



## بررسی پارامترهای فیزیک راکتور صفر قدرت آب سنگین در گام جدید

جواد مختاری، افروز عسگری\*

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

### چکیده

راکتور صفر قدرت آب سنگین اصفهان (HWZPR) یک راکتور تحقیقاتی با توان ۱۰۰ وات است، که می‌تواند در گام‌های مختلف مورد بهره‌برداری قرار گیرد. اخیراً گام شبکه این راکتور از ۲۰ سانتیمتر به ۱۴/۱۴ سانتیمتر تغییر یافت. برای حفظ ایمنی راکتور در ساختار جدید، مطابق با گزارش آنالیز ایمنی ( $SAR^1$ ) این راکتور، لازم است قبل از بهره‌برداری، پارامترهای قلب در گام جدید شبیه‌سازی و محاسبه شود. به همین منظور ارتفاع بحرانی، ارزش راکتیویته آب سنگین، ارزش میله‌های کنترل و میله‌های ایمنی محاسبه شد، که هر یک از پارامترها با معیارهای گزارش آنالیز ایمنی تطابق دارد. در نهایت ارتفاع بحرانی راکتور در گام جدید به صورت تجربی اندازه‌گیری شد و با نتایج حاصل از محاسبات کد MCNP مقایسه گردید. همچنین مقادیر محاسباتی در گام جدید با مقادیر محاسباتی و تجربی در گام قبلی نیز مقایسه گردید.

**کلید واژه:** راکتور صفر قدرت آب سنگین HWZPR، گام شبکه، گزارش آنالیز ایمنی، ارتفاع بحرانی، ارزش راکتیویته، میله‌های کنترل، میله‌های ایمنی، MCNP.

## Investigating the Physics Parameters of Heavy Water Zero Power Reactor with a New Core Configuration

J. Mokhtari, A.Asgari\*

Reactor and Nuclear Safety School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, P.O. Box 81465/1589, Esfahan, Iran

### Abstract

The heavy water zero power reactor (HWZPR), which is a critical assembly with a maximum power of 100 W, can be used in different lattice pitches. The last change of core configuration was from a lattice pitch of 20 to 14.14 cm. Based on regulations, prior to the first operation of the reactor, a new core parameters such as the critical water level, the reactivity worth of  $D_2O$ , the reactivity worth of safety and control rods were calculated. The results show that the relevant criteria in the safety analysis report were satisfied in the new core. Finally, the critical water level of new lattice was measured experimentally and compared with MCNP results. In addition, the results were compared with the corresponding values in the last core configuration.

**Keywords:** HWZPR, lattice pitch, SAR, Critical water level, reactivity worth, Safety rods, Control Rods, MCNP.

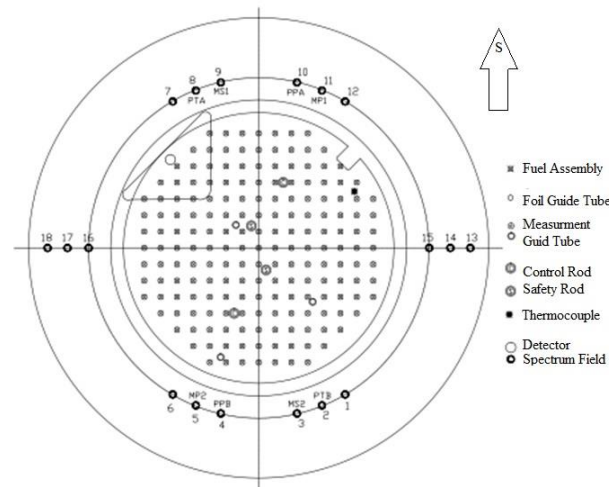
<sup>1</sup> Safety Analysis Report

## ۱. مقدمه

راکتور صفر قدرت آب سنگین اصفهان از نوع راکتورهای تانکی با کندکننده آب سنگین و سوخت اورانیم طبیعی فلزی است. تانک راکتور از جنس آلومینیوم به شعاع ۱۲۰ سانتیمتر و ارتفاع ۳۰۲ سانتیمتر است. حداکثر توان راکتور برابر با ۱۰۰ وات در شار نوترونی  $10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  است. با طراحی دو صفحه مشبک نگهدارنده میله‌های سوخت این راکتور قابلیت بهره‌برداری در چهار گام مختلف ۱۲/۷۳، ۱۴/۱۴، ۱۸ و ۲۰ سانتیمتر را داراست. تاکنون این راکتور در گام ۱۸ سانتیمتر با دو آرایش ۱۲۴ و ۹۶ عدد میله سوخت اورانیم فلزی، گام ۲۰ سانتیمتر با ۱۱۲ میله سوخت و همچنین با آرایش سوخت ترکیبی اکسید اورانیم و اورانیم فلزی بهره‌برداری شده است. در حال حاضر هدف تغییر گام شبکه از ۲۰ به ۱۴/۱۴ سانتیمتر است. به صورتیکه در این گام ۱۸۵ میله سوخت هریک با ۱۴ اسلاگ در قلب راکتور بارگذاری شده است. برای حفظ ایمنی راکتور در ساختار جدید، مطابق با گزارش آنالیز ایمنی (SAR) راکتور صفر قدرت آب سنگین اصفهان [۱]، لازم است قبل از بهره‌برداری از راکتور پارامترهای ارتفاع بحرانی راکتور، ارزش آب سنگین، میله‌های کنترل و ایمنی و حداکثر میزان تزریق راکتیویته‌ی مثبت در واحد زمان محاسبه شوند.

## ۲. روش کار

در جدول ۱ مشخصات فنی و در شکل ۱ نمای راکتور در گام ۱۴/۱۴ سانتیمتر با ۱۸۵ عدد میله سوخت نشان داده شده است [۱].



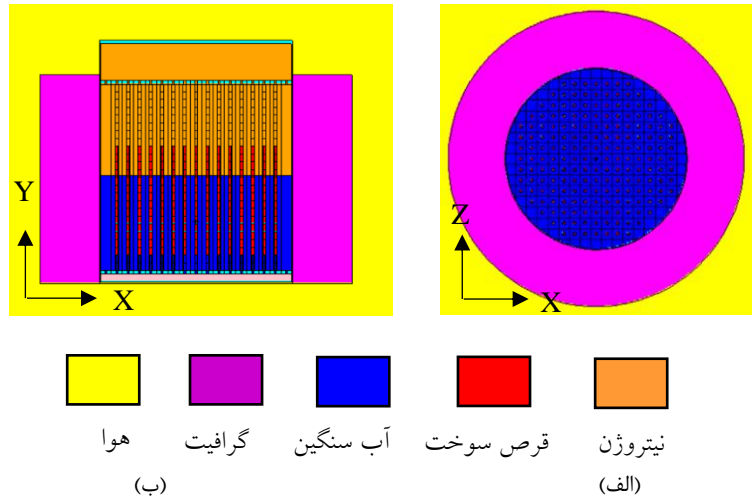
شکل ۱. نمای بالا از آرایش میله‌های سوخت، میله‌های کنترل و ایمنی در گام ۱۴/۱۴ سانتیمتر

جدول ۱. مشخصات فنی راکتور صفر قدرت آب سنگین

مشخصه	توضیحات
نوع راکتور	تانک استوانه‌ای
کندکننده	آب سنگین
نوع سوخت	اورانیم طبیعی فلزی
نوع شبکه	مربعی
گام شبکه	۱۴/۱۴ سانتیمتر
تعداد میله‌های سوخت	عدد ۱۸۵
قطر بیرونی تانک	۲۴۰ سانتیمتر
ارتفاع تانک راکتور	۳۰۲ سانتیمتر
جنس بازتابنده	گرافیت و آب سنگین

### ۲-۱- محاسبات بحرانی قلب راکتور به روش مونت کارلو

در ابتدا قلب راکتور صفر قدرت آب سنگین با ۱۸۵ میله سوخت اورانیوم طبیعی با گام ۱۴/۱۴cm توسط کد MCNP شبیه سازی شد. در این محاسبات از داده های کتابخانه ای ENDF/B-V برای سطوح مقطع و مدل پراکندگی حرارتی  $S(\alpha, \beta)$  استفاده شده است [۲]. نمایی از قلب راکتور در این گام که توسط کد MCNP شبیه سازی شده، در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲. (الف). نمای شعاعی (ب). نمایی محوری از قلب راکتور شبیه سازی شده با کد MCNP.

### ۲-۲- ارتفاع بحرانی و ارزش راکتیویته آب سنگین

به منظور محاسبه ارزش آب سنگین، ضریب تکثیر موثر حول ارتفاع بحرانی محاسبه شده است. با در نظر گرفتن مقدار ضریب تکثیر در ارتفاع بحرانی به عنوان مقدار مرجع با استفاده از رابطه زیر تغییرات راکتیویته در ارتفاع‌های مختلف محاسبه شد.

$$\Delta\rho = \frac{1}{K_{\text{eff(ref)}}} - \frac{1}{K_{\text{eff}}}$$

### ۲-۳- حداکثر میزان تزریق راکتیویته مثبت در واحد زمان

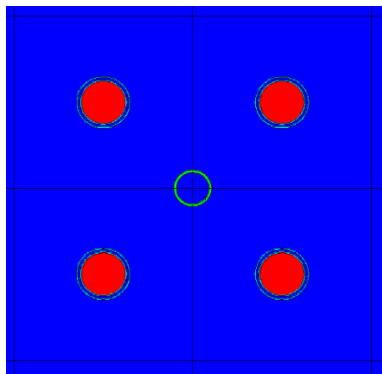
مطابق SAR راکتور صفر قدرت آب سنگین اصفهان، میزان تزریق راکتیویته مثبت آب سنگین در واحد زمان نباید بیشتر از  $(\Delta k/k/\text{sec})$  ۰/۰۰۰۲ باشد. با توجه به این که ارزش آب با کد MCNP برابر با  $(\Delta k/k/\text{cm})$  ۰/۰۰۱۴ به دست آمده است، با ضرب مقدار ارزش آب در نرخ تزریق آب سنگین در تانک اصلی که  $(\text{cm}/\text{sec})$  ۰/۰۴۵ است، میزان تزریق آب سنگین  $(\Delta k/k/\text{sec})$  ۰/۰۰۰۰۶۳ به دست می آید و همان طور که ملاحظه می گردد، کمتر از حد معیار  $(\Delta k/k/\text{sec})$  ۰/۰۰۰۲ است.

### ۲-۴- ارزش راکتیویته میله‌های کنترل

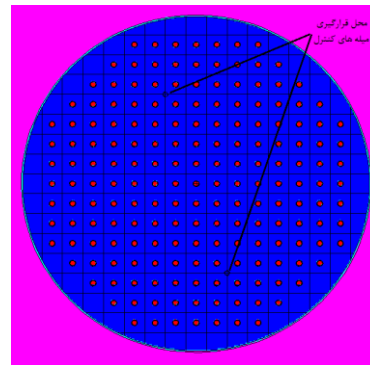
در راکتور صفر قدرت آب سنگین دو عدد میله کنترل از جنس آهن ضد زنگ وجود دارد. مشخصات سه نوع میله کنترل، در جدول ۲ آمده است. طبق ملاحظات ایمنی ارزش کل میله های کنترل باید از ۴ mk کمتر باشد، همچنین حداقل ارزش میله‌ها به گونه ای باشد که در هنگام گذار از حالت زیر بحرانی به فوق بحرانی، پس از خارج کردن یک میله، دوره تناوب راکتور بیش از دو دقیقه باشد. شکل ۳-الف وب موقعیت و ساختار داخلی میله کنترل در مجاورت چهار میله سوخت فلزی دیده می‌شود.

جدول ۲. مشخصات میله های کنترل راکتور

ماده	۱Cr ۱۸Ni ۹Ti
قطر داخلی به ترتیب برای میله‌های (۱و۲و۳)	۳۲۲۶و۳۲ mm
قطر خارجی به ترتیب برای میله‌های (۱و۲و۳)	۳۸۳۰و۳۵ mm
طول	۲۱۰۰ mm
ارزش راکتیویته هریک از میله‌های کنترل	$2/0 > \Delta K/K/\%$
وزن	۶ Kg



ب



الف

شکل ۳. الف) محل قرارگیری میله‌های کنترل در قلب ، ب) نمایی افقی از آرایش میله کنترل در مجاورت چهار میله سوخت در شبیه سازی با MCNP

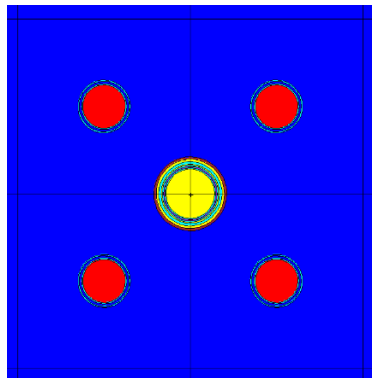
### ۲-۵- ارزش راکتیویته میله‌های ایمنی

میله های ایمنی از موادی که سطح مقطع جذب بالایی دارند ساخته می‌شوند. در راکتور HWZPR دو عدد میله ایمنی وجود دارد که از جنس کادمیم است، طبق ملاحظات ایمنی ارزش هر میله ایمنی باید از ۱۰ mk بیشتر باشد. مشخصات میله‌های ایمنی در راکتور، در جدول ۳ آمده است.

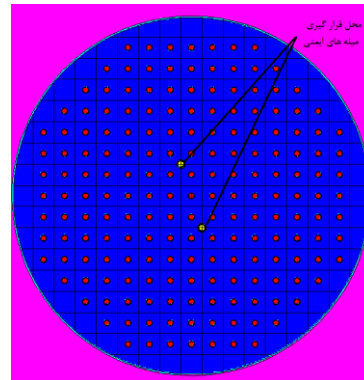
جدول ۳. مشخصات میله های ایمنی در راکتور HWZPR

قطر خارجی جاذب کادمیم	۴۴ mm
قطر داخلی جاذب کادمیم	۴۲ mm
طول قسمت کادمیمی	۲۸۸ mm
قطر خارجی قسمت جاذب	۴۶ mm
قطر داخلی قسمت جاذب	۴۰ mm
طول هر یک از قسمت‌های جاذب	۲۹۰ mm
طول کل جاذب در میله ایمنی	۲۰۳۰ mm
قطر خارجی میله ایمنی	۵۲ mm
طول کل میلی ایمنی	۲۳۳۶ mm
فاصله لبه پایینی کادمیم تا انتهای میله ایمنی	۲۳۵ mm

شکل های ۴ الف و ب به ترتیب نمای افقی از موقعیت میله های ایمنی در قلب راکتور و آرایش میله ایمنی در مجاورت چهار میله سوخت فلزی را که با کد MCNP شبیه‌سازی شده است، نشان می دهد.



ب



الف

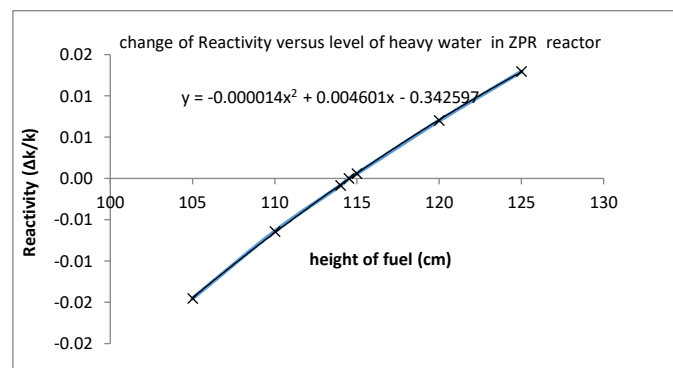
شکل ۴. الف) شبیه سازی راکتور با دو میله ایمنی و محل قرار گیری آنها در قلب راکتور ب) نمای افقی از آرایش میله ایمنی در مجاورت چهار میله سوخت فلزی شبیه سازی شده با کد MCNP

### ۳. نتایج

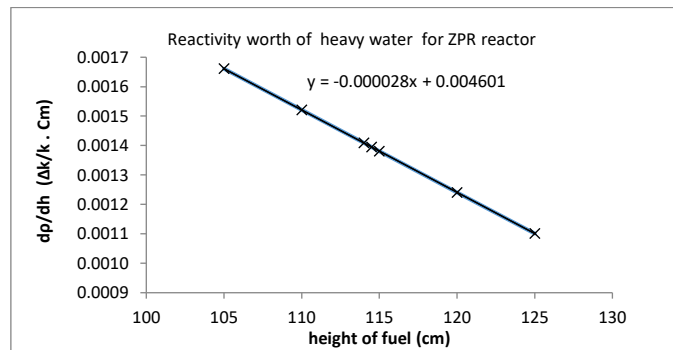
نتایج ضریب تکثیر موثر و راکتیویته در جدول ۴ نشان داده شده است. ارتفاع بحرانی راکتور با ۱۸۵ میله سوخت در گام جدید ۱۴/۱۴ cm برابر ۱۴۹/۵ cm ارتفاع آب سنگین (۱۱۴/۵) سانتیمتر ارتفاع سوخت فعال) است. منحنی تغییرات  $\rho$  بر حسب ارتفاع مؤثر سوخت مطابق شکل ۳ و تغییرات ارزش راکتیویته آب سنگین بر حسب ارتفاع مطابق شکل ۴ می باشد. ارزش راکتیویته آب سنگین در ارتفاع بحرانی حاصل از نتایج شبیه سازی برابر ۱/۴mk/cm بدست آمده است. ارتفاع بحرانی حاصل از نتایج تجربی برابر ۱۴۹ cm محاسبه شد.

جدول ۴. تغییرات ضریب تکثیر، راکتیویته و ارزش آب بر حسب ارتفاع مؤثر سوخت در راکتور با کد MCNP

ارتفاع سوخت فعال (cm)	$k_{eff, ave}$	Reactivity $\left(\frac{\Delta k}{k}\right)$	$\frac{\Delta \rho}{\Delta H}$ (1/cm)
۱۰۵	۰/۹۸۵۵۶	- ۰/۰۱۴۵۳	۰/۰۰۱۶۶۱
۱۱۰	۰/۹۹۳۵۲	- ۰/۰۰۶۴۱	۰/۰۰۱۵۲۱
۱۱۴	۰/۹۹۹۰۴	- ۰/۰۰۰۸۴	۰/۰۰۱۴۰۹
۱۱۴/۵	۰/۹۹۹۸۸	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۱۳۹۵
۱۱۵	۱/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۶۰	۰/۰۰۱۳۸۱
۱۲۰	۱/۰۰۶۹۴	۰/۰۰۷۰۱	۰/۰۰۱۲۴۱
۱۲۵	۱/۰۱۳۰۰	۰/۰۱۲۹۴۷	۰/۰۰۱۰۱



شکل ۵. نمودار تغییرات راکتیویته بر حسب ارتفاع مؤثر سوخت محاسبه شده با کد MCNP



شکل ۶. نمودار تغییرات ارزش آب سنگین بر حسب ارتفاع مؤثر سوخت محاسبه شده با کد MCNP

جدول ۵ محاسبات ارزش راکتیویته کل هر سه نوع میله‌های کنترل در گام ۱۴/۱۴ سانتی متر را نشان می‌دهد، ارزش راکتیویته دو میله کنترل نوع سوم ۳/۴۹mk محاسبه شد و به عنوان میله کنترل انتخابی در گام جدید به کار رفت.

جدول ۵. راکتیویته میله‌های کنترل در گام ۱۴/۱۴ سانتی متر محاسبه شده با کد MCNP

میله کنترل	$k_{eff,1}$	$k_{eff,2}$	$k_{eff,3}$	$k_{eff, averag}$	راکتیویته ( $\Delta K/K$ )
نوع اول	۰/۹۹۸۲۶	۰/۹۹۷۵۶	۰/۹۹۷۲۴	۰/۹۹۷۶۹	۰/۰۰۲۲۰۱
نوع دوم	۰/۹۹۷۷۹	۰/۹۹۷۸۳	۰/۹۹۷۶۸	۰/۹۹۷۷۷	۰/۰۰۲۱۱۲
نوع سوم	۰/۹۹۶۸۴	۰/۹۹۶۰۲	۰/۹۹۶۳۶	۰/۹۹۶۴۱	۰/۰۰۳۴۸۸

ارزش راکتیویته میله‌های ایمنی با استفاده از شبیه سازی محاسبه شده و نتایج در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶. راکتیویته کل میله‌های ایمنی در گام ۱۴/۱۴ سانتی متر محاسبه شده با کد MCNP

$k_{eff,1}$	$k_{eff,2}$	$k_{eff,3}$	$k_{eff, averag}$	راکتیویته ( $\Delta K/K$ )
۰/۹۷۸۱۱	۰/۹۷۷۴۶	۰/۹۷۷۷۴	۰/۹۷۷۷۷	۰/۰۲۲۶۱۳

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

با کاهش گام شبکه از ۲۰ به ۱۴/۱۴ با توجه به این که نسبت سوخت به کندکننده افزایش می‌یابد، پارامترهای فیزیکی راکتور در گام جدید تغییر می‌یابند. در جدول ۷ پارامترهای نوترونیک حائز اهمیت در گام ۱۴/۱۴ و گام قبلی ۲۰ سانتیمتر [۳] آمده است. نتایج حاصل با نتایج تجربی و نیز با معیارهای SAR مقایسه شده است.

جدول ۷. پارامترهای نوترونیک محاسبه شده در گام ۱۴/۱۴ سانتیمتر و مقایسه با گام ۲۰ سانتیمتر

معیار SAR	گام قبلی ۲۰ سانتیمتر		گام جدید ۱۴/۱۴ سانتیمتر			پارامترهای نوترونیک محاسباتی
	تجربی	MCNP	خطا (%)	تجربی	MCNP	
همخوانی نتایج تجربی و شبیه سازی	۱۷۱/۷	۱۶۸	۰/۳۶	۱۴۹	۱۴۹/۵	ارتفاع بحرانی (cm)
۴/۴۴(mk/cm)	۱/۳۶	۱/۳۸	-	-	۱/۴۰	ارزش آب سنگین در ارتفاع بحرانی (mk/cm)
< ۲/۰(mk/sec)	۰/۰۶۱۲	۰/۰۶۲۱	-	-	۰/۰۶۳۰	نرخ تزریق راکتیویته مثبت آب سنگین (mk/sec)
< ۴mk	۳/۷۶	۳/۷۶	-	-	۳/۴۸۰	ارزش میله‌های کنترل (mk)
> ۲۰mk	۳۰/۵۷	۳۲/۵۹	-	-	۲۲/۶۱۳	ارزش میله‌های ایمنی (mk)



با توجه به افزایش تعداد میله های سوخت در گام جدید (۱۸۵ میله سوخت) نسبت به گام قبلی (۱۱۲ میله سوخت) ارتفاع بحرانی راکتور کاهش یافته است. همچنین با کاهش ارتفاع بحرانی نسبت به گام قبل میزان ارزش راکتیویته آب سنگین افزایش می یابد. بر اساس آنچه که در نتایج محاسباتی حاصل از کد و تجربی نشان می دهد، ارزش راکتیویته میله های ایمنی و کنترل در گام جدید شرط لازم در SAR را برآورده می سازد، همچنین نسبت به گام قبل (با توجه به اینکه ارتفاع بحرانی کم شده است) ارزش آنها کمتر شده است. نتایج حاصل از ارزش آب سنگین محاسبه شده توسط کد MCNP و تجربی نشان می دهد که شرط SAR برای نرخ تزریق راکتیویته مثبت ناشی از آب سنگین به تانک اصلی راکتور برآورده می شود.

## ۵. مراجع

1. Preliminary Safety Analysis Report on heavy Water Zero Power Reactor, China Institute of Atomic Energy, 1992.
2. Briesmeister, J. F., MCNP a General Monte Carlo N-Particle Transport Code System (version C), Los Alamos, National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 2000.
3. Investigating HWZPR with a new core configuration based on experiment and calculation results, Z. Nasr, R. Salami, A. Asgari, Nuclear Engineering and Technology, 2016.