

ارزیابی سیستم پایش نوترون داخل قلب راکتور VVER-1000 مدل V-446: شبیه سازی با استفاده از کد MCNP و ارزیابی با مقادیر تجربی

امام جمعه احسان^۱-رحمانی، فائزه^{۲*}-آفریده حسین^۳

۱ سازمان انرژی اتمی ایران - شرکت تولید و توسعه انرژی اتمی

۲ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده فیزیک

۳ دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک

چکیده:

یکی از انواع آشکارسازهای قابل استفاده برای بررسی و پایش فعالیت راکتور در قدرتهای مختلف استفاده از آشکارسازهای خودتوان نوترونی (SPND) هستند. برای بررسی امکان استفاده از انواع مختلف آشکارسازهای SPND در سیستم پایش درون قلب راکتور و بررسی کارایی آنها، بایستی بتوان سیگنال آشکارسازهای SPND داخل قلب راکتور VVER-1000 را بررسی نمود. لذا کد MCNP برای شبیه سازی راکتور VVER-1000 و آشکارسازهای SPND مورد استفاده قرار گرفت و سیگنال الکتریکی تولید شده توسط آشکارساز SPND بر اساس نتایج تجربی و نیز شبیه سازی مورد ارزیابی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: VVER-1000، آشکارسازهای خودتوان نوترونی (SPND)، احتمال فرار ذرات بتا، شبیه سازی مونت کارلو.

مقدمه:

در راکتورهای قدرت برای اندازه گیری توان راکتور از روش اندازه گیری شار نوترونی بوسیله آشکارسازهای اتا فک شکافت و آشکارساز خودتوان نوترونی (SPND) استفاده می شود. در راکتورهای VVER-1000 نیز از آشکارسازهای SPND برای این منظور استفاده می شود [۱-۴]. این آشکارسازها در هندسه های پیچیده تر قلب راکتور در لوله های مخصوصی تعبیه می شوند و اطلاعاتی شامل شار محلی نوترون، گرادیان تغییرات شار، قدرت حرارتی و نوترونی، نقشه نوترونی و تعادل گرمایی را از داخل قلب راکتور ارائه می کنند. در این زمینه مطالعات زیادی انجام شده که از آن جمله می توان به محاسبه میزان جریان تأخیری SPND [۵]، محاسبات مونت کارلو جریان فعال سازی نوترونی آشکارسازهای رودیومی [۳] و بررسی حساسیت لایه مرده آشکارسازهای SPND رودیومی [۲] اشاره نمود.

تاکنون شبیه سازی در زمینه پاسخ آشکارسازهای SPND در راکتورهای VVER-1000 مدل V-446 و مقایسه آن با نتایج تجربی حاصل از درون قلب راکتور انجام نشده است. در درون قلب راکتور VVER-1000، ۱۶۳ مجتمع سوخت و در درون مجتمع های سوخت تعداد ۳۱۱ میله سوخت، یک کانال مرکزی، یک کانال هادی برای جایگذاری مجتمع آشکارسازهای ICIS (In Core Instrumentation System) و ۱۸ کانال برای میله های کنترل تعبیه شده است. در ۵۴ مجتمع سوخت راکتور، مجتمع آشکارسازهای ICIS در سه نوع متفاوت وجود دارند و در هر کدام، ۷ آشکارساز SPND با فواصل یکنواخت در ارتفاع قرار دارند. تجهیزات پایش داخل قلب راکتور،

اطلاعات توزیع سه بعدی قدرت درون راکتور را برای کاربر و همینطور سیستم های ایمنی راکتور به طور برخط و همزمان فراهم می آورند.

روش کار :

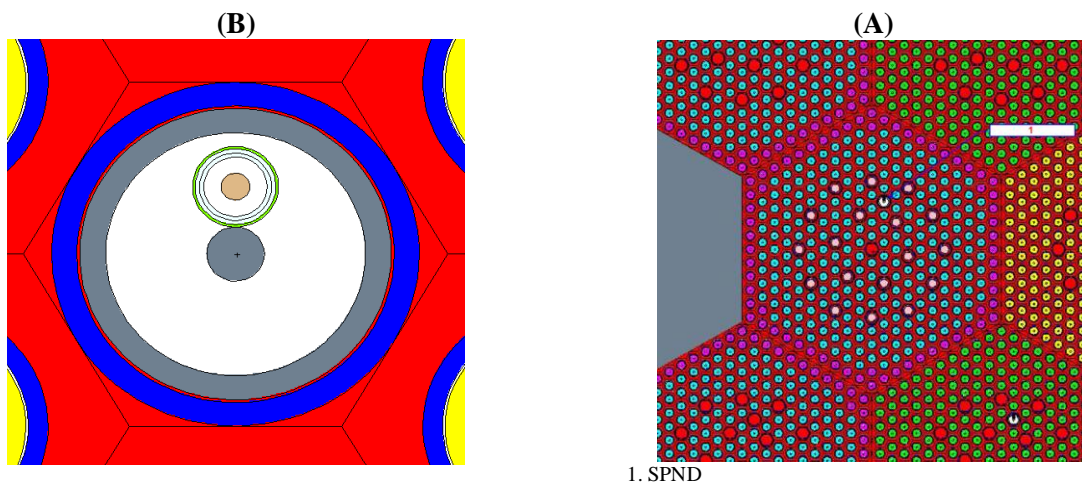
آشکارسازهای SPND رودیومی در سیستم ICIS نیروگاه های VVER-1000 استفاده می شوند که شامل امیتر رودیومی، عایق Al_2O_3 و کلکتور (معمولاً از جنس اینکنل ۶۲۵) هستند. رودیوم دارای سطح مقطع جذب بالایی برای نوترون های حرارتی است. مبنای کار این آشکارساز بر اساس واکنش گیراندازی نوترون توسط امیتر استوانه ای شکل رودیوم ^{103}Rh است. به دنبال این واکنش، رودیوم طیف بتا (الکترون های با انرژی بالا) گسیل می کند که پس از مهاجرت از طریق عایق Al_2O_3 خود را به کلکتور رسانده و مدار الکتریکی را تکمیل می کنند، لذا بدون وجود منبع خارجی باعث ایجاد جریان الکتریکی می شوند. جریان خالص الکترون ها معمولاً از امیتر (استوانه ای شکل و از جنس رودیوم ^{103}Rh) به سمت کلکتور می باشد. ^{103}Rh در مدت زمان نیمه عمر خود (۴۲ ثانیه) واپاشی بتا زا کرده که حدود ۸۷٪ از سیگنال کلی جریان الکتریکی SPND را می سازد. همچنین ایزومر ^{104m}Rh با نیمه عمر ۲۴۶ ثانیه ۷٪ از جریان کلی را شامل می شود.

معادله اساسی برای جریان تولیدی یک SPND رودیومی وجود دارد که به صورت زیر می باشد [۲]:

$$I = \epsilon P_{\beta} N \int_{Rh} \int \sigma \Phi dE dV \quad (1)$$

که در آن ϵ بار الکترون، P_{β} متوسط احتمال فرار از رزونانس، N متوسط چگالی اتمی رودیوم، σ سطح مقطع جذب نوترونی رودیوم، E انرژی الکترون، V حجم امیتر رودیومی و Φ شار نوترونی در موقعیت امیتر رودیومی می باشد. به عبارت دیگر آهنگ الکترون های گسیل شده اولیه از امیتر محاسبه شده و سپس بر اساس طیف بتا های گسیل شده از امیتر، الکترون های رسیده و جذب شده در کلکتور محاسبه می گردند. آشکارسازهای SPND در مجتمع آشکارسازهای ICIS با جزئیات شبیه سازی شدند [۶]. طیف بتای گسیل شده از انرژی ۱۰۰ keV تا انرژی ۲/۴۴ MeV تولید شدند که توزیع انرژی آنها بر اساس طیف انرژی فرمی می باشد [۳]. سپس جریان تولید شده بر اساس ترابرد الکترون های گسیلی از امیتر به سوی کلکتور محاسبه شد. سرعت گیراندازی نوترون ها در امیتر رودیوم SPND با سرعت اندر کنش گسیل بتا متناسب است، بنابراین می تواند در ارزیابی سیگنال SPND مورد استفاده قرار گیرد. وضعیت راکتور را در حالت تعادل (Steady State) در نظر می گیریم، زیرا در حالت تعادل (هنگامی که به طور دائم هسته های ^{104}Rh در حال واپاشی هستند) میزان تولید هسته های ^{104}Rh معادل میزان سرعت اندر کنش (n, γ) توسط هسته های رودیوم ^{103}Rh می باشد. نیمه عمر واپاشی هسته ^{104m}Rh حدود ۶ برابر بیشتر از هسته ^{104}Rh است، بنابراین در این حالت (حالت تعادلی) از هسته های ^{104m}Rh تولید شده، صرف نظر می شود. به هنگام تغییرات شدید شار نوترونی (مثلاً به هنگام خاموشی و یا تغییر قدرت راکتور)، میزان هسته ^{104m}Rh در امیتر رودیومی باعث اثر قابل توجهی می شود که قابل صرف نظر کردن نیست. در این مطالعه با در نظر گرفتن شرایط پایا، این فرضیات صحیح می باشد.

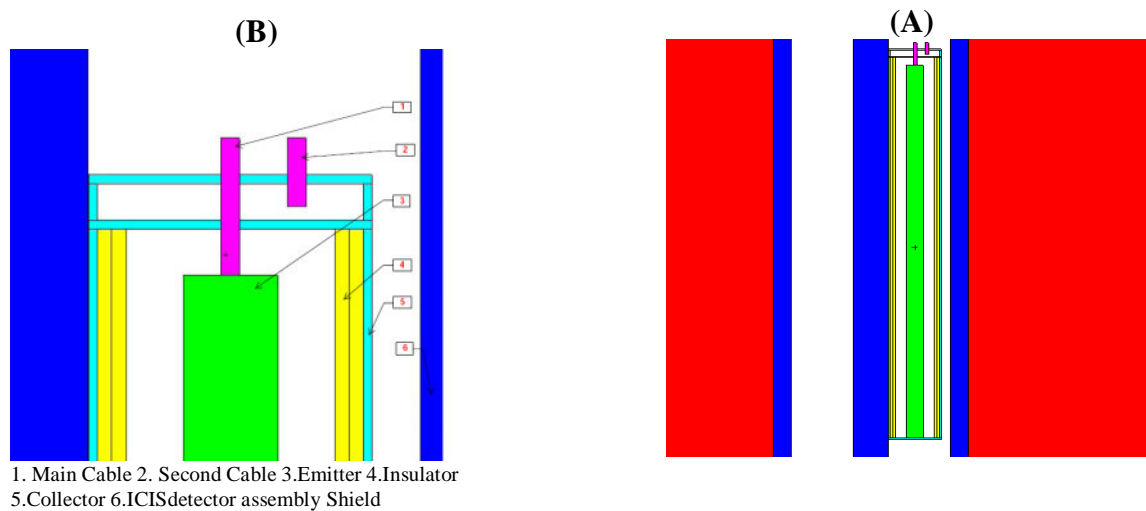
در این مطالعه مشخص نبودن میزان تولید ایزوتوپ ^{104m}Rh به هنگام واکنش گیراندازی تابشی (واکنش (n, γ)) می‌تواند به اشتباه در شبیه‌سازی جریان ایجاد شده SPND در حالت غیر پایدار منجر شود. علاوه بر آن، الکترون‌های خارجی از قسمتهای داخلی دیگر راکتور به سطوح داخلی امیتر و کلکتور برخورد کرده و می‌تواند باعث ایجاد جریان اضافی شوند که البته این مولفه در راکتور VVER-1000 نقشی ندارد و جداره خارجی مجتمع آشکارسازهای ICIS باعث جذب این الکترون‌ها و حذف این مولفه اضافی جریان می‌گردد. ضمناً پرتوهای گاما می‌توانند در اثر پدیده تولید زوج و یا فوتوالکتریک و یا کامپتون تولید الکترون کرده و باعث ایجاد جریان اضافی شوند که این مولفه بوسیله رشته دوم سیم و کسر جریان درون این رشته سیم از جریان کلی، حذف خواهد شد. گیراندازی نوترون‌ها باعث تغییر در حساسیت نسبی SPND نسبت به شار نوترونی طی زمان موجب ایجاد لایه تهی شده بر روی امیتر رودیوم در زمان طولانی بهره برداری می‌شود [۲]. بدین ترتیب برای شبیه‌سازی سیگنال SPND در قلب راکتور VVER-1000، بایستی محاسبات نوترونیک درون قلب راکتور برای آهنگ اندرکنش واکنش امیتر انجام شود. اول برای محاسبه سرعت اندرکنش جذب پرتوزا (واکنش (n, γ)) در امیتر رودیومی، مدل راکتور هسته ای VVER-1000 متشکل از ۱۶۳ مجتمع سوخت شش ضلعی با غناهای مختلف، با هر مجتمع سوخت شامل ۳۱۱ میله سوخت و تعدادی از مجتمع سوخت شامل جاذب های سوختنی و یک کانال هادی مجتمع آشکارسازهای ICIS و یک کانال هادی مرکزی و ۱۸ کانال هادی برای میله های کنترل، و در درون کانال هادی مجتمع آشکارسازهای ICIS، مجتمع آشکارسازهای ICIS شامل ۷ عدد سنسور SPND، شبیه‌سازی شد (شکل ۱) [۷، ۸].



1. SPND

شکل ۱ A, B: مدل شبیه سازی شده مجتمع سوخت در راکتور VVER-1000، کانال هادی جهت قرار گیری مجتمع آشکارسازهای ICIS و همینطور مجتمع آشکارسازهای ICIS به همراه آشکارسازهای SPND درون آن (قطر داخلی کانال=۱۱mm)

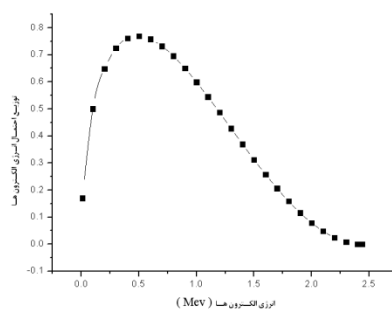
در مرحله دوم، شبیه‌سازی سیگنال SPND ترابرد الکترون‌ها در اطراف امیتر رودیومی انجام شد (شکل ۲).



1. Main Cable 2. Second Cable 3. Emitter 4. Insulator
5. Collector 6. ICIS detector assembly Shield

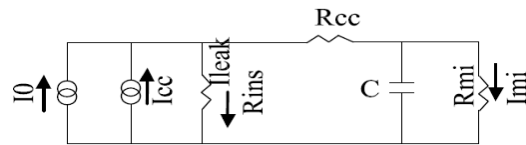
شکل A, B: مدل شبیه‌سازی شده مجتمع آشکارسازهای ICIS توسط کد MCNP (شعاع امیتر $Rh=0.5\text{mm}$ ، شعاع داخلی عایق $(Al_2O_3)=1.1\text{mm}$ ، شعاع خارجی عایق $=1.4\text{mm}$ ، شعاع خارجی کلکتور $=1.49\text{mm}$ ، طول موثر امیتر $=250\text{mm}$)

طیف الکترون‌های بتا ناشی از مدل فرمی با انرژی بیشینه $MeV\ 2/44$ در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: طیف فرمی برای واپاشی ^{104}Rh

SPND از لحاظ الکتریکی همانند منبع جریان در نظر گرفته می‌شود. مدار معادل سنسورهای اندازه‌گیری شار نوترونی (SPND) در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴: مدار معادل آشکارسازهای اندازه‌گیری شارنوترونی (SPND)

در این مدار معادل اجزاء آن عبارتند از :

I_0 : جریان ذرات باردار است که در امیتر تولید شده که توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. I_{CC} : جریان خطوط ارتباطی SPND، I_{Leak} : جریان نشتی، R_{mi} و I_{mi} مقاومت داخلی دستگاه اندازه‌گیری جریان گذرنده از آن، R_{CC} : مقاومت خطوط ارتباطی از SPND تا دستگاه اندازه‌گیری، R_{ins} : مقاومت عایق SPND، C : ظرفیت خازنی SPND و خطوط ارتباطی هستند.

در حالت تعادل پایدار جریان دستگاه اندازه‌گیری I_{mi} به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$I_{MI} = (I_0 + I_{CC}) \times R_{Ins} / (R_{Ins} + R_{CC} + R_{MI}) \quad (2)$$

نتایج :

جریان الکترونی که در کلکتور SPND ها در هر نقطه از راکتور ایجاد می‌شود با قدرت راکتور (نوترون‌های تولید شده در آن قدرت) متناسب است. با توجه به آنکه سوخت راکتور VVER-1000 اورانیوم ۲۳۵ است و شکافت غالب در راکتورهای آب سبک تحت فشار، در اورانیوم ۲۳۵ صورت می‌پذیرد، لذا تعداد نوترون تولید شده به ازای هر MWh توان راکتور برابر $2.7E20$ n/s محاسبه شد.

با توجه به آهنگ برخورد کم نوترون‌ها با امیتر رودیوم و برای کاهش خطای نسبی آهنگ اندرکنش جذب پرتوزا (واکنش (n, γ)) در محل امیتر رودیوم و نیز کوتاه‌تر شدن زمان کسب خروجی قابل قبول، تعداد نوترون‌های برخورد کننده در این منطقه با روش‌های مختلف کاهش واریانس از جمله تغییر ارزش ذرات مورد ترابرد و برخورد واداشته افزایش داده شدند. بدین ترتیب برآیند جریان الکترونی ذرات گذرنده از کلیه سطوح جانبی کلکتور آشکارساز (جمع جریان های وارد شونده به کلکتور و خارج شونده از کلکتور) محاسبه شده و برآیند الکترون‌هایی که در حجم بین سطوح کلکتور باقی مانده به عنوان جریان الکترونی در نظر گرفته شدند (جدول ۱).

جدول شماره (۱): اجزاء تشکیل دهنده جریان برآیند در کلکتور در واحد زمان

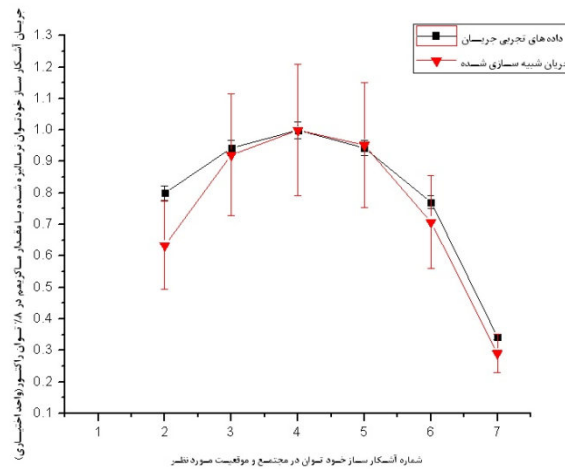
برآیند جریان الکترون های متوقف شده در کلکتور (e/s)	برآیند جریان الکترون ها به سمت داخل سلول (e/s)	برآیند جریان الکترون ها روی سطوح به سمت داخل (e/s)	جریان به سمت خارج (e/s)	جریان به سمت داخل (e/s)	سطوح SPND
2.51E-02	2.31E-02	-6.00E-02	7.19E-02	1.20E-02	سطح خارجی استوانه ای کلکتور
		8.31E-02	1.30E-01	4.67E-02	سطح داخلی استوانه ای کلکتور
	9.15E-04	-1.38E-03	1.88E-03	4.99E-04	سطح خارجی دیسک بالایی
		2.30E-03	3.66E-03	1.37E-03	سطح داخلی دیسک بالایی
	1.10E-03	3.59E-03	2.28E-03	5.87E-03	سطح خارجی دیسک پایینی
		-2.50E-03	2.76E-05	2.52E-03	سطح داخلی دیسک پایینی

محاسبات در جدول ۱ برای یک ذره بهنجار شده‌اند، بنابراین تعداد الکترون‌هایی که در واحد زمان و در قدرت ۸۰ مگا وات به کلکتورهای ۷ SPND در موقعیت (۰ ۰ ۶-) در قلب راکتور، رسیده اند و متوقف شده‌اند، (I_{SPND}^{MCNP})، محاسبه شدند (جدول ۲).

خاطر نشان می گردد که خطای نسبی در محاسبات در تمام حالات کمتر از ۱۰ درصد می باشد. نتایج تجربی (با خطای اندازه گیری ۰,۵٪) از آشکارسازهای SPND در همان موقعیت (۰ ۰ ۶-) و در اوائل کارکرد راکتور و آشکارسازهای SPND (در روز ۹۰ از اولین سیکل راکتور) برای مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی انتخاب شدند. بنابراین می توان با تقریب خوبی از اثرات لایه تهی شده و تغییر در حساسیت آشکارساز صرف نظر نمود. برای مقایسه بهتر، نتایج شبیه‌سازی آشکارسازهای SPND و نتایج تجربی به مقدار بیشینه بهنجار شده‌اند. همخوانی مناسبی بین نتایج مطابق شکل ۵ مشاهده گردید.

جدول شماره (۲): برآیند جریان الکترون‌ها در ۷ آشکار ساز SPND

توان نوترونی راکتور ۸٪ - توان الکتریکی راکتور ۸۰ MWh			
شماره آشکار ساز در موقعیت (6 0 0-) در راکتور	آهنگ گسیل بتا با در نظر گرفتن قدرت راکتور (e/s)	تعداد الکترون‌های رسیده و متوقف شده در کلکتور	بار الکتریکی ذرات متوقف شده در کلکتور در واحد زمان (جریان شبیه سازی شده به آمپر)
1	1.37E+16	3.43E+14	5.48E-05
2	3.60E+16	9.04E+14	1.45E-04
3	5.26E+16	1.32E+15	2.11E-04
4	5.70E+16	1.43E+15	2.29E-04
5	5.44E+16	1.36E+15	2.18E-04
6	4.04E+16	1.02E+15	1.62E-04
7	1.66E+16	4.16E+14	6.66E-05

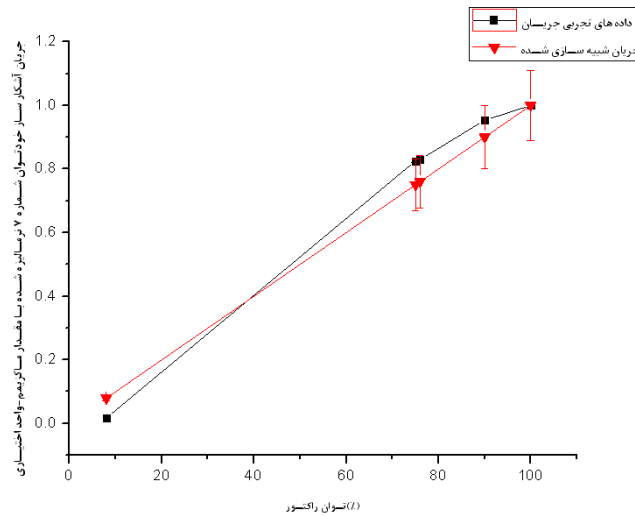


شکل ۵: مقایسه نتایج بهنجار شده (به مقدار بیشینه) شبیه‌سازی سیگنال آشکار ساز SPND شماره ۷ با مقادیر تجربی در توان نوترونی ۸٪

همچنین نتایج مقایسه پاسخ بهنجار شده آشکار سازهای SPND در قدرت‌های مختلف راکتور در همان بازه زمانی و همان موقعیت (۶۰۰-)، در شکل شماره ۶ نمایش داده شده اند. رابطه بسیار خوبی بین جریان شبیه‌سازی شده و نتایج تجربی از نظر مرتبه و رفتار نمودار جریان‌ها (افزایش و کاهش جریان‌ها) در طول ارتفاع راکتور، مشاهده گردید. در قدرت‌های بالاتر، تغییر در موقعیت قرارگیری میله‌های کنترل به منظور کنترل راکتور و برای نگهداری افسست منفی در طول ارتفاع راکتور بر اساس دستور العمل‌های بهره‌برداری منجر به کاهش مقدار داده‌های تجربی آشکار سازهای SPND در قسمت بالای قلب راکتور شده است (آشکار سازهای شماره ۴ تا ۷).

بحث و نتیجه گیری :

هماهنگی نسبی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی می‌تواند با استفاده از روش دو مرحله‌ای شبیه‌سازی سیگنال SPNDها انجام گیرد. با توجه به حجم بسیار کوچک آشکار سازهای SPND، تاریخچه بالای ذرات ردیابی شده، زمان بسیار بالای رسیدن به نتایج و غیر قابل انجام بودن محاسبات مستقیم برای شبیه‌سازی سیگنال SPNDها در راکتور توسط کد MCNP، استفاده از این روش ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۶: مقایسه نتایج بهنجار شده (به مقدار بیشینه) شبیه‌سازی با مقادیر تجربی آشکارساز شماره ۷ در موقعیت (۰-۶۰) در توان‌های مختلف راکتور

در نظر گرفتن سایر اثرات برشمرده شده خطاها را کاهش داده و به شبیه‌سازی دقیق‌تری منجر شود، طوری که این اثرات می‌توانند ۱۰ تا ۱۵٪ بر سیگنال شبیه‌سازی شده در راکتورهای VVER-1000 اثر بگذارند.

مراجع :

- [1] C. S. Yoo, B. C. Kim, J.-Ho Park, A. H. Fero, S. L. Anderson, 2005. Rhodium self-powered neutron detector's lifetime for Korean standard nuclear power plants. Nuclear Engineering and Technology, VOL.37 NO.6, pp 605-610
- [2] G. G. Kim, N. Z. Cho, 2001. Investigation of sensitivity depletion laws for rhodium self-powered neutron detectors (SPNDs). Journal of Korean nuclear society. Vol.23, NO.2, pp 121-131
- [3] S.S. Gorodkov, 2002. Monte Carlo calculation of the activation current of a rhodium neutron detector. Atomic Energy, vol 92.No.1, pp 15-20
- [4] S. Gorodkov, M. Kalugin, D. Oleynik, 2005. VVER In-core self-powered neutron detector calculational benchmark. NEA/NSC/DOC (2005)31. "Kurchatov Institute" Moscow, Russian Federation
- [5] J. Kópházi, Sz. Czifrus, S. Fehér, G. Pór, 2001. Measuring delayed part of the current of a self-powered neutron detector and comparison with calculations. International conference nuclear energy in central Europe.
- [6] ASME part II-B, 2006. ASME Boiler and pressure vessel committee and subcommittee on materials. Inconel alloy 625, pp 584
- [7] FSAR of BNPP-1, 2007. Final safety analysis report of BNPP-1, chapter 4. 49. BU.10.0.OO.FSAR.RDR001. Bushehr, Iran
- [8] 2010. Album of neutron and physical characteristics of the initial fuel inventory, 49.BU.1 0.00.AB.WI.ATEX.011, Bushehr, Iran