بررسی تغییرات پارامترهای نوترونیکی و سنتیکی قلب رآکتور صفر قدرت آب سنگین در اثر تغییرات گام شبکه با استفاده از کد MCNPX

ظریفی،احسان – سپانلو، کامران-نامی‌نظری،محمد

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته ای

چکیده:

هدف از ارائه این مقاله ارزیابی نوترونی قلب رآکتور صفر قدرت آب سنگین (*HWZPR*) در اثر تغییرات گام شبکه می باشد. در این تحقیق راکتور با استفاده از کد *MCNPX 2.6* شبیه سازی گردید و در راستای اطمینان از صحت مدلسازی انجام شده، پارامترهای اصلی رآکتور نظیر توزیع شار، ضریب تکثیر موثر و ارتفاع بحرانی آب سنگین مورد بررسی قرار گرفت. شبیه سازی در کد *MCNPX* با تعداد ۱۰۰ هزار تاریخچه در هر سیکل و ۳۰۰ سیکل فعال با دستور *KCODE* انجام شد، به طوری که میانگین خطای نسبی محاسبات K_{eff} حدود ۰/۰۰۰۱ به دست آمد. نتایج نشان دادند که سازگاری خوبی با نتایج ارائه شده در گزارشات ایمنی رآکتور موجود وجود دارد.

کلمات کلیدی: : رآکتور صفر قدرت آب سنگین، تحلیل نوترونی، گام شبکه سوخت، کد *MCNPX*

Investigation of neutronic and kinetic parameters of Heavy Water Zero Power Reactor in the result of fuel pith changes using MCNPX code

Zarifi, Ehsan; Sepanloo, Kamran; Naminazari, Mohammad

Reactor and nuclear safety school, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Atomic Energy Organization of Iran (AEOI)

Abstract:

The aim of this article is to investigate the neutronic analysis of heavy water zero power reactor in the result of fuel pith changes. Reactor were simulated using MCNPX2.6 code and main parameters such as neutron flux distribution, effective multiplication factor and critical level of heavy water were investigated as verification of accurate modeling. In MCNPX code, the KCODE card was used for critical source calculations, with 100000 histories and 300 active cycles to obtain relative error of K_{eff} less than 0.0001. The results showed a reasonable agreement with the reactor Safety Analysis Reports (SAR).

Keywords: Heavy Water Zero Power Reactor, neutronic analysis, fuel pitch, MCNPX code

مقدمه:

به منظور بررسی ایمنی راکتور، بایستی دید کلی نسبت به تاثیرات گوناگون برروی پارامترهای نوترونیکی راکتور داشت. گام شبکه یکی از عوامل بسیار مهم در بحث فرآیند کند شدن و جذب نوترونها و در نهایت تعیین حالت نهایی رآکتور می باشد. نظر به اینکه کندکننده رآکتور صفر قدرت، آب سنگین می باشد در نتیجه نوترون دارای طول مهاجرتی در حدود ۱۷۰ سانتیمتر می باشد که این فاصله تقریبا ۳۰ برابر (۸/ ۵ سانتیمتر) طول مهاجرت نوترونها در آب سبک می باشد. از آنجا که مطابق گزارشات ایمنی رآکتور صفر قدرت، این رآکتور می تواند در گامهای پیش بینی شده مختلفی کار کند لذا ارزیابی این فرآیند جهت برآورد رفتار نوترونی آن می‌تواند مفید باشد. با این وجود در گزارشات ایمنی این رآکتور به غیر از گام شبکه ۱۸ و ۲۰ سانتیمتر، نتایجی در خصوص گامهای دیگر ارائه نشده است [۱]. موسی خانی و همکارانش [۲] در سال ۲۰۱۱ طی مقاله ای با استفاده از روش مونت کارلو و استفاده از کد MCNP 4C به بررسی رفتار قلب رآکتور آب سنگین صفر قدرت در گام شبکه ۱۸ سانتیمتر پرداختند. در سال ۲۰۱۳ جلالی و همکارانش [۳] طی مقاله ای نحوه اندازه گیری توان رآکتور آب سنگین صفر قدرت را با استفاده از تابش های گاما و نوترونی تشریح نمودند. نصرآبادی و همکارانش [٤] در سال ۲۰۱٤ طی مقاله ای با استفاده از کد MCNP 4C برخی پارامترهای قلب رآکتور و بحرانی شدن آن با تغییر سطح آب سنگین را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۵ خورسندی و همکارانش [۵] طی مقاله ای با استفاده از محاسبات توسط کدهای MCNP 4C و کوپل کدهای WIMS و CITATION و همچنین اندازه گیری های تجربی رفتار نوترونی قلب رآکتور آب سنگین صفر قدرت در گام شبکه ۱۸ سانتیمتر را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق با استفاده از کد MCNPX به بررسی رفتار نوترونیکی قلب رآکتور صفر قدرت آب سنگین در گامهای مختلف پرداخته و پارامترهای نوترونی قلب رآکتور نظیر ضریب تکثیر موثر، توزیع شار و پارامترهای سنتیکی تعیین شده است.

روش کار:

رآکتور صفر قدرت مجموعه ایست با سوخت اورانیوم طبیعی فلزی، کندکننده آب سنگین و بازتابنده گرافیت که حدکثر قدرت آن ۱۰۰ وات است. این رآکتور برای آموزش و انجام مطالعات پایه در زمینه فیزیک رآکتور مورد استفاده قرار می گیرد. این رآکتور قابلیت انجام آزمایشات بحرانی با شبکه های مختلف قلب را دارا می باشد. در بروز حوادث احتمالی،

٤ میله کنترل و خروج اضطراری کند کننده، کنترل رآکتور را به عهده دارند. مشخصات فنی این رآکتور در جدول ۱ نشان داده شده است.

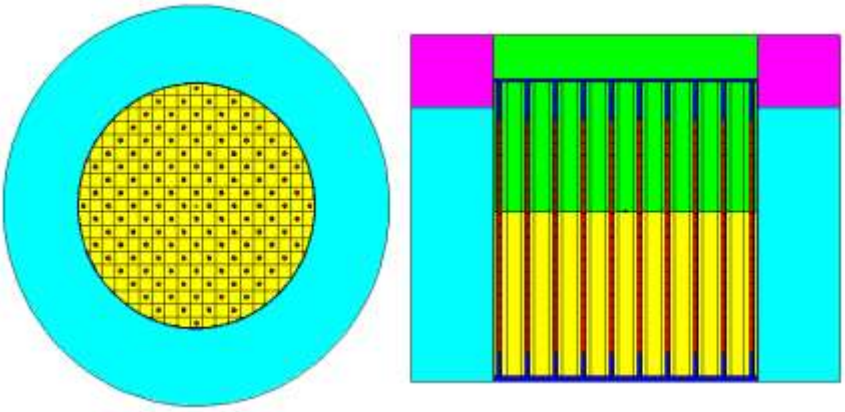
جدول (۱) مشخصات فنی رآکتور صفر قدرت آب سنگین [۱]

ردیف	مشخصات	مقادیر
۱	نوع رآکتور	تانک
۲	حداکثر توان حرارتی	100 W
۳	نوع سوخت	اورانیوم طبیعی فلزی
٤	نوع کند کننده	آب سنگین
٥	نوع باز تابنده	گرافیت
٦	شکل سوخت	میله ای با غلاف Al
۷	قطر میله سوخت	37 mm
۸	ارتفاع میله سوخت	102 mm
۹	وزن میله سوخت	1.79 Kg
۱۰	شکل قلب	استوانه ای
۱۱	ارتفاع قلب	2380 mm
۱۲	قطر قلب	2050 mm
۱۳	میله کنترل	۲ عدد میله استیل ضدزنگ
۱٤	میله ایمنی	۲ عدد میله کادمیمم
۱٥	شار نوترون حرارتی	10^9 n/cm^{2}sec

قلب رآکتور دارای قطری در حدود ۲/۰٥ m و ارتفاع ۲/۳۸ m بوده که مطابق گزارشات ایمنی (SAR) [۱] می‌تواند دارای ٤ گام شبکه (۷۳ /۱۲، ۱٤/۱٤، ۱۸ و ۲۰ سانتیمتر) باشد. بطوریکه در گام شبکه ۷۳/ ۱۲ cm این رآکتور دارای ۲٥۳ میله سوخت، در گام شبکه ۱۸ cm دارای ۱۲٤ سوخت و در نهایت در گام شبکه ۲۰ cm دارای ۱۱۲ میله سوخت می باشد.

در این تحقیق، رآکتور صفر قدرت آب سنگین در گام های مختلف شبکه با استفاده از اطلاعات موجود [۱]، توسط کد MCNPX 2.6 شبیه سازی شده است (شکل ۱). در این کد قلب رآکتور با استفاده از دستور KCODE که برای چشمه محاسبات بحرانی استفاده می شود با تعداد ۱۰۰ هزار تاریخچه در هر سیکل و تعداد ۳۰۰ سیکل فعال شبیه سازی گردید. همچنین اهمیت ذرات در تمامی سلول های تعریف شده یکسان و برابر یک در نظر گرفته شده است.

دمای در نظر گرفته شده در تمامی محاسبات ۲۰ درجه سانتیگراد (متوسط دمای خنک کننده) است و از ویژگی پراکندگی S(α,β) (کارت MTn) جهت در نظر گرفتن پراکندگی حرارتی در آب سنگین و بازتابنده گرافیتی استفاده شده است. همچنین از کتابخانه سطح مقطع پیوسته ENDF/B-VI و کدهای شناسایی پایگاه داده 50.C، 59.C، 66.C و 70.C در فایل MCNPX استفاده شده است. پارامترهای نوترونی که در این تحقیق محاسبه شده است عبارتند از: ضریب تکثیر موثر (k_{eff}) به ازای ارتفاع بحرانی آب، کسر موثر نوترونهای تاخیری (β_{eff}) ، عمر نوترون های آنی (lp) و توزیع شار محوری و شعاعی نوترون.



شکل (۱) نمایی از طرح رآکتور صفر قدرت آب سنگین در کد MCNPX

نتایج:

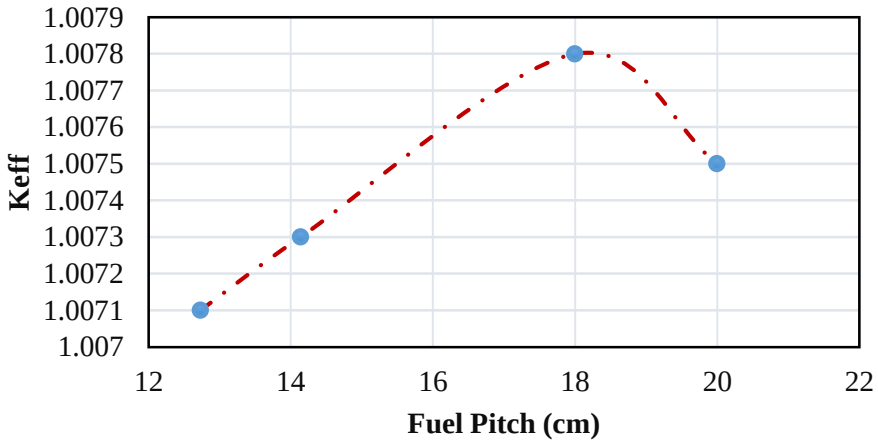
۱. محاسبات بحرانیت راکتور

ضریب تکثیر موثر (k_{eff}) با در نظر گرفتن ارتفاع آب بحرانی در داخل قلب، برای گام های شبکه مختلف انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ آمده است. خطای نسبی محاسبات ضریب تکثیر موثر (k_{eff}) در همه محاسبات، حدود ۰/۰۰۰۱ به دست آمد.

جدول (۲) محاسبات ارتفاع آب بحرانی و مقادیر ضریب تکثیر موثر در گام های شبکه مختلف

گام شبکه سوخت (cm)	۱۲/۷۳	۱٤/۱٤	۱۸/۰۰	۲۰/۰۰
ارتفاع آب بحرانی (cm)	۱٤۱/۰۰	۱٤۳/۰۰	۱٤۳/۵۰	۱۵۲/۰۰
ضریب تکثیر موثر (k_{eff})	۱/۰۰۰۷۱	۱/۰۰۰۷۳	۱/۰۰۰۷۸	۱/۰۰۰۷۵

تغییرات ضریب تکثیر موثر بر حسب تغییرات گام شبکه در شکل (۲) زیر نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد تغییرات شبکه نشان می‌دهند نواحی با گام شبکه کمتر از ۱۸ سانتیمتر به عنوان نواحی under-moderated بوده بطوریکه با افزایش دمای کندکننده و یا افزایش کسرخلاء (void) ضریب تکثیر موثر کاهش یافته و یک رآکتیویته منفی به رآکتور تزریق خواهد شد که در نتیجه آن باعث ایجاد ضریب رآکتیویته فیدبک دمایی (و یا کسر خلاء) منفی می‌گردد که برای پایداری سیستم الزامی است. در حالی‌که در نواحی بالاتر از گام شبکه ۱۸ سانتیمتر، نواحی over-moderated می باشد که با افزایش دمای کند کننده و یا افزایش کسزخلاء، ضریب تکثیر افزایش و باعث تزریق یک رآکتیویته مثبت خواهد شد که در نتیجه آن ضریب رآکتیویته فیدبک دمایی (و کسرخلاء) مثبت ایجاد خواهد نمود که باعث ایجاد ناپایداری در سیستم نسبت به دیگر مکانیزم‌های فیدبک منفی (نظیر پهن شدگی دوپلر) در اثر افزایش دما خواهد شد.



شکل (۲) تغییرات ضریب تکثیر موثر برحسب گام شبکه

۲. محاسبات سینتیک راکتور

دو پارامتر مهم در محاسبات سینتیک راکتور کسر نوترون های تا خیری موثر (β_{eff}) و عمر نوترونهای آنی (l_p) است. کسر نوترونهای تاخیری با در نظر گرفتن کارت TOTNU با ورودی No و کارت فیزیک نوترون در کد MCNPX و استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\beta_{eff} = \frac{k_{eff} - k_p}{k_{eff}} \quad (۱)$$

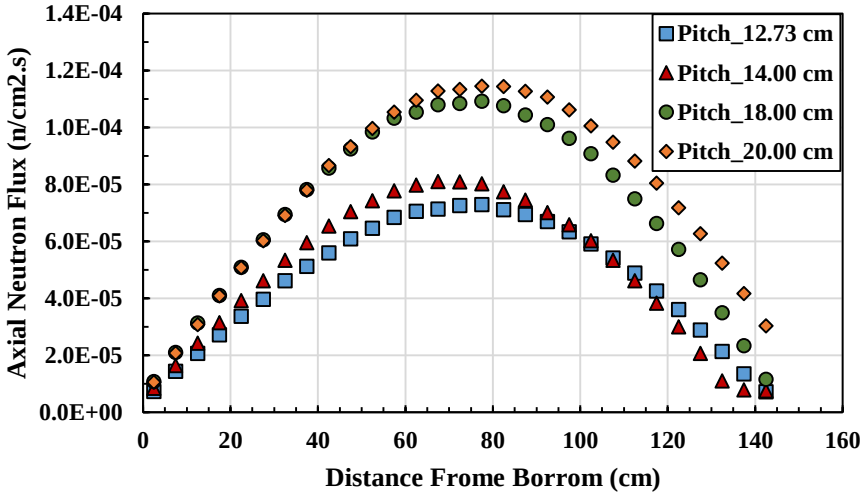
دراین فرمول k_{eff} ضریب تکثیر موثر به ازای مجموع نوترونهای تاخیری و آنی و k_p ضریب تکثیر موثر به ازای نوترونهای آنی است. عمر نوترون های آنی (l_p) در کد MCNPX 2.6 درخروجی استاندارد کد با محاسبه ضریب تکثیر موثر به ازای نوترون های آنی قابل حصول است. نتایج محاسبات پارامترهای دینامیکی قلب (β_{eff}و l_p) در جدول ۳ آمده است. میانگین خطای نسبی محاسبات β_{eff}و l_p برای گام های شبکه مختلف به ترتیب ۲/۰E-۶ و ۱/۰E-۶ به دست آمد.

جدول (۳) کسر نوترون های تاخیری موثر و عمر نوترون های آنی

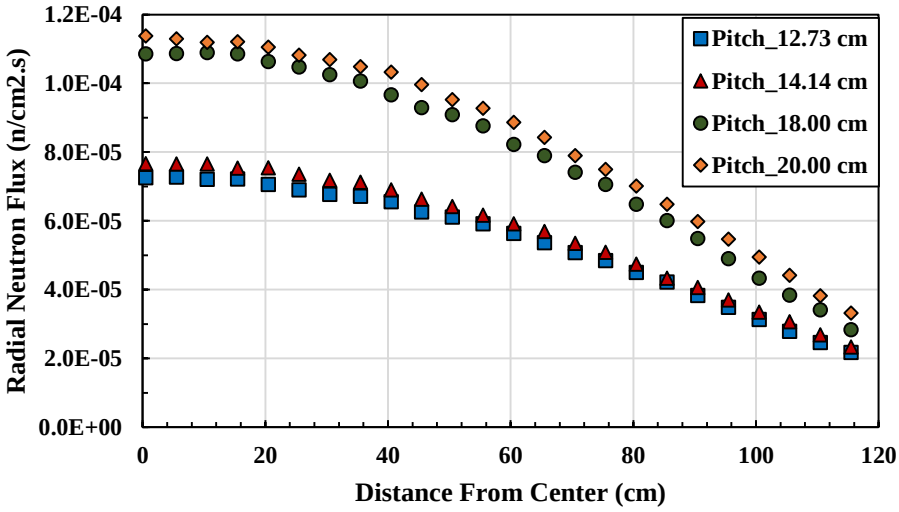
گام شبکه سوخت (cm)	۱۲/۷۳	۱٤/۱٤	۱۸/۰۰	۲۰/۰۰
کسر نوترون های تاخیری موثر (β_{eff})	۷/۰۲۵۰E-۳	۷/۰٤٤۹E-۳	۷/۱۷٤٤E-۳	۷/۱۸٤٦E-۳
عمر نوترون های آنی (sec)	۵/۷٤۳٤E-٤	٦/٤٦۳۹E-٤	۱/۰٤٤٦E-۳	۱/۲۲۵۲E-۳

۳. توزیع شار محوری و شعاعی

برای محاسبه توزیع شار در کد MCNPX از Mesh Tally نوع یک که برای محاسبه شار به کار می رود استفاده شده است. مش بندی از نوع مربعی و ابعاد مش ها در راستاهای مورد نظر به صورت ۵ cm ×۵ cm ×۵ cm در نظر گرفته شد. در شکل ۳ توزیع شار محوری کل به ازای یک نوترون در قلب رآکتور نشان داده شده است. همچنین در شکل ٤ توزیع شار شعاعی به ازای یک نوترون در قلب رآکتور در محل ماکزیمم شار محوری نشان داده شده است.



شکل (۳) توزیع شار محوری قلب رآکتور



شکل (٤) توزیع شار شعاعی به ازای یک نوترون در قلب رآکتور در محل ماکزیمم شار محوری

از آنجاییکه سطح مقطع میکروسکوپیک جذب آب سنگین برای نوترون‌های حرارتی در حدود ۰/۰۰۲٦ بارن، سطح مقطع میکروسکوپیک پراکندگی آن ۱۰/۵ بارن، کاهش لگاریتمی انرژی در هر برخورد (ζ) در آب سنگین در حدود ۰/۵۱، میانگین تعداد برخورد تا رسیدن به حالت حرارتی ۳۵/۷ و طول پخش نوترونها در آب سنگین در حدود ۱۰۰ سانتیمتر می‌باشد، نوترونها در آب سنگین نسبت به آب سبک بایستی طول بیشتری را با تعداد برخوردهای بیشتر طی نموده تا به

حالت حرارتی درآیند. بنابراین همزمان با افزایش گام شبکه و افزایش سطح بحرانی آب سنگین، فضای بهتری برای کاهش انرژی نوترونها فراهم شده و این امر باعث افزایش شار نوترونها در قلب رآکتور می‌گردد.

بحث و نتیجه گیری:

هدف از این تحقیق بررسی رفتار نوترونی قلب رآکتور صفر قدرت آب سنگین در گام های مختلف شبکه می‌باشد. نتایج نشان می دهند که با افزایش گام شبکه به دلیل کاهش تعداد میله های سوخت و در نتیجه کاهش موجودی مواد شکافان، کندکننده بیشتری جهت رسیدن به حالت بحرانی مورد نیاز است بطوریکه ارتفاع بحرانی آب سنگین در گام شبکه ۲۰ سانتیمتر در حدود ۷ درصد بیشتر از ارتفاع آب سنگین در گام شبکه ۱۲/۷۳ سانتیمتر می باشد (جدول ۲). از طرفی افزایش گام شبکه باعث می گردد طول عمر نوترونهای آنی بیشتر شود (جدول ۳)، همچنین افزایش فاصله بین میله های سوخت و افزایش ارتفاع بحرانی کندکننده سبب افزایش کسر نوترونهای تاخیری نیز می‌گردد، زیرا با افزایش گام شبکه، نوترونها فرصت کافی جهت حرارتی شدن و جذب بیشتر درسوخت را پیدا می‌کنند در نتیجه میزان شکافت نوترون‌ها در سوخت و ضریب تکثیر موثر نیز افزایش می‌یابد که به تبع آن میزان نوترونهایی که از فرآیند شکافت غیر مستقیم (واپاشی دختر هسته ها) تولید می‌شوند (نوترونهای تاخیری) نیز افزایش خواهد یافت که برآیند این عوامل سبب می گردد که کنترل رآکتور بهتر انجام شود. همچنین افزایش گام شبکه باعث می گردد به میزان ۳۰ درصد شار کل در قلب رآکتور افزایش یابد. با توجه به لزوم بهره برداری در حالت under-moderated می‌توان نتیجه گرفت که گام شبکه ۱٤/۱٤ از لحاظ بهره‌برداری ایمن، مناسبتر است، اما با توجه به میزان شار نوترونی بیشتر در گام های شبکه‌ای بالاتر، از زمان راه‌اندازی تا کنون این رآکتور با گام شبکه ۱۸ سانتیمتر مورد بهره برداری قرار گرفته است.

مراجع:

[1] China Institute of Atomic Energy, 1992. Preliminary Safety Analysis Report on Heavy Water Zero Power Reactor.

[2] A. Moosakhani, M.N. Nasrabadi, B. Timuri, 2011. Monte Carlo calculation of the core of the Heavy Water Zero Power Reactor (HWZPR) using MCNP 4C, Nuclear Engineering and Design, 241(5) 1459-1462.

[3] M. Jalali, M.R. Abdi, M. Mostajaboddavati, 2013. Reactor power measurement by gamma and neutron radiation in Heavy Water Zero Power Reactor (HWZPR), Annals of Nuclear Energy, 57, 368-374.

[4] M.N. Nasrabadi, B. Timuri, A. Moosakhani, 2014. Critical heavy water level and some parameters for the HWZPR reactor core using MCNP 4C code, Annals of Nuclear Energy, 73, 496-499.

[5] J. Khorsandi, Z. Nasr, R. Salimi, M. Ahvadvand, H. Khalafi, 2015. Heavy Water Zero Power Reactor (HWZPR) mixed core first criticality, calculation and experiments, Progress in Nuclear Energy, 85, 613-616.