتی با پوشش کادمیم تعریف میشود. مقادیر E<sub>cd</sub> و F<sub>cd</sub> به طیف نوترون، توزیع زاویهای، سطح مقطع نمونه (پولک) و کادمیم بستگی دارند. چون در هر دو بهرهبرداری از راکتور، از پولکهای یکسان با پوشش های کادمیم یکسان و با در نظر گرفتن نسبت ها استفاده می شود، بنابراین به فاکتور تصحيح F<sub>cd</sub> نيازى نيست. البته مقدار F<sub>cd</sub> بر حسب ضخامت و نوع پولک و ضخامت کادمیم، در مراجع هستهای 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 (باکلینگ 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 ناحیهی فیزیکی راکتور را برای محاسبهی باکلینگ تعیین کرد. همچنین در

اندازه گیری شار مطلق نوترون برای تصحیح فعالیت مطلق پولک طلا به حالت نمونه ی که تابع قانون ۱/۷ است، نیاز به اندازه-گیری نسبت کادمیم طلا در طیف مورد نظر است. نسبت کادمیم از لحاظ ریاضی به صورت رابطهی (۱) نوشته می شود [۴]:

(۱)  

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

$$E = \int_{0}^{\infty} dE \Phi(r, E) \int_{0}^{1} d\mu \times \mu \times \left(1 - \exp \frac{-\Sigma_{a} - (E) \times d}{\mu}\right)$$

A

(٢)

$$A_{\rm ed}(r) = \int_{0}^{\infty} dE \,\Phi(r, E) \int_{0}^{1} d\mu \times \mu \times \exp \times \frac{-(\Sigma_{\rm ed}(E) \times t)}{\mu} \left( 1 - \exp \frac{-\Sigma_{\rm e} - (E) \times d}{\mu} \right)$$
(**Y**)

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 ۱۳۳۱ به ۱٪ کاهش مییابد. در حالت کلی مقدار خطا در اندازه گیری نسبت کادمیم به ۴ تا ۵٪ می رسد. مقدار فـاکتور پراکنـدگی نیـز بـرای میلـه ی اورانیمـی، بـا روش فـاکتور پراکنـدگی نیـز بـرای میلـه ی اورانیمـی، بـا روش چشم پوشی است [۴]. در ضمن در این مقاله، به دلیل این که اندازه گیری های انجام شده با پولکهای منگنز – نیکل و شرایط انجام آزمایش (از قبیل تابش دهی و شمارش نمونهها) کاملاً یکسان است، خطای چندانی وجود ندارد و عمدهی منابع خطا مربـوط بـه آزمایش با پوشـش کـادمیمی بـرای پولـکهای 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.

### ٤. ناحیهی مجانبی یا طیف پایدار

به علت وجود بازتابنده در راکتورها، شار نوترون حرارتی در نزدیکی مرز به میزان قابل توجهی تغییر می کند. بنابراین در هنگام برازش و درونیابی دادههای تجربی با تابع توزیع شار راکتور برای پولکهای برهنه، خطایی به وجود می آید. علت این خطا وجود نقاطی خارج از ناحیهی پایداری طیف راکتور است. با حذف این نقاط (نقاطی که نزدیک به بازتابنده قرار دارند)، می-توان از بروز آن خطا جلوگیری نمود. طبق تعریف، ناحیهای که توزیع شار نوترون در آن، از تئوری پخش تک گروهی پیروی می کند، و بازتابنده در آن ناحیه تأثیری ندارد و طیف نوترون این ناحیه، از روش نسبت کامیده می شود. برای به دست آوردن یولک با پوشش کادمیم را به دست آید [طبق رابطهی (۱)]، مکانهایی که در آن این نسبت ثابت باشد، ناحیه مجانبی خواهند پولک با پوشش کادمیم را به دست آید [طبق رابطهی (۱)]،

## ٥. روش اندازه گیری نسبت کادمیم

برای اندازه گیری 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، نمونه های بدون پوشش کادمیمی درون ظرف های آلومینیمی کوچک با مشخصاتی مشابه کادمیم قرار می گیرند. از مزایای پوشش های آلومینیمی این است که باعث می شوند موقعیت مکانی پولک منگنز – نیکل در دو حالت دقیقاً یکسان باشند. هم چنین پراکندگی در اطراف نمونه نیز در دو حالت یکسان باشند.

برای شبکهبندی ۱۸cm 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 ۱۴۹cm از کف تانک راکتور و به فاصلههای مساوی (۵cm) از هم در گاید تیوب قرار گرفتهاند، به مدت ۲۵min در توان

A<sup>۷-۲</sup>۸×۶۰ تـابشدهـی شـدند. شـکل ۱، نحـوهی قـرار دادن پولکها بر روی یک نگهدارندهی آلومینیمی را نشان میدهد.



**شکل ۱.** نحوهی چیدمان پولکه های منگنز – نیکل بـرای انـدازه گیـری نسبت کادمیم در راستای محوری راکتور.

در این راکتور، توان با خروجی آشکارساز اتاقک شکافت (") برحسب مُد جرياني كاليبره شده است. مراحل رسيدن به اين توان (۰،۶×۱۰<sup>-۷</sup> A) مشابه آزمایش رسیدن به حالت بحرانی در یک راکتور انجام میشود. حدود ۴۰min پس از پایان تابشدهی و خاموش کردن راکتور و انجام دزیمتری محیطی نوترون و گامای گروه فیزیک بهداشت در سالن راکتور، نمونهها از راکتور خارج مىشوند. سپس نمونەھا از داخل پوشش آلـومينيمي خـارج، و بـا سیستم اندازه گیری شار نسبی نوترون، شمارش پرتو گاما و بتای نمونهها انجام می شود. برای شمارش ذرات بتا از آشکارساز سوسوزن پلاستیکی مدل ORTEC PD-282R با ابعاد v/۶×۷/۶cm (m×۳ in) و برای شمارش ذرات گاما از آشکارساز یدور سدیم (NaI(Tl مدل ORTEC NS 905-4 به ابعاد ۳۲۳۳ (۱۲in) ۷/۶×۰/۳cm و با قدرت تفکیک انرژی ۸/، استفاده شده است. شکل ۲، نشاندهندهی نحوهی چیدمان سیستم الکترونیکی به همراه آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی و یـدور سديم است.

سپس پولک های منگنز – نیکل را در همان موقعیت های بیان شده، ولی این بار با پوشش کادمیمی در داخل راکتور قرار داده شد. در بهرهبرداری دیگر از راکتور، نمونه های با پوشش کادمیمی به مدت ۲۰min در توان ۲<sup>4</sup> ۲۰۲× ۲۰ تحت تابش دهی قرار داده شد. از آنجا که طیف راکتور به صورت توزیع ماکسولی، و بیش تر نو ترون ها حرارتی هستند، با قرار دادن نمونه ها در پوشش کادمیمی، میزان شار در محل نمونه کاهش زیادی پیدا می کند 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 امکان پذیر است. تفاوت سطح آب در این دو به مرهبرداری از راکتور، حدود ۳ تا ۴cm است. این بار نیز ۱۴ پس از پایان تابش

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 اندازه گیری پرتوزایی پولک.

همین دو مرحله بهرهبرداری از راکتور برای شبکهبندی ۲۰cm صفحهی نگهدارندهی میلههای سوخت (گام شبکهی ۲۰) نیز تکرار شد. برای در نظر گرفتن آثار ناشی از تغییر ارتفاع بحراني راکتور، تغيير دما و ساير پارامترهاي متغير در دو بهره-برداری راکتور، یعنی در گامهای ۱۸ و ۲۰cm 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، بهرهبرداری های متفاوت از راکتور را باید انجام داد. وقتی از پوشــش آلــومينيمي اســـتفاده مــيشــود تــوان راكتــور A ··· (خروجي آشكارساز اتاقك شكافت)، معادل با ۶W است، در حالی که وقتی از پوشـش کـادمیمی اسـتفاده مـی-شود، توان راکتور A ۰/۰۰×۳۰ است که معادل با ۳۰W است. علت افزایش توان راکتور در بهرهبرداری دوم به خاطر استفاده کردن پوشـش.هـای کـادمیمی (جـذب نـوترون.هـای حرارتـی و کاهش شار نوترونی) و جبران کاهش شار نوترونی است. به همین دلیل است که وقتی از پوشش های کادمیمی استفاده می-شود، میزان ارتفاع آب سنگین به اندازهی ۳ تا ۴cm افزایش می-يابد. چون با افزايش ارتفاع آب سنگين ميزان كندشدگي افزايش مى يابد و به دنبال آن با افزايش كندكنند كي، شار نوترون نيز افزایش می یابد.

همچنین برای به دست آوردن پرتوزایی ویژهی هر پولک در پایان تابشدهی از رابطهی (۴) استفاده شده است [۱۲]:

(F)  $A = \frac{\lambda \times (count - B.G) e^{\lambda d}}{m \times (1 - e^{-\lambda t_{ir}}) \times (1 - e^{-\lambda t_{c}})}$ 

لازم به بیان است که در هر بهرهبرداری از راکتور، زمان تابش دهی تمامی نمونه ها، t<sub>ir</sub> یکسان است چون در شرایط یکسانی تحت تابش دهی قرار گرفته اند و به طور همزمان نیز از قلب راکتور خارج می شوند. اما زمان واپاشی آن ها، t<sub>a</sub>، متفاوت است چون همه ی آن ها به طور همزمان شمارش نمی شوند. بنابراین لازم است زمان واپاشی را زمان پایان شمارش تا زمان شروع شمارش برای هر یک در نظر گرفت. چون مدت زمان ش

همهی نمونه ها یکسان در نظر گرفته شده است، نیازی به تصحیح مدت زمان شمارش، t<sub>c</sub>، نیست. طبق آزمایش هایی که در راکتور صفر – قدرت آب سنگین اصفهان برای رسیدن به حالت بحرانی انجام شده است، ارتفاع بحرانبی آب سنگین، در دو گام ۱۸ و ۲۰ cm به ترتیب برابر با ۱۵۹و ۱۷۱cm است. دلیل افزایش ارتفاع ۱۲cm آب سنگین در گام ۲۰ نسبت به گام ۱۸، افزایش فاصلهی سوختها از هم و کم شدن تعداد میله های سوخت است. همان طور که از شکل ۳ مشاهده می شود، ناحیه ی مجانبی که دارای شیب تقریباً ثابتی است، از فاصلهی حدود ۴۰cm از کف تانک راکتور شروع می شود و تا ارتفاع ۱۴۰cm ادامه می-یابد. ولی در شکل ۴، برای گام ۲۰، ناحیهی با طیف ثابت، همانند گام ۱۸ از فاصلهی ۴۰cm از کف تانک راکتور شروع می شود و تا فاصلهی حدود ۱۵۹cm ادامه دارد. یعنی ناحیهی مجانبی در گام ۲۰ نسبت به گام ۱۸، حدود ۱۹cm افزایش می یابد، علت این افزایش زیاد شدن فاصلهی سوخت ها از هم و افزایش ارتفاع آب سنگین است. همچنین می توان نتیجه گرفت که باز تابنده، 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 شبیه سازی شد و مقدار نسبت کادمیم بر حسب ارتفاع راکتور به دست آمد. شکل های ۵ و ۶ نتایج حاصل از شبیه سازی با کد MCNPX 2.6.0 برای مقدار نسبت کادمیم به

ترتیب برای هر دو گام شبکهی راکتور یعنی ۱۸ و ۲۰cm است. مقایسهی شکل های 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 ۴.** مقدار تجربی نسبت کادمیم برحسب فاصله از کف تانک راکتـور در گام ۲۰ cm.



راکتور در گام cm ۱۸ با کد MCNPX-2.6.0.

شـکلهـای ۷و ۸ نمـای بـالایی و جـانبی از قلـب راکتـور صفر – قدرت آب سنگین اصفهان را با استفاده از شبیهسـازی کـد MCNPX-2.6.0 نشان میدهند.

شکل های ۹ و ۱۰ نشاندهنده ی میزان پر توزایی پولکه های 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. نکته ی دیگری که باید به آن اشاره کرد آن است که پولکه های با پوشش کادمیمی به دلیل جذب نوترونهای حرارتی، میزان پر توزایی یا به عبارتی شار کم تری نسبت به پولکه های با پوشش آلومینیمی دارند و در هر دو گام ۱۸ و ۲۰ این تفاوت پر توزایی پولکه ها با

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<sup>(۴)</sup> در هر دو بهرهبرداری از راکتور در یک نقطهی ثابت در داخل راکتور استفاده شده است. به منظور به دست آوردن نسبت کادمیم، تمام پرتوزایی های پولک ها با پوشش کادمیمی و آلومینیمی به پرتوزایی پولک پایش توان که برای هر توان متفاوت است تقسیم شده است تا پرتوزایی پولکها



**شکل ۲.** نمای بالایی از قلب راکتور صفر-قدرت آب سنگین اصفهان در گام ۲۰ ۲۲ استفاده از کد مونته کارلو MCNPX-2.6.0.



شکل ۸. نمای جانبی از قلب راکتور صفر−قدرت آب سنگین اصفهان در گام ۲۰ ۲۱ استفاده از کد MCNPX-2.6.0.



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



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

## ۲. نتیجه گیری

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 بیش تری از خود نشان میدهند. بنابراین، نسبت کادمیم در این ناحیه کاهش مییابد و رفتار نزولی از خود نشان

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

پینوشتھا

- مراجع
- [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 <sup>174</sup>Yb  $(n,\gamma)$  <sup>175</sup>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  $^{133}Cs(n, \gamma)$   $^{134m}Cs$  reaction, *Ann. Nucl. Engergy* **62** (2013) 178–183.
- [7] M.G. Budak, M. Karadag, H. Yücel, Experimental determination of effective resonance energies for <sup>158</sup>Gd  $(n,\gamma)$  <sup>159</sup>Gd and 179<sup>179</sup> Hf  $(n,\gamma)$  <sup>180m</sup>Hf reactions, *Ann. Nucl. Energy* **38** (2011) 2550–2556.

- 2. Cadmium Cut-Off Energy
- 3. Fission Chamber

1. Epi-Thermal

4. Power Monitoring Foil



- [8] M.G. Budak, H. Yucel, M. Karadag, M. Tan, Experimental determination of effective resonance energies for the  $(n, \gamma)$  reactions of <sup>71</sup>Ga, <sup>75</sup>As, <sup>164</sup>Dy, <sup>170</sup>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).