

استفاده از تحلیل آماری افتوخیزهای ناهمبسته برای شناسایی سامانه‌های آشکارسازی هسته‌ای حالت پالسی

محمد ارکانی*

پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

*Email: markani@aeoi.org.ir

مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۲/۱۰ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۵/۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۵/۳۱

چکیده

یکی از فرایندهای تصادفی که در اکثر آزمایش‌های هسته‌ای مشاهده می‌شود، فرایند تصادفی پواسون است. با توجه به اثر زمان‌مرده در سامانه‌های آشکارسازی حالت پالسی، فرایند اندازه‌گیری شده در خروجی آشکارساز نسبت به فرایند تصادفی پواسون دارای اعوجاج است. در این تحقیق با استفاده از روش‌های تحلیل آماری به شناسایی سامانه‌های آشکارسازی حالت پالسی پرداخته شده است. یکی از آشکارسازهای نوعی که در حالت پالسی کار می‌کند، آشکارساز BF_3 است. در این پژوهش یک آشکارساز BF_3 نوعی برای پیاده‌سازی روش فوق انتخاب شد و سپس پالس‌های مشاهده شده در خروجی آشکارساز در حوزه زمان با استفاده از تحلیل آماری افتوخیزها اندازه‌گیری و تحلیل گردید. در آزمایش‌هایی مانند اندازه‌گیری‌های مربوط به تئوری نوفه راکتور قدرت صفر، تابع انتقال سامانه آشکارسازی استفاده شده نیز خود بر نتایج به‌دست آمده اثرگذار است. از این‌رو آگاهی از تابع انتقال سامانه آشکارسازی به‌کار گرفته شده در این آزمایش‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین، در اندازه‌گیری‌هایی که در آن‌ها تصحیح زمان‌مرده سامانه آشکارسازی ضروری است، مشخص بودن تابع انتقال می‌تواند اطلاعات مفیدی از اثرات زمان‌مرده را در اختیار قرار دهد. در این پژوهش تابع انتقال یک سامانه آشکارسازی نوترون نوعی که بر پایه‌ی آشکارساز BF_3 است بررسی شده است.

کلیدواژه‌ها: پالس‌های تصادفی ناهمبسته، تابع توزیع احتمال پواسون، آشکارساز هسته‌ای

Application of uncorrelated stochastic fluctuations analysis for identification of pulse mode nuclear detector systems

M. Arkani*

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEIOI, P.O.BOX: 14395-836, Tehran – Iran

Technical Paper

Received: 30.4.2023, Revised: 31.7.2023, Accepted: 22.8.2023

Abstract

One of the most frequently observed random processes in nuclear experiments is the Poisson process. Due to the dead time effect of detection systems, the experimental process is different from the Poisson process. In this work, based on stochastic methods, a nuclear detection system is identified. The BF_3 detector is a typical pulse mode detector. In this research, a typical BF_3 detector is selected to implement the above method. Observed pulses at the detector output in the time domain were measured and analyzed using stochastic fluctuations analysis. In experiments such as measurements related to zero-power reactor noise theory, the transfer function of the detection system itself also affects the obtained results. Therefore, knowledge of the transfer function of the detection system used in these experiments is of particular importance. Also, in measurements where it is necessary to correct the detection system dead time, the specificity of the transfer function can provide valuable information about the effects of dead time. This study investigates the transfer function of a typical neutron detection system based on BF_3 .

Keywords: Uncorrelated random pulses, Poisson probability distribution function, Nuclear detector



۱. مقدمه

برای مدل‌سازی یک سامانه روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از روش‌های مدل‌سازی، مدل‌سازی جعبه‌سیاه^۱ است. در این روش ابتدا آزمایش روی سامانه واقعی انجام می‌شود و سپس از اطلاعات اندازه‌گیری شده از آزمایش، برای مدل‌سازی و تخمین تابع انتقال سامانه مورد نظر بهره گرفته می‌شود [۱]. این روش مدل‌سازی را شناسایی سامانه می‌نامند. مشکلات متعددی در بحث شناسایی سامانه‌ها وجود دارد، از جمله این‌که اندازه‌گیری‌های پدیده‌های فیزیکی همواره با نویز همراه است که آزمایش‌گر بایستی این موارد را به حداقل برساند.

از روش‌های شناسایی سامانه‌ها می‌توان برای شناسایی رآکتورهای هسته‌ای نیز بهره جست. به عنوان مثال در رآکتور آب سبک جوشان هالدن^۲ در کشور نروژ، مدل‌های خطی ورودی-خروجی، و همچنین مدل‌های حالت خطی متغیر زمان، به عنوان ساختار مدل برای شناسایی تابع انتقال این رآکتور استفاده شده‌اند. در این رآکتور، روش‌های شناسایی مختلفی برای نشان دادن کاربرد تکنیک‌های شناسایی به‌عنوان ابزاری برای کشف دینامیک یک رآکتور هسته‌ای استفاده شده‌اند [۲].

در پژوهشی دیگر، تابع انتقال رآکتور آب جوشان HPR۱۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. در این پژوهش در مرحله اول، روش‌های مدل‌سازی برای به دست آوردن مدل دینامیکی غیرخطی سامانه خنک‌کننده رآکتور، فشارنده، ژنراتور بخار L شکل و سامانه بای‌پس^۳ بخار در نظر گرفته می‌شوند. سپس خطی‌سازی هر مدل دینامیکی بر اساس تئوری اغتشاش کوچک انجام می‌گردد. در نهایت، شبیه‌سازی‌های گذرا با مدل‌های غیرخطی با معرفی اختلالات معمولی برای تأیید توابع انتقال اجرا می‌شوند. با توجه به توافق خوب نتایج به‌دست آمده، تابع انتقال توسعه یافته می‌تواند رفتارهای دینامیکی HPR۱۰۰۰ را پیش‌بینی نماید.

تحلیل آماری سیگنال خروجی از آشکارسازهای هسته‌ای به شناسایی سامانه‌ی قلب رآکتورهای هسته‌ای محدود نمی‌باشد و طیف وسیعی از اندازه‌گیری‌ها را شامل می‌شود. اولین مشاهده نوسانات آماری تعداد نوترون‌ها در یک رآکتور هسته‌ای، آزمایش

معروف روسی آلفا است که به نام برونو روسی نام‌گذاری شد، کسی که دستگاه اندازه‌گیری این آزمایش را در روزهای آغازین کار آزمایشگاه لوس آلاموس پیشنهاد و راه‌اندازی نمود. مطالعات نظری اولیه توسط فرمی^۴، فاینمن^۵ و هافمن^۶ در سال ۱۹۴۴ و دوباره توسط دی‌هافمن^۷ در همان دوره تدوین شد و به ترتیب در دو گزارش لوس آلاموس منتشر گردید (گزارش‌های با کدهای LADC-۲۶۹ و LADC-۲۵۶)، گزارش‌های ذکر شده در بالا مانند بسیاری از تولیدات علمی و ادبی آن زمان، برای چندین سال طبقه‌بندی شده باقی ماندند [۴]. نوبه رآکتور، هم به دلیل ماهیت تصادفی زنجیره‌های شکافت و هم دیگر واکنش‌ها ایجاد می‌شود. نوبه، یکی از مباحث اساسی در علوم و مهندسی هسته‌ای، چه در تئوری و چه در عمل است. فرایندهای تصادفی به‌طور گسترده‌ای در طبیعت اتفاق می‌افتند. توصیف ریاضی فرایندهای تصادفی در مراجع با جزئیات توسعه داده شده است.

در نهان افت‌وخیزهای آماری داده‌های به‌دست آمده از آشکارسازهای هسته‌ای، اطلاعات مهمی نهفته و پنهان است که استخراج این اطلاعات مستلزم کاربرد روش‌های منحصربه‌فرد خود است. این افت‌وخیزها که در این تحقیق منظور فاصله‌زمانی بین وقایع است، به‌صورت زنجیره پالس‌های تصادفی می‌تواند در خروجی آشکارساز هسته‌ای مشاهده شود. جنبه‌های مختلفی از این وقایع می‌تواند ارزیابی شود، مانند انرژی یا ارتفاع پالس ایجاد شده، هم‌زمانی آن با دیگر وقایع، توزیع نسبی فاصله‌زمانی بین پالس‌ها، متوسط یا آهنگ پالس‌های ثبت شده و مواردی از این قبیل. معمولاً بخشی از تحلیل این وقایع به‌صورت سخت‌افزاری انجام می‌شود و نتایج تحلیل شده به رایانه برای ثبت و تحلیل‌های بعدی ارسال می‌شود که در این صورت بخشی از اطلاعات این فرایندهای تصادفی از دست می‌رود.

آشکارسازی ذرات رادیواکتیو، به‌صورت تصادفی است، از این‌رو خروجی سامانه‌های آشکارسازی نیز داده‌های تصادفی است که معمولاً از توزیع پواسون برای فاصله‌زمانی بین پالس‌ها (که البته تحت تأثیر زمان مرده دچار اعوجاج شده است) و از

4. Fermi

5. Feynman

6. Hoffmann

7. De Hoffman

1. Black Box

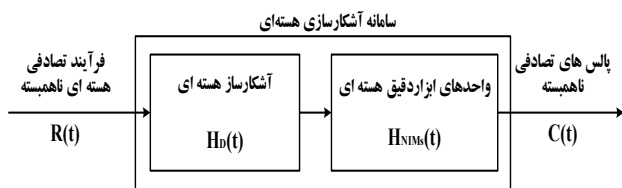
2. Halden Boiling Water Reactor (HBWR)

3. Bypass

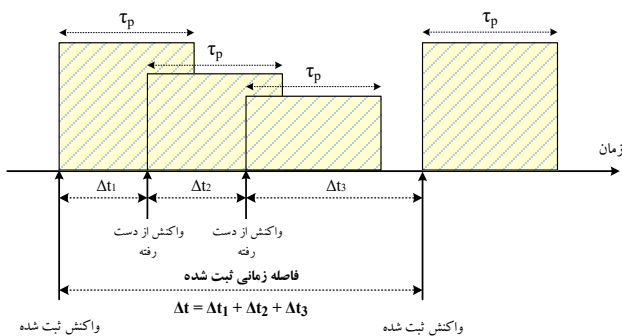


آشکارساز در خروجی ظاهر نشده‌اند. به همین دلیل فاصله‌زمانی ثبت شده^۵ مجموع تمامی فاصله‌زمانی‌ها است. بر همین اساس اثر زمان‌مرده باعث دو تغییر مهم در خروجی آشکارساز نسبت به ورودی این سامانه می‌شود:

- فاصله‌زمانی‌های خیلی کوتاه در خروجی آشکارساز ظاهر نمی‌شوند.
- تابع توزیع نسبی فاصله‌زمانی‌های مشاهده شده در خروجی به سمت فاصله‌زمانی‌های بلندتر منحرف می‌شود. به دلیل آن‌که فرایند تصادفی ورودی، مستقل زمانی است، انتظار می‌رود انحراف مشاهده شده برای تمامی فاصله‌زمانی‌ها دارای تابع توزیع احتمال یکسانی است. یا به عبارتی دیگر، انحراف در همه فاصله‌زمانی‌ها یکسان مشاهده شود. در حقیقت رفتار واقعی اثر زمان‌مرده در سامانه‌های آشکارسازی بسیار پیچیده‌تر از مدل شرح داده شده در فوق است. از این‌رو در حد آشنایی خواننده با مفاهیم مربوطه، به همین مقدار بحث مقدماتی اکتفا می‌شود. مطالب بیشتر در این رابطه در مراجع در دسترس می‌باشند [۶، ۷].



شکل ۱. پیکربندی سامانه آشکارسازی در حالت پالسی.



شکل ۲. نمایش زمان‌مرده در سامانه آشکارسازی حالت پالسی و اثر آن بر تابع توزیع فاصله‌زمانی بین پالس‌ها.

توزیع گاوسی^۱ برای ارتفاع پالس‌های مشاهده شده تبعیت می‌کند. به‌طور معمول ورودی چنین سامانه‌هایی فرایندی تصادفی است که در بیش‌تر حالات از نوع پواسون و ناهمبسته است. در محیطی تکثیرپذیر برای نوترون مانند قلب رآکتور هسته‌ای، به دلیل آن‌که نوترون‌ها از نسل‌های متوالی و گاهاً مشترکی نشات می‌گیرند، نوعی همبستگی بین نوترون‌های آشکار شده توسط آشکارساز وجود دارد. از این‌رو خروجی آشکارساز در چنین شرایطی خودهمبسته است. به علم تحلیل پالس‌های همبسته آشکارساز نوترون، که متأثر از نوترون‌های همبسته قلب رآکتور هسته‌ای است، تحلیل نوفه رآکتور قدرت صفر اطلاق می‌شود. از این‌رو تحلیل نوفه رآکتور هسته‌ای از جمله روش‌های استاندارد برای شناسایی^۲ سامانه قلب رآکتور هسته‌ای است. تابع انتقال سامانه آشکارسازی از ارزش و اهمیت خاصی برخوردار است. در تحلیل‌های آماری مانند تحلیل نوفه قلب رآکتور، تابع انتقال سامانه آشکارسازی بر نتایج اندازه‌گیری شده اثرگذار است و باعث اعوجاج و تغییر در پاسخ به‌دست آمده از نتایج تجربی می‌شود. تابع انتقال سامانه‌های آشکارسازی هسته‌ای حالت پالسی در شکل ۱ نشان داده شده است. ورودی چنین سامانه‌ای فرایندی تصادفی و ناهمبسته است. خروجی این سامانه هم فرایندی تصادفی است که تحت تأثیر تابع انتقال آشکارساز دچار اعوجاج شده است. تابع انتقال آشکارساز به صورت داخلی به دو بلوک مجزا تقسیم‌بندی می‌شود، بلوک مربوط به آشکارساز و بلوک مربوط به سامانه آشکارسازی (واحدهای ابزار دقیق هسته‌ای^۳). آن‌چه که در این مقاله اندازه‌گیری شده است، تابع انتقال کل این مجموعه است. قابل ذکر است کلیه تحلیل‌های مورد نیاز که شرح آن در بخش‌های بعدی به‌طور مبسوط آورده شده است در محیط نرم‌افزار مهندسی متلب به انجام رسیده است [۵].

در شکل ۲ نمایش نمادین زمان‌مرده در آشکارسازهای هسته‌ای و اثر آن بر بازه‌های زمانی ثبت شده نشان داده شده است [۶]. در این شکل فرایند زمان‌مرده از نوع فلج‌شونده^۴ فرض شده است [۶]. چهار واکنش هسته‌ای تصادفی با آشکارساز انجام شده که دو واکنش میانی تحت تأثیر زمان‌مرده

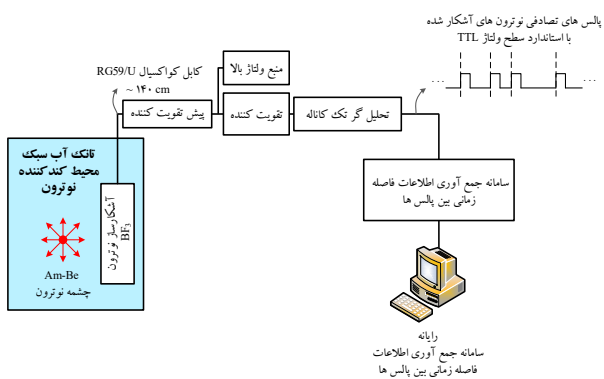
1. Gaussian
2. Identification
3. Nuclear Instrumentation Modules
4. Paralyzable/Extendable Dead Time Model



بعد از تقویت از مدار تمییز دهنده سطح ولتاژ عبور کرده و اغتشاشات ناشی از پرتوهای گاما یا نوفه الکتریکی محیط از آن حذف و جداسازی می‌شود. خروجی این واحد، پالس‌های منطقی با سطح ولتاژ ۵ ولت با استاندارد تی‌تی‌ال^۱ می‌باشند. دو سامانه مجزا که یکی برای جمع‌آوری اطلاعات آزمایش رومی‌آلفا تنظیم شده و دیگری برای اطلاعات مربوط به فاصله‌زمانی بین پالس‌ها، داده‌های تجربی را ثبت می‌کنند. هر یک از این سامانه‌ها به رایانه‌ای مجزا برای جمع‌آوری و ذخیره‌سازی داده‌ها متصل هستند. اطلاعات جزئی‌تر راجع به نحوه عمل‌کرد سامانه‌های جمع‌آوری اطلاعات استفاده شده در مراجع قابل دسترس است [۸، ۹].

مهم‌ترین بخش پیکربندی نشان داده شده در شکل ۳، سامانه جمع‌آوری اطلاعات فاصله‌زمانی بین پالس‌ها است. بنا بر بررسی‌های صورت گرفته بهترین گزینه برای این هدف استفاده از تکنولوژی FPGA^۲ است. نظر به آن‌که این سامانه بایستی زمان‌سنجی‌های از مقیاس ns را انجام دهد، از این‌رو ابزارهای پردازش‌گر^۳ ذاتاً امکان‌ارایه چنین خدمتی را ندارند.

پس مبنای سامانه اندازه‌گیری بایستی مستقیماً بر اساس سخت‌افزار بنا نهاده شود. این ویژگی در تکنولوژی FPGA به خوبی نهاده شده است.



شکل ۳. پیکربندی کلی سامانه به کار گرفته شده برای اندازه‌گیری‌های انجام شده.

۲. تحلیل آماری پالس‌های خروجی از آشکارساز استفاده از تابع توزیع پواسون

چنانچه آهنگ شمارش‌ها در خروجی آشکارساز نسبتاً کم باشد، انحراف از توزیع اولیه نیز محدود و قابل صرف نظر کردن خواهد بود. می‌دانیم در چشمه‌ای از نوع واپاشی، واپاشی هسته‌ها مستقل از هم بوده و از تابع توزیع پواسون تبعیت می‌کند. در نتیجه، انتظار می‌رود تابع توزیع احتمال فاصله‌زمانی بین ذرات آشکار شده از چشمه توسط آشکارساز نیز از تابع توزیع احتمال پواسون تبعیت کند. به این ترتیب می‌توان با استفاده از تابع توزیع احتمال اندازه‌گیری شده توسط آشکارساز، فرایند تصادفی واپاشی هسته‌های چشمه را اندازه‌گیری نمود [۷] و بدین ترتیب با دانستن فرایندهای تصادفی ورودی و خروجی به/ از آشکارساز به تابع انتقال سامانه آشکارسازی پی‌برد. در این روش از توزیع نسبی فاصله‌زمانی بین پالس‌ها استفاده می‌شود. هرچند این روش نسبتاً دقیق است، ولی دارای معایب زیر است:

- به دست آوردن تابع انتقال نیازمند انجام محاسبات و استخراج تابع توزیع پواسون برآزش شده بر خروجی آشکارساز و تلقی نمودن آن به عنوان تابع پواسون اولیه و ورودی به آشکارساز است. از این‌رو این روش مستقیماً به اندازه‌گیری تابع انتقال سامانه آشکارسازی نمی‌پردازد.
- در این روش فرایند تصادفی ورودی به آشکارساز تخمین زده می‌شود. پس یکی از عوامل بروز خطا در محاسبات می‌تواند همین مورد باشد.

۳. سامانه اندازه‌گیری و چیدمان آزمایش

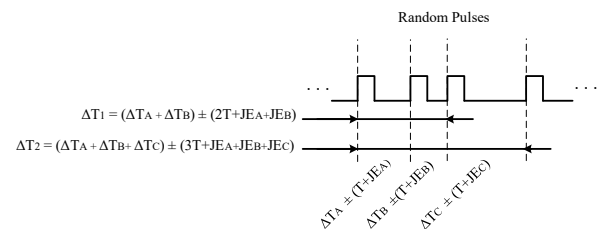
شکل ۳ نشان‌دهنده پیکربندی کلی سامانه‌ای است که در این تحقیق به منظور اندازه‌گیری توزیع نسبی فاصله‌زمانی بین پالس‌های آشکارساز استفاده شده است. بخش‌های آشکارساز نوترون و واحدهای الکترونیک هسته‌ای، بخش‌های معمول در آشکارسازی نوترون می‌باشند [۶]. چشمه نوترون، چشمه Am-Be با قدرت ۵ کوری است که در محیط آب‌سبک درون تانک قرار گرفته است. در اندازه‌گیری‌های مورد نظر در این تحقیق از آشکارساز BF₃ نسبتاً بزرگی با قطر خارجی ۲/۹ cm و طول ۵۰ cm استفاده شد. در آزمایش‌های انجام شده، فاصله چشمه و آشکارساز حدود ۳۰ cm است. پالس‌های آشکارساز

1. TTL: Transistor-Transistor Logic
2. FPGA: Field Programmable Gate Array
3. Microprocessor Based Equipment

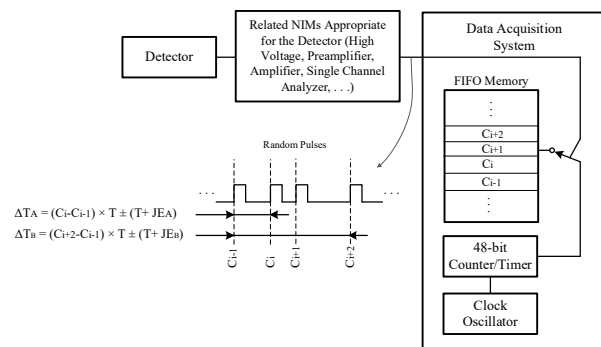


شکل ۶ نشان‌دهنده طرح‌واره سامانه جمع‌آوری اطلاعات مربوط به فاصله زمانی بین پالس‌های متوالی است. طرح مذکور با این معماری قادر است تا با پله‌زمانی^۴ از مقیاس چند ns زمان رسیدن پالس‌ها را اندازه‌گیری و ثبت نماید. چنان‌که در این شکل مشهود است نوسان‌گر کریستال کوارتز به عنوان زمان‌سنجی دقیق عمل کرده و پالس‌های خروجی آن به بلوک PLL درون تراشه^۵ FPGA اعمال می‌گردد. شمارنده‌ای ۴۸ بیتی شمارش پالس‌های خروجی از PLL که دارای بسامد ثابتی است را برعهده دارد. واحد منطبق و کنترل حافظه FIFO^۶ که هم‌زمان با بسامد خروجی بلوک PLL عمل می‌کند، وظیفه ثبت زمان ورود پالس‌های سامانه آشکارساز نوترون در حافظه FIFO را براساس زمان شمارش شده در شمارنده ۴۸ بیتی برعهده دارد. در واقع حافظه FIFO نقش حافظه موقت را برای داده‌های زمانی پالس‌های ورودی از سامانه آشکارساز نوترون برعهده دارد. قابل ذکر است بلوک PLL علاوه بر تأمین بسامد مربوط به شمارش زمان و هم‌زمانی^۷، سیگنال ساعت مورد نیاز بلوک پردازنده Nios II را نیز فراهم می‌نماید. خروجی بلوک حافظه FIFO به پردازش‌گر Nios II متصل است. این پردازش‌گر نهن در تراشه FPGA، با استفاده از سیگنال‌های کنترلی مربوطه اطلاعات را با سرعتی پایین‌تر (نسبت به سرعتی که در طرف دیگر حافظه FIFO برای ثبت تعداد محدودی از پالس‌ها وجود دارد)، اطلاعات نوشته شده در این حافظه را قرائت می‌کند. با توجه به منابع محدودی که در هر تراشه FPGA در دسترس است، استفاده از تراشه‌ای مجزا برای تأمین فضای حافظه کافی، ضروریست. قابل ذکر است ارسال اطلاعات به کامپیوتر به‌طور مستقیم به دلیل سرعت پایین تبادل، منطقی نمی‌باشد و باعث کاهش شدید در حداکثر نرخ نمونه‌برداری‌های ممکن می‌شود. به همین دلیل بانک حافظه SRAM نیز به این طرح اضافه شده است. در مرحله بعد اطلاعات جمع‌آوری شده با استفاده از درگاه USB به کامپیوتر منتقل می‌شود. لازم به توضیح است که آزمون‌های مربوط به این تراشه بر روی پلت‌فرم برد توسعه STRATIX III^۸، محصول شرکت ALTERA انجام شده است. قابل ذکر است حداقل سه پرپود گسسته‌سازی زمان بایستی بعد از هر آشکارسازی سپری شود تا ساختار شرح داده شده آماده دریافت پالس بعدی شود، این بازه‌زمانی در اصطلاح

شکل ۴ نشان‌دهنده دو نمونه از تحلیل اطلاعات جمع‌آوری شده در یک آزمایش است. چنان‌که مشهود است اگر اطلاعات مربوط به فاصله‌زمانی بین پالس‌ها جمع‌آوری شود، در تحلیل‌های دلخواه، خطای مربوط به لرزش بسامدی^۱ به‌صورت تجمعی سبب افزایش خطای کل می‌شود. برای رفع این نقیصه، سامانه جمع‌آوری اطلاعات می‌بایست داده‌های مربوط به زمان ورود پالس‌ها را جمع‌آوری کند. بدین ترتیب، در تحلیل‌های دلخواه جمله مربوط به خطای تجمعی ظاهر نخواهد شد. این ویژگی در شکل ۵ که نشان‌دهنده اصول کلی تبدیل زمان به کمیت دیجیتال^۲ در سامانه مذکور است به‌خوبی نشان‌داده شده است. کمیت زمان که از جنس کمیت‌های پیوسته است توسط یک نوسان‌گر به بازه‌های زمانی گسسته‌ای تبدیل می‌شود. سیگنال ساعت ایجاد شده توسط شمارنده شمارش می‌شود، حال چنان‌که دو پالس پی‌درپی خروجی از آشکارساز را در نظر بگیریم، در لحظات لبه‌های بالا رونده پالس‌های ورودی، مقدار خروجی شمارنده برابر با C_i و C_{i+1} (متناظر با T_i و T_{i+1}) است. چنان‌که فاصله‌زمانی بین پالس‌های متوالی مد نظر باشد، با تفاضل زمان‌های اندازه‌گیری شده می‌توان به فاصله‌زمانی بین پالس‌ها پی‌برد. پارامتر T در اصطلاح پارامتر دوره^۳ گسسته-سازی نامیده می‌شود. در این روش خطا برابر با $\pm T$ دوره تناوب گسسته‌سازی زمان، است.



شکل ۴. خطای تجمعی در تحلیل‌های دلخواه در سامانه‌ای که بازه‌های زمانی را ثبت می‌نماید.



شکل ۵. اصول کلی تبدیل زمان به کمیت دیجیتال و ثبت آن در حافظه FIFO در سامانه جمع‌آوری فاصله زمانی بین پالس‌ها.

4. Time Step

5. Chip

6. Writing Control Logic

7. FPGA Global Clock (Synchronization Clock)

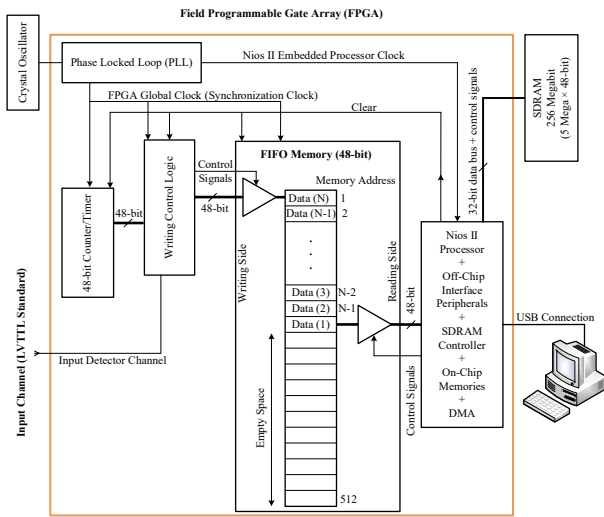
8. STRATIX III DSP Development Kit

1. JE: Jitter Error

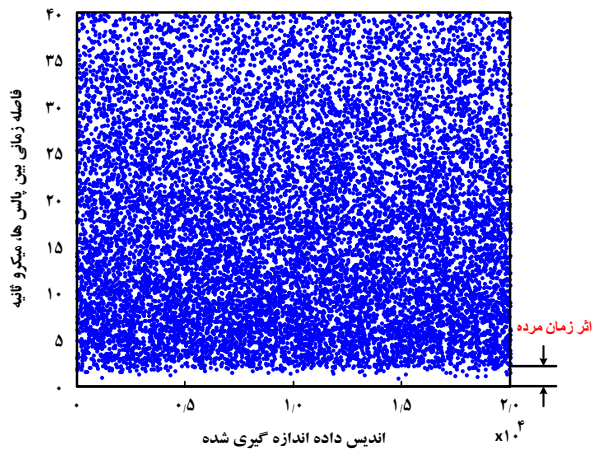
2. TDC: Time to Digital Conversion

3. Period

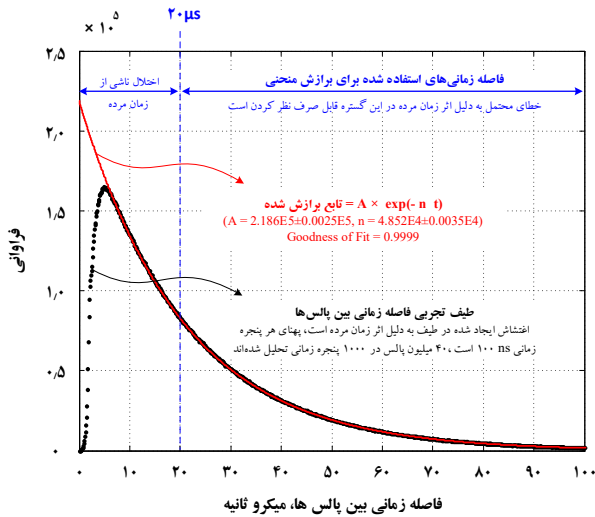




شکل ۶. ساختار پیاده‌سازی شده برای سامانه جمع‌آوری اطلاعات فاصله زمانی بین پالس‌های متوالی.



شکل ۷. فاصله‌زمانی بین پالس‌های متوالی برای ۲۰ هزار نمونه اندازه‌گیری شده.



شکل ۸. توزیع نسبی فاصله‌زمانی بین پالس‌های خروجی از آشکارساز BF_۳ به همراه تابع توزیع پواسون برازش شده بر آن.

زمان‌مرده بین وقایع^۱ نامیده می‌شود. از این رو وابسته به این‌که بسامد گسسته‌سازی چقدر است، زمان‌مرده سامانه جمع‌آوری اطلاعات مشخص می‌شود. به عنوان مثال پرپود گسسته‌سازی زمان برای تراشه از خانواده STRATIX III برابر با ۲/۲۲ ns است، از این رو زمان‌مرده بین وقایع برابر با ۶/۶۶ ns است. پارامتر مهم بعدی، حداکثر نرخ نمونه‌برداری است.

۴. نتایج تجربی به‌دست آمده از تحلیل توزیع نسبی فاصله‌زمانی بین پالس‌ها

سامانه نشان داده شده در شکل ۳ در نرخ شمارش نوترون حدود ۴۳ هزار شمارش در هر ثانیه به‌کار گرفته شد و تعداد چهل میلیون فاصله زمانی بین پالس‌ها اندازه‌گیری و ثبت گردید. تعداد بیست هزار نمونه از اطلاعات اندازه‌گیری شده در شکل ۷ آورده شده است. چنان‌که مشهود است، تجمع بیشتری برای پالس‌ها با فاصله زمانی کوتاه وجود دارد. این در حالیست که به دلیل زمان مرده سامانه آشکارسازی، به ازای فاصله زمانی‌های خیلی کوتاه (کوچک‌تر از ۲ μs) نمونه‌ای ثبت نشده است. شکل ۸ نشان‌دهنده توزیع طیفی فاصله زمانی بین پالس‌ها است که در هزار تقسیم‌بندی زمانی^۲ ترسیم شده است. هر تقسیم‌بندی زمانی دارای پهنای زمانی ۱۰۰ ns است. در مجموع تعداد چهل میلیون نمونه‌برداری از فاصله زمانی بین پالس‌ها انجام شده است. در فاصله زمانی‌های بزرگ‌تر از ۲۰ μs جایی که اثر زمان مرده آشکارساز بر توزیع به‌دست آمده تأثیر ناچیزی دارد، توزیع پواسون برازش شده است. خط ممتد نشان‌دهند تابع برازش شده است. رابطه تحلیلی برازش شده بر نتایج تجربی تطابق خوبی داشته و مقدار پارامتر "خوبی برازش"^۳ به‌دست آمده برابر با ۰/۹۹۹۹ است. در بازه زمانی صفر الی ۲۰ μs اثر زمان مرده به شکل انحراف از توزیع پواسون مشهود است. تابع برازش شده مقدار شمارش صحیح را برابر با ۴۸۵۲۰ شمارش در هر ثانیه به‌دست داده است. متوسط شمارش مشاهده از آشکارساز برابر با ۴۳۴۲۲ شمارش در هر ثانیه اندازه‌گیری شده است.

1. Inter-Event Dead Time
2. Time Bin
3. Goodness of Fit



قلب یک کد محاسباتی مونت کارلو اعداد تصادفی تولیدی با توزیع متناسب با مسئله مورد نظر است. در این تحقیق از روش تبدیل معکوس برای تولید اعداد تصادفی با توزیع پواسون استفاده شد. اگر از تابع توزیع احتمال پواسون در فاصله زمانی دو پالس پی در پی انتگرال گیری کنیم داریم، حاصل احتمال مشاهده پالس بعدی است. نتیجه‌ی انتگرال که تابع توزیع احتمال تجمعی مشاهده پالس مذکور است، اگر برابر با عدد تصادفی ξ قرار داده شود داریم:

$$\xi = \int_0^{t_{\text{Poisson}}} n e^{-nt'} dt' = 1 - e^{-nt_{\text{Poisson}}} \quad (1)$$

رابطه (۱) نشان‌دهنده مبدل اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت به اعداد تصادفی با توزیع پواسون است:

$$\Delta t_{pj} = \frac{\ln\left(\frac{1}{\xi_j}\right)}{n} \quad (2)$$

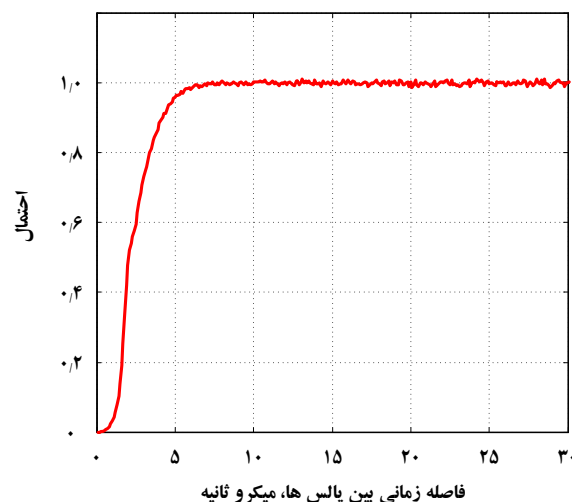
در این رابطه Δt_{pj} فاصله زمانی با توزیع پواسون، n شمارش صحیح آشکارساز، ξ_j عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک، و j زاندریس شماره عدد تصادفی تولیدی است.

برای آزمون صحت‌سنجی تابع انتقال اندازه‌گیری شده، یک فرایند تصادفی دیگر (در نرخ شمارشی متفاوت از آشکارساز) توسط سامانه آشکارسازی ثبت و در رایانه ذخیره گردید. سپس با تحلیل نتایج به‌دست آمده فرایند تصادفی اولیه (فرایند ورودی به سامانه آشکارسازی) استخراج گردید. فرایند تصادفی بازیابی شده به همراه نتایج تجربی اندازه‌گیری شده در شکل ۱۰ آورده شده است. سپس فرایند تصادفی بازیابی شده به عنوان یک فرایند تصادفی ورودی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو به تابع تبدیل نشان داده شده در شکل ۹ اعمال گردید. فرایند تصادفی بازیابی شده مبنایی برای تولید فاصله زمانی‌های تصادفی با استفاده از رابطه‌ی (۲) قرار گرفت. فاصله‌زمانی‌های تصادفی تولیدی سپس با استفاده از تابع انتقال نشان داده شده در شکل ۹ مورد بررسی قرار گرفتند و احتمال مشاهده‌ی هر یک در خروجی سامانه لحاظ گردید. برنامه نوشته شده در محیط نرم‌افزار متلب حدود ۱۵۹ دقیقه برای ره‌گیری ده میلیون داده تصادفی اجرا و نتایج در شکل ۱۱ به همراه نتایج تجربی (نتیجه مورد انتظار از شبیه‌سازی) و فرایند تصادفی اولیه آورده شده است که تطابق خوبی مشاهده می‌شود.

با مشخص بودن توابع ورودی و خروجی سامانه آشکارسازی می‌توان از تقسیم نقطه به نقطه توابع ورودی و خروجی به تابع توزیع احتمال انتقال سامانه آشکارسازی پی برد. شکل ۹ نشان‌دهنده تابع انتقال سامانه آشکارسازی به ازای فاصله زمانی‌های مختلف پالس‌های ورودی است. تابع فوق به ازای فاصله‌زمانی‌های بزرگ‌تر از $10 \mu\text{s}$ برابر با ۱ و یکنواخت است. این بدان معناست که سامانه آشکارسازی، واکنش‌های با فاصله زمانی بزرگ‌تر از این مقدار را با احتمال صد در صد آشکار می‌کند. در زمان‌های بین صفر تا $10 \mu\text{s}$ ، سامانه آشکارسازی به صورت یک تابع صعودی و پیوسته است. بدین معنی که واکنش‌های با فاصله‌زمانی‌های متناظر، با یک احتمال مشخص آشکار و در خروجی ظاهر می‌شوند.

۵. صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده با استفاده از روش مونت کارلو

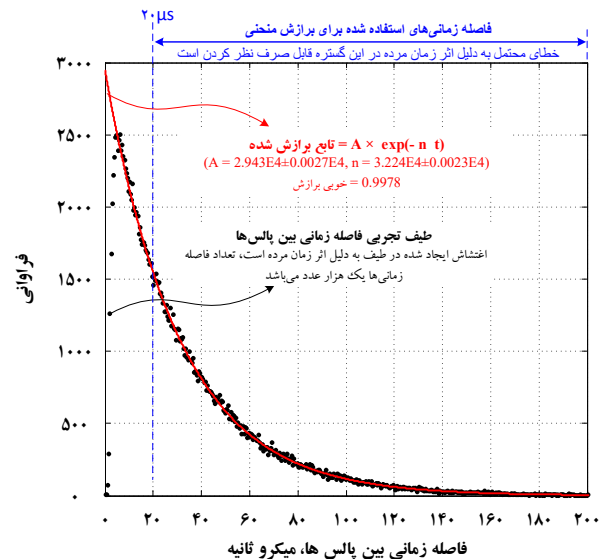
از آن‌جا که سامانه شناسایی شده ذاتاً سامانه‌ای تصادفی است، آزمون و ارزیابی صحت نتایج به‌دست آمده نیز بایستی با استفاده از آزمون‌های آماری انجام شود. بر همین اساس روش مونت کارلو بدین منظور انتخاب شد. روش کار بر این اساس است که با تولید یک رشته فاصله زمانی با توزیع پواسون به صورت مصنوعی، خروجی مورد انتظار با استفاده از تابع تبدیل اندازه‌گیری شده در حوزه زمان تولید می‌شود. سپس نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج تجربی مقایسه می‌گردد. برای صحت‌سنجی سامانه‌ی شناسایی شده، مجدداً آزمایشی ترتیب داده شد، و نتایج تجربی جدیدی برای این منظور جمع‌آوری گردید. به این ترتیب داده‌های استفاده شده برای شناسایی سامانه از داده‌های استفاده شده برای صحت‌سنجی نتایج متفاوت می‌باشند.



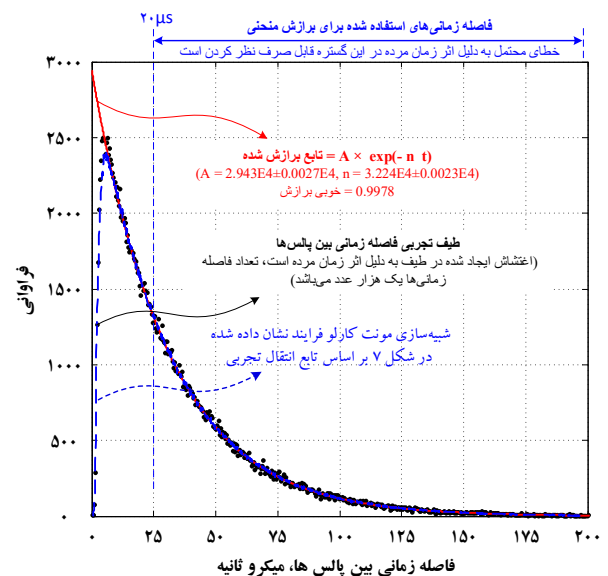
شکل ۹. تابع انتقال سامانه آشکارسازی که به‌واسطه تحلیل توزیع نسبی فاصله‌زمانی بین پالس‌های متوالی از آشکارساز به‌دست آمده است.



تصادفی است. خروجی نیز یک فرایند تصادفی است که نسبت به فرایند اولیه ورودی به آشکارساز، دچار اعوجاج و تغییر شده است. به این ترتیب فرایند تصادفی واقعی و فرایند تصادفی اندازه‌گیری شده با یکدیگر تفاوت‌هایی دارند. ارتباط بین فرایند تصادفی واقعی، و فرایند تصادفی اندازه‌گیری شده توسط تابع انتقال آشکارساز مشخص می‌شود. در این پژوهش با استفاده از تحلیل آماری افتوخیزهای ناهمبسته به شناسایی سامانه‌های آشکارسازی هسته‌ای حالت پالسی پرداخته شده است. برای این منظور، یک آشکارساز BF_3 نوعی برای پیاده‌سازی روش فوق انتخاب شد. پالس‌های مشاهده شده در خروجی آشکارساز در حوزه زمان با استفاده از تحلیل آماری افتوخیزها اندازه‌گیری و تحلیل گردید. در این پژوهش تابع انتقال این سامانه‌آشکارسازی نوترون که بر پایه‌ی آشکارساز BF_3 است اندازه‌گیری شده است. با اعمال ورودی از نوع فرایند پواسون، فرایند تصادفی خروجی آشکارساز مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده، فرایند تصادفی ورودی به آشکارساز حدس زده شد و به این ترتیب ارتباط بین ورودی و خروجی که تابع انتقال آن مشخص گردید. برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده، برنامه‌ای با استفاده از روش مونت‌کارلو توسعه داده شد که قادر است با دریافت تابع انتقال سامانه آشکارسازی و فرایند تصادفی ورودی (که در این تحقیق فرایند تصادفی پواسون است)، فرایند تصادفی خروجی آشکارساز را شبیه‌سازی نماید. بدین ترتیب نتایج به‌دست آمده از روش مونت‌کارلو با نتایج تجربی که در آهنگ شمارش متفاوتی اندازه‌گیری شد، مقایسه و تطابق خوبی مشاهده گردید. با آگاهی از تابع انتقال آشکارساز، بی‌آنکه آزمایشی را به انجام رساند، با معلوم بودن فرایند تصادفی ورودی به آشکارساز، می‌توان فرایند تصادفی اندازه‌گیری شده (که به علت ماهیت ذاتی سامانه آشکارسازی دارای اعوجاج است) را با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو تخمین زد.



شکل ۱۰. توزیع طیفی فاصله زمانی‌های مشاهده شده بین پالس‌های متوالی در خروجی آشکارساز و توزیع پواسون برازش شده بر آن. آهنگ شمارش صحیح به‌دست آمده برای آشکارساز برابر با 32240 ± 23 شمارش در هر ثانیه است.



شکل ۱۱. مقایسه نتایج تجربی به‌دست آمده برای فرایند تجربی نشان داده شده در شکل ۱۰ و نتایج شبیه‌سازی شده با استفاده از روش مونت‌کارلو.

۶. نتیجه‌گیری

یکی از ابزارهای بسیار پرکاربرد در صنعت هسته‌ای سامانه‌های آشکارسازی است. بسته به نوع ذره و انرژی آن، آشکارساز مورد استفاده نیز متفاوت است. از جمله خواص جدایی‌ناپذیر سامانه‌های آشکارسازی، زمان مرده آشکارساز و سامانه الکترونیک مرتبط با آن است. در اندازه‌گیری‌های مربوط به ذرات راديواکتیو، ورودی سامانه‌های آشکارسازی معمولاً فرایندی

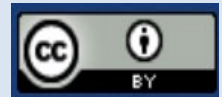


مراجع

1. Karrari M. System Identification. Amirkabir University of Technology. *Tehran Polytechnic Press*. 2010.
2. Olsson G. Modeling and Identification of a Nuclear Reactor. *Mathematics in Science and Engineering*. 1976;126:519-593.
3. Zhang X, Sun P, Qiu L, Pu S, Wei X. Transfer function modeling and simulation of HPR1000. *Annals of Nuclear Energy*. 2022;166:108689.
4. Henley E.J, Lewins J. Advances in Nuclear Science and Technology. *Elsevier*. 2014;7: NY, DOI: 10.1007/978-1-4613-2862-9.
5. MATLAB 2020b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, *United State*.
6. Knoll G.F. Radiation detection and measurement. *John Wiley & Sons Inc*. 1999.
7. Arkani M, Raisali G. Measurement of dead time by time interval distribution method. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2015;774:151-158.
8. Arkani M, Khalafi H, Vosoughi N, Khakshournia S. Design and construction of a two-channel data acquisition system for random processes based on FPGA. *Journal of Nuclear Research and Applications*. 2015;36(72):29-38.
9. Arkani M, Khalafi H, Vosoughi N, Khakshournia S. A FPGA based Time Analyser for Stochastic Methods in Experimental Physics. *Instruments and Experimental Techniques*. 2015;58:350-358.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

ارکانی، محمد. (۱۴۰۳)، استفاده از تحلیل آماری افت‌وخی‌های ناهمبسته برای شناسایی سامانه‌های آشکارسازی هسته‌ای حالت پالسی. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۰۹ (۳)، ۱۸۱-۱۸۹. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1589> .Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1589.html

