



محاسبه توزیع شار شعاعی و محوری در گام جدید راکتور HWZPR بر طبق مطالعات تجربی و شبیه سازی

عسگری، افروز* - کاویانی، پروین - خورسندی، جمشید - مختاری، جواد

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

چکیده

راکتور صفر قدرت آب سنگین اصفهان، قابلیت بهره‌برداری در چهار گام مختلف را داراست. پارامترهای فیزیکی این راکتور در گام ۱۸ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است، به منظور بررسی این پارامترها در گام‌های دیگر، اخیراً گام شبکه از ۱۸ به ۲۰ سانتیمتر تغییر یافته است. برای محاسبه پارامترهای فیزیکی راکتور، قلب جدید راکتور HWZPR توسط کد MCNP شبیه سازی شد. به منظور اندازه‌گیری توزیع نسبی شار نوترون و نسبت کادمیوم در قلب راکتور، فویل‌هایی از جنس منیزیم (Mn-Ni) با پوشش آلومینیوم و کادمیوم در دو جهت شعاعی و محوری قرار داده شد. ارتفاع بحرانی، مرکز فیزیکی، انحناى شار شعاعی و محوری حاصل از نتایج شبیه‌سازی و تجربی در تطابق خوبی با هم هستند، به نحوی که بیشترین خطای بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد.

کلید واژه: راکتور HWZPR، کد MCNP، نسبت کادمیوم، انحناى شار شعاعی، انحناى شار محوری.

Determination of radial and axial flux distribution of the HWZPR based on simulation and experimental studies

Asgari, Afrooz¹; Kaviani, Parvin^{1,*}; Khorsandi, Jamshid¹, Mokhtari, Javad¹

¹ NSTRI, P.O.Box 81465/1589, Isfahan, Iran

Abstract:

The Isfahan heavy water zero power reactor (HWZPR) can be operated in different lattice pitches from 12 cm to 20 cm. Recently, the HWZPR core configuration has been changed from lattice pitch of 18 cm to 20 cm. The MCNP Monte Carlo code is used to calculate the physical parameters of the new core configuration. The foils of magnesium with aluminum and cadmium cover are used to measure relative distribution of neutron flux and cadmium ratio in the radial and axial directions. According to the simulation and experimental calculations, the critical water level, the physical center of the core, the radial buckling, and the axial buckling are in good agreement (maximum difference is less than 10%).

Key words: HWZPR, MCNP, Cadmium ratio, Radial buckling, Axial buckling.



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. در حال حاضر، گام شبکه از ۱۸ سانتیمتر به ۲۰ سانتیمتر تغییر می‌یابد. در گام ۱۸ سانتیمتر، تعداد ۱۲۴ میله سوخت در داخل راکتور قرار گرفت، همچنین در مرحله ی بعدی از سوخت ترکیبی در طراحی قلب استفاده شده که پارامترهای فیزیکی در قلب راکتور با گام ۱۸ سانتیمتر و سوخت ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت [۱]. در حال حاضر با تغییر گام شبکه از ۱۸ سانتیمتر به ۲۰ سانتیمتر، مطابق مدارک موجود ۱۱۲ میله سوخت در قلب راکتور پیچیده شد [۲]. توزیع شار شعاعی و محوری از مهمترین پارامترها در راکتور است، که در گام جدید از طریق شبیه سازی و به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفت. برای بدست آوردن انحنای شار^۱ و اثر بازتابنده، نیاز به توزیع شار در ناحیه مجانبی^۲ است. ناحیه مجانبی ناحیه‌ای است که در آن طیف راکتور پایدار بوده و در مکان‌های متفاوت از این ناحیه، نسبت نوترون‌هایی با انرژی‌های مختلف، ثابت است. به‌عنوان مثال نسبت نوترون‌های کل به فوق‌حرارتی، ثابت می‌ماند هرچند که شار کل نوترون‌ها، تغییر می‌کند. در این شرایط، نسبت کادمیم^۳ (نسبت نوترون‌های کل به فوق‌حرارتی) ثابت است. بنابراین برای تعیین ناحیه مجانبی راکتور، نسبت کادمیم در دو راستای محوری و شعاعی محاسبه می‌شود و نواحی که این نسبت ثابت می‌باشد، ناحیه مجانبی است.

۲. روش کار

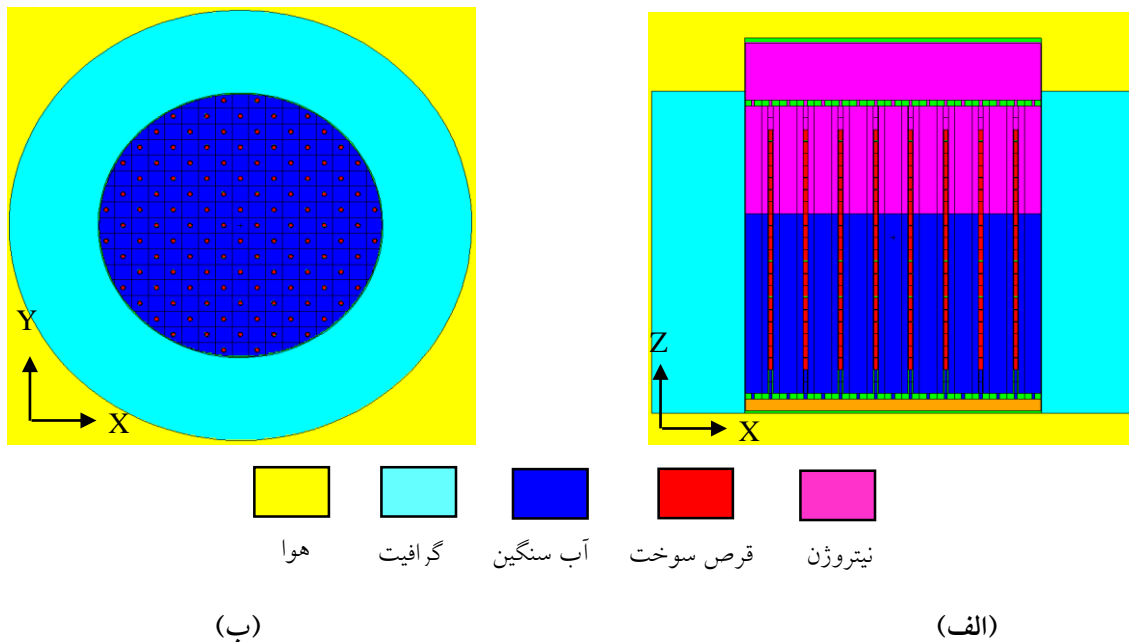
۱-۲. محاسبات شبیه سازی

در ابتدا قلب راکتور HWZPR در گام جدید توسط کد محاسباتی MCNP شبیه سازی گردید [۳، ۴]. شکل ۱ الف و ب به ترتیب نمای محوری و شعاعی از قلب راکتور شبیه‌سازی شده را نمایش می‌دهد. پس از آن، ارتفاع بحرانی، توزیع شار نوترون و نسبت کادمیم در دو راستای شعاعی و محوری توسط کد MCNP محاسبه شد. به‌منظور محاسبه مرکز فیزیکی راکتور و انحنای شار شعاعی و محوری، برازش داده‌ها به ترتیب با تابع کسینوسی و بسط توسط نرم افزار Matlab انجام شد.

1 Buckling

2 Asymptotic

3 Cadmium Ratio



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

۲-۲. محاسبات تجربی

برای تعیین نسبت کادمیم در جهت محوری، ابتدا فویل‌های یکسان منیزیوم با پوشش آلومینیوم را در فواصل مساوی بر روی یک استرینگ چسبانده و داخل راکتور قرار می‌گیرند. پس از پرتو دهی نمونه‌ها در توان و زمان مناسب، آن‌ها را از راکتور خارج نموده و با شمارش واپاشی آن‌ها توسط آشکارساز بتا یا گاما و انجام محاسبات و تصحیحات لازم، اکتیویته نسبی آن‌ها محاسبه می‌گردد. در مرحله‌ای دیگر از آزمایش، همان فویل‌ها در پوشش کادمیم و در همان مکان‌ها، تحت تابش دهی یکسانی قرار می‌گیرند و مانند مرحله قبل، اکتیویته نسبی به دست می‌آید. در نهایت با استفاده از رابطه ۱ توزیع نسبت کادمیم محاسبه می‌گردد.

$$R_{cd} = \frac{A}{A^{>cd}} \frac{P_{cd}}{P} \quad (1)$$

که در آن A اکتیویته فویل با پوشش آلومینیوم، $A^{>cd}$ اکتیویته فویل با پوشش کادمیم، P توان راکتور در هنگام پرتو دهی فویل با پوشش آلومینیوم، P_{cd} توان راکتور در موقع پرتو دهی فویل با پوشش کادمیم و R_{cd} نسبت کادمیم می‌باشد. به همین صورت فویل‌های یکسان MN-Ni یکبار با پوشش آلومینیوم و بار دیگر با پوشش کادمیم در ارتفاع‌های یکسان اما در فواصل شعاعی مختلف از قلب راکتور قرار داده می‌شوند و ناحیه مجانبی، در جهت شعاعی نیز محاسبه می‌گردد.

به منظور به دست آوردن توزیع شار شعاعی نوترون، فویل‌های یکسان MN-Ni با پوشش آلومینیوم در ارتفاع یکسان و در شعاع‌های مختلف و برای اندازه‌گیری توزیع شار محوری نوترون نیز، فویل‌های یکسان MN-Ni

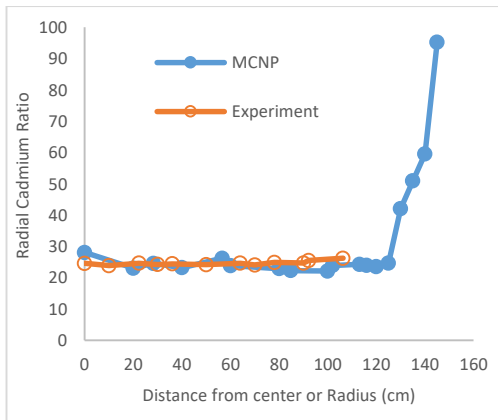


با پوشش آلومینیوم در شعاع یکسان ولی در ارتفاع‌های مختلف داخل مکان‌های پرتودهی راکتور قرار می‌گیرند. فویل‌ها در شار و مدت زمان مناسب پرتودهی شده، سپس از داخل راکتور خارج می‌شوند. اکتیویته هر فویل به‌طور جداگانه توسط آشکارساز بتا یا گاما شمارش می‌گردد. دستیابی به انحای شار محوری و شعاعی، به ترتیب با برازش توابع کسینوسی و بسل به نتایج تجربی توزیع شار نسبی محوری و شعاعی انجام می‌شود.

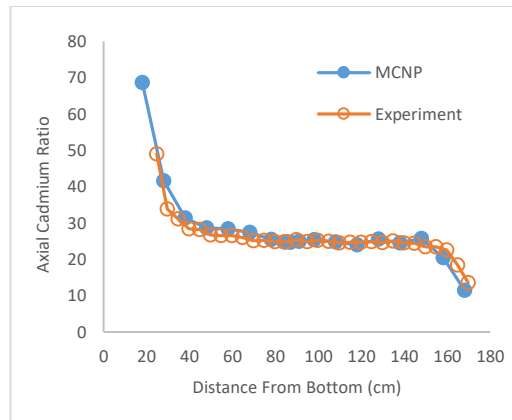
۳. نتایج

منحنی تغییرات نسبت کادمیم محاسبه شده از طریق کد MCNP و تجربی در راستای شعاعی و محوری در شکل ۲ الف و ب نشان داده شده است.

با بررسی تغییرات نسبت کادمیم بر حسب ارتفاع در شکل ۲ الف ملاحظه می‌شود که از ارتفاع ۵۰ تا ۱۵۰ سانتیمتر نسبت کادمیم ثابت است. همچنین مطابق با شکل ۲ ب، در تمام راستای شعاعی قلب راکتور نسبت کادمیم ثابت و در نتیجه در این ناحیه (Asymptotic) طیف پایدار و تئوری تک گروهی صادق است. بنابراین در نواحی فوق، توزیع شار شعاعی و محوری محاسبه می‌گردد.



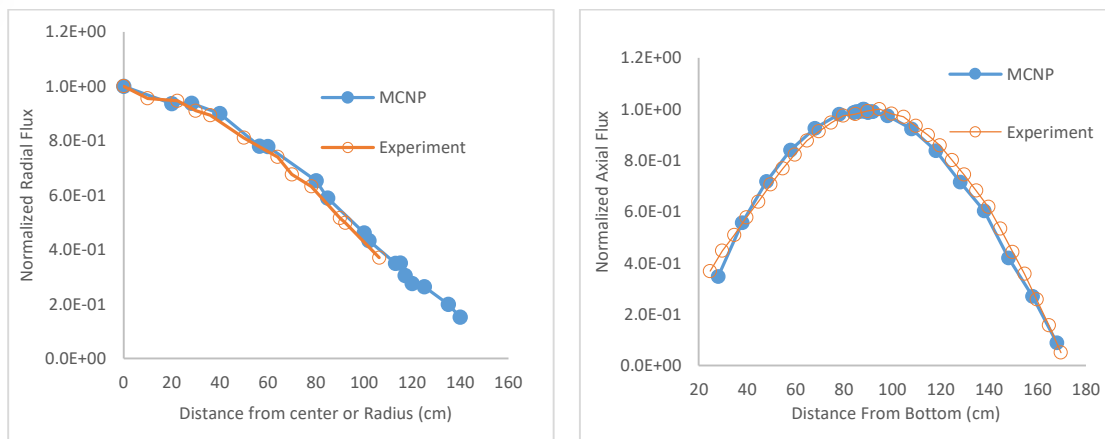
(ب)



(الف)

شکل ۲. تغییرات نسبت کادمیم محاسبه شده از طریق کد MCNP و تجربی (الف). محوری (ب). شعاعی.

نتایج توزیع شار نسبی محوری و شعاعی حاصل از شبیه‌سازی توسط کد MCNP و تجربی به ترتیب در شکل ۳ الف و ب نشان داده شده است.



شکل ۳. توزیع شار بهنجار شده حاصل از روش تجربی و شبیه سازی با کد MCNP (الف). محوری (ب). شعاعی.

طبق نمودارهای فوق نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی، هم‌خوانی خوبی با هم دارند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، نمودار شار محوری به صورت تابع کسینوسی است. مقدار z_0 به عنوان مرکز فیزیکی و β^2 به عنوان انحنای شار محوری، با برازش تابع کسینوسی به توزیع شار محوری و براساس رابطه ۲ محاسبه شد.

$$\varphi = \varphi_0 \cos\beta(z - z_0) \quad (2)$$

توزیع شار شعاعی به صورت تابع بسل است. مقدار α^2 به عنوان انحنای شار شعاعی، با برازش تابع بسل به توزیع شار شعاعی و براساس رابطه ۳، محاسبه شد.

$$\varphi(x) = a \times [((1 - (\alpha^2 \times x^2)/4)) + (\alpha^4 \times x^4/64) - (\alpha^6 \times x^6/2304) + (\alpha^8 \times x^8/147456) - (\alpha^{10} \times x^{10}/14745600)] \quad (3)$$

طبق محاسبات شبیه‌سازی و تجربی و برازش هر یک از منحنی‌های شکل ۲ به ترتیب مرکز فیزیکی ۸۸/۱۱ و ۹۰/۲ سانتیمتر، انحنای شار شعاعی $2/33e-4$ و $2/20e-4$ بر سانتیمتر مربع و محوری $3/43e-4$ و $3/50e-4$ بر سانتیمتر مربع محاسبه شد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

به دلیل مواردی همچون آنالیز فعالسازی نوترونی، خسارات پرتودهی و دزیمتری نوترونی محاسبات تجربی و شبیه‌سازی توزیع شار شعاعی و محوری، مرکز فیزیکی در راکتور و انحنای شار از پارامترهای بسیار مهم و ضروری است. بنابراین این پارامترها از طریق شبیه‌سازی و تجربی محاسبه گردید.

با به‌دست آوردن نسبت کادمیم در دو راستای محوری و شعاعی، ناحیه مجانبی راکتور در این گام، محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که در راستای محوری، این نسبت از ارتفاع ۵۰ تا ۱۵۰ سانتیمتر و در راستای شعاعی



تقریباً تا شعاع ۱۰۲ سانتیمتر ثابت است. در مرحله بعد با محاسبه توزیع شار شعاعی و محوری از طریق تجربی و شبیه‌سازی، مشخص گردید که نتایج در تطابق خوبی با هم هستند. با برازش توابع کسینوسی و بسل به ترتیب به توزیع‌های شار محوری و شعاعی، نتایج به صورت جدول ۱ بدست آمد و با مقادیر مربوط به راکتور HWZPR در گام ۱۸ سانتیمتر مقایسه گردید.

جدول ۱. پارامترهای فیزیکی محاسبه شده از طریق تجربی و شبیه‌سازی در گام ۲۰ سانتیمتر و مقایسه با

نتایج گام ۱۸ سانتیمتر

| گام ۱۸ سانتیمتر | خطا % | نتایج تجربی | نتایج محاسبات با کد MCNP | پارامتر فیزیکی |
|-----------------|-------|-----------------|--------------------------|--------------------------------|
| | | گام ۲۰ سانتیمتر | | |
| ۱۵۸/۵ | ۰/۱۸ | ۱۷۱/۱ | ۱۶۸ | ارتفاع بحرانی (cm) |
| ۸۵/۷ | ۲/۳۱ | ۹۰/۲۰ | ۸۸/۱۱ | مرکز فیزیکی (cm) |
| $۲/۸۳e-۴$ | ۵/۹۱ | $۲/۲۰e-۴$ | $۲/۳۳e-۴$ | انحنای شار شعاعی (cm^{-2}) |
| $۴/۱۷e-۴$ | ۲/۰۰ | $۳/۵۰e-۴$ | $۳/۴۳e-۴$ | انحنای شار محوری (cm^{-2}) |

طبق جدول ۱ نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی در تطابق خوبی با هم هستند، به صورتی که بیشترین خطای بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. هر دو گام ۲۰ و ۱۸ سانتیمتر در ناحیه over-moderate قرار دارند بنابراین افزایش گام، منجر به کند شدن و جذب بیشتر نوترون‌های راکتور می‌گردد. از طرف دیگر، با افزایش گام راکتور، تعداد میله‌های سوخت کاهش می‌یابد که این مسئله منجر به افزایش ارتفاع بحرانی و مرکز فیزیکی در گام جدید می‌شود. افزایش ارتفاع بحرانی، منجر به گستردگی بیشتر در توزیع شار محوری نوترون و در نتیجه، کاهش انحنای شار و افزایش نشت نوترون از راکتور می‌گردد.

۵. مراجع

1. Khorsandi J., Nasr Z., Salimi R., Adavoodi M., Khalafi H., Heavy Water Zero Power Reactor (HWZPR) mixed core first criticality, calculation and experiments, Progress in Nuclear Energy 85:613-616, 2015.
2. China Institute of Atomic Energy, Preliminary Safety Analysis Report on heavy Water Zero Power Reactor, internal report, 1992.
3. Briesmeister, J. F., MCNP a General Monte Carlo N-Particle Transport Code System (version C), Los Alamos, National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 2000.
4. Moosakhani, A., Nasrabadi, M.N., Timuri, B., Monte Carlo calculation of the core of the heavy water zero power reactor (HWZPR), using MCNP4C, Nuclear Engineering and design 241, 1459-1462, 2011.