



## بررسی اثر همپوشانی میله های کنترل و ایمنی در گام جدید راکتور HWZPR طبق نتایج شبیه سازی و تجربی

کاوایانی، پروین\* - عسگری، افروز - خورسندی، جمشید

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

### چکیده

راکتور صفر قدرت آب سنگین اصفهان، یک راکتور تحقیقاتی با توان پایین با قابلیت بهره‌برداری در چهار گام مختلف می‌باشد. پارامترهای فیزیکی این راکتور در گام ۱۸ (Cm) اندازه‌گیری شده است. به منظور بررسی این پارامترها در گام‌های دیگر، اخیراً گام شبکه از ۱۸ به ۲۰ سانتیمتر تغییر کرده است. به منظور بررسی بحرانیت و ایمنی قلب جدید، ساختار جدید با کد محاسباتی MCNP شبیه‌سازی و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه شده است. طبق نتایج به دست آمده، ارزش هر میله ایمنی و کنترل به ترتیب بیشتر از  $1\% \Delta K/K$  و کمتر از  $0.2\% \Delta K/K$  می‌باشد. تاثیر یک میله کنترل و ایمنی به ترتیب بر ارزش میله کنترل و ایمنی دیگر (اثر همپوشانی و غیر هم پوشانی) نیز براساس نتایج تجربی و شبیه سازی بررسی گردید.

کلید واژه: راکتور صفر قدرت آب سنگین، گام شبکه، کد MCNP، ارزش راکتیویته، اثر

### Investigation of the control and safety rods shadowing for HWZPR based on simulation and experimental calculations

Kaviani, Parvin<sup>1,\*</sup>; Asgari, Afroz<sup>1</sup>; Khorsandi, Jamshid<sup>1</sup>

NSTRI, P.O.Box 81465/1589, Isfahan, Iran

#### Abstract:

The heavy water zero power reactor (HWZPR) is a low power research reactor which can be arranged in four lattice pitches. The lattice pitch of the core has been recently changed from 18 cm to 20 cm. The physical parameters of this reactor were measured in lattice pitch of 18 cm. In order to investigate criticality and safety of the new core, its configuration has been simulated by MCNP-4C code and some of the important reactor physics parameters have been calculated and experimentally measured. The experimental and calculated physical parameters in HWZPR are compared. The reactivity worth of each safety rod is higher than  $1\% \Delta K/K$  and the reactivity worth of each control rod is less than  $0.2\% \Delta k/k$ . In addition, the shadowing and anti-shadowing effect are investigated.

Key words: HWZPR, Lattice Pitch, MCNP, reactivity worth, shadowing effect, anti-shadowing effect.



راکتور صفر قدرت آب سنگین اصفهان از نوع راکتورهای تانکی با کندکننده آب سنگین و سوخت اورانیوم فلزی طبیعی است. مطالعاتی بر روی راکتور در گام ۱۸ سانتیمتر و سوخت ترکیبی انجام شده است [۱]. در حال حاضر گام شبکه به ۲۰ سانتیمتر با ۱۱۲ میله سوخت تغییر کرده است. به منظور کنترل راکتور از دو میله کنترل و دو میله ایمنی استفاده شده که باید ارزش هر میله ایمنی و کنترل به ترتیب بیشتر از  $\Delta K/K$  ۱٪ و کمتر از  $\Delta K/K$  ۰/۲٪ باشد [۲]. از آنجا که اندازه‌گیری ارزش راکتیویته میله‌های جاذب نوترون در راکتور، از اهمیت خاصی برخوردار است، لذا قبل از گذر به حالت بحرانی و فوق بحرانی، بایستی ارزش این میله‌ها را در شرایط زیر بحرانی اندازه‌گیری نمود. ارزش هر میله به محل قرارگیری میله‌ی دیگر بستگی دارد، به طوری که وقتی میله کنترل و یا ایمنی وارد قلب می‌گردد، نوترون‌های مجاورش را جذب نموده و باعث اغتشاش در توزیع شار نوترون می‌گردد. برای توصیف تاثیر یک میله بر روی ارزش راکتیویته میله دیگر از اصطلاح همپوشانی<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. در صورتی که ارزش راکتیویته دو میله کمتر از مجموع ارزش هر کدام به تنهایی باشد، میله‌ها در ناحیه همپوشانی قرار گرفته‌اند. این حالت موقعی اتفاق می‌افتد که دو میله در نزدیکی هم قرار گرفته و به علت وجود یک میله، شار در محل میله دیگر کاهش یابد. با افزایش فاصله دو میله از یکدیگر، میله در مکانی قرار می‌گیرد که ناحیه غیرهمپوشانی<sup>۲</sup> است. در این ناحیه میله کنترل در مکانی قرار می‌گیرد که به علت وجود میله کنترل دیگر، شار نوترون نسبت به حالت clean core افزایش یافته است. در این شرایط، نصف ارزش راکتیویته دو میله با هم بزرگتر از مجموع ارزش تک تک میله‌ها است [۳]. هدف از این مطالعه اندازه‌گیری ارزش راکتیویته آب سنگین، میله کنترل و ایمنی از طریق MCNP و مقایسه با داده‌های تجربی و هم‌چنین بررسی پدیده همپوشانی و غیرهمپوشانی میله‌های کنترل و ایمنی است.

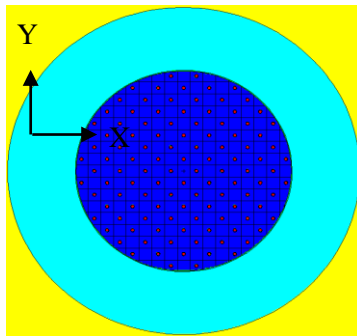
## ۲. روش کار

### ۱-۲. شبیه سازی مونت کارلو

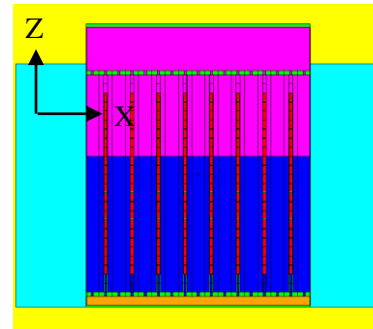
در ابتدا قلب راکتور با شبکه مربعی و گام ۲۰ سانتیمتر از طریق کد MCNP شبیه سازی گردید. شکل ۱ الف و ب به ترتیب نمای محوری و شعاعی از قلب راکتور شبیه سازی شده را نمایش می‌دهد. میله ایمنی از جنس کادمیوم با قطر خارجی ۵۲ و طول فعال ۲۰۳۰ میلیمتر و میله کنترل از جنس استیل ضد زنگ (1Cr18Ni9Ti) با قطر خارجی ۳۵ و طول کل ۲۵۰۰ میلیمتر، شبیه سازی گردید، شکل ۲ و ۳ به ترتیب نمایی از دو میله ایمنی و دو میله کنترل و موقعیت قرارگیری آنها در قلب راکتور را نمایش می‌دهد.

<sup>1</sup> Shadowing

<sup>2</sup> Antishadowing

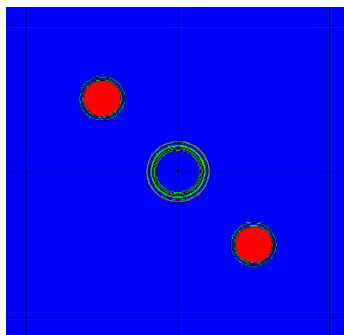


(ب)



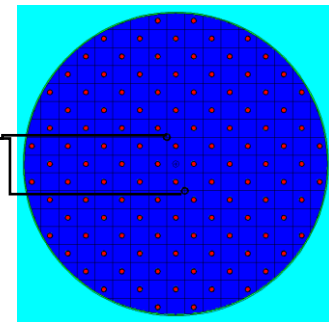
(الف)

شکل ۱. (الف). نمای محوری (ب). نمایی شعاعی از قلب راکتور شبیه سازی شده با کد MCNP.



(ب)

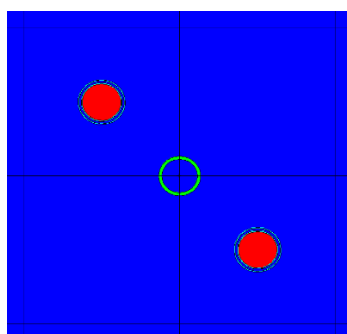
مکان قرارگیری میله های  
ایمنی در قلب راکتور



(الف)

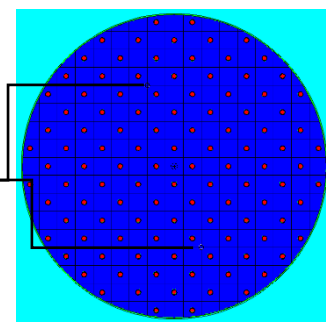
شکل ۲. (الف). موقعیت قرارگیری میله های ایمنی در قلب HWZPR (ب). نمایی افقی از موقعیت یک میله

ایمنی در مجاورت دو میله سوخت شبیه سازی شده با کد MCNP.



(ب)

مکان قرارگیری میله های  
کنترل در قلب راکتور



(الف)

شکل ۳. (الف). موقعیت قرارگیری میله های کنترل در قلب HWZPR (ب). نمایی افقی از موقعیت یک میله

کنترل در مجاورت دو میله سوخت شبیه سازی شده با کد MCNP.

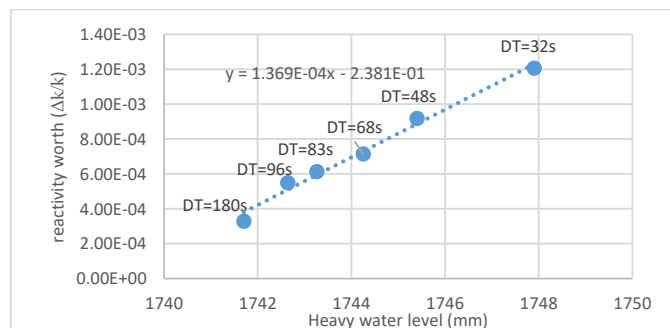


در راه اندازی راکتور، ارتفاع بحرانی در حالت زیر بحرانی (روش برون‌یابی) محاسبه می‌شود و پس از آن، ارزش دو میله ایمنی و کنترل در  $K_{eff} = 0.996$  محاسبه می‌گردد. به منظور اندازه‌گیری ارزش آب و ارتفاع بحرانی در حالت فوق بحرانی (روش درون‌یابی)، ارتفاع آب افزایش می‌یابد و راکتور به شرایط فوق بحرانی می‌رسد [۴].

### ۳. نتایج

#### ۳-۱. محاسبه ارزش راکتیویته آب سنگین از طریق تجربی و شبیه‌سازی

به منظور اندازه‌گیری ارزش راکتیویته آب سنگین از طریق تجربی، با افزایش ارتفاع آب سنگین به بیش از ارتفاع بحرانی، راکتور با پریودهای مختلف به حالت فوق بحرانی می‌رود و در هر ارتفاع، پریود دو برابر شدن توان با استفاده از سیستم اندازه‌گیری توان به دست می‌آید. با توجه به رابطه بین راکتیویته و پریود دو برابر شدن توان، راکتیویته متناظر با هر ارتفاع فوق بحرانی محاسبه می‌گردد. این آزمایش سه مرتبه انجام شده و میانگین نتایج آورده شده است. نمودار ارزش راکتیویته آب سنگین برحسب ارتفاع آب سنگین محاسبه و در شکل ۴ نشان داده شده است. طبق شیب نمودار شکل ۴ ارزش راکتیویته آب سنگین در ارتفاع بحرانی  $(\Delta k/k/cm)$  ۰/۰۰۱۳۷ است.



شکل ۴. ارزش راکتیویته آب سنگین برحسب ارتفاع آب سنگین محاسبه شده از طریق تجربی.

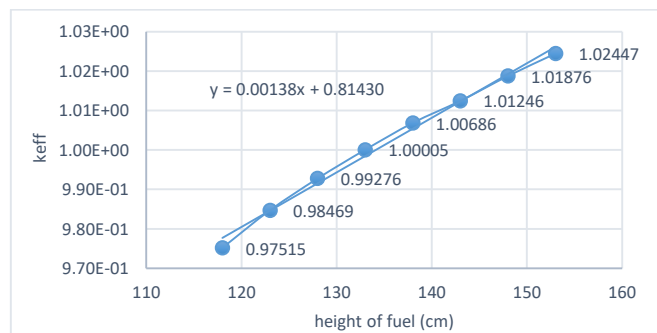
به منظور محاسبه ارزش راکتیویته آب سنگین توسط کد محاسباتی MCNP، پس از شبیه‌سازی جزئیات راکتور، تغییرات ضریب تکثیر موثر با تغییر ارتفاع آب سنگین محاسبه گردید. در شکل ۵ نمودار تغییرات ضریب تکثیر موثر برحسب ارتفاع سوخت نشان داده شده است. فاصله انتهای سوخت تا کف تانک ۳۵ سانتی‌متر است و این ناحیه به عنوان بازتابانگر عمل می‌کند. بنابراین طبق نمودار زیر ارتفاع بحرانی آب سنگین برابر با ۱۶۸ سانتیمتر و ارتفاع موثر سوخت برابر ۱۳۳ سانتیمتر می‌باشد.

به منظور محاسبه ارتفاع بحرانی راکتور توسط کد MCNP ابتدا ارتفاع آب راکتور را در حدود ارتفاع بحرانی در نظر گرفته و ضریب تکثیر موثر ( $k_{eff}$ ) محاسبه می‌گردد. ارتفاعی که در آن،  $k_{eff}$  برابر با یک باشد، ارتفاع

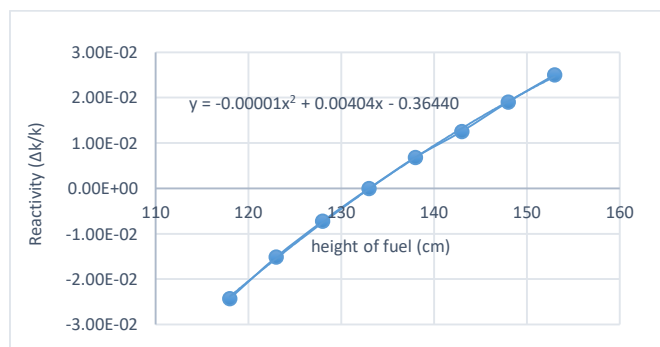
بحرانی است. ارتفاع بحرانی از طریق شبیه‌سازی و تجربی در حالت clean core به ترتیب برابر  $۱۶۸ \pm ۰/۲\%$  و  $۱۷۱/۱ \pm ۰/۱\%$  به دست آمده است [۵]. برای محاسبه ارزش راکتیویته آب سنگین، با تغییر ارتفاع آب، در واقع ارتفاع موثر سوخت تغییر می‌کند و ضریب تکثیر موثر ( $k_{eff}$ ) متناظر با آن محاسبه می‌گردد. راکتیویته مربوط به ارتفاع آب سنگین بالاتر از ارتفاع بحرانی، از رابطه ۱ به دست می‌آید. منحنی تغییرات  $\rho$  بر حسب ارتفاع موثر سوخت در شکل ۶ نشان داده شده است. منحنی تغییرات  $\rho$  بر حسب ارتفاع موثر سوخت با تابعی درجه ۲ برازش گردید و سپس با مشتق‌گیری از این تابع، تغییرات ارزش راکتیویته آب سنگین بر حسب ارتفاع آب بدست می‌آید. منحنی تغییرات  $\partial\rho/\partial h$  بر حسب ارتفاع سوخت در شکل ۷ نشان داده شده است.

$$\rho = \frac{k_{eff(ref)} - k_{eff}}{k_{eff(ref)} \cdot k_{eff}} \quad (1)$$

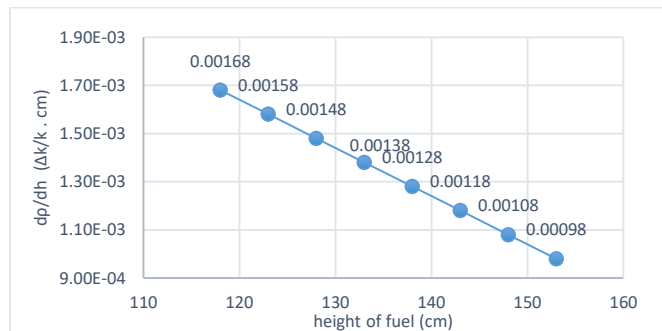
نتایج کد محاسباتی نشان می‌دهد که ارزش راکتیویته آب سنگین در ارتفاع بحرانی برابر با  $۰/۰۰۱۳۸ (\Delta k/k/cm)$  است که هم‌خوانی خوبی با نتایج تجربی ( $۰/۰۰۱۳۷ (\Delta k/k/cm)$ ) دارد. طبق نتایج به دست آمده (شکل ۷)، با افزایش ارتفاع آب سنگین، ارزش راکتیویته آن کاهش می‌یابد.



شکل ۵. منحنی تغییرات ضریب تکثیر موثر بر حسب ارتفاع سوخت محاسبه شده با کد MCNP.



شکل ۶. منحنی تغییرات راکتیویته بر حسب ارتفاع موثر سوخت محاسبه شده با کد MCNP.



شکل ۷. منحنی ارزش راکتیویته آب سنگین بر حسب ارتفاع موثر سوخت محاسبه شده با کد MCNP.

### ۲-۳. محاسبه ارزش میله کنترل و ایمنی و اثر هم پوشانی از طریق تجربی و شبیه سازی

به منظور اندازه گیری ارزش میله های کنترل (ایمنی) ارتفاع آب سنگین را مرحله به مرحله تا  $k_{eff} = 0.996$  افزایش داده و در هر مرحله آشکارساز  $BF_3$  شمارش نوترون را اندازه می گیرد، سپس نمودار برون یابی عکس شمارش نوترون بر حسب ارتفاع آب بدست آمد. در این مرحله میله های کنترل (ایمنی) وارد راکتور شده و شمارش نوترون اندازه گیری شد و طبق نمودار برون یابی، ارتفاع آب سنگین متناسب با این شمارش نوترون محاسبه گردید. اختلاف ارتفاع آب سنگین متناسب با ارزش راکتیویته میله های کنترل (ایمنی) می باشد. جدول ۱ مقادیر نصف ارزش راکتیویته میله های کنترل (ایمنی) و به صورت تنها را طبق نتایج تجربی نشان می دهد. به منظور اندازه گیری ارزش میله های کنترل (ایمنی) از طریق شبیه سازی، مطابق شکل ۲ و ۳ میله های کنترل و ایمنی شبیه سازی گردید و ارزش هر کدام از میله ها مطابق رابطه ۲ محاسبه شد.

$$\rho = \frac{k_{eff} - k_0}{k_{eff} \cdot k_0} \quad (2)$$

$k_0$  و  $k_{eff}$  ضریب تکثیر موثر راکتور بدون حضور میله کنترل (میله ایمنی) و با حضور میله کنترل (میله ایمنی) می باشد. جدول ۱ مقادیر ارزش راکتیویته میله های کنترل (ایمنی) با هم و به صورت تنها را نشان می دهد.

جدول ۱. محاسبه ارزش راکتیویته میله کنترل (میله ایمنی) از طریق شبیه سازی و تجربی

روش مطالعه	نصف ارزش راکتیویته دو میله	نصف ارزش راکتیویته یکی از میله های ایمنی ( $\rho_{(SR_1)}$ )	نصف ارزش راکتیویته دو میله	ارزش راکتیویته یکی از میله های کنترل ( $\rho_{(CR_1)}$ )
تجربی	0.014693±4/8%	0.015976±4/2%	0.001799±3/4%	0.001759±2/8%
شبیه سازی	0.016295±5%	0.017501±4/9%	0.001880±3/3%	0.001705±3%
درصد خطا	9.83	8.71	4.31	3.17

طبق جدول فوق، نتایج تجربی هم خوانی خوبی با نتایج شبیه سازی را نشان می دهد. هم چنین نصف ارزش راکتیویته دو میله ایمنی کمتر از ارزش راکتیویته یکی از میله های ایمنی است که نشان دهنده اثر هم پوشانی برای



میله‌های ایمنی می‌باشد، از طرفی میله‌های ایمنی در شعاع ( $r_0$ )  $20/21$  سانتیمتری از مرکز قلب راکتور با شعاع ( $R$ )  $120$  سانتیمتری قرار دارند و  $r_0 (20.21cm) < 0.19R(22.80cm)$  می‌باشد که نشان دهنده این است که میله‌های ایمنی در ناحیه همپوشانی قرار دارند [۶،۳]. این در حالی است که میله‌های کنترل در شعاع ( $r_0$ )  $60/41$  سانتیمتری از مرکز قلب راکتور و در منطقه غیرهمپوشانی ( $r_0 (60.41cm) > 0.19R(22.80cm)$ ) قرار دارند و طبق نتایج فوق نصف ارزش راکتیویته دو میله کنترل کمتر از ارزش راکتیویته یکی از میله‌های کنترل است [۶،۳]. نتایج به دست آمده هم‌خوانی خوبی با تئوری‌های بیان شده در زمینه فیزیک راکتور دارند.

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

به منظور بررسی بحرانیات و ایمنی گام جدید شبکه قلب راکتور HWZPR، برخی از پارامترهای فیزیکی راکتور از طریق تجربی و شبیه‌سازی محاسبه شد که نتایج در تطابق خوبی با هم هستند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که ارزش هر میله ایمنی و کنترل به ترتیب بیشتر از  $1\% \Delta K/K$  و کمتر از  $0.2\% \Delta K/K$  می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، به علت قراردادن میله‌های ایمنی در ناحیه همپوشانی، مجموع ارزش هر میله ایمنی به تنهایی، بیشتر از نصف ارزش دو میله ایمنی با هم است و این درحالی است که به علت قرارگرفتن میله‌های کنترل در ناحیه غیرهمپوشانی، مجموع ارزش هر میله کنترل به تنهایی، کمتر از نصف ارزش دو میله کنترل است. به علت افزایش ارتفاع بحرانی در گام جدید  $20$  سانتیمتر نسبت به  $18$  سانتیمتر (از  $158/5$  به  $171/1$  سانتیمتر) و در نتیجه، افزایش ارتفاع موثر میله‌های ایمنی (بدون تغییر در موقعیت شعاعی میله‌ها در دو گام)، ارزش این میله‌ها در گام  $20$  سانتیمتر ( $\rho_{SR12} = 29.385E-03$ ) نسبت به گام  $18$  سانتیمتر ( $\rho_{SR12} = 28.67E-03$ ) افزایش یافته است.

#### ۵. مراجع

1. J. Khorsandi, Z. Nasr, R. Salimi, M. Adavoodi, H. Khalafi, Heavy Water Zero Power Reactor (HWZPR) mixed core first criticality, calculation and experiments, Progress in Nuclear Energy 85:613-616, 2015.
2. Preliminary Safety Analysis Report of Heavy Water Zero Power Reactor, China Institute of Atomic Energy, 1992.
3. M. Itagaki, Y. Miyoshi, K. Gakuhari, N. Okada, T. Sakai, Control-Rod Interference Effects Observed during Reactor Physics Experiments with Nuclear Ship "MUTSU", Journal of Nuclear Science and Technology, 30(5): 465-476, 1993.
4. China Institute of Atomic Energy, HWZPR Safe Operation Manual, Internal Report, 1992.
5. Z. Nasrazadani, R. Salimi, A. Askari, J. Khorsandi, M. Mirvakili, and M. Mashayekh, Investigating Heavy Water Zero Power Reactors with a New Core Configuration Based on Experiment and Calculation Results, Nuclear Engineering and Technology, 1-5, 2016.
6. R. LAMARSH, Introduction to Nuclear Reactor Theory, Addison-Wesley Pub. Co., 1966.