



## بررسی عملکرد آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم در بازیابی بیناب نوترون‌های سریع ناشی از پرتوهای کیهانی با روش شبکه‌ی عصبی فازی تطبیقی

شهریار بدیعی<sup>\*</sup>، پیمان رضائیان

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

\*Email: shbadiei@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۷/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۹/۹

### چکیده

در این مقاله بیناب نوترون‌های سریع در ارتفاع‌های ۳ و ۵ کیلومتری سطح زمین با استفاده از پاسخ آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم و با بهره‌گیری از شبکه‌ی هوشمند عصبی فازی (انفیس) بازیابی شد. انفیس، یک سیستم استنتاج فازی نوع تاکاگی-سوگنو است که در قالب شبکه‌ی تطبیقی پیاده‌سازی شده است. این ابزار مشابه با تفکر انسان در مواجهه با مسایل غیرقطعی و همراه با خطا عمل می‌کند. ماتریس پاسخ پنج آشکارساز قطره‌ی فوق‌گرم در فشارهای خارجی مختلف توسط یک برنامه‌ی کاربردی نوشته شده توسط ابزار شبیه‌سازی Geant4 محاسبه گردید و از آن برای محاسبه‌ی ورودی‌های انفیس استفاده شد. مجموعه بیناب‌های گزارش‌های فنی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی نیز به عنوان خروجی به کار گرفته شد. بیناب‌های مرجع با خطاهای ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱۱ بازیابی شدند. توافق نسبی بین بیناب‌های مرجع و بازیابی شده نشان می‌دهد که این آشکارسازها با کمک انفیس می‌تواند به عنوان یک روش جدید در بازیابی بیناب‌های نوترون ناشی از برهم‌کنش تشعشعات فضایی در جو به کار رود.

**کلیدواژه‌ها:** Geant4، انفیس، نوترون سریع، آشکارساز قطره فوق‌گرم

## Investigation of the performance of Superheated Drop Detectors for unfolding fast neutron spectra produced by cosmic rays using an Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS)

Sh. Badiei<sup>\*1</sup>, P. Rezaeian

Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P. O. Box 11365-3486, Tehran - Iran

Research Article

Received 6.10.2021, Accepted 30.11.2021

### Abstract

In this paper, the fast neutron spectra at altitudes of 3 and 5 km were unfolded by the response of Superheated Drop Detectors and using an Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS). ANFIS is a Takagi-Sugeno Fuzzy Inference System implemented in the framework of adaptive networks. This tool works similarly to human thinking in dealing with uncertain and erroneous problems. The response matrix of five Superheated Drop Detectors under various external pressures was calculated by an application developed using the Geant4 simulation toolkit and was used to obtain inputs of ANFIS. Also, the neutron spectra of the IAEA technical reports were utilized as the targets. The reference spectra were unfolded with RMSEs of 0.005 and 0.011. The relative agreement between the unfolded and reference spectra shows that these detectors and ANFIS can be used as a new technique for unfolding neutron spectra produced by cosmic radiations in the atmosphere.

**Keywords:** Geant4, ANFIS, Fast neutron, Superheated drop detector



## ۱. مقدمه

غیرفعال که نیاز به تجهیزات جانبی نداشته باشند، پیشنهاد می‌شود. یکی از آشکارسازهایی که دارای این ویژگی‌ها می‌باشد، آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم است [۵]. این آشکارسازها دارای ابعاد کوچک و قابل حمل می‌باشند و قرائت آن‌ها حتی با چشم غیرمسلح نیز، امکان‌پذیر است. با توجه به عدم حساسیت این آشکارسازها به پرتوهای گاما و قابلیت آستانه‌ای بودن آن‌ها، ابزاری بسیار مفید برای اندازه‌گیری بیناب نوترون‌های حاصل از برهم‌کنش‌های تابش‌های کیهانی در جو هستند.

در آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم، تعداد حباب‌های تشکیل شده زمانی که آشکارساز در مقابل یک چشمه‌ی نوترونی قرار دارد، انتگرال حاصل‌ضرب بیناب انرژی نوترون‌ها در پاسخ آشکارساز روی تمام بازه‌ی انرژی می‌باشد [۶]. به این معنی که شار نوترون در هر بازه‌ی انرژی در پاسخ آشکارساز در آن بازه ضرب می‌شود و مجموع آن‌ها پاسخ نهایی آشکارساز خواهد بود. به بیان ریاضی عبارت فوق یک معادله‌ی انتگرال فردهلم نوع اول می‌باشد که در رابطه‌ی (۱) شکل گسسته‌ی آن ملاحظه می‌شود [۷].

$$C_j = \sum_{i=1}^m R_{i,j} \phi_i \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$C_j$  شمارش آشکارساز  $j$ ،  $R_{i,j}$  پاسخ آشکارساز  $j$  ام در بازه‌ی انرژی  $i$  ام،  $\phi_i$  شارش نوترون در بازه‌ی انرژی  $i$  ام و  $m$  تعداد آشکارسازهای مورد استفاده می‌باشد. معادله (۱) یک معادله‌ی بد حالت<sup>۲</sup> است و بی‌نهایت جواب دارد.

در نتیجه باید با استفاده از روش‌های بازیابی، بیناب انرژی نوترون به دست آید. از مهم‌ترین روش‌های بازیابی می‌توان به روش‌های تکراری، حداقل مربعات، مونت‌کارلو و . . . اشاره کرد [۱]. از جمله معایب روش‌های بالا می‌توان به نیاز به حدس اولیه‌ی خوب برای بیناب جواب، ریاضیات ماتریسی پیچیده‌تر نظیر معکوس ماتریس پاسخ با دترمینان نزدیک به صفر و خطای بالا در جواب نهایی اشاره نمود. نقایص ذکر شده باعث شد تا از روش‌های جدیدتر نظیر شبکه‌های عصبی فازی تطبیقی برای بازیابی بیناب نوترون‌های سریع استفاده شود [۸].

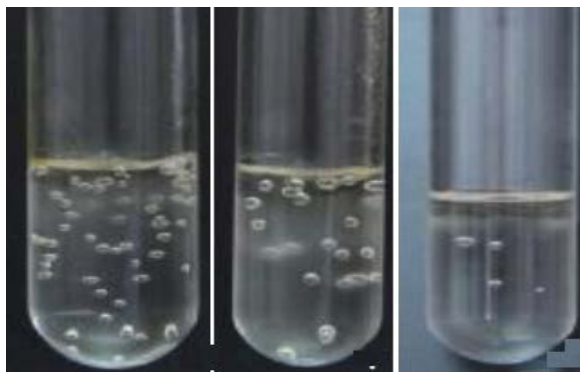
در این مقاله تلاش شده است تا با استفاده از محاسبات بر مبنای شبکه‌های عصبی فازی تطبیقی، بیناب نوترون‌های ایجاد شده در جو در دو ارتفاع سه و پنج کیلومتری با استفاده از پاسخ آشکارسازهای آستانه‌ای قطره‌ی فوق‌گرم بازیابی شود. به منظور ارزیابی محاسبات، بیناب‌های محاسبه شده با بیناب‌های گزارش شده در مراجع [۹، ۱۰] مقایسه شده است. نتایج مقایسه‌ها

پرتوهای کیهانی معمولاً متشکل از ذرات پروتون، آلفا، الکترون و هسته‌های سنگین هستند. منشأ این ذرات می‌تواند خورشیدی و یا کهکشانی باشد. این ذرات پر انرژی، پس از ورود به جو زمین در اثر برهم‌کنش با هسته‌های اتم‌های موجود در جو، سبب ایجاد ذرات ثانویه‌ی فوتون (پرتوهای گاما) و نوترون می‌شوند. معمولاً بیناب انرژی و معادل دز فردی و محیطی این ذرات به ارتفاع از سطح زمین بستگی دارد و با توجه به عمق نفوذ این ذرات، معمولاً افرادی نظیر خلبانان، خدمه پروازی و مسافران که در ارتفاع بالای جو قرار دارند، تحت تأثیر این تابش‌ها قرار می‌گیرند. خلبانان و خدمه پروازی به واسطه شغلی که دارند بیش‌تر از سایر افراد در معرض این پرتوها قرار دارند و به همین دلیل است که براساس گزارش‌های ۱۰۳ و ۶ کمیسیون بین‌المللی حفاظت رادیولوژیکی<sup>۱</sup>، پایش پرتویی آن‌ها باید انجام شود.

به منظور پایش پرتویی خلبانان و خدمه‌ی پروازی، تاکنون محققین، اقدام به اندازه‌گیری معادل دز محیطی و فردی در ارتفاعات مختلف نموده‌اند. در این میان، اندازه‌گیری معادل دز نوترون به دلیل وابستگی سطح مقطع برهم‌کنش‌هایش به انرژی، همواره یکی از چالش‌های مهم بوده است. هم‌چنین ضرایب تبدیل شار به دز وابسته به انرژی است. در نتیجه برای تعیین معادل دز در یک میدان نوترونی در اختیار داشتن بیناب میدان نوترونی مورد نظر از اهمیت زیادی برخوردار است و از این‌رو بیناب‌نمایی نوترون همواره مورد توجه محققین آشکارسازی و دزیمتری نوترون بوده است.

در تحقیقات گذشته برای بیناب‌نمایی نوترون‌ها در ارتفاعات، از آشکارسازهایی نظیر کره‌های بونر، سوسوزن‌های آلی مایع، شمارنده‌های معادل دز و آشکارسازهای فوزویچ استفاده شده است [۱]. روش‌های بازیابی بیناب معمولاً روش‌های کلاسیک غیرهوشمند نظیر روش تکراری، مونت‌کارلو و حداقل مربعات بوده است [۱]. در مقیاس تحقیقاتی و آزمایشگاهی از روش‌هایی نظیر پس‌زنی پروتون، اندازه‌گیری زمان پرواز [۲، ۳]، آشکارسازهای نیمه‌هادی [۴] و . . . برای بیناب‌نمایی نوترون استفاده می‌شود که این روش‌ها دارای چالش‌های گسترده بوده و نیاز به ابزارآلات الکترونیکی پیچیده دارند. بنابراین می‌توان گفت که استفاده از این روش‌ها در ارتفاعات شاید چندان منطقی و البته عملیاتی نباشد. برای بیناب‌نمایی در چنین شرایطی معمولاً استفاده از آشکارسازهای کوچک، قابل حمل و





شکل ۱. پرتودهی آشکارسازهای قطره فوق‌گرم با آستانه‌های متفاوت در میدان چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$ .

در آشکارساز قطره‌ی فوق‌گرم که در معرض تابش نوترون قرار می‌گیرد، انرژی موردنیاز برای تشکیل حباب، توسط ذرات بارداری تأمین می‌شود که در خلال برهم‌کنش نوترون‌ها با هسته‌های مایع فوق‌گرم، تولید می‌شوند. اگر انرژی به جا گذاشته شده توسط این ذرات باردار، بیش‌تر از سد انرژی مورد نیاز برای تشکیل حباب باشد، قطرات فوق‌گرم تبخیر می‌شوند و حباب‌هایی در محیط میزبان تشکیل می‌شوند. بیشینه‌ی انرژی جنبشی ( $E_A$ ) که به هسته‌ای به عدد جرمی  $A$  در یک برهم‌کنش پراکندگی کشسان از سوی نوترونی با انرژی  $E_n$  منتقل می‌شود، برابر است با [۵]:

$$E_A = \frac{4AE_n}{(A+1)^2} \quad (4)$$

هسته‌ی پس‌زده شده، انرژی‌اش را در مایع فوق‌گرم، متناسب با توان توقفش، بر جای می‌گذارد. انرژی به جا گذاشته شده در فاصله‌ای به اندازه‌ی دو برابر شعاع بحرانی باعث تبخیر قطره می‌شود که برابر است با:

$$E_D = r_c \left( \frac{dE}{dx} \right) \quad (5)$$

$dE/dx$  توان توقف ذرات باردار تولید شده در برهم‌کنش با نوترون می‌باشد. بر طبق رابطه‌ی (۵) هسته‌های پس‌زده شده‌ی مختلف با توجه به مقدار توان توقفشان، انرژی‌های متفاوتی در مایع فوق‌گرم به جای می‌گذارند. بنابراین هسته به بیش‌ترین توان توقف، نقش اصلی را در تبخیر قطره در شرایط آستانه‌ای بازی می‌کند.

نشان می‌دهد که بیناب‌های محاسبه شده با بیناب‌های مرجع سازگاری نسبی دارند. براین اساس می‌توان گفت که آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم آستانه‌ای ابزاری مناسب برای بیناب‌نمایی نوترون‌های حاصل از برهم‌کنش پرتوهای کیهانی با جو زمین می‌باشند و برای این منظور می‌توانند مدنظر قرار گیرند.

## ۲. تئوری

۱۰۲ روابط فیزیکی حاکم بر آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم متشکل از هزاران قطره‌ی میکرونی از مایع فوق‌گرم است که به طور تصادفی در یک محیط پلیمری میزبان پراکنده شده‌اند. در اثر برهم‌کنش نوترون‌های سریع با هسته‌های مایع فوق‌گرم و آزادسازی یون‌های با توان توقف کافی، این قطرات به حباب تبدیل می‌شوند.

در شکل ۱ تصویری از آشکارسازهای قطره فوق‌گرم با آستانه‌های متفاوت که در میدان پرتویی چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  قرار گرفته‌اند نشان داده شده است.

یک مایع را زمانی در حالت نیمه‌پایدار فوق‌گرم گوئیم که دمایش بالای نقطه‌ی جوش باشد و در حالت مایع قرار داشته باشد. در مایعات یک سد انرژی وجود دارد که مانع تشکیل حباب می‌شود و برابر است با [۵]:

$$W = \frac{16\pi\gamma^2(T)}{3(P_v - P_0)^2} \quad (2)$$

$\gamma(T)$  تنش سطحی مایع در دمای  $T$ ، فشار بخار  $P_v$  و فشار  $P_0$  فشار خارجی اعمال شده بر سطح مایع می‌باشد. اگر انرژی به جا گذاشته شده در مایع بر این سد انرژی غلبه کند، حبابی با شعاع بحرانی مطابق با رابطه‌ی (۳) تشکیل می‌شود [۵]:

$$r_c = \frac{2\gamma(T)}{(P_v - P_0)} \quad (3)$$

در این حالت، حباب تشکیل شده به لحاظ ترمودینامیکی، ناپایدار است و با تبخیر کل قطره تا ابعاد قابل‌مشاهده، بزرگ می‌شود. بنابراین سد انرژی، مطابق با رابطه‌ی (۲) برابر با کم‌ترین انرژی موردنیاز برای تشکیل حباب تا ابعاد قابل مشاهده می‌باشد. در یک دمای خاص، با افزایش فشار خارجی، جمله‌ی  $(P_v - P_0)$  کوچک‌تر می‌شود و تنش سطحی ثابت می‌ماند. در نتیجه مطابق رابطه‌ی (۲) سد انرژی تشکیل حباب افزایش می‌یابد.



۵. یک واسط نافازی سازی<sup>۱۱</sup> که نتایج فازی حاصل از استنتاج را به خروجی‌های غیرفازی تبدیل می‌کند. معمولاً به مجموع پایگاه داده‌ها و قواعد، پایگاه دانش<sup>۱۲</sup> گفته می‌شود.

سیستم‌های استنتاج فازی به سه دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند [۱۱]:

نوع اول: خروجی نهایی، میانگین وزن‌داری از مقادیر توابع عضویت خروجی می‌باشد. وزن مورد استفاده، همان قدرت تأثیر هر قاعده می‌باشد. توابع عضویت خروجی در این نوع باید صعودی باشند.

نوع دوم: خروجی فازی نهایی به دست آمده با اعمال عملگر ماکزیمم به خروجی‌های فازی تمام قاعده‌ها به دست می‌آید (خروجی فازی هر قاعده مینیمم قدرت تأثیر و تابع عضویت خروجی هر قاعده می‌باشد). با روش‌های متعددی می‌توان خروجی فازی را به غیرفازی تبدیل نمود، نظیر مرکز سطح<sup>۱۳</sup>، نقطه‌ی تقسیم‌کننده‌ی مساحت<sup>۱۴</sup>، نقطه با ماکزیمم عرض<sup>۱۵</sup>، میانگین نقاط با عرض ماکزیمم<sup>۱۶</sup> و غیره.

نوع سوم: در این نوع، قواعد فازی تاکاگی و سوگنو استفاده می‌شود. خروجی هر قاعده یک ترکیب خطی از متغیرهای ورودی و یک عدد ثابت است. خروجی نهایی میانگین وزن‌داری از خروجی تمام قواعد می‌باشد. در مقاله‌ی حاضر از این نوع از سیستم فازی استفاده شده است.

می‌توان سیستم‌های فازی را در قالب شبکه‌های تطبیقی نمایش داد. برای سادگی یک سیستم استنتاج فازی را در نظر بگیرید که دو ورودی  $x$  و  $y$  و یک خروجی  $z$  دارد. فرض کنید که پایگاه قواعد، دو قاعده‌ی اگر-آن‌گاه فازی از نوع تاکاگی و سوگنو دارد.

قاعده‌ی ۱: اگر  $A_1, x$  و  $B_1, y$  است آن‌گاه  $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$   
 قاعده‌ی ۲: اگر  $A_2, x$  و  $B_2, y$  است آن‌گاه  $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$   
 استدلال فازی نوع سوم در شکل ۲ و ساختار انفیس معادل آن (انفیس نوع سوم) در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

یافته‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که کسر بسیار کوچکی از انرژی به‌جا مانده توسط هسته‌های پس‌زده‌شده، در تشکیل حباب نقش دارد. این کسر بازدهی ترمودینامیکی نام دارد و با نماد  $\eta$  نمایش داده می‌شود [۵]. این پارامتر صرفاً وابسته به نوع مایع فوق‌گرم می‌باشد و مستقل از دما، فشار و انرژی نوترون فرودی است. در نتیجه شرط تشکیل حباب برابر است با:

$$\eta E_D \geq W \quad (6)$$

شرط نهایی تشکیل حباب با جای‌گذاری روابط (۲)، (۳) و (۵) در رابطه‌ی (۶) به دست می‌آید:

$$\frac{dE}{dx} \geq \frac{4\pi\gamma^2(T)}{3(P_v - P_o)\eta} \quad (7)$$

مطابق رابطه‌ی (۷) ذرات بارداری که توان توقف متوسطشان در فاصله‌ی دو برابر شعاع بحرانی از توان توقف آستانه (مقدار سمت راست رابطه‌ی (۷)) بیش‌تر باشد، در تشکیل حباب شرکت می‌کنند.

## ۲.۲ انفیس<sup>۱</sup>: سیستم استنتاج فازی بر پایه‌ی شبکه‌های تطبیقی

سیستم‌های استنتاج فازی هم‌چنین با نام‌های سیستم‌های بر پایه‌ی قانون فازی<sup>۲</sup>، مدل‌های فازی<sup>۳</sup>، حافظه‌های شرکت‌پذیر فازی<sup>۴</sup> و یا کنترلرهای فازی<sup>۵</sup> شناخته می‌شوند. به طور کلی یک سیستم استنتاج فازی از ۵ بخش اصلی ساخته می‌شود [۱۱].

۱. یک پایگاه قاعده<sup>۶</sup> که متشکل از تعدادی قواعد "اگر-آن‌گاه" فازی است.
۲. یک پایگاه داده<sup>۷</sup> که توابع عضویت مجموعه‌های فازی مورد استفاده در قواعد فازی در آن تعریف شده است.
۳. یک واحد تصمیم‌گیرنده<sup>۸</sup> که عملیات استنتاج روی قواعد را انجام می‌دهد.
۴. یک واسط فازی سازی<sup>۹</sup> که ورودی‌های غیرفازی<sup>۱۰</sup> را تبدیل به درجه‌ی تطابق با مقادیر زبانی می‌کند.

1. ANFIS (Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System)
2. Fuzzy-Rule-Based Systems
3. Fuzzy Models
4. Fuzzy Associative Memories (FAM)
5. Fuzzy Controllers
6. Rule Base
7. Data Base
8. Decision-Making Unit
9. Fuzzification Interface
10. Crisp Inputs

11. Defuzzification Interface
12. Knowledge Base
13. Centroid of Area
14. Bisector of Area
15. Maximum Criterion
16. Mean of Maxima



تغییر می‌کند. در واقع هر تابع پیوسته و مشتق‌پذیر قطعهای<sup>۱</sup>، مانند مثلثی یا دوزنقه‌ای می‌تواند برای گره‌های این لایه استفاده شود. پارامترهای این لایه، پارامترهای مقدم<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند. در شکل ۴ تابع گوسی، مثلثی و دوزنقه‌ای به ترتیب با ۳، ۲ و ۴ پارامتر مشخص است.

لایه‌ی دوم: گره‌های این لایه مدور (بدون پارامترهای آزاد) هستند و با نماد  $\Pi$  مشخص شده‌اند. خروجی این گره‌ها مطابق رابطه‌ی (۱۱) حاصل ضرب سیگنال‌های ورودی در هم است:

$$W_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

خروجی هر گره قدرت تأثیر هر قاعده را نشان می‌دهد. هر عملگر تی- نرم<sup>۳</sup> دیگر نیز می‌تواند به عنوان تابع گره برای عملیات AND منطقی استفاده شود.

لایه‌ی سوم: گره‌های این لایه مدور هستند و با نماد  $N$  مشخص شده‌اند. خروجی هر گره مطابق رابطه‌ی (۱۲) برابر نسبت قدرت تأثیر قاعده‌ی آن گره به مجموع قدرت تأثیر تمام قواعد می‌باشد:

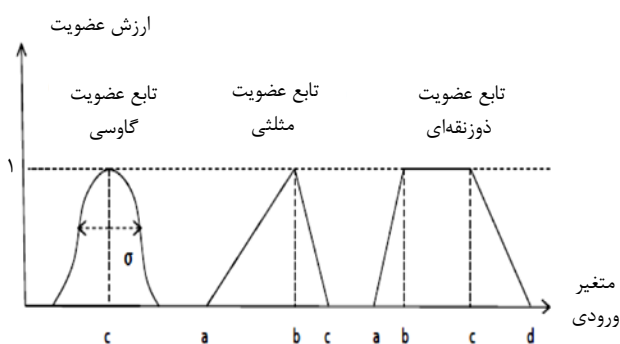
$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \quad (12)$$

برای سادگی، خروجی گره‌های این لایه، قدرت تأثیر نرمالیزه شده‌ی قواعد هم نامیده می‌شود.

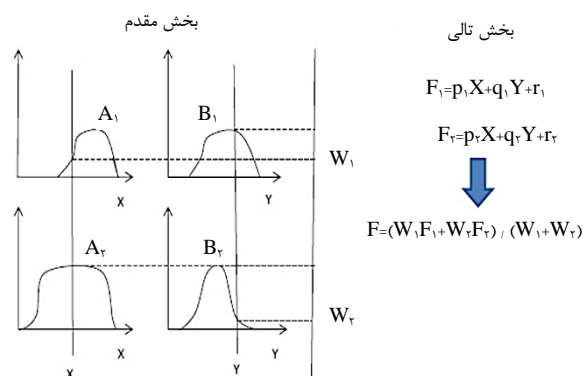
لایه‌ی چهارم: گره‌های این لایه مربعی هستند و خروجی گره‌ی  $i$ ام عبارت است از:

$$o_i^* = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (13)$$

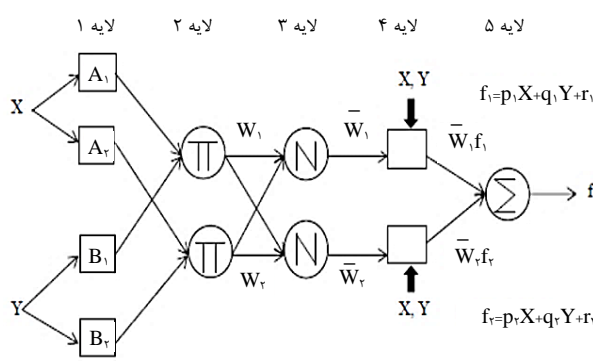
$\bar{w}_i$  خروجی لایه‌ی سوم و  $\{p_i, q_i, r_i\}$  پارامترهای این لایه هستند که به پارامترهای تالی<sup>۴</sup> معروفند.



شکل ۴. تابع گوسی، مثلثی و دوزنقه‌ای مورد استفاده به عنوان توابع عضویت در انفیس.



شکل ۲. نمودار گرافیکی مربوط به استدلال فازی نوع سوم [۸].



شکل ۳. نمایش انفیس نوع سوم در قالب شبکه‌ی تطبیقی [۸].

توابع گره‌ها در هر لایه از یک خانواده هستند و در ادامه توضیح داده می‌شوند. لایه‌ی اول: گره‌ی  $i$ ام در این لایه یک گره‌ی مربعی (شامل پارامترهای آزاد) با تابع زیر است:

$$o_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (14)$$

که  $x$  ورودی گره‌ی  $i$ ام و  $A_i$  برچسب زبانی مربوط به گره است (برای مثال کوچک، بزرگ و غیره). در حقیقت  $o_i^1$ ، درجه‌ی تطابق متغیر  $x$  با تابع عضویت  $A_i$  را نشان می‌دهد. برای تابع عضویت می‌توان از تابع زنگوله‌ای شکل با مینیمم صفر و ماکزیمم ۱ با ضوابط (۹) یا (۱۰) استفاده نمود.

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - c_i}{a_i}\right)^{b_i}} \quad (9)$$

$$\mu_{A_i}(x) = e^{-\frac{(x - c_i)^2}{a_i}} \quad (10)$$

که  $\{a_i, b_i, c_i\}$  مجموعه‌ی پارامترهای تابع عضویت هستند. زمانی که مقدار این پارامترها تغییر می‌کند، شکل تابع زنگوله‌ای تغییر کرده و در نتیجه تابع عضویت روی برچسب زبانی  $A_i$

1. Piecewise Differentiable Function
2. Premise Parameters
3. T-Norm
4. Consequent Parameters

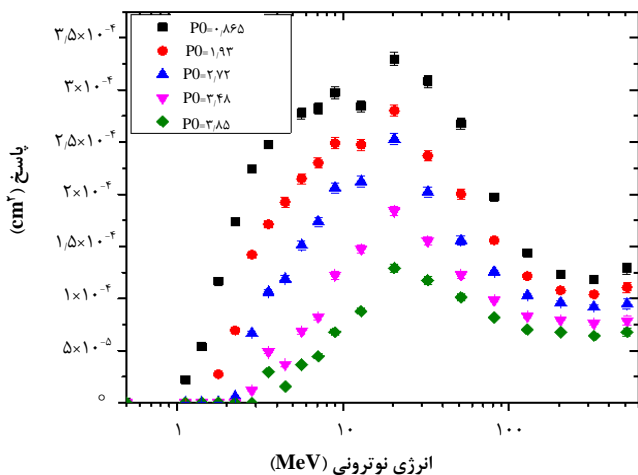


پاسخ مجموعه‌ای از ۵ آشکارساز قطره‌ی فوق‌گرم به بیناب‌های فوق، به عنوان ورودی به شبکه به کار می‌رود. در [۱۴، ۱۵]، برنامه‌ای کاربردی با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4 [۱۶] تدوین و اعتبارسنجی گردید. این برنامه که از امکانات زبان ++C بهره می‌گیرد، براساس توان توقف ذرات باردار تولید شده در اثر برهم‌کنش نوترون‌ها با هسته‌ی اتم‌های مایع فوق‌گرم (رابطه (۷))، تعداد حباب‌های تشکیل شده را در دماها و فشارهای خارجی مختلف محاسبه می‌کند و همچنین قابلیت تعریف آشکارساز با هندسه‌های گوناگون و مواد مختلف را داراست. در این تحقیق از مدل QGSP\_BERT\_HP برای معرفی فرایندهای فیزیکی در بخش PhysicsList برنامه، استفاده شد. با استفاده از این برنامه ماتریس پاسخ آشکارساز در پنج فشار خارجی مختلف در دمای ۲۸ درجه‌ی سلسیوس محاسبه گردید. در شکل ۵ این توابع پاسخ و خطای مربوطه (یک انحراف استاندارد) به نمایش درآمده‌اند.

ماتریس پاسخ در محاسبه‌ی ورودی‌های مورد نیاز انفیس به کار خواهد رفت.

حساس‌ترین آشکارساز این مجموعه به نوترون‌های با انرژی کمتر از ۱ MeV پاسخ نمی‌دهد. از این‌رو تمام بازه‌های انرژی کمتر از ۱ MeV در یک بازه‌ی انرژی تجمیع گردید و تعداد بازه‌های انرژی بیناب‌ها به ۲۰ رسید.

در جدول ۱ بازه‌بندی نهایی انرژی بیناب‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۵. توابع پاسخ و خطای مربوطه (یک انحراف استاندارد) برای آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم ساخته شده از ۰.۲ میلی‌لیتر فریون ۱۲ به صورت تعداد حباب در واحد شارش نوترون در پنج فشار خارجی مختلف در دمای ۲۸ درجه‌ی سلسیوس.

لایه‌ی پنجم: تنها گره‌ی این لایه مدور است و با نماد  $\Sigma$  در شکل ۳ مشخص شده است و وظیفه‌اش به دست آوردن مجموع سیگنال‌های ورودی است.

$$\text{overall output} = o_i^{\Delta} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (14)$$

شبکه‌ی تطبیقی با توضیحات گفته شده، از لحاظ عملکرد معادل با یک انفیس نوع ۳ است. برای مقادیر مشخصی از پارامترهای مقدم، خروجی نهایی به صورت ترکیب خطی پارامترهای تالی نوشته می‌شود. برای مثال در شکل ۳ خروجی برابر است با:

$$f = \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 = \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 \quad (15)$$

از روش آموزش ترکیبی به راحتی می‌توان برای آموزش شبکه بهره جست [۱۱]. در مرحله‌ی پیش‌رونده، پارامترهای تالی با روش برآورد حداقل مربعات تنظیم می‌شوند. در مرحله‌ی بازگشتی نرخ خطا به ابتدای شبکه منتشر می‌شود و پارامترهای مقدم (پارامترهای توابع عضویت) به روش کاهش گرادیانی تنظیم می‌شوند.

### ۳. مواد و روش‌ها

۱.۳ آماده‌سازی داده‌های ورودی و خروجی جهت آموزش شبکه‌ی عصبی فازی تطبیقی با استفاده از ماتریس پاسخ آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم

از بیناب‌های موجود در مجموعه گزارش‌های فنی<sup>۱</sup> آژانس شماره‌های ۴۰۳ و ۳۱۸ به عنوان داده‌های خروجی انفیس استفاده شد [۱۲، ۱۳]. هر گزارش حاوی حدود ۲۰۰ بیناب، شامل بیناب‌های مرجع یا کالیبراسیون و بیناب‌های عملیاتی می‌باشد. بیناب‌های گزارش ۴۰۳ در ۶۰ بازه‌ی انرژی از ناحیه‌ی حرارتی تا انرژی ۶۳۰ MeV و بیناب‌های گزارش ۳۱۸ در ۵۵ بازه‌ی انرژی از ناحیه‌ی حرارتی تا انرژی ۴۳۵ MeV ارایه شده‌اند. از آن‌جایی که گزارش ۴۰۳ جدیدتر و به‌روزتر است، بازه‌بندی انرژی آن برای مجموعه‌ی بیناب‌ها برای آموزش شبکه‌ی عصبی-فازی انتخاب گردید و بیناب‌های گزارش ۳۱۸ به فرم جدید تبدیل گردیدند. همچنین بیناب‌های گزارش ۴۰۳ به صورت شارش بر واحد لتارژی ارایه شده‌اند که با ضرب داده‌های هر بازه‌ی انرژی در  $\ln(E_{i+1}/E_i)$ ، به شارش تبدیل می‌شوند.





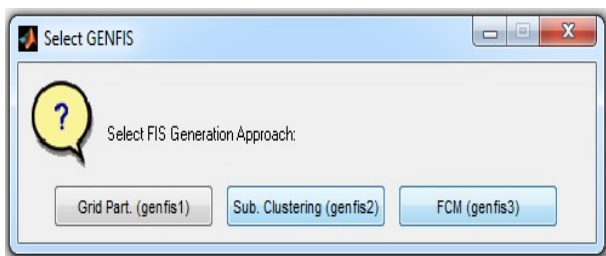
پس از اجرای برنامه در ابتدا، در کادری محاوره‌ای مطابق شکل ۶ طریقه‌ی ایجاد سیستم فازی پایه از کاربر سوال می‌شود. کاربر می‌تواند یکی از سه روش Grid partitioning، Subtractive clustering و Fcm را انتخاب کند (کلیه‌ی روش‌های موجود برای ایجاد سیستم فازی اولیه).

پس از انتخاب هر گزینه کادرهای محاوره‌ای دیگر جهت دریافت پارامترهای مربوط به هر روش باز می‌شود. در روش Grid partitioning اگر n ورودی موجود باشد و هر ورودی به m بخش تقسیم‌بندی شود (برای هر ورودی m تابع عضویت تعریف شود)، یک سیستم فازی با  $m^n$  قانون حاصل می‌شود. از معایب این روش این است که بسیاری از این قوانین استفاده نمی‌شوند و سبب طولانی شدن اجرای برنامه می‌شوند. در عمل استفاده از روش‌های Subtractive clustering و FCM مؤثرتر می‌باشد. در این دو روش داده‌های ورودی نزدیک به هم دسته‌بندی می‌شوند و برای داده‌های متعلق به هر دسته برای تمامی ورودی‌ها یک قانون تعریف می‌شود. در نتیجه تعداد قوانین کاهش می‌یابد و سرعت اجرای برنامه افزایش می‌یابد. در روش FCM کاربر تعداد دسته‌ها را به برنامه وارد می‌کند [۱۷-۱۹] ولی در Subtractive clustering، الگوریتم مربوطه تعداد مناسب دسته‌ها را می‌یابد.

سپس پارامترهای آزاد سیستم فازی پایه توسط الگوریتم آموزش تنظیم می‌شود. قبل از ورود به الگوریتم آموزش پارامترهای مورد نیاز از کاربر سوال می‌شود.

آموزش به دو روش Back Propagation و Hybrid امکان‌پذیر است [۱۱].

انفیس برای مدل‌سازی یک سیستم چند ورودی و تک خروجی<sup>۱</sup> به کار می‌رود ولی مسأله‌ی بیناب‌نمایی نوترون یک مسأله‌ی چند ورودی چند خروجی<sup>۲</sup> می‌باشد. برای حل این مسأله از آرایه‌ای متشکل از ۲۰ انفیس استفاده شد، به طوری که خروجی هر سیستم فازی، یکی از کانال‌های بیناب خروجی را تشکیل می‌دهد و کل بیناب نتیجه‌ی خروجی ۲۰ انفیس می‌باشد.



شکل ۶. پرسش از کاربر جهت ایجاد یک سیستم فازی اولیه.

جدول ۱. بازه‌بندی نهایی انرژی برای بیناب‌های مورد استفاده به عنوان خروجی انفیس

شماره‌ی بازه	بازه‌ی انرژی (MeV)	شماره‌ی بازه	بازه‌ی انرژی (MeV)
۱	۰ - ۱	۱۱	۷,۹۴ - ۱۰
۲	۱ - ۱,۲۵	۱۲	۱۰ - ۱۵,۸
۳	۱,۲۵ - ۱,۵۸	۱۳	۱۵,۸ - ۲۵,۱
۴	۱,۵۸ - ۱,۹۹	۱۴	۲۵,۱ - ۳۹,۸
۵	۱,۹۹ - ۲,۵۱	۱۵	۳۹,۸ - ۶۳
۶	۲,۵۱ - ۳,۱۶	۱۶	۶۳ - ۱۰۰
۷	۳,۱۶ - ۳,۹۸	۱۷	۱۰۰ - ۱۵۸
۸	۳,۹۸ - ۵,۰۱	۱۸	۱۵۸ - ۲۵۱
۹	۵,۰۱ - ۶,۳	۱۹	۲۵۱ - ۳۹۸
۱۰	۶,۳ - ۷,۹۴	۲۰	۳۹۸ - ۶۳۰

پاسخ آشکارسازهای قطره‌ای فوق‌گرم برای برخی از بیناب‌های مجموعه که در ناحیه‌ی حرارتی بودند برابر صفر محاسبه شد و در نتیجه، این بیناب‌ها از مجموعه حذف شدند و در نهایت ۳۷۷ بیناب باقی ماند. تمامی این بیناب‌ها نرمال به ۱ واحد شارش شدند.

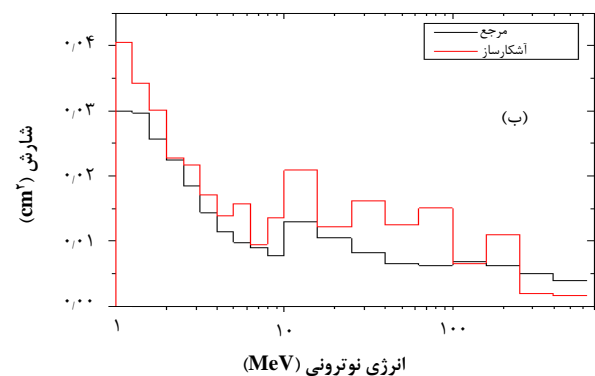
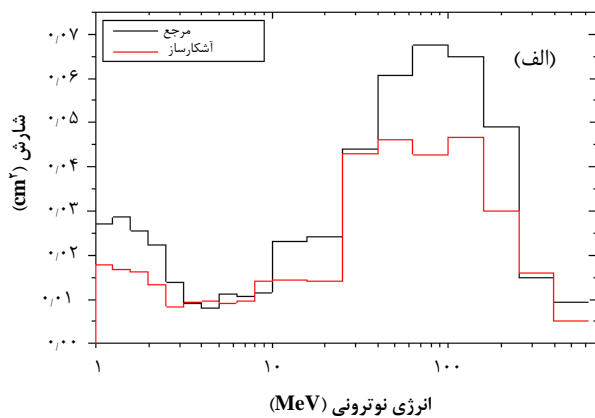
با ضرب هر تابع پاسخ در بیناب انرژی و مجموع‌گیری روی تمام بازه‌های انرژی، خروجی هر آشکارساز به دست می‌آید. نمایش ماتریسی این مطلب، به صورت رابطه‌ی (۱۶) است.

$$A = \Phi R \quad (16)$$

در رابطه‌ی (۱۶)،  $R$  یک ماتریس  $20 \times 5$  و ماتریس پاسخ ۵ آشکارساز می‌باشد. پاسخ هر آشکارساز روی یک ستون این ماتریس قرار گرفته است.  $\Phi$  ماتریس بیناب و یک ماتریس  $377 \times 20$  است. هر بیناب روی یک سطر این ماتریس قرار گرفته است. ماتریس  $A$  یک ماتریس  $377 \times 5$  است. روی هر سطر ماتریس  $A$  خروجی یک آشکارساز در مواجهه با بیناب مربوطه، قرار گرفته است. داده‌های هر سطر این ماتریس به ۱ نرمال شده‌اند. ماتریس  $A$  ورودی و ماتریس  $\Phi$  خروجی اعمال شده به شبکه‌ی عصبی فازی تطبیقی می‌باشند.

۲.۳ طراحی شبکه‌ی عصبی - فازی تطبیقی برای بیناب‌نمایی نوترون تمامی مراحل طراحی و آموزش و آزمون انفیس، توسط یک برنامه‌ی نوشته شده در محیط Matlab صورت پذیرفت [۸]. در این برنامه کسری از داده‌ها به عنوان داده‌های آموزش و مابقی به عنوان داده‌های آزمون در نظر گرفته می‌شوند (بسته به نظر کاربر).





شکل ۷. بیناب مرجع و بازیابی شده نوترون‌های سریع در (الف) ارتفاع ۳ کیلومتری از سطح زمین در شهر زاگسپیتز<sup>۴</sup> آلمان. (ب) ارتفاع ۵ کیلومتری از سطح زمین در شهر رم ایتالیا.

#### ۵. جمع‌بندی

همان‌طور که نتایج این مقاله نشان می‌دهد امکان بازیابی بیناب نوترون‌های حاصل از برهم‌کنش تشعشعات کیهانی با استفاده از آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم با کمک شبکه‌های عصبی فازی تطبیقی وجود دارد. نوترون‌ها در ارتفاع‌های بالای جو، مسئول نیمی از مقدار معادل دز دریافتی خدمه پرواز از کل پرتوهای دریافتی می‌باشند که بایستی جهت حفاظت خلبانان و خدمه پرواز از خطرات نوترون‌ها تمهیدات جدی در نظر گرفت [۱]. بدین منظور و با توجه به ویژگی‌های آشکارسازهای قطره فوق‌گرم نظیر عدم حساسیت به پرتوهای گاما، اندازه کوچک و قابل حمل بودن و البته قرائت آسان و مستقیم آن‌ها، این آشکارسازها ابرازی مناسب در بیناب‌نمایی نوترون‌ها در ارتفاعات بالای جو هستند.

بعد از مرحله‌ی آموزش، داده‌های ورودی به انفیس اعمال شد تا بیناب‌های خروجی برای مجموعه‌های آزمون و آموزش به دست بیایند. مقایسه بین بیناب‌های خروجی و هدف به چند روش می‌تواند انجام شود. یکی پارامتر نسبت شارش کل در بیناب بازیابی شده به بیناب هدف<sup>۱</sup> است که بایستی در حالت ایده‌آل ۱ باشد. دیگری ریشه‌ی میانگین مربعات خطا یا همان  $RMSE^2$  است که طبق رابطه‌ی (۱۷) تعریف می‌شود و مقدار ایده‌آل آن صفر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (\phi_i(E)_{unfolding} - \phi_i(E)_{original})^2} \quad (17)$$

در رابطه‌ی (۱۷)،  $N$  تعداد بازه‌های انرژی بیناب نوترون می‌باشد. اگر برای بیناب‌های آزمون مقدار این دو پارامتر به مقادیر ایده‌آل نزدیک باشد، نشان‌دهنده‌ی قابلیت تعمیم‌پذیری<sup>۳</sup> انفیس می‌باشد.

#### ۴. نتایج و بحث

شبکه‌ی عصبی فازی تطبیقی با در نظر گرفتن شش تابع گوسی روی ورودی‌ها (شش قانون) با روش FCM به تعداد ۲۰۰۰ مرتبه توسط بیناب‌های آموزش مورد آموزش قرار گرفت. ۹۹ درصد بیناب‌ها برای آموزش (۳۷۳ بیناب) و بقیه برای آزمون مورد استفاده قرار گرفت (۴ بیناب). بیناب نوترون‌ها در ارتفاع ۳ و ۵ کیلومتری زمین در بیناب‌های آزمون قرار گرفتند تا قابلیت تعمیم‌پذیری شبکه سنجیده شود.

در شکل ۷ نتیجه‌ی بازیابی شبکه برای بیناب نوترون‌ها در ارتفاع ۳ و ۵ کیلومتری زمین ملاحظه می‌شود.

$RMSE$  برای بیناب‌های بازیابی شده در شکل‌های (۷ الف) و (۷ ب) به ترتیب برابر ۰/۰۱۱ و ۰/۰۰۵ می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی توافق نسبی بین بیناب‌های مرجع و بازیابی شده می‌باشد. اختلافی که بین بیناب‌های بازیابی شده با بیناب‌های مرجع وجود دارد ناشی از عملکرد انفیس است و می‌توان خطا را با افزایش غنای مجموعه‌ی آموزش یا به کارگیری ساختار دیگری از شبکه‌ی فازی، کاهش داد. عملکرد مناسب انفیس در کنار ویژگی‌های منحصر به فرد آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم نظیر کوچک، سبک و قابل حمل بودن و پاسخ ندادن به پرتوهای گاما، این آشکارساز را به عنوان گزینه‌ی مناسب برای سنجش نوترون‌های حاصل از برخورد پرتوهای کیهانی با جو زمین، مطرح می‌سازد.

1. Unfolded to Original Total Fluence Ratio
2. Root Mean of Squared Errors
3. Generalization Capability



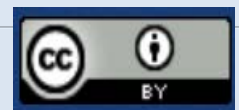


## مراجع

1. T. Nakamura, *Cosmic-ray Neutron Spectrometry and Dosimetry*, *Journal of Nuclear Science and Technology Supplement*, **5**, 1-7 (2008).
2. M. Gatun Johnson, et al, *The 2.5 MeV neutron time-of-flight spectrometer TOFOR for experiments at JET*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **591(2)**, 417 (2008).
3. J.R.D. Copley, T.J. Udovic, *J. Res. Neutron Time-of-Flight Spectroscopy*, *Natl. Inst. Stand. Technol.*, **98**, 71 (1993).
4. R. Ciolini, et al, *A feasibility study of a SiC sandwich neutron spectrometer*, *Radiation Measurements*, **46(12)**, 1634 (2011).
5. P. Rezaeian, et al, *Development of a new pressure dependent threshold superheated drop detector for neutrons*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **776**, 50 (2015).
6. J.C. McDonald, B.R.L. Siebert, W.G. Alberts, *Neutron spectrometry for radiation protection purposes*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **476(1-2)**, 347-352 (2002).
7. H.R. Vega-Carrillo, et al., *Neutron spectrometry using artificial neural networks*, *Radiation Measurements*, **41**, 425-431 (2006).
8. S. Badiiei, et al, *Unfolding of fast neutron spectra by superheated drop detectors using Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System (ANFIS)*, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **944**, 162517 (2019).
9. K. O'Brien, et al, *Atmospheric cosmic rays and solar energetic particles at aircraft altitudes*, *Environ. Int.* **22** Suppl. 18-44 (1996).
10. H. Schraube, et al., *The cosmic ray induced neutron spectrum at the summit of the Zugspitze (2963 m)*, *Radiat. Prot. Dosim.*, **70**, 405-408 (1997).
11. J. Shing, R. Jang, *ANFIS Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System*, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **23**, 665 (1993).
12. R. Griffith, J. Palfalvi, U. Madhvantah, *Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes*, *IAEA, Technical Report Series*, No. **403** (2001).
13. R. Griffith, J. Palfalvi, U. Madhvantah, *Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes*, *IAEA, Technical Report Series*, No. **318** (1990).
14. S. Badiiei, et al, *Development and validation of a Geant4 application to calculate the response matrix of a set of superheated drop detectors under various external pressures*, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **939** (2019) 55.
15. S. Badiiei, et al, *Development and experimental validation of a fast neutron spectrometry system based on superheated drop detectors (SDDs) operating under different external pressures*, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **1010** (2021).
16. S. Agostinelli, et al., *Geant4 a simulation toolkit*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **506**, 250 (2003).
17. J.C. Bezdek, R. Ehrlich, W. Full, *FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm*, *Computers and Geosciences*, **10**, 191 (1984).
18. J.C. Bezdek, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, *New York: Plenum Press*, (1981).
19. S. Chiu, *Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation*, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **2**, 267 (1994).

## 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

شهریار بدیعی، پیمان رضائیان (۱۴۰۲)، بررسی عملکرد آشکارسازهای قطره‌ی فوق‌گرم در بازیابی بیناب نوترون‌های سریع ناشی از پرتوهای کیهانی با روش شبکه‌ی عصبی فازی تطبیقی، ۱۰۳، ۵۸-۶۶

DOI: 10.24200/NST.2021.974.1660

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1520.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1520.html)

