



## اندازه‌گیری ثابت واپاشی نوترون آنی در قلب رآکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان با استفاده از تحلیل فاینمن - آلفا

محمد ارکانی\*<sup>۱</sup>، صمد خاکشورنیا<sup>۱</sup>، حسین خلفی<sup>۱</sup>، ناصر وثوقی<sup>۲</sup>

۱. پژوهشکده‌ی رآکتور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

۲. دانشکده‌ی مهندسی انرژی، دانشگاه شریف، صندوق پستی: ۱۱۱۴-۱۴۵۶۵، تهران - ایران

**چکیده:** روش‌های شناسایی که بر پایه‌ی تئوری نوفه‌ی رآکتور قدرت صفر هستند، در اندازه‌گیری پارامترهای جنبشی قلب رآکتورهای هسته‌ای بسیار رایج، پُر کاربرد و البته از جمله روش‌های استاندارد در شناسایی قلب رآکتورهای هسته‌ای می‌باشند. از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به روش کارآمد فاینمن - آلفا اشاره نمود. در رآکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان، سامانه‌ی قلب رآکتور عمیقاً زیربحرانی است. از این رو پارامتر ثابت واپاشی نوترون آنی در این سامانه، کمیت منفی بزرگی است. در این پژوهش، با استفاده از سامانه‌ی جمع‌آوری اطلاعات ویژه‌ای، این پارامتر به وسیله‌ی تحلیل فاینمن - آلفا در پنجره‌های زمانی با قدرت تفکیک  $100 \mu\text{s}$  تخمین زده شد. مقدار تجربی پارامتر ثابت واپاشی نوترون آنی در این سامانه برابر با  $[s^{-1}] 3966 \pm 88$  برآورد شده است. از تحلیل رُسی - آلفا، این مقدار در مراجع برابر با  $[s^{-1}] 3990 \pm 177$  برای این سامانه گزارش شده است. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با مقدار تخمین زده شده از روش رُسی - آلفا، سازگاری نسبتاً خوبی را در گستره‌ی عدم قطعیت آماری به دست آمده نشان می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل فاینمن - آلفا، رآکتور زیربحرانی، ثابت واپاشی نوترون آنی، نوفه‌ی رآکتور قدرت صفر

## Measurement of Prompt Neutron Decay Constant in Esfahan Light Water Subcritical Reactor Utilizing Feynman- $\alpha$ Analysis

M. Arkani\*<sup>1</sup>, S. Khakshournia<sup>1</sup>, H. Khalafi<sup>1</sup>, N. Vosoughi<sup>2</sup>

1. Reactor Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

2. Department of Energy Engineering, Sharif University, P.O.Box: 14565-1114, Tehran - Iran

**Abstract:** Diagnostic methods based on zero power reactor noise theory are very common and widely applicable in kinetic parameters and are also one of the standard diagnosis methods of nuclear reactor cores. Feynman- $\alpha$  method is one of these efficient methods of diagnosis. In this work, this method is employed to measure the prompt neutron decay constant of the Esfahan Light Water Subcritical Reactor (ELWSCR). The ELWSCR is a deep subcritical reactor. Therefore, the prompt neutron decay constant of the core is a large negative quantity. Using an especial data acquisition system, the prompt neutron decay constant of the core, based on the Feynman- $\alpha$  analysis, is estimated to be  $3966 \pm 88 \text{ sec}^{-1}$ . The time window of  $100 \mu\text{s}$  is employed in this investigation. By applying the Rossi- $\alpha$  method, this parameter has already been reported to be  $3990 \pm 177 \text{ sec}^{-1}$  in references. The comparison shows that our results are in a rather good agreement with that estimated by the Rossi- $\alpha$  method within the range of statistical uncertainties.

**Keywords:** Feynman- $\alpha$  Analysis, Subcritical Reactor, Prompt Neutron Decay Constant, Zero Power Reactor Nois



## ۱. مقدمه

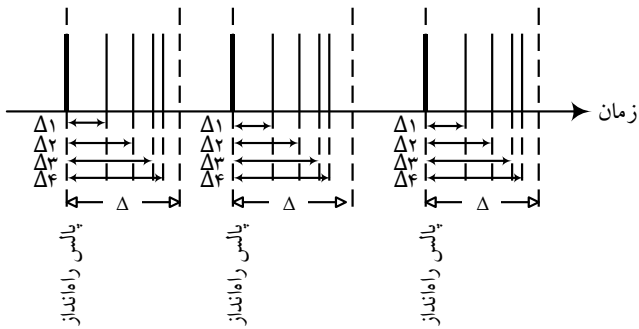
در اُفت و خیزهای آماری داده‌های به دست آمده از آشکارسازهای هسته‌ای، اطلاعات مهمی پنهان است که استخراج آن‌ها نیازمند به کارگیری روش‌های منحصر به فرد است. این اُفت و خیزها که در این پژوهش به صورت شمارش‌های سامانه‌ی آشکارسازی نوترون در پنجره‌های زمانی مشخصی هستند، به شکل زنجیره‌ای از پالس‌های تصادفی می‌توانند در خروجی آشکارساز هسته‌ای مشاهده شوند. جنبه‌های مختلفی از این وقایع ارزیابی می‌شوند، که از آن جمله می‌توان به انرژی یا ارتفاع پالس ایجاد شده، هم‌زمانی آن با دیگر وقایع، طیف توزیع فاصله زمانی بین پالس‌ها، متوسط یا نرخ پالس‌های ثبت شده و مواردی از این دست اشاره نمود. یکی از ابزارهای مفید در تحلیل سامانه‌های زیربحرانی، روش‌هایی است که بر پایه‌ی تئوری نوفه رآکتور قدرت صفر می‌باشند. از مزیت‌های مهم در تحلیل نوفه‌ی رآکتور قدرت صفر، انجام آزمایش در شرایط کار عادی رآکتور بدون نیاز به چشمه‌ی پالسی نوترون است. از آن‌جا که رآکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان، به چشمه‌ی پالسی نوترون مجهز نیست، تحلیل نوفه روشی سودمند برای این‌گونه از سامانه‌های زیربحرانی است. رآکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان، سامانه‌ای عمیقاً زیربحرانی است که ضریب تکثیر مؤثر به دست آمده از محاسبات مونت کارلو با کد MCNP [۱]، حدوداً برابر با  $0.873 \pm 0.004$  است و راکتیویته‌ای معادل با منفی ۲۱ دلار را شامل می‌شود (با فرض آن که کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری،  $\beta_{\text{eff}}$ ، برای سامانه‌ی فوق برابر با ۰/۰۰۶۵ باشد). در بخش ۴ در مورد جزئیات این سامانه‌ی زیربحرانی، اطلاعات بیش‌تری ارائه شده است. در این شرایط، از آن‌جا که زنجیره‌های شکافت نوترونی تحت تأثیر ثابت واپاشی منفی بزرگ نوترون آنی به سرعت میرا می‌شوند، اندازه‌گیری و کاربرد روش‌های تحلیل نوفه، نیازمند ابزارهای مفیدی برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های تجربی و آماری رآکتور هستند. کاربرد تحلیل فاینمن - آلفا در این رآکتور برای اولین بار در پژوهش حاضر مطالعه می‌شود.

## ۲. روش کار

در این پژوهش، با استفاده از سخت‌افزار مناسبی [۲] حجم نسبتاً بزرگی از داده‌های تجربی مربوط به اُفت و خیزهای شمارش نوترون‌های آشکار شده در این رآکتور ثبت و در کامپیوتر ذخیره شد. در مرحله‌ی بعد، تحلیل فاینمن - آلفا در محیط نرم‌افزار مهندسی متلب<sup>(۱)</sup> [۳]، به صورت غیرهم‌زمان بر این داده‌ها به کار برده شد. در حقیقت، داده‌های تجربی جمع‌آوری شده، برداری از اعداد است که هر عضو آن نماینده‌ی زمان ورود یکی از پالس‌های تصادفی از سامانه‌ی آشکارسازی نوترون است. در مورد روش و الگوریتم تحلیل داده‌ها، در بخش‌های مربوط به شرح تحلیل‌های رُسی - آلفا و فاینمن - آلفا اطلاعات بیش‌تری ارائه شده است. نوفه‌ی رآکتور قدرت صفر، مقدار ثابت واپاشی نوترون آنی را به دست می‌دهد. احتمال از بین رفتن نوترون آنی در اثر جذب و یا نشت از سامانه‌ی قلب رآکتور را در واحد زمان در اصطلاح «ثابت واپاشی نوترون آنی» می‌نامند. این پارامتر در رابطه‌ی (۱) تعریف شده است [۴-۶]. یادآوری می‌شود در یک رآکتور فرضی که در آن نوترون‌های تأخیری نقشی ندارند، ثابت واپاشی نوترون آنی، ثابت زمانی کاهش یا افزایش جمعیت نوترون‌ها نسبت به زمان است (یعنی عکس دوره‌ی تناوب آنی قلب رآکتور) [۷]:

$$\alpha = \frac{1 - k_p}{l} = \frac{(\beta_{\text{eff}} - \rho)}{A} \quad (1)$$

که در آن،  $k_p$  ضریب تکثیر نوترون‌های آنی،  $l$  متوسط عمر نوترون‌های آنی،  $\beta_{\text{eff}}$  کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری،  $A$  زمان تولید نسل نوترون‌ها، و  $\rho$  راکتیویته سامانه‌ی قلب رآکتور است. چنان‌که مشاهده می‌شود، هر چقدر راکتیویته سامانه‌ی قلب رآکتور، مقدار منفی بزرگ‌تری باشد، پارامتر  $\alpha$  نیز بزرگ‌تر خواهد بود و با محاسبه‌ای تقریبی برای رآکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان (با فرض  $\rho = -21$ ،  $\beta_{\text{eff}} = 0.0065$ ،  $A = 40 \mu\text{s}$ ) حدود  $3575 \text{ s}^{-1}$  به دست می‌آید. از آن‌جا که رآکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان دارای راکتیویته منفی بزرگی است، روش تحلیل نوفه‌ی رآکتور قدرت صفر برای اندازه‌گیری پارامتر ثابت واپاشی نوترون آنی در این سامانه روشی منحصربه‌فرد و ایده‌آل است. هم‌چنین با توجه به زمینه‌ی بسیار



شکل ۱. الگوریتم تحلیل رُسی - آلفا نوع اول.

#### ۴. تحلیل فاینمن - آلفا

در تحلیل فاینمن - آلفا، نسبت واریانس به متوسط شمارش‌ها در پنجره‌های زمانی مختلفی اندازه‌گیری می‌شوند. نسبت واریانس به متوسط شمارش‌ها عبارتست از:

$$\frac{\overline{S^2}}{\overline{C}} = \frac{\overline{C^2} - \overline{C}^2}{\overline{C}} \quad (۳)$$

می‌دانیم در توزیع پواسون، این نسبت برابر با یک است، اما در قلب رآکتور هسته‌ای، علاوه بر وجود نوترون‌هایی که دارای توزیع پواسون هستند، نوترون‌های وابسته‌ای نیز وجود دارند که از نسل‌های واکنش‌های زنجیره‌ای مشترکی به وجود آمده‌اند. در این صورت نسبت واریانس به متوسط شمارش‌ها نسبت به توزیع پواسون دارای انحراف است، از این رو داریم:

$$\frac{\overline{S^2}}{\overline{C}} = \frac{\overline{C^2} - \overline{C}^2}{\overline{C}} = 1 + y \quad (۴)$$

میزان انحراف از توزیع پواسون،  $y$ ، در مراجع به صورت زیر بیان شده است [۴-۶]:

$$y = \frac{\varepsilon D_v}{\rho_p} \left( 1 - \frac{1 - \exp(-\alpha\tau)}{\alpha\tau} \right) \quad (۵)$$

در این رابطه داریم:

$$\rho_p: \text{راکتیویته آبی و برابر است با } \frac{k_p - 1}{k_p}$$

$\varepsilon$ : بازدهی سامانه‌ی آشکارسازی نوترون (نسبت تعداد

شمارش‌ها به تعداد کل شکافت‌های انجام شده)،

$$D_v: \text{ضریب دیون}^{(۷)} \text{ که برابر است با } \frac{v(v-1)}{v^2}$$

ضعیف نوترون و گاما در این رآکتور، این روش، عملیاتی است. در این پژوهش از تحلیل فاینمن - آلفا، ثابت واپاشی نوترون آبی در قلب رآکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان به دست آمده است. نتایج تجربی اندازه‌گیری شده با نتایج به دست آمده از روش رُسی - آلفا مقایسه، و تطابق نسبتاً خوبی مشاهده شد. در ادامه قبل از پرداختن به نحوه‌ی انجام آزمایش و نتایج به دست آمده از آن، روش‌های رُسی - آلفا و فاینمن - آلفا معرفی می‌شوند.

#### ۳. تحلیل رُسی - آلفا

یکی از بهترین روش‌های تحلیل اُفت و خیزهای آماری نوترون‌های آشکار شده در قلب رآکتور، روش رُسی - آلفا است. این روش در ابتدا برای رآکتورهای سریع ارائه شد، ولی با ابزارهای جدید امروزی در رآکتورهای حرارتی نیز قابل کاربرد است. رابطه‌ی (۲)، با نام توزیع احتمال رُسی شناخته شده است که عبارت است از [۴-۷]:

$$P_{\text{Rossi}}(\tau) = N_{\text{UC}} + N_c e^{-\alpha\tau} \quad (۲)$$

سمت راست این رابطه، به ترتیب شامل عبارت‌های مربوط به واکنش‌های زنجیره‌ای همبسته<sup>(۲)</sup> و غیرهمبسته<sup>(۳)</sup> است. در اصطلاح به پارامتر  $\tau$  پنجره‌ی زمانی<sup>(۴)</sup> اطلاق می‌شود. در آزمایش تجربی رُسی - آلفا، تابع توزیع احتمال،  $P_{\text{Rossi}}(\tau)$ ، اندازه‌گیری و سپس بر نتایج به دست آمده از رابطه‌ی (۲) برازش می‌شود. یکی از پارامترهای منحنی برازش شده، پارامتر  $\alpha$  است که شامل اطلاعاتی راجع به میزان راکتیویته، کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری، و طول عمر نوترون‌های آبی است. شکل ۱ نشان‌دهنده‌ی نحوه‌ی تحلیل داده‌ها در روش رُسی - آلفای نوع اول است. در این روش، اولین پالس هر زنجیره‌ی تصادفی که در پنجره‌های زمانی<sup>(۵)</sup> TCW 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 سرانجام میزان متوسط وابستگی، محاسبه خواهد شد. هر چقدر تعداد پنجره‌های زمانی بیش‌تر باشد، به دنبال آن، زمان جمع‌آوری اطلاعات بیش‌تر شده و خطای آماری نتایج نیز کاهش می‌یابد.



شکل شبکه‌های سوخت، مطالعات مربوط به جذب و انعکاس نوترون. رآکتور زیربحرانی آب‌سبک که در مرکز هسته‌ای اصفهان در دسترس است، مجموعه‌ای از مواد شکافان با غنای طبیعی است که آب‌سبک به شکل کندکننده و حفاظ بیولوژیکی، فضای خالی بین میله‌های سوخت را پُر کرده است. کل مجموعه‌ی سوخت و کندکننده در داخل محفظه‌ای استوانه‌ای شکل با شعاع حدود ۶۸ cm و ارتفاع حدود ۱۹۰ cm قرار گرفته است. در وسط این محفظه، قلب رآکتور که متشکل از شبکه‌ای شش ضلعی به شعاع متوسط و تقریبی ۳۶ cm است بر روی یک شبکه از جنس پلکسی گلاس<sup>(۹)</sup> به صورت آویخته قرار گرفته است. سوخت رآکتور، اورانیم طبیعی فلزی است که با لایه‌ای از نیکل پوشش داده شده است. تعداد میله‌های سوخت ۲۴۰ عدد است. کندکننده‌ی رآکتور زیربحرانی، آب‌سبک است. جدول ۱ مشخصات کلی این رآکتور را نشان می‌دهد. از آنجا که در یک رآکتور زیربحرانی، واکنش‌های زنجیره‌ای بدون حضور چشمه‌ی خارجی با نرخ بسیار اندکی رخ می‌دهد، قلب رآکتور زیربحرانی توسط چشمه‌های نوترونی مانند  $^{252}\text{Cf}$  و Am-Be برای انجام آزمایش‌های مربوطه، بهره‌برداری می‌شود. اطراف قلب رآکتور حدود ۳۰ cm آب‌سبک قرار گرفته است که نقش حفاظ بیولوژیکی را بر عهده دارد. هم‌چنین به دلیل آن که این رآکتور به صورت ذاتی زیربحرانی است، به سامانه‌های کنترل و ایمنی نیازی نیست. در شکل ۳، چیدمان قلب رآکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان و موقعیت قرارگیری آشکارساز در مرکز قلب رآکتور به تصویر کشیده شده است. چشمه‌ی نوترون Am-Be به عنوان راه‌انداز واکنش‌های زنجیره‌ای در کنار قلب رآکتور قرار گرفته است.

جدول ۱. مشخصات کلی رآکتور زیربحرانی

زیربحرانی	نوع رآکتور
آب‌سبک	کندکننده
شش ضلعی	نوع شبکه
~ ۴,۷ cm	گام شبکه
۲۴۰	تعداد میله‌های سوخت
~ ۳۶ cm	شعاع قلب رآکتور
~ ۱۰۰ cm	ارتفاع قلب رآکتور
~ ۶۸ cm	شعاع تانک رآکتور
~ ۳ cm	قطر سوخت
اورانیم طبیعی فلزی	نوع سوخت

دیگر پارامترها تعاریف مشابهی مانند پارامترهایی دارند که در قسمت‌های قبلی ارائه شده است. پارامتر  $\lambda$ ، معیاری از آفت و خیزهای اضافی نسبت به توزیع پواسون است که بعضاً پارامتر وابستگی زنجیره<sup>(۸)</sup> نیز نامیده می‌شود. تحلیل فاینمن - آلفا به دنبال یافتن پارامتر  $\lambda$  است و از این راه، مقدار ثابت واپاشی نوترون آبی در قلب رآکتور به دست می‌آید. در شکل ۲، الگوریتم ترکیب شمارش‌های جمع‌آوری شده طی ۱۲ پنجره‌ی زمانی نشان داده شده است. در این شکل،  $T$ ، عرض پنجره‌ی زمانی مبنا است. به این ترتیب با جمع دو شمارش انجام شده در دو پنجره‌ی متوالی با عرض زمانی  $T$ ، داده‌های متناظر با پنجره‌ی زمانی با عرض  $2T$  به دست می‌آید. به این ترتیب، چنان که در شکل نیز نشان داده شده است، ترکیب‌های متوالی دیگر، شمارش‌هایی با عرض بزرگ‌تر و مضرب صحیحی از  $T$  در پنجره‌های زمانی به دست خواهد داد. برای مطالعه و آشنایی بیش‌تر با روش‌های مختلف نوفه رآکتور قدرت صفر به مراجع [۸-۱۸] مراجعه کنید.

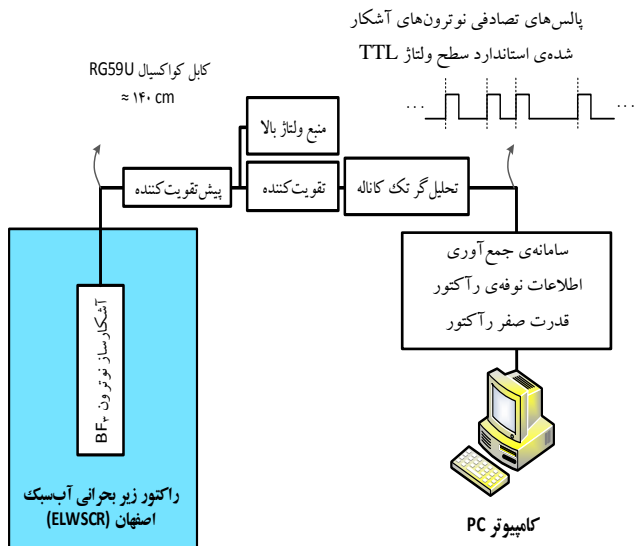
## ۵. آشنایی با رآکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان

رآکتور زیربحرانی، به ترکیبی از مواد شکافان و دیگر مواد اطلاق می‌شود که ضریب تکثیر در کل مجموعه، کوچک‌تر از واحد است و اساساً امکان بحرانی شدن این سامانه وجود ندارد. از این‌رو، این نوع از رآکتورها از ایمنی ذاتی بالایی برخوردار هستند و در نتیجه به سامانه‌های کنترل نیازی ندارند. رآکتورهای زیربحرانی در مطالعات مربوط به فیزیک رآکتور موارد استفاده فراوانی دارند. برخی از این کاربردها عبارتند از، اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز در طراحی رآکتور، بررسی‌های مربوط به

پنجره زمانی

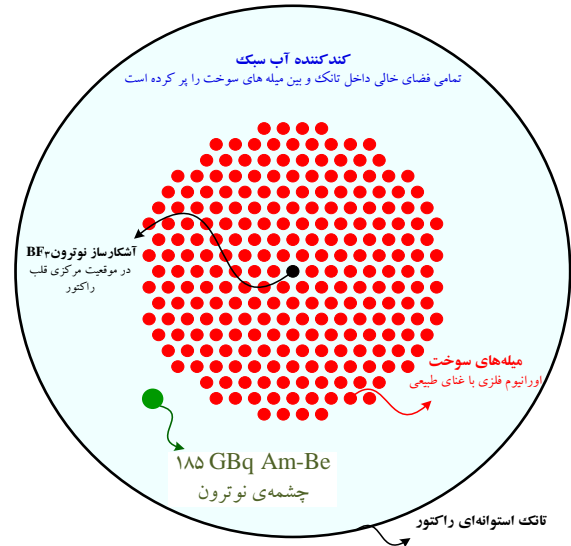
۱ T	$C_1$ $C_2$ $C_3$ $C_4$ $C_5$ $C_6$ $C_7$ $C_8$ $C_9$ $C_{10}$ $C_{11}$ $C_{12}$
۲ T	$C_1+C_2$ $C_3+C_4$ $C_5+C_6$ $C_7+C_8$ $C_9+C_{10}$ $C_{11}+C_{12}$
۳ T	$C_1+C_2+C_3$ $C_4+C_5+C_6$ $C_7+C_8+C_9$ $C_{10}+C_{11}+C_{12}$
۴ T	$C_1+C_2+C_3+C_4$ $C_5+C_6+C_7+C_8$ $C_9+C_{10}+C_{11}+C_{12}$
۵ T	$C_1+C_2+C_3+C_4+C_5$ $C_6+C_7+C_8+C_9+C_{10}$
۶ T	$C_1+C_2+C_3+C_4+C_5+C_6$ $C_7+C_8+C_9+C_{10}+C_{11}+C_{12}$
۷ T	$C_1+C_2+C_3+C_4+C_5+C_6+C_7$
۸ T	$C_1+C_2+C_3+C_4+C_5+C_6+C_7+C_8$
۹ T	$C_1+C_2+C_3+C_4+C_5+C_6+C_7+C_8+C_9$
۱۰ T	$C_1+C_2+C_3+C_4+C_5+C_6+C_7+C_8+C_9+C_{10}$
۱۱ T	$C_1+C_2+C_3+C_4+C_5+C_6+C_7+C_8+C_9+C_{10}+C_{11}$
۱۲ T	$C_1+C_2+C_3+C_4+C_5+C_6+C_7+C_8+C_9+C_{10}+C_{11}+C_{12}$

شکل ۲. الگوریتم تحلیل داده‌ها در روش فاینمن - آلفا.



**شکل ۴.** نحوه استقرار سامانه‌ی اندازه‌گیری در قلب رآکتور زیر بحرانی آب‌سبک اصفهان.

می‌رود که ثابت واپاشی نوترون آنی در این سامانه، مقدار منفی بزرگی باشد. به همین دلیل، کل گستره‌ی زمانی مورد مطالعه در روش فاینمن - آلفا به حداکثر چند میلی‌ثانیه محدود می‌شود. پس به منظور کاهش خطا در اندازه‌گیری، باید زمان نسبتاً قابل توجهی را برای جمع‌آوری داده‌ها صرف نمود. با توجه به مشخصه‌های فیزیکی رآکتور زیر بحرانی آب‌سبک اصفهان، بهترین تنظیم‌های انجام شده و مشخصه‌های مناسب برای جمع‌آوری اطلاعات آزمایش فاینمن - آلفا که به طور تجربی تعیین شده‌اند در جدول ۲ ارائه شده است. با تفکیک زمانی  $100 \mu s$ ،  $100 \mu s$ ، نقطه‌ی تجربی از  $100 \mu s$  تا  $10 \text{ ms}$  اندازه‌گیری شدند.  $400$  میلیون پنجره‌ی زمانی در مدت زمان  $40000 \text{ s}$  (بیش از  $11 \text{ h}$ ) اندازه‌گیری و تحلیل شدند. نتایج تجربی به دست آمده در شکل ۵ نشان داده شده است. خط ممتد در این شکل، نشان‌دهنده‌ی میزان انحراف از توزیع پواسون [رابطه‌ی (۵)] می‌باشد که بر داده‌های تجربی برازش شده است. مقدار ثابت واپاشی نوترون آنی به دست آمده از برازش برابر با  $[88 \pm 3966 \text{ s}^{-1}]$  است. یادآوری می‌شود که خطای گزارش شده، انحراف از معیار است. جدول ۳، نشان‌دهنده‌ی مقادیر ثابت واپاشی نوترون آنی در قلب رآکتور زیر بحرانی آب‌سبک اصفهان است که از دو روش رُسی - آلفا و فاینمن - آلفا به دست آمده‌اند. این نتایج در محدوده‌ی عدم قطعیت گزارش شده، دارای سازگاری نسبتاً خوبی است.



**شکل ۳.** چیدمان قلب در رآکتور زیر بحرانی آب‌سبک اصفهان و موقعیت استقرار آشکارساز و چشمه‌ی نوترون در آن.

## ۶. نحوه‌ی استقرار سامانه‌ی اندازه‌گیری

شکل ۴ نشان‌دهنده‌ی نمایش کلی سامانه‌ی اندازه‌گیری است که در این پژوهش برای آزمایش فاینمن - آلفا به کار گرفته شده است. آشکارساز نوترون و مدارهای بسته‌ی الکترونیک هسته‌ای، بخش‌های کلاسیک در آشکارسازی نوترون هستند. در اندازه‌گیری‌های مورد نظر در این پژوهش، از آشکارساز  $BF_3$  نسبتاً بزرگی با قطر خارجی  $2.9 \text{ cm}$  و طول  $50 \text{ cm}$  استفاده شد. پالس‌های آشکارساز بعد از تقویت از مدار تمیزدهنده‌ی سطح ولتاژ عبور کرده و اغتشاشات ناشی از پرتوهای گاما و نوفه‌ی الکتریکی محیط از آن حذف و جداسازی شد. خروجی این واحد، پالس‌های منطقی با سطح ولتاژ  $5 \text{ V}$  با استاندارد TTL<sup>(۱۰)</sup> می‌باشد. اطلاعات بیش‌تر در مورد نحوه‌ی عمل کرد سامانه‌ی جمع‌آوری اطلاعات مورد استفاده در این پژوهش در مرجع [۲] در دسترس است.

## ۷. بحث و بررسی نتایج به دست آمده

نظر به آن‌که شرط لازم برای انجام تحلیل‌های نوفه‌ی رآکتور قدرت صفر، کوچک بودن پس‌زمینه‌ی نوترون در سامانه‌ی قلب رآکتور است، فاصله‌ی چشمه تا قلب رآکتور باید به گونه‌ای تنظیم شود که شمارش نوترون‌ها توسط آشکارساز، بیش‌تر متأثر از نوترون‌های حاصل از شکافت باشد تا برآمده از چشمه‌ی نوترون خارجی. همان‌طور که در مقدمه نیز اشاره شد، با توجه به این‌که سامانه‌ی قلب رآکتور، عمیقاً زیر بحرانی است، انتظار



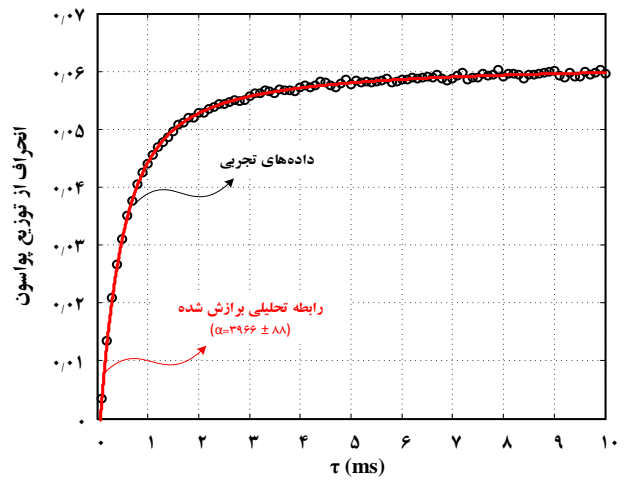
صورت نرم‌افزاری در محیط‌های نرم‌افزاری قدرتمند مانند متلب می‌باشد. نتایج به دست آمده از هر دو روش فاینمن-آلفا و رُسی-آلفا دارای سازگاری نسبتاً خوبی در گستره‌ی عدم قطعیت گزارش شده هستند.

### پی‌نوشت‌ها

1. Matlab
2. Chain Correlated
3. Uncorrelated
4. Time Window
5. TCW: Total Channel Width in Rossi- $\alpha$  Analysis
6. Auto-Correlated
7. Diven Factor
8. Chain Correlative Parameter
9. Plexiglas
10. Transistor- Transistor- Logic

**جدول ۲.** تنظیم‌های انجام شده و مشخصه‌های مهم سامانه‌ی جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های به دست آمده از تحلیل فاینمن-آلفا در قلب رآکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان

ردیف	مشخصه	مقدار
۱	قدرت تفکیک پنجره‌های زمانی	۱۰۰ $\mu$ S
۲	تعداد کل پنجره‌های زمانی جمع‌آوری شده با عرض ۱۰۰ $\mu$ S	۴۰۰ میلیون عدد
۳	تعداد کل نقاط تجربی به دست آمده	۱۰۰ عدد
۴	بازه‌ی زمانی مورد مطالعه در تحلیل فاینمن-آلفا	۱۰۰ $\mu$ S تا ۱۰ ms
۵	زمان کل جمع‌آوری اطلاعات	۴۰۰۰ s



**شکل ۵.** نتایج به دست آمده از تحلیل فاینمن-آلفا در قلب رآکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان.

**جدول ۳.** مقایسه‌ی ثابت واپاشی نوترون آنی در قلب رآکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان از دو روش رُسی-آلفا و فاینمن-آلفا

روش اندازه‌گیری	روش رُسی-آلفا [۱۹]	روش فاینمن-آلفا
ثابت واپاشی نوترون آنی [ $s^{-1}$ ]	$3990 \pm 177$	$3966 \pm 88$

### ۸. نتیجه‌گیری

از جمله روش‌های استاندارد در شناسایی قلب رآکتورهای هسته‌ای، روش فاینمن-آلفا است. در این پژوهش، رآکتور زیربحرانی آب‌سبک اصفهان از طریق آزمایش فاینمن-آلفا تحلیل و ارزیابی شد. از آن‌جا که این رآکتور، سامانه‌ای عمیقاً زیربحرانی است، ثابت واپاشی نوترون آنی قلب رآکتور مقدار منفی بزرگی است. برای پیاده‌سازی آزمایش فاینمن-آلفا، از یک سامانه‌ی جمع‌آوری داده استفاده شد. سامانه‌ی مذکور با جمع‌آوری داده‌های حاوی زمان مشاهده‌ی پالس‌های مربوط به آشکارساز نوترون، امکان تحلیل غیرهم‌زمان داده‌های فوق‌را فراهم می‌آورد. یکی از مزیت‌های روش فوق، تحلیل داده‌ها به



- [1] N. Nasiri Mofakham, Z. Nasr Azadani, J. Sadegh zadeh, Determination of physical parameters of light water subcritical reactor based on experimental and theoretical results, *J. Nucl. Sci. Tech.* **60** (1) (2012) 55-60.
- [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. Sys.* **21** (3) (2014) 433-446.
- [3] Mathworks, MATLAB Reference Guide. The Math Works Inc. (2013), www.mathworks.com.
- [4] J.A. Thie, Reactor Noise, Rowman and Littlefield Inc., New York, (1963).
- [5] R.E. Uhrig, Random Noise Techniques in Nuclear Reactor Systems, the Ronald Press Company, New York, (1970).
- [6] M.M.R. Williams, Random Process in Nuclear Reactors, Pergamom Press, (1974).
- [7] J.R. Lamarsh, Introduction to Nuclear Reactor Theory, Addison Wesley Publishing Company, (1972).
- [8] M. Arkani, H. Khalafi, N. Vosoughi, S. Khakshournia, A FPGA based Time Analyser for Stochastic Methods in Experimental Physics, *Instrum. Exp. Tech.* **3** (2015) 350-358.
- [9] S.A. Hosseini, N. Vosoughi, M. Hosseini, Monte Carlo simulation of Feynman- $\alpha$  and Rossi- $\alpha$  techniques for calculation of kinetic parameters of Tehran Research Reactor, *Ann. Nucl. Energ.* **2** (2011) 140-145.
- [10] G. Por, G. Szappanos, Feynman- $\alpha$  Measurement in a 100 kW Research Reactor, *Prog. Nucl. Energy.* **33**(4) (1998) 439-455.
- [11] Y. Yamane, T. Misawa, S. Shiroya, Formulation of Data Synthesis Technique for Feynman- $\alpha$  Method, *Ann. Nucl. Energ.* **25** (1-3) (1998) 141-148.
- [12] F. Akino, H. Yasuda, Y. Kaneko, Determination of large negative reactivity by integral versions of various experimental methods, *J. Nucl. Sci. Tech.* **17**(8) (1980) 593-615.
- [13] Y. Kitamura, M. Matoba, T. Misavita, H. Unesaki, S. Shiroya, Reactor Noise Experiments by using Acquisition System for Time Series Data of Pulse Train, *J. Nucl. Sci. Tech.* **36** (8) (1999) 653-660.
- [14] Y. Kitamura, I. Pázsit, J. Wright, A. Yamamoto, Y. Yamane, Calculation of the pulsed Feynman- $\alpha$  and Rossi- $\alpha$  formulae with delayed neutrons, *Ann. Nucl. Energ.* **32**(7) (2005) 671-692.
- [15] Y. Kitamura, K. Taguchi, T. Misawa, I. Pázsit, A. Yamamoto, Y. Yamane, C. Ichihara, H. Nakamura, H. Oigawa, Calculation of the stochastic pulsed Rossi- $\alpha$  formula and its experimental verification, *Prog. Nucl. Energ.* **48**(1) (2006) 37-50.
- [16] 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, *Prog. Nucl. Energ.* **24**(1) (1997) 21-31.
- [17] M. Szieberth, G. Klujber, J.L. Kloosterman, D. de Haas, Measurement of multiple  $\alpha$ -mode at the Delphi subcritical assembly by neutron noise techniques, *Ann. Nucl. Energ.* **75** (2015) 146-157.
- [18] F.C. Difilippo, Higher moments of the distribution of detector counts in a subcritical reactor, *Ann. Nucl. Energ.* **80** (2015) 166-171.
- [19] 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.* **72** (2015) 29-38.