



ثابت واپاشی نوترون آنی در قلب راکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان: مقایسه‌ی آزمایش رُسی - آلفا و شبیه‌سازی مونته کارلو

محمد ارکانی^۱، حسین خلفی*^۱، ناصر وثوقی^۲، صمد خاکشورنیا^۱

۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران
۲. دانشکده‌ی مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۱۱۴-۱۴۵۶۵، تهران - ایران

چکیده: یکی از روش‌های سودمند برای شناسایی سامانه‌های زیربحرانی، روش رُسی - آلفا است. در این پژوهش، این روش برای اندازه‌گیری ثابت واپاشی نوترون آنی در قلب راکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان به کار گرفته شده است. برای راه‌اندازی شکافت زنجیره‌ای در این سامانه، از یک چشمه‌ی ^{252}Cf استفاده، و داده‌های تجربی به صورت زمان ورود پالس‌های تصادفی از طریق سامانه‌ای اختصاصی جمع‌آوری، و بر روی کامپیوتر ذخیره شد. سپس این داده‌ها به صورت ناهم‌زمان در محیط نرم‌افزار مهندسی متلب پردازش، و توزیع رُسی - آلفا استخراج شد. در پایان، با برازش رابطه‌ی متناسب بر توزیع رُسی - آلفا، پارامتر ثابت واپاشی نوترون آنی استخراج شد. قلب راکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان از طریق شبیه‌سازی نیز با استفاده از کد MCNPX مطالعه شد. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از هر دو روش فوق تطابق نسبتاً خوبی را نشان می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: راکتور زیربحرانی، تحلیل رُسی - آلفا، ثابت واپاشی نوترون آنی، کد MCNPX

Prompt Neutron Decay Constant in Esfahan Light Water Subcritical Reactor (ELWSCR): Comparison of Rossi- α Experiment and Monte Carlo Simulation

M. Arkani¹, H. Khalafi*¹, N. Vosoughi², S. Khakshournia¹

1. Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran-Iran
2. Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.Box: 14565-1114, Tehran-Iran

Abstract: Rossi- α method is one of the useful techniques for diagnosis of subcritical nuclear reactors. In the present work, Rossi- α method was used to measure the prompt neutron decay constant of the reactor core of the Esfahan Light Water Subcritical Reactor (ELWSCR), and to drive the neutron chain reactions, a ^{252}Cf neutron source was used. The experimental data in the form of the arrival time of the stochastic pulses were collected by a dedicated data acquisition system, and the required data were stored in a PC. Offline processing of the data was performed by the MATLAB software engineering tool, and Rossi distribution was extracted. Finally, by the curve fitting of Rossi distribution function to the processed data, the prompt neutron decay constant of the core was determined. Based on MCNPX code simulation, the reactor core was also studied. A comparison of the results obtained by the two methods shows a fairly good agreement.

Keywords: Subcritical Reactor, Rossi- α Analysis, Prompt Neutron Decay Constant, MCNPX Code



۱. مقدمه

از جمله روش‌های سودمند برای تحلیل سامانه‌های زیربحرانی، روش‌هایی هستند که بر پایه‌ی نظریه‌ی نوین راکتور صفر-قدرت^(۱) تعریف شده‌اند. از مزیت‌های مهم این نوع تحلیل، اندازه‌گیری در شرایط کار عادی راکتور بدون نیاز به مولد پالس نوترون است. به دلیل آن که راکتور آب‌سبک زیربحرانی اصفهان^(۲) به ژنراتور پالس نوترون مجهز نیست، تحلیل نوین راکتور صفر-قدرت یکی از روش‌های سودمند و عملیاتی برای این‌گونه از سامانه‌های زیربحرانی است. راکتور ELWSCR، سامانه‌ی عمیقاً زیربحرانی است. ضریب تکثیر این سامانه براساس محاسبات

با استفاده از کد MCNPX [۱]، به‌طور تقریبی برابر با 0.87739 ± 0.00051 است، یعنی راکتیویته‌ای در حدود $21/5$ -دلار (با احتساب $\beta_{eff} = 0.0065$). در بخش ۳ در مورد جزئیات این سامانه‌ی زیربحرانی اطلاعات بیشتری ارائه شده است. در چنین سامانه‌ای، به دلیل آن‌که زنجیره‌های شکافت نوترونی، تحت تأثیر ثابت واپاشی بزرگ نوترون آبی سریعاً میرا می‌شوند، استفاده از روش‌های تحلیل نوین، نیازمند ابزارهای مفیدی برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های تجربی و آماری راکتوراند.

کاربرد تحلیل نوین در این راکتور برای اولین بار در این پژوهش مطالعه می‌شوند. با استفاده از یک سخت‌افزار [۲، ۳] حجم مناسبی از داده‌های تجربی مربوط به آفت و خیزهای فاصله-ی زمانی بین پالس‌های آشکار شده در این راکتور ثبت، و در کامپیوتر ذخیره شد. در مرحله‌ی بعد، تحلیل رُسی-آلفا در محیط نرم‌افزار مهندسی متلب [۴]، به‌صورت ناهم‌زمان بر این داده‌ها انجام شد و مقدار ثابت واپاشی نوترون آبی به‌دست آمد. هم‌چنین نظر به آن‌که کد محاسباتی MCNPX قادر است رفتار تابع زمان ذرات را در محیط‌های ایستا شبیه‌سازی کند، ثابت واپاشی نوترون آبی نیز با این کد محاسبه، و با نتایج تجربی مقایسه شده است. با توجه به این‌که این راکتور دارای راکتیویته منفی بزرگی است، روشی که منحصربه‌فرد و ایده‌آل برای اندازه‌گیری پارامتر ثابت واپاشی نوترون آبی در آن باشد، روش رُسی-آلفا است. هم‌چنین با توجه به زمینه‌ی بسیار ضعیف نوترون و گاما در این راکتور، این آزمایش به‌طور ویژه می‌تواند

مفید واقع شود. بر خلاف روش فاینمن-آلفا، اساساً روش رُسی-آلفا در نرخ‌های پایین شمارش نوترون‌ها پاسخ خوبی به‌دست می‌دهد [۵-۹].

۲. تحلیل آماری رُسی-آلفا

یکی از بهترین روش‌های تحلیل آفت و خیزهای آماری نوترون‌های آشکار شده در قلب راکتور، روش رُسی-آلفا است. این روش در ابتدا برای راکتورهای سریع ارایه شد، ولی با ابزارهای جدید امروزی در راکتورهای حرارتی نیز قابل کاربرد است. هدف اصلی در این روش، اندازه‌گیری طول عمر نوترون یا راکتیویته قلب راکتور به‌طور مستقیم است. این روش بر پایه‌ی اطلاعاتی است که از تابع احتمال آشکارسازی یک نوترون در بازه‌ی زمانی Δt_r حول t_r به‌دست می‌آید، به طوری که نوترون دیگری در بازه‌ی زمانی Δt_1 حول t_1 آشکار شده باشد. از رابطه-ی زیر می‌توان احتمال رخداد را محاسبه کرد [۳]:

$$P_{Rossi}(t_1, t_r) = A \Delta t_1 \Delta t_r + B \Delta t_1 \Delta t_r e^{-\alpha(t_r - t_1)} \quad (1)$$

در این رابطه، A متوسط نرخ شمارش نوترون‌های آشکار شده است. پارامترهای B و α به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$B = \varepsilon \frac{U(U-1)}{2\alpha \tau_f} \quad (2)$$

(۳)

$$\alpha = \frac{\beta - \rho}{\Lambda}$$

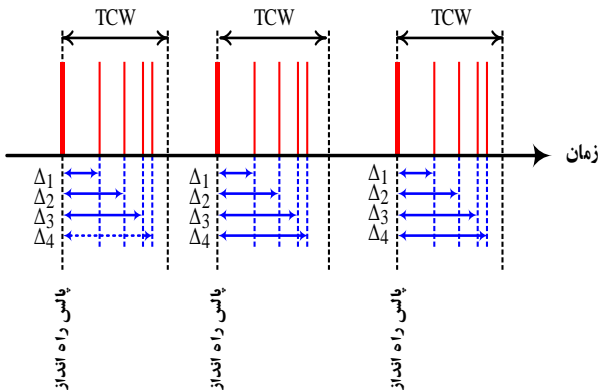
رابطه‌ی (۱) نشان‌دهنده‌ی تابع توزیع احتمال شمارش در زمان-های t_1 و t_2 است. سمت راست این رابطه به ترتیب شامل عبارت-های مربوط به واکنش‌های همبسته‌ی زنجیره‌ای^(۳) و تصادفی^(۴) است. رابطه‌ی (۴)، با علامت اختصاری $\tau = t_2 - t_1$ ، با نام توزیع احتمال رُسی شناخته شده است که عبارت است از [۱۰-۱۵]:

(۴)

$$P_{Rossi}(\tau) = N_{UC} + N_C e^{-\alpha\tau}$$



متوسط و تقریبی ۳۶ cm است بر روی شبکه‌ای از جنس پلگسی گلاس^(۶) به صورت آویز قرار گرفته است. سوخت راکتور، اورانیم طبیعی فلزی است که با لایه‌ای از نیکل پوشش داده شده، و تعداد میله‌های سوخت ۲۴۰ عدد است. کندکننده راکتور ELWSCR، آب معمولی است. جدول ۱، مشخصات کلی این



شکل ۱. نحوه‌ی تحلیل رُسی - آلفا نوع اول.

در اصطلاح به پارامتر τ پنجره‌ی زمانی اطلاق می‌شود. تابع توزیع احتمال $P_{Rossi}(\tau)$ در آزمایش تجربی رُسی - آلفا اندازه‌گیری، و بر نتایج به دست آمده از رابطه‌ی (۴) برازش می‌شود. یکی از پارامترهای منحنی برازش شده، α است که شامل اطلاعاتی در مورد میزان راکتیویته، کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری، و طول عمر نوترون‌های آبی است. پارامتر α در اصطلاح، ثابت واپاشی نوترون آبی نامیده می‌شود.

شکل ۱، نشان‌دهنده‌ی نحوه‌ی تحلیل داده‌ها در روش رُسی - آلفا نوع اول است. در این روش، اولین پالس هر زنجیره‌ی تصادفی که در پنجره‌های زمانی $TCW^{(۵)}$ قرار دارند، پالس مبدأ زمانی در نظر گرفته می‌شود. تحلیل داده‌ها منجر به محاسبه‌ی میزان وابستگی پالس‌های ثانویه به پالس آغازکننده‌ی زنجیره می‌شود. این الگوریتم بر روی تعداد زیادی از پنجره‌های زمانی تکرار، و در نهایت میزان متوسط وابستگی محاسبه خواهد شد. هر چقدر تعداد پنجره‌های زمانی بیشتر باشد، به دنبال آن زمان جمع‌آوری اطلاعات بیشتر می‌شود و خطای آماری نتایج کاهش می‌یابد.

۳. آشنایی با راکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان

راکتور زیربحرانی شامل ترکیبی از مواد شکافان و دیگر مواد است که ضریب تکثیر در مجموعه کوچک‌تر از عدد ۱ باشد و اساساً امکان بحرانی شدن این سامانه وجود نداشته باشد. از این رو این نوع راکتورها، از ایمنی ذاتی بالایی برخوردارند و به سامانه‌های کنترل نیازی ندارند (چنانچه $k < 1$ ولی خیلی نزدیک به ۱ باشد، سامانه‌ی کنترل لازم است). راکتورهای زیربحرانی، موارد استفاده‌ی فراوانی در مطالعات مربوط به فیزیک راکتور دارند. از جمله این موارد می‌توان به اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز در طراحی راکتور، بررسی‌های مربوط به شکل شبکه‌های سوخت، و مطالعات مربوط به جذب و انعکاس نوترون اشاره کرد. راکتور زیربحرانی آب‌سبک که در مرکز هسته‌ای اصفهان در دسترس است، مجموعه‌ای از مواد شکافان با غنای طبیعی است که در آن آب‌سبک به عنوان کندکننده و حفاظ بیولوژیکی، فضای خالی بین میله‌های سوخت را پُر کرده است. کل مجموعه‌ی سوخت و کندکننده در داخل یک تانک استوانه‌ای شکل با شعاع حدود ۶۸ cm و ارتفاع حدود ۱۹۰ cm قرار گرفته است. در وسط این تانک، قلب راکتور که متشکل از شبکه‌ای شش ضلعی به شعاع

جدول ۱. مشخصات کلی راکتور زیربحرانی

مشخصه	توضیحات
نوع راکتور	تانک استوانه‌ای
کندکننده	آب سبک
نوع شبکه	شش ضلعی
گام شبکه	~ ۴٫۷ cm
تعداد میله‌های سوخت	۲۴۰
شعاع قلب راکتور	~ ۳۶ cm
ارتفاع قلب راکتور	~ ۱۰۰ cm
شعاع تانک راکتور	~ ۶۸ cm
قطر سوخت	~ ۳ cm
نوع سوخت	اورانیم طبیعی فلزی

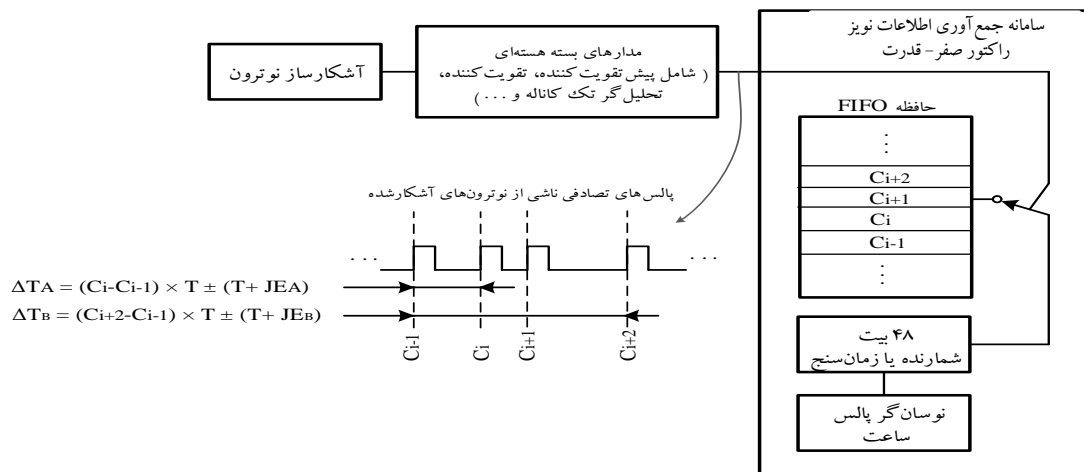
راکتور را نشان می‌دهد. نظر به آن که در راکتور زیربحرانی واکنش‌های زنجیره‌ای بدون حضور چشمه‌ی خارجی، با نرخ بسیار اندکی رخ می‌دهند، قلب راکتور زیربحرانی با استفاده از چشمه‌های نوترونی مانند ^{252}Cf برای انجام آزمایش‌های مربوطه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. اطراف قلب راکتور حدود ۳۰ cm آب‌سبک قرار گرفته است که نقش حفاظ بیولوژیکی را بر



شکل ۲، نشان‌دهنده‌ی نمودار کلی سامانه‌ی اندازه‌گیری ثابت واپاشی نوترون آنی در راکتور ELWSCR است. بخش‌های آشکارساز نوترون و مدارهای بسته‌ی الکترونیک هسته‌ای، بخش‌های کلاسیک در آشکارسازی نوترون هستند. برای

عهده دارد. هم‌چنین به دلیل آن‌که این راکتور به صورت ذاتی زیربحرانی است، به سامانه‌های کنترل و ایمنی نیازی ندارد.

۴. سامانه‌ی اندازه‌گیری و چیدمان آزمایش



شکل ۲. نمودار کلی سامانه‌ی اندازه‌گیری استفاده شده در تحلیل رُسی - آلفا در راکتور ELWSCR [۲].

۵. شبیه‌سازی آزمایش چشمه‌ی نوترون پالسی با

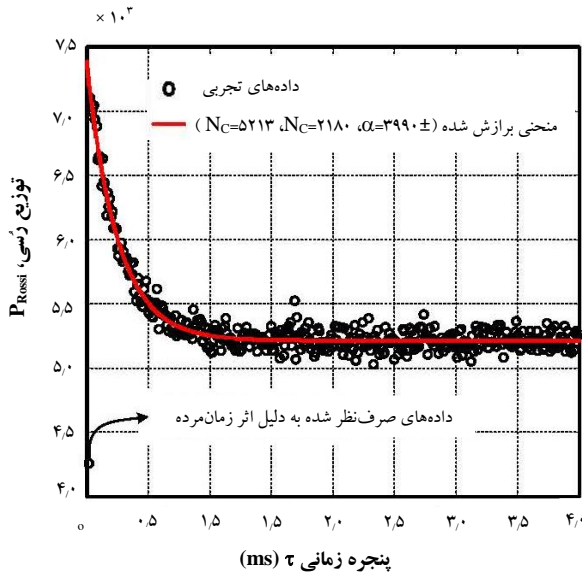
استفاده از کد MCNP

در این پژوهش، کد محاسباتی MCNPX [۱] به منظور شبیه‌سازی قلب راکتور ELWSCR به کار گرفته شد. چیدمان قلب راکتور ELWSCR شبیه‌سازی شده با کد MCNPX در شکل ۳ نشان داده شده است. چشمه‌ی نوترون پالسی در این شبیه‌سازی یک چشمه‌ی نوترون نقطه‌ای با تابع توزیع احتمال همسان‌گرد در همه‌ی زوایا برای گسیل نوترون با انرژی ۱ MeV است. تعریف تالی^(۹) به دو صورت موضعی و گسترده در فضای کندکننده انجام پذیرفته است. در حالت اول، در کنار قلب راکتور، یکی از سلول‌های کناری قلب، و در حالت دوم کل کندکننده موجود در قلب راکتور به عنوان سلول‌هایی که خروجی روی آن‌ها تعریف شده، در ورودی کد لحاظ شد. نظر به آن‌که ثابت واپاشی نوترون در این سامانه بسیار بزرگ است، از این‌رو بازه‌ی زمانی مورد بررسی تا حدود ۳s مناسب است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در بخش بعدی این مقاله ارائه شده است. در این‌جا لازم است اشاره شود که تعریف تالی روی یکی از سلول‌های کناری قلب راکتور، آثار هندسی و تابعیت چگونگی گسترش واکنش زنجیره‌ای در فضای قلب را به همراه دارد، در حالی‌که این تعریف روی کل حجم کندکننده‌ی داخل قلب راکتور،

اندازه‌گیری‌های مورد نظر در این پژوهش، از یک آشکارساز BF_۳ نسبتاً بزرگ با قطر خارجی ۲٫۹ cm و طول ۵۰ cm استفاده شد. پالس‌های آشکارساز بعد از تقویت، از مدار تمیزدهنده‌ی سطح ولتاژ عبور می‌کنند و اغتشاشات ناشی از پرتوهای گاما یا نویز الکتریکی محیط از آن حذف و جداسازی می‌شود. خروجی این مدار بسته، پالس‌های منطقی با سطح ولتاژ ۵V با استاندارد TTL است. در سامانه‌ی جمع‌آوری اطلاعات^(۷)، یک نوسان‌گر که با فرکانس ۱۰۰ MHz کار می‌کند، وظیفه‌ی گسسته‌سازی زمان را بر عهده دارد. به این ترتیب، در اثر شمارش این نوسان‌ها با شمارنده^(۸)، یک مرجع زمانی برای تمامی پالس‌های آشکار شده ایجاد می‌شود. ورود هر پالس به سامانه‌ی جمع‌آوری اطلاعات، سبب ثبت زمان با این شمارنده در حافظه‌ی FIFO می‌شود. در مرحله‌ی بعد، این داده‌ها با یک نرم‌افزار رابطی به منظور ثبت و تحلیل‌های ناهم‌زمان بعدی به کامپیوتر ارسال می‌شود. تفاضل زمان‌های ورود دو پالس دلخواه به سامانه‌ی جمع‌آوری اطلاعات، فاصله‌ی زمانی بین دو واقعه‌ی مورد نظر را به دست می‌دهد. به دلیل آن‌که دو نوع خطا در نتایج اندازه‌گیری محتمل است، تکنیک ارائه شده سبب حداقل شدن خطای تجمع‌ی در تحلیل‌های دلخواه می‌شود [۲].



نوترون‌های تأخیری است، تطابق خوبی بین تجربه و رابطه‌ی (۱) مشاهده می‌شود. مقدار ثابت واپاشی نوترون آبی در قلب راکتور زیربحرانی اصفهان به روش تجربی برابر 3990 ± 177 و شبیه‌سازی برابر 3572 ± 30 به دست آمد. نظر به بزرگی ثابت آلفا در قلب ELWSCR، بین تجربه و تئوری خطایی حدوداً برابر با 10.5% مشاهده می‌شود. علل عمدی اختلاف مشاهده شده می‌تواند در قالب موارد زیر خلاصه شوند:



شکل ۴. نتایج تجربی به دست آمده از آزمایش رُسی- آلفای نوع اول در راکتور ELWSCR

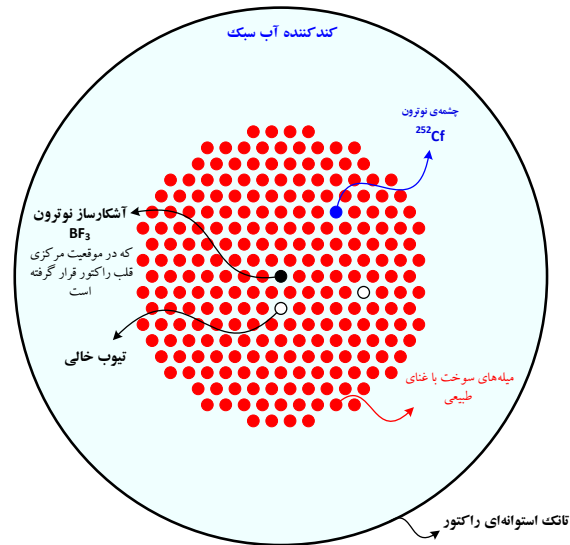
(۱) در شبیه‌سازی، آشکارساز مدل نشده است. از این‌رو انتظار می‌رود که ثابت واپاشی نوترون آبی، در اندازه‌گیری بزرگ‌تر تخمین زده‌شود.

(۲) در شبیه‌سازی، تالی روی کل قلب راکتور تعریف شده است، در حالی که در اندازه‌گیری انجام شده، تنها نوترون-هایی که به آشکارساز می‌رسند و واکنش انجام می‌دهند بر نتایج تجربی اثرگذارند.

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ثابت واپاشی نوترون آبی در قلب راکتور ELWSCR به کمک دو روش تجربی با تحلیل رُسی- آلفا و تئوری با استفاده از کد MCNP محاسبه شده است. در روش تجربی با استفاده از یک آشکارساز BF_3 که در یکی از نواحی خالی در قلب راکتور قرار داده شده بود، با استفاده از یک

نوعی متوسط‌گیری پارامتر موردنظر در کل قلب راکتور است. به هر حال انتظار می‌رود که در هر دو حالت، پاسخ‌های گذرایی در لحظات اولیه مشاهده شوند که سریعاً نیز از بین می‌روند. این حالات گذرا ناشی از هارمونیک‌های بالاتر از پاسخ سامانه‌ی قلب راکتور است.



شکل ۳. نحوه‌ی چیدمان قلب راکتور ELWSCR

۶. نتایج و بحث

شکل ۴، نشان‌دهنده‌ی نتایج تجربی به دست آمده از تحلیل رُسی- آلفا در راکتور ELWSCR است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، به دلیل اثر زمان مرده‌ی سامانه‌ی آشکارسازی مورد استفاده که از مقیاس چند میکروثانیه است، از داده‌ی تجربی اول (داده‌ای که توضیح لازم برای آن بر روی شکل ارائه شده است) حاصل از فرایند برازش منحنی بر نتایج تجربی، صرف نظر شده است تا اعوجاج تابع توزیع احتمال به دست آمده بر روی مقدار اندازه‌گیری شده‌ی ثابت واپاشی نوترون آبی اثرگذار نباشد. زیرا در فاصله‌زمانی‌های خیلی کوتاه، به دلیل اثر زمان مرده، امکان مشاهده‌ی پالس‌های متوالی کاهش می‌یابد.

در محیط نرم‌افزار متلب، بر داده‌های تجربی به دست آمده، توزیع رُسی- آلفا [رابطه‌ی (۱)] برازش شد. بر خلاف آن که رابطه‌ی (۱) دارای مدل سینتیک نقطه‌ای و بدون در نظر گرفتن



5. TCW: Total Channel Width in Rossi- α Analysis
6. Plexiglas
7. ZPR Noise DAS
8. 48-Bit Counter/Timer
9. Tally

مراجع

- [1] H.G. Hughes, et al., MCNPXTM 2.4.0, User's Manual, Version 2.4.0, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-02-408 (2002).
- [2] M. Arkani, H. Khalafi, N. Vosoughi, Development of an embedded FPGA-based data acquisition system dedicated to zero power reactor noise experiments, *Metrol. Meas. Syst.* **21** (2014) 433-446.
- [3] M. Arkani, Measurement of Tehran and Esfahan Research Reactors Kinetic Parameters using Reactor Noise Diagnostic Methods, Nuclear Science and Technology Research Institute, Ph.D. Thesis (2015).
- [4] Mathworks, MATLAB Reference Guide. The Math Works Inc, (2013).
- [5] M. Arkani, H. Khalafi, N. Vosoughi, S. Khakshournia, A FPGA based Time Analyser for Stochastic Methods in Experimental Physics, *Instrum. Exp. Technol.* **3** (2015) 350-358.
- [6] M. Arkani, H. Khalafi, N. Vosoughi, S. Khakshournia, Design and construction of a two-channel data acquisition system for random processes based on FPGA, *J. Nucl. Sci. Tech.* **76** (2016) 29-38.
- [7] J.A. Thie, Reactor Noise, Rowman and Littlefield Inc., New York (1963).
- [8] R.E. Uhrig, Random Noise Techniques in Nuclear Reactor Systems, the Ronald Press Company, New York (1970).
- [9] M.M.R. Williams, Random Process in Nuclear Reactors, Pergamom Press (1974).

سامانه‌ی جمع‌آوری اطلاعات که به طور اختصاصی به این منظور طراحی و ساخته شده است، اُفت و خیزهای آماری نوترون‌های درون قلب راکتور اندازه‌گیری، و در کامپیوتر ثبت و ذخیره شد. سپس این داده‌ها به صورت ناهم‌زمان تحلیل و پارامتر ثابت واپاشی نوترون آنی از این داده‌ها استخراج شد. هم‌چنین از طریق شبیه‌سازی قلب راکتور، این پارامتر به طور جداگانه محاسبه شد. این پژوهش نشان داد بر خلاف آن‌که راکتور زیربحرانی اصفهان دارای راکتیویته منفی بزرگی است، روش رُسی - آلفا در این سامانه قابل انجام است و نتایج به دست آمده می‌تواند به پژوهشگران هسته‌ای کشور در درک بهتری از این راکتور کمک شایان توجهی کند.

اختصارات

T : پارامتر گسسته‌سازی زمان
 C_i : عدد شمارش شده در شمارنده در لحظه‌ی ورود پالس i ام به سامانه‌ی جمع‌آوری اطلاعات
 ΔT_A و ΔT_B : فاصله‌ی زمانی بین پالس‌های متوالی
 JE : خطای مربوط به لرزش فرکانسی
 DAS : سامانه‌ی جمع‌آوری اطلاعات
 $ZPRN$: نویز راکتور صفر - قدرت
 α : ثابت واپاشی نوترون آنی
 ρ : راکتیویته قلب راکتور
 β : کسر نوترون تأخیری
 Λ : زمان متوسط نسل نوترون
 U : بهره‌ی شکافت نوترونی
 E : بازده‌ی آشکارسازی نوترون در آزمایش رُسی - آلفا
 τ_f : معکوس Σ_f
 Σ_f : سطح مقطع ماکروسکوپیکی شکافت
 N_C : شمارش‌های همبسته
 N_{UC} : شمارش‌های غیر همبسته

پی‌نوشت‌ها

1. ZPRN: Zero Power Reactor Noise
2. ELWSCR: Esfahan Light Water Sub-Critical Reactor
3. Chain Correlated
4. Random Events



- [11] P. Baeten, Heuristic derivation of the Rossi- α formula for a pulsed neutron source, *Ann. Nucl. Energ.* **31** (2004) 43-53.
- [12] Y. Kitamura, M. Matoba, T. Misavita, H. Unesaki, S. Shiroya, Reactor Noise Experiments by using Acquisition System for Time Series Data of Pulse Train, *Nucl. Sci. Technol.* **36** (1999) 653-660.
- [13] Y. Kitamura, I. Pázsit, J. Wright, A. Yamamoto, Y. Yamane, *Ann. Nucl. Energ.* **32** (2005) 671-692.
- [10] F. Akino, H. Yasuda, Y. Kaneko, Determination of large negative reactivity by integral versions of various experimental methods, *Nucl. Sci. Technol.* **17** (1980) 593-615.
- [14] Y. Kitamura, K. Taguchi, T. Misawa, I. Pázsit, A. Yamamoto, Y. Yamane, C. Ichihara, H. Nakamura, H. Oigawa, Calculation of the stochastic pulsed Rossi- α formula and its experimental verification, *Prog. Nucl. Energ.* **48** (2006) 37-50.
- [15] G.E. Ragan, J.T. Mihalcz, R.C. Robinson, Prompt neutron decay constants at delayed criticality for the Oak Ridge Research Reactor with 20 and 93 wt% ²³⁵U enriched fuel, *Ann. Nucl. Energ.* **24** (1997) 21-31.