

## پردازش خطی مشترک مکان-انرژی داده‌های پایش هوایی پرتوی گاما

محسن رضایی\*، منصور عاشور و لیلا سرخوش

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

\*تهران، خیابان کارگر شمالی، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کدپستی: ۱۴۳۹۹۵۱۱۱۳

پست الکترونیکی: mhsn.rezaei@gmail.com

### چکیده

از مهم‌ترین مسائل متعاقب یک حادثه هسته‌ای، تعیین سریع و دقیق نوع و مقدار پراکندگی مواد پرتوزا است. در این مقاله، اصلاح الگوی میانگین متحرک خود همبسته یکپارچه فصلی (SARIMA) جهت پایشگر هوایی گاما با استفاده از راهکار پردازش خطی مشترک مکان-انرژی داده‌های پایش پرتویی پیشنهاد شده است. این مدل‌سازی دقیق و به‌هنگام تعداد فوتون دریافتی، برای طراحی آشکارساز متناسب با سنجش دقیق و پویا به‌منظور استفاده در حفاظت و اقدامات ایمنی پرتویی کاربرد دارد. ساختار طراحی‌شده، با قابلیت به‌کارگیری پارامترهای نایستای طیف‌سنجی پرتو گاما به دست‌بندی دقیق نوع و میزان مواد پرتوزا و همچنین افزایش حجم مؤثر کریستال آشکارساز می‌انجامد. روش پیشنهادی، افزایش صحت و دقت تشخیص نوع و مقدار پراکندگی مواد پرتوزا و کاهش زمان پایش را در پی دارد و بنابراین، به‌منظور انجام اقدامات کاربردی مناسب و حفاظت در برابر پرتو، در همان زمان محدود، به گسترش منطقه قابل بررسی منجر می‌شود.

**کلیدواژگان:** تعیین نوع و مقدار پراکندگی مواد پرتوزا، کاربرد و حفاظت در برابر پرتو، پردازش مشترک مکان-انرژی، پایش هوایی پرتویی، میانگین متحرک خود همبسته یک‌پارچه فصلی.

### ۱. مقدمه

به افراد در معرض پرتو و پاک‌سازی محل برای چنین حوادثی، در اولویت حفاظت و ایمنی پرتوی قرار می‌گیرد. اطلاع از میزان و نوع آلودگی پرتوی، مشخص‌کننده چگونگی و نحوه مقابله با گسترش آثار پرتوی و کاهش مشکلات و عواقب حادثه هسته‌ای است [۱]. در عملیات حفاظت کاربردی و اقدامات ایمنی پرتوی متناسب با سنجش دقیق و پویا نوع و میزان آلودگی پرتوی، از مواد شیمیایی خاص و خنک‌کننده‌های مختلف استفاده می‌شود و نیروهای سنجش و حفاظت پرتوی و امدادی متناسب با نوع و میزان مواد پرتوزا باید مجهز به

اولین و مهم‌ترین اقدام از مجموعه اقدامات واکنش سریع جهت ایمنی پرتوی در جریان حادثه هسته‌ای، سنجش نوع و شدت پراکندگی مواد پرتوزا، است. آزاد شدن عناصری مانند ید رادیواکتیو و سزیم ۱۳۷، منجر به وارد آمدن صدمات گوناگون به موجودات زنده و بدن انسان از جمله تب‌های ناگهانی و حتی انواع سرطان‌ها و در صورت دریافت دزهای بالای پرتو، منجر به مرگ سریع خواهد شد. شدت این آسیب‌ها، با افزایش تأخیر در اقدامات کاربردی حفاظت و ایمنی پرتو افزایش پیدا می‌کند، بنابراین سرعت عمل رسیدگی

تجهیزات خاص و هم‌چنین پوشش‌های ویژه برای جلوگیری از تأثیر پرتوهای هسته‌ای مضر باشند.

راهکار پایش هوایی گاما برای واکنش سریع و ایمن در بررسی مقدار و نوع عناصر پرتوزای پراکنده‌شده در پی یک حادثه هسته‌ای و یا نشت مواد پرتوزا اهمیت فراوانی دارد [۲]، با توجه به برد پرتوی گاما در هوا، می‌توان ضمن حفظ فاصله مناسب و ایمن از پرتوها و ذرات پرتوزا، با دقت مناسبی تخمین دقیق و قابل‌اعتمادی از نوع و میزان مواد پرتوزا و آلودگی پرتوی محیط به‌دست آورد. توسعه و ارتقاء تحلیل‌های مکان-انرژی در کنار تکامل و توسعه روش‌های مدل‌سازی [۳]، گامی بزرگ برای آشکارسازی، رفع آلودگی و حفاظت و ایمنی هسته‌ای است [۴].

پایش هوایی هم‌چنین یکی از راهکارهای اقتصادی، سریع و مناسب برای جمع‌آوری اطلاعات پرتوی سطح زمین به‌منظور تهیه نقشه پرتوزایی مناطق مختلف کشور مخصوصاً در شرایط بحران است [۵].

جمع‌آوری اطلاعات مربوط به وضعیت پرتوزایی و سطوح تشعشعات در محیط آلوده و هم‌چنین تشعشعات خارج از سایت از ابزارهای اولیه و ضروری برای تصمیم‌گیری مناسب در این مواقع است. چنین تصمیماتی باید به‌کمک مدل‌های پیش‌آگامی و اندازه‌گیری‌های جامع محیطی که به‌صورت اضطراری و در شرایط بحران انجام می‌شود، اتخاذ و به‌طور مستمر اصلاح و بازنگری شوند. علاوه‌براین، بازگشت از حالت فوق‌العاده به شرایط عادی و طبیعی به‌کمک نتایج اندازه‌گیری‌های پی‌درپی مشخص شده و به افراد در معرض پرتو و یا محدوده سانحه و منطقه آلوده اطلاع داده می‌شود. پایش وضعیت ید ۱۳۱ در پی سوانح هسته‌ای [۶]، جستجوی چشمه‌های دزدیده یا مفقودشده، یافتن باقیمانده ماهواره‌ها یا سایر پرتابه‌هایی که به زمین اصابت کرده‌اند، نمونه‌هایی از کاربردهای گسترده و متنوع آشکارسازهای هوایی گاما هستند

که به‌کمک تشخیص موارد ناهنجاری یا تغییرات پرتوی محیط میسر می‌شوند [۷].

در سال‌های اخیر با توجه به مسائل، مخاطرات و هزینه‌های مترتب بر به‌کارگیری سامانه‌های متداول سنگین‌وزن پایش هوایی گاما در کنار توسعه فناوری‌های دیجیتال و پرنده‌های بدون سرنشین، به کوچک‌سازی بخش آشکارساز به‌منظور کاهش وزن و امکان‌پذیر شدن به‌کارگیری سامانه پایش هوایی گاما به‌صورت محموله قابل حمل توسط پرنده‌های کوچک و با ظرفیت حمل کم، توجه زیادی شده است [۸]. این رویکرد به‌ویژه با استفاده از فنون طیف‌نگاری و روش‌های مختلف کاهش خطا و نویز می‌تواند به افزایش دقت اندازه‌گیری سامانه‌های کوچک‌تر و سبک‌وزن‌تر منجر شود. این روش‌ها مشتمل بر انواع روش‌های کاهش نویز آماری، کالیبراسیون تجهیزات، تنظیم پنجره‌های انرژی و از این دست اقدامات است [۹]. راهکار متداول در سامانه‌های پایش هوایی گاما که در حال حاضر به‌صورت تجاری-کاربردی استفاده می‌شود، به‌کارگیری یک سیستم نسبتاً سنگین‌وزن همراه با کارور متخصص است که مجموعه‌ای به وزن چند صد کیلوگرم را شامل می‌شود. چنین سامانه‌ای در یک پرنده (معمولاً بالگرد) و طبیعتاً خلبان و احیاناً کمک‌خلبان که مجموعه بزرگی از نیروی انسانی، تجهیزات حمل و تجهیزات اندازه‌گیری و منابع تأمین انرژی و ... را شامل شده به‌عنوان محموله پروازی در نظر گرفته می‌شود. استفاده از چنین سامانه‌ای از جنبه‌های متعددی برای بازنگری توسط متخصصان و کارشناسان موردعلاقه است. علاوه بر هزینه بالای سرمایه به‌کارگرفته شده شامل وسیله پرنده و تجهیزات و تأمین انرژی تجهیزات اندازه‌گیری، هزینه‌های مترتب بر عملیات از منظر قیمت تمام‌شده عدد بالایی را دربرمی‌گیرد.

به‌جز نگاه هزینه‌ای و مسائل مربوط به وزن تجهیزات به‌عنوان محموله پروازی، خطرپذیری عملیات پروازی به‌ویژه

داده است. تاکنون برای این منظور، مدل واحدی که از نظر همگان به‌عنوان بهترین روش شناخته شود، توسعه نیافته است. یکی از این روش‌ها، روش خودبرگشتی است [۱۰]. روش میانگین متحرک خودهمبسته، سری مورد انتظار را به‌صورت میانگین متحرک و خودبرگشتی در نظر گرفته و به مدل‌سازی آن می‌پردازد. مدل‌سازی سری‌های زمانی با استفاده از روش‌های هموارسازی رگرسیونی ناپارامتری قابل انجام است. در استفاده از روش‌های رگرسیونی در مورد سری‌های زمانی که در آن مشاهدات برخلاف داده‌های رگرسیونی از یکدیگر مستقل نیستند و خصوصیت خودهمبستگی در آن‌ها وجود دارد، نیاز به تعدیلاتی جهت مناسبت برای چنین داده‌هایی است که این تعدیلات با ورود مؤلفه فصلی به این مدل‌ها، در این مقاله مورد بحث قرار می‌گیرد. روش‌های مختلفی جهت مدل‌سازی سری‌های زمانی پیشنهاد شده است، که اخیراً مدل میانگین متحرک خودهمبسته یک‌پارچه فصلی<sup>۱</sup> SARIMA مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر نیز از روش خطی SARIMA برای مدل‌سازی تعداد فوتون‌های شمارش شده در پایش هوایی پرتو گاما استفاده می‌شود [۱۱].

این روش به پردازش تعداد فوتون‌های دریافتی از منابع شناخته‌شده پرتوزا می‌پردازد و پس از ارزیابی، مدل استخراج شده برای پایش هوایی گاما مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک از ملاحظات اصلی کارایی روش‌های خودبازگشتی "ایستایی" سری داده‌ها است. مدل SARIMA برای سری‌های زمانی نایستا نیز کاربرد دارد [۱۱]. ایستایی در انواع مختلف خود شامل ایستایی ضعیف، ایستایی کوواریانس و ایستایی مرتبه دوم به‌ترتیب با شاخص‌های میانگین ثابت، واریانس ثابت و کوواریانس ثابت در دوره‌های مشخص تعریف می‌شود. عموماً رفتار سیستم خطی، تحت تأثیر

روی مناطق حساس و نیز خطرپذیری مربوط به امنیت نیروی انسانی در وسیله پرنده از اشکالات وارده بر این سیستم است. در کنار این معایب لزوم برخورد نامحسوس و پرهیز از ایجاد حساسیت در ساکنان مناطق هم‌جوار نواحی و تأسیسات تحت پایش، لزوم حرکت به‌سمت سامانه‌های رباتیک، سبک و کوچک که بتوان به‌وسیله آن‌ها نتایجی در حد همان دقت و حساسیت دستگاه‌های متداول را به‌دست آورد، مورد توجه محققین و متولیان امر قرار گرفته است. چنین دستگاه‌هایی با توجه به کوچک‌سازی تجهیزات، کاهش توان مصرفی و استفاده از پرنده‌های سبک‌تر، خطرپذیری کمتر و هزینه‌های پایین‌تر را در پی خواهد داشت.

در بخش دوم این مقاله با مدل‌سازی و اهمیت سرعت و دقت در پایش هوایی گاما جهت سنجش دقیق پرتوی جهت اقدامات سریع و کاربردی ایمنی پرتوی بیشتر آشنا می‌شویم و مزایا و قابلیت‌های طرح پیشنهادی بررسی می‌شود. سپس در بخش سوم جزئیات روش پیشنهادی در دو بخش مدل‌سازی و تحلیل مشترک به‌دقت شرح داده می‌شود. در بخش چهارم پیاده‌سازی‌های متعددی با استفاده از داده‌های اخذشده از نمونه‌های واقعی در ارتفاعات مختلف برای روش پیشنهادی آزمایش می‌شود و نتایج مربوط به‌صورت شهودی و عددی گزارش می‌شود. سپس در بخش پنجم به بحث و جمع‌بندی مقاله با توجه به نتایج به‌دست آمده و گزارش‌ها مبتنی بر داده واقعی پرداخته می‌شود.

## ۲. مدل‌سازی خطی سامانه پایش گر هوایی گاما

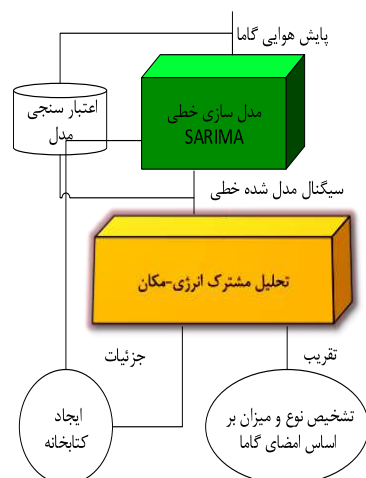
مدل‌سازی دقیق و بهنگام تعداد فوتون دریافتی یکی از اجزای اصلی پایش هوایی فوتون‌های گاما مطرح است. از آنجا که تعداد فوتون دریافتی دارای خواص فرآیندی سری‌های زمانی نایستا است، لذا مدل‌سازی تعداد فوتون دریافتی عموماً یک کار پیچیده با شرایط غیرمطمئن و همراه با ضعف در پایگاه

<sup>۱</sup> Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average

دخیل در اندازه‌گیری، تعداد اختلال، بازده آشکارساز، حساسیت جهتی، قدرت تفکیک، زمان مرگ و عوامل مؤثر در ایجاد شکل پالس واقعی توسط طیف‌نگارها تعیین می‌شود [۱۱].

### ۳. تصحیح خودکار مدل با تحلیل مشترک

چارچوب پیشنهادی این مقاله برای تشخیص نوع و مقدار مواد پرتوزا از طریق داده‌های اندازه‌گیری شده در پایش هوایی، از دو بلوک مدل‌سازی SARIMA و تحلیل موجک<sup>۲</sup> [۱۳] به‌عنوان یک مجموعه مرسوم از تحلیل‌های مشترک یا Processing Joint استفاده می‌کند. تحلیل مشترک مکان-انرژی در سنجش جهت اصلاح مدل خطی به‌کارگرفته شده در حفاظت و ایمنی پرتویی استفاده می‌شود. به‌کارگیری تحلیل‌های مشترک در علوم کامپیوتر و کاربردهای آن منجر به افزایش کارایی دستگاه‌ها می‌شوند. تحلیل‌های مشترک، داده‌های اندازه‌گیری شده را به فضای مشترک چندبعدی انتقال می‌دهند. در روش پیشنهادی این مقاله، پارامترها و متغیرهای سامانه پایشگر هوایی توسط سازوکار اعتبارسنجی و بازخوردی، به‌صورت پیوسته تنظیم می‌شود تا میزان نااریبی، میانه قدرمطلق انحراف و متوسط مربع خطا نسبت به تعداد واقعی فوتون‌های شمارش شده در پایش هوایی حداقل شوند.



شکل (۱): بلوک دیاگرام چارچوب پیشنهادی.

اغتشاش پنهان گاوسی مدل می‌شود. مدل SARIMA، به‌علت مقاوم بودن در برابر ناپیوستگی، امکان استفاده از مزایای مدل‌های خطی در سیگنال ناپیوستگی طیف گاما در پایش هوایی پرتوی را فراهم می‌کند [۱۱].

در این مقاله روش میانگین متحرک خودهمبسته یک‌پارچه فصلی (SARIMA) برای مدل‌سازی تعداد فوتون گامای دریافتی در آشکارساز پیشنهاد می‌شود. این روش اساساً بر پایه تعداد مشخص و نسبتاً کمی متغیر بنا شده است. فرم کلی چنین مدلی به‌صورت  $ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)$  است. در فرمول زیر  $x$  تعداد فوتون شمارش شده و اندیس نشانگر دفعات متوالی اندازه‌گیری با اندازه گام‌های به میزان کوچک‌ترین واحد قابل اندازه‌گیری و قابل تفکیک توسط آشکارساز است.

$$(1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p)(1 - \Phi_1 B^s - \dots - \Phi_P B^{sP})(1 - B)^d (1 - B^s)^D x_n = (1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q)(1 - \Theta_1 B^s - \dots - \Theta_Q B^{sQ}) \varepsilon_n \quad (1)$$

که در آن باید همه پارامترهای زیر تخمین زده شود.

$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p, \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_P, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q, \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_Q, \sigma$  که برابر واریانس  $\varepsilon_n$  است. در آن اختلال<sup>۱</sup> در اندازه‌گیری  $n$  ام است [۱۲].

اگر اندازه‌گیری‌های تعداد فوتون‌های دریافتی گاما توسط آشکارساز، با فاصله زمانی بزرگ‌تر از زمان مرگ آشکارساز تکرار شود، اطلاعات تجمیع شده یک فرآیند میانگین متحرک خودهمبسته یک‌پارچه فصلی تشکیل می‌دهد که  $d$  مرتبه یک‌پارچگی و  $s$  مرتبه فصلی بودن را مشخص می‌نماید. می‌توان چنین فرآیندی را به‌عنوان  $SARIMA(p,d,q,P,D,Q)$  مدل کرد. در این مقاله پارامترهای مدل میانگین متحرک خودهمبسته یک‌پارچه فصلی از تعداد فوتون‌های دریافتی توسط آشکارساز هوایی استخراج می‌شود و مقادیر  $p, q, d, P, Q, D$  برای فرآیند SARIMA وابسته به تعداد واحدهای انرژی‌های پیشین

<sup>۲</sup> Wavelet

<sup>۱</sup> perturbation

به دست می‌آید که اصطلاحاً موج مادر نامیده می‌شود. تابع تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر است:

$$CWT_x^\psi = \frac{1}{\sqrt{S}} \int_{-x}^x x(e) \psi\left(\frac{e-\tau}{s}\right) de$$

$$CWT_x^\psi = \frac{1}{\sqrt{S}} \int_{-x}^x x(e) \psi\left(\frac{e-\tau}{s}\right) de \quad CWT_x^\psi = \frac{1}{\sqrt{S}} \int_{-x}^x x(e) \psi\left(\frac{e-\tau}{s}\right) de \quad (3)$$

که در آن پارامترهای  $\tau$  و  $s$  به ترتیب پارامترهای انتقال و مقیاس هستند. انتقال یک موجک به معنای تأخیر انداختن آن است که منجر به آن می‌شود موجک مورد نظر به سمت راست انتقال یافته و از اول تا انتهای سیگنال را طی کند. مقیاس کردن همان طور که از معنی آن برمی‌آید به عنوان یک عملگر ریاضی، سیگنال را منبسط یا منقبض می‌کند که مانند مفهوم مقیاس در نقشه است. مقیاس‌های بالا (متناظر با تغییرات کوچک انرژی فوتون جذب شده توسط آشکارساز)، مشخصه دید کلی و فارغ از جزئیات مربوط به سیگنال است و مقیاس‌های کوچک، مشخصه نگاه به جزئیات سیگنال است و بنابراین در تناظر با تغییرات زیاد انرژی فوتون جذب شده توسط آشکارساز خواهد بود.

در حقیقت پردازش مشترک مکان-انرژی یک شباهت سنجی بین سیگنال و توابع پایه (موجک‌ها) است [۱۳]. منظور از شباهت سنجی، سنجش میزان تطابق سیگنال حاصل از پایش هوایی گاما با موجک‌ها است. نتیجه پردازش مشترک مکان-انرژی یک ماتریس است که ستون‌های آن جابه‌جایی در مکان و سطرها آن مقیاس مورد بررسی را نشان می‌دهد. به بیان دیگر ضرایب پردازش مشترک مکان-انرژی، بیانگر میزان نزدیکی سیگنال به موجک در مقیاس مورد نظر است. در تحلیل موجک، سیگنال از یک سری فیلترهای بالاگذر برای تحلیل تغییرات زیاد انرژی و از یک سری فیلترهای پایین‌گذر برای تحلیل تغییرات کم انرژی عبور داده می‌شود. بنابراین سیگنال به دو بخش تقسیم می‌شود: بخش حاصل از عبور سیگنال از فیلتر بالاگذر که شامل اطلاعات تغییرات زیاد انرژی (از جمله نویز

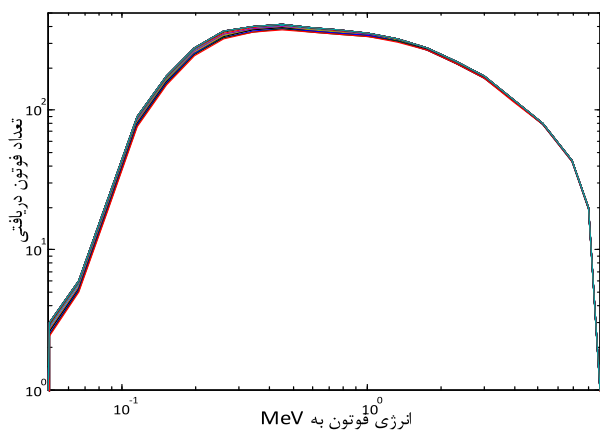
چارچوب پیشنهادی با به کارگیری تحلیل موجک به حذف نویز و اغتشاشات اندازه‌گیری که متناظر با جزئیات سیگنال است، می‌پردازد و این امر به نوبه خود به بهبود عملکرد پایشگر می‌انجامد.

همان‌طور که در بلوک دیاگرام شکل ۱ دیده می‌شود، سیگنال مدل شده توسط SARIMA به بلوک تحلیل مشترک داده‌ها، تحویل می‌شود. داده‌های اندازه‌گیری پرتوی گاما، شامل متغیرهای مستقل مکان و انرژی است و تحلیل‌های انرژی یا تحلیل‌های مکانی به تنهایی، لزوماً به بهترین نتایج حاصل از پایش منجر نمی‌شود. به عبارت دیگر، در داده‌های پایش هوایی پرتوی گاما، اطلاعات بسیاری در تحلیل مشترک مکان-انرژی آن‌ها نهفته است [۱۳]. از این رو، در این مقاله برای استخراج اطلاعات مفیدتر از پایش هوایی، تبدیل‌های ریاضی چندبعدی به داده‌های حاصل از پایش اعمال شده است.

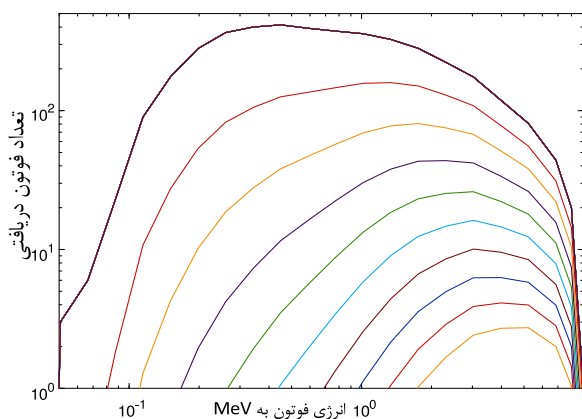
تحلیل مکان-انرژی مبتنی بر بسط توابع پایه، همانند موجک‌ها است. موجک تابع مشخص با میانگین صفر است که در حوزه مشترک انرژی و مکان تعریف شده و بسط بر حسب انتقال‌ها و اتساع‌های این تابع انجام می‌گیرد. برخلاف چندجمله‌ای‌های مثلثاتی، موجک‌ها در فضای تعریف شده توسط آن‌ها به صورت موضعی بررسی می‌شوند. انتظار می‌رود، خروجی بلوک تحلیل مشترک مکان-انرژی علاوه بر این که پایشگر را به تشخیص دقیق‌تر نوع و اندازه مواد پرتو هدایت می‌کند، موجب ایجاد کتابخانه باارزشی برای تصحیح پیوسته مدل SARIMA شود که این به نوبه خود درک بهتری را از محیط مورد سنجش از منظر حفاظت و اقدامات ایمنی پرتویی ایجاد می‌کند.

در پردازش مشترک مکان-انرژی، سیگنال بر روی یک دسته از توابع که موجک نامیده شده و برگرفته از موج مادر هستند، تصویر می‌شود. واژه مادر، بدین معناست که تمامی نسخه‌های انتقال یافته و مقیاس، همگی از روی یک تابع اولیه

چشمه و آشکارساز تضعیف می‌شود. این پدیده تضعیف در داخل چشمه هم اتفاق می‌افتد. با ادامه تضعیف، فتوییک‌های حاصل شده به دلیل بروز تشعشعات پراکنده کاهش پیدا می‌کنند. میزان تضعیف پرتوهای با انرژی پایین از پرتوهای با انرژی بالا بیشتر است. اما در صورت افزایش فاصله بین چشمه و آشکارساز و یا افزایش ضخامت پوشش به دلیل پراکندگی، شار کل در همه سطوح انرژی کاهش می‌یابد. این رفتار گاما به دلیل نزدیک بودن فرکانس و طول موج آن به اشعه ایکس و تابش ترمزی، مشابه آن‌هاست. اثرات این پدیده در هوا، آلومینیوم و سرب به ازای ضخامت‌های مختلف با افزایش‌های ضخامت‌های به ترتیب یک متر، پنج سانتی‌متر و یک سانتی‌متر در شکل‌های ۲ تا ۴ نمایش داده شده است.



شکل (۲): اثر افزایش ارتفاع در تابش ترمزی هوا در ارتفاع‌های مختلف (هر خط مبین ۱ متر افزایش ارتفاع سنجنده نسبت به منبع پرتوزا).



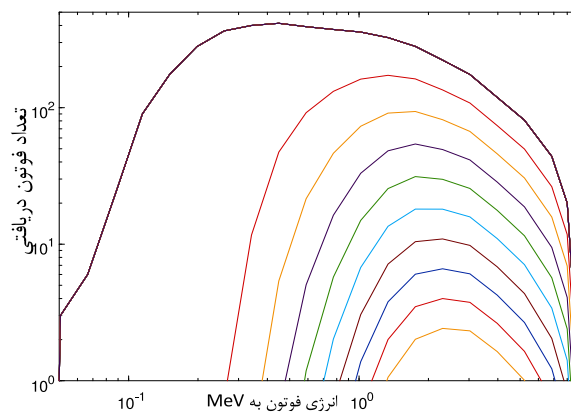
شکل (۳): طیف تابش ترمزی آلومینیوم در ضخامت‌های مختلف، هر خط مبین ۵ cm افزایش فاصله سنجنده نسبت به منبع پرتوزا است.

است، و جزئیات نام دارد. بخش حاصل از عبور سیگنال از فیلتر پایین‌گذر که شامل اطلاعات تغییرات کم‌انرژی و دربرگیرنده مشخصات هویتی سیگنال است و تقریباً نامیده می‌شود. به بیان دیگر سیگنال اصلی در هر مرحله به دو بخش تقریب و جزئیات تجزیه می‌شود. بخش تقریب، حاوی مؤلفه‌های مقیاس‌بالا (تغییرات کم‌انرژی) و بخش جزئیات، حاوی مؤلفه‌های مقیاس پایین و یا تغییرات زیاد انرژی سیگنال است که البته می‌توان سیگنال اصلی را به‌طور معکوس از ترکیب بخش‌های تقریب و جزئیات تا هر میزان دقت مورد نیاز بازسازی کرد.

سیگنال اصلی مورد بررسی، پس از مدل‌سازی توسط SARIMA، آهنگ فوتون‌ها شمارش شده توسط آشکارساز هوایی پرتوی گامای پیشنهادی است. پارامترهای مختلفی در عملکرد پیش‌گیر هوایی گاما و در مدل‌سازی آن دخیل هستند که باید به‌عنوان متغیرهای کالیبراسیون پیش‌گیر در نظر گرفته شود. عوامل مؤثر در اندازه‌گیری واقعی مانند هندسه چشمه آشکارساز، مواد غیر پرتوزا، دما و فشار هوا، بارندگی، وارونگی لایه‌های دمایی و حرکت هوا در لایه‌های پایین جو و همچنین رطوبت هوا و خاک، همگی بر نتایج پایش هوایی گاما تأثیر می‌گذارند. در نتیجه طیف به دست آمده، تابعی پیچیده از متغیرهای مختلف است. ضخامت و نوع چشمه (نقطه‌ای، خطی یا صفحه‌ای) بر شکل طیف مشاهده شده در خروجی تأثیر دارند. با افزایش ضخامت چشمه، زنجیره کامپتون بزرگ‌تری ایجاد شده و فتوییک‌های شاخص ناشی از گامای عناصر مختلف نسبت به کامپتون زمینه، کاهش می‌یابند. این اثر در ناحیه انرژی‌های پایین جدی‌تر است. زیرا فوتون‌های کم‌انرژی به مراتب بیشتر از فوتون‌های پرانرژی تضعیف می‌شوند [۱۴]. بدین معنی که در مورد چشمه‌های گسترده، پراکندگی کامپتون بیشتر منجر به ایجاد زنجیره کامپتون در داخل خود چشمه می‌شود. تشعشع از سطح زمین در مواد بین

پرنده‌های از نوع بال ثابت (هوایما) است، اما در مورد بالگردها، سرعت کم است که البته کم بودن آن تأثیر مثبت در عملکرد آشکارساز هوایی گاما دارد. به‌ویژه با کوچک‌سازی حجم کریستال آشکارساز، که مدنظر این مقاله است، سرعت پایین پرنده می‌تواند بهبود قابل توجهی در نتایج ایجاد کند. بین جمع‌آوری داده‌ها، نرخ اندازه‌گیری شمارش (و بنابراین دقت شمارش)، زمان نمونه‌برداری، سرعت پرنده و تفکیک‌پذیری فضایی داده‌ها یک مصالحه و تعادل برقرار می‌شود. در ارتفاع‌های متفاوت پروازی برای تخمین پوشش مؤثر، میدان دید باید محاسبه شود. در ارتفاع بالاتر میدان دید آشکارساز، بزرگ‌تر است، اما چون شدت تشعشع با ارتفاع تقریباً به‌صورت نمایی کم می‌شود، کیفیت داده‌های حاصله در آشکارساز با کاهش ارتفاع پروازی به‌طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کند.

در سامانه‌های متداول پایش هوایی در صورتی که هدف طیف‌نگاری باشد، معمولاً از تحلیل‌گر چندکاناله که دامنه انرژی از صفر تا سه مگا‌الکترون ولت را پوشش می‌دهد، استفاده می‌کنند. هم‌چنین از کریستال NaI(Tl) با حجم بالاتر از ۳۳ لیتر استفاده می‌شود [۱۵]. حتی در صورت استفاده از این حجم از کریستال، دقت شمارش سیستم پایین است [۸]. چگونگی و روش جمع‌آوری داده، کالیبراسیون سیستم و فرآیند فرآوری و ارائه داده‌ها از جمله عوامل مؤثر بر صحت و دقت شمارشگر هوایی پرتوی گاما است [۶]. در مرحله آنالیز و تفسیر داده‌ها، توجه به شرایط عدم تعادل در سری‌های واپاشی و شناخت مناسب از خواص شیمیایی پتاسیم (K)، اورانیوم (U) و توریم (Th) به‌عنوان پرتوهای طبیعی زمینه، بسیار مؤثر است. با توجه به چگالی کریستال یدور سدیم و وزن مربوط به بخش الکترونیک آشکارساز و نیز سایر سامانه‌های مرتبط و پردازش اولیه، وزن کلی یک سیستم پایش هوایی متداول بیش از ۱۵۰ کیلوگرم است.



شکل (۴): طیف تابش ترمزی سرب در ضخامت‌های مختلف، هر خط مبین ۱ cm افزایش فاصله سنجنده نسبت به منبع پرتوزا است.

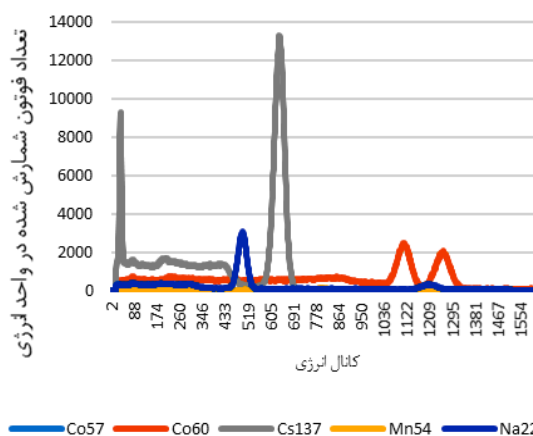
ضخامت پوشش روی چشمه و هم‌چنین سایر پارامترهایی که در پاراگراف فوق به آن‌ها اشاره شد، می‌توانند منجر به کاهش و تغییراتی در تعداد فوتون‌های شمارش شده توسط پایشگر هوایی گاما بشوند که لازم است در چارچوب پیشنهادی توسط بلوک‌های ارائه‌شده تحلیل و نهایتاً اثرات این عوامل در داده‌های به‌دست آمده، تصحیح شوند که در روش پیشنهادشده این امر به‌صورت ترکیب تحلیل مشترک و ایجاد کتابخانه و ایجاد بازخورد به مدل SARIMA انجام شده است.

#### ۴. پیاده‌سازی و نتایج

منطقه پایش هوایی وابسته به دید و برد سیستم کنترل از راه دور پرنده، مسافتی حدود ۴۰۰ متر طول پروازی، در ارتفاع بین ۸۰ تا ۱۰۰ متر در نظر گرفته می‌شود. این مقادیر در روش‌های کلاسیک نیز در همین حدود در نظر گرفته می‌شود [۶]. در چنین پایشی آشکارسازی گاما به‌همراه جمع‌آوری داده‌های مکانی (ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی) انجام می‌شود. مسافت خط پروازی معمولاً با مصالحه بین میزان تفکیک‌پذیری داده‌های موردنظر و هزینه‌های پایش هوایی تعیین می‌شود. ارتفاع پروازی نیز معمولاً با در نظر گرفتن پارامترهای ایمنی پرواز، وابسته به خط پروازی است. سرعت وسیله پرنده معمولاً در حدود ۵۰ تا ۶۰ متر بر ثانیه برای

## ۱,۴. مجموعه داده‌ها

در شکل ۵ یک نمونه داده حاصل از شمارش تعدادی چشمه‌های کالیبره شده گاما آمده است. طیف‌های این شکل همگی توسط آشکارساز یدور سدیم سه اینچی با مشخصات یکسان ولتاژ فتومالتی پلیر ۶۵۰ ولت، بهره ۸۰ بازده ۰/۹ و قرارگیری چشمه‌ها در موقعیت یکسان نسبت به آشکارساز به‌دست آمده است.



شکل (۵): نمونه خروجی یک شمارنده گاما با ۱۰۲۴ کانال برای تفکیک مقدار ۱۶۵۰ KeV طیف انرژی با زمان شمارش ۳۰۰ ثانیه برای عناصر مختلف پرتوزا.

اندازه‌گیری در تاریخ ۳ ژوئن ۱۹۹۸ و شمارش به‌مدت ۳۰۰ ثانیه انجام شده است [۱۶]. چشمه‌ها عبارت بوده‌اند از:

(۱) چشمه  $^{22}\text{Na}$  با اکتیویته ۱/۱۶ میکروکوری در تاریخ ۱۱ دسامبر ۱۹۸۴.

(۲) چشمه  $^{54}\text{Mn}$  با اکتیویته ۱/۰۷ میکروکوری در تاریخ ۵ آوریل ۱۹۹۱.

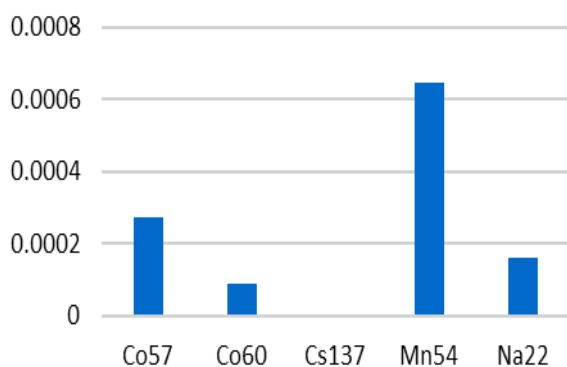
(۳) چشمه  $^{60}\text{Co}$  با اکتیویته ۰/۸۴ میکروکوری در تاریخ ۱۳ مارس ۱۹۸۵.

(۴) چشمه  $^{137}\text{Cs}$  با اکتیویته ۱/۱۲ میکروکوری در تاریخ ۳۰ آوریل ۱۹۸۵ (شمارش این چشمه در ۱۲۰ ثانیه انجام شده است).

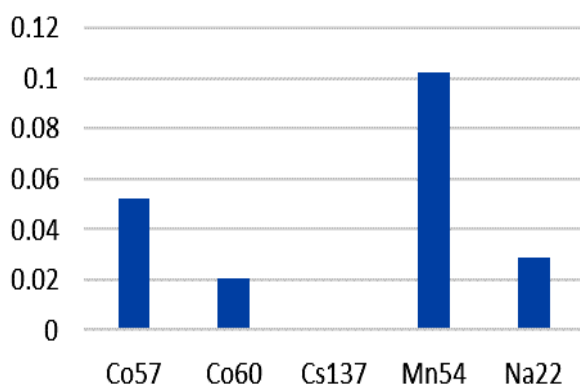
(۵) چشمه  $^{57}\text{Co}$  با اکتیویته ۱/۱۹ میکروکوری در تاریخ ۲۶ مارس ۱۹۹۱.

## ۲,۴. یافته‌های پژوهش

براساس چارچوب ارائه‌شده در قسمت قبل، مدل‌سازی تعداد فوتون‌های دریافتی برای منابع پرتوزای مختلف انجام و نتایج حاصله با داده‌های واقعی شمارش مقایسه شده است. شکل‌های ۶ تا ۸ میزان خطای مدل‌سازی مواد پرتوزا با استفاده از چارچوب پیشنهادی (استفاده از مدل‌سازی SARIMA با بازخورد از تحلیل مشترک مکان-انرژی) با سه معیار بایاس، میانه قدرمطلق انحراف و متوسط مربع خطا اعتبارسنجی شده را نشان می‌دهند.



شکل (۶): مقدار بایاس خروجی چارچوب پیشنهادی در مقایسه با داده واقعی.



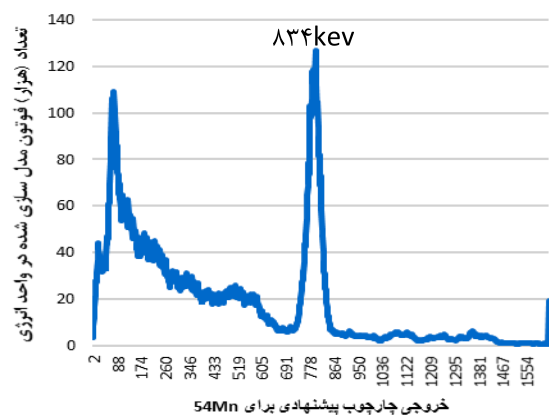
شکل (۷): مقدار میانه قدرمطلق انحراف خروجی چارچوب پیشنهادی در مقایسه با داده واقعی.



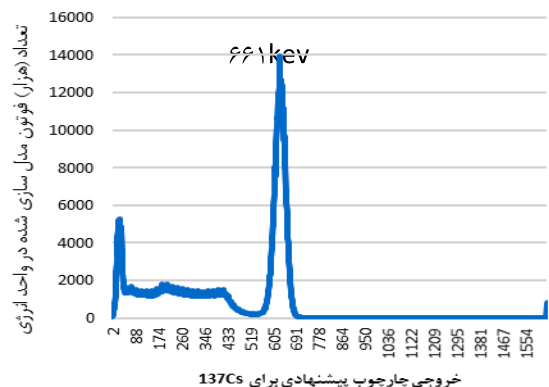
از تحلیل مشترک مکان-انرژی، قله‌های شمارش را بسیار دقیق پیش‌بینی کرده است.



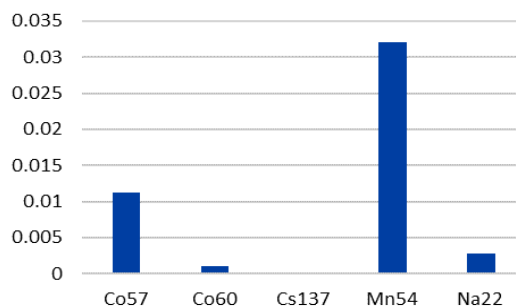
شکل (۹): خروجی چارچوب پیشنهادی برای  $^{22}\text{Na}$  با اکتیویته  $1/16$  میکروکوری در مقایسه با داده واقعی.



شکل (۱۰): خروجی چارچوب پیشنهادی برای  $^{54}\text{Mn}$  با اکتیویته  $1/07$  میکروکوری در مقایسه با داده واقعی.



شکل (۱۱): خروجی چارچوب پیشنهادی برای  $^{137}\text{Cs}$  با اکتیویته  $1/12$  میکروکوری در مقایسه با داده واقعی.



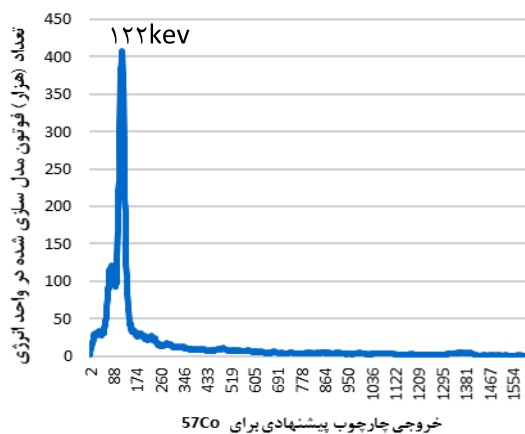
شکل (۸): مقدار متوسط مربع خطای خروجی چارچوب پیشنهادی در مقایسه با داده واقعی.

بایاس یا سوگیری که لفظ اریب نیز درباره آن به‌کار می‌رود، تفاوت بین حد بی‌نهایت تخمین در یک پارامتر و مقدار حقیقی آن است. شکل ۶ نشان می‌دهد که هرچند مدل SARIMA برای تخمین پایش هوایی گاما ناریب است ولی میزان این بایاس برای عناصر مختلف پرتوزا بسیار کم است. متوسط مربع خطا (MSE) و میانه قدرمطلق انحراف (MAD)، معیارهایی مقاوم از میزان تغییرات مقدارهای تخمین‌زده شده از تعداد شمارش شده فوتون‌های گاما است. آزمون MSE و MAD به‌صورت متوسط مربع خطاها و میانه قدرمطلق انحراف از میانه کل داده تعریف می‌شوند.

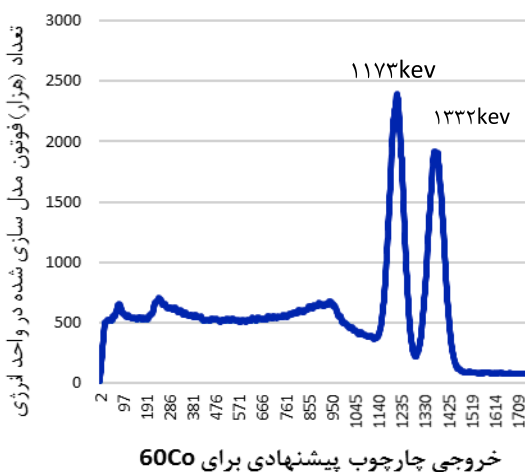
برای محاسبه معیار MAD، ابتدا فاصله تخمین‌ها توسط مدل پیشنهادی SARIMA با میانه آن‌ها را به‌دست آورده و سپس میانه قدرمطلق این فاصله‌ها را استخراج کرده‌ایم، نتایج در اشکال ۷ و ۸ نمایش داده شده‌اند. در شکل ۹ تا ۱۳ تطابق خروجی چارچوب پیشنهادی با داده‌های واقعی اندازه‌گیری تعداد فوتون‌ها در انرژی‌های مختلف برای چهار چشمه  $^{22}\text{Na}$  با اکتیویته  $1/16$  میکروکوری،  $^{54}\text{Mn}$  با اکتیویته  $1/07$  میکروکوری،  $^{137}\text{Cs}$  با اکتیویته  $1/12$  میکروکوری،  $^{57}\text{Co}$  با اکتیویته  $1/19$  میکروکوری و  $^{60}\text{Co}$  با اکتیویته  $0/84$  میکروکوری نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود برای همه عناصر پرتوزای مورد آزمایش، چارچوب پیشنهادی شامل مدل‌سازی SARIMA با بازخورد

لازم برای آشکارساز و به‌کارگیری آشکارسازهای موجود در کشور روی پرند مناسب و در دسترس، بتوان پایش هوایی و یا بررسی آلودگی بعد از سوانح محتمل هسته‌ای را انجام داد. به‌کارگیری روش‌های مناسب برای تحلیل داده‌های حاصل از سیستم پایش هوایی با استفاده از مدل‌سازی SARIMA طیف گاما برای کاهش نویز و زمینه و خاصیت نایستایی سیگنال فوتون شمارش‌شده، در کنار انجام اصلاحات توسط تحلیل مشترک مکان-انرژی، منجر به انعطاف‌پذیری سامانه کوچک و سبک برای دریافت داده‌هایی با میزان خطای کمتر و دقت بیشتر در مرحله آشکارسازی شده و متعاقباً قابلیت مانور بالا در تحلیل داده‌های حاصل را در پی داشت. خودکارسازی حداکثری چنین روش‌هایی می‌تواند با سرعت قابل قبولی جمع‌آوری داده‌های تصحیح‌شده و دارای دقت مناسب را در پی داشته باشد.

نوآوری این پژوهش، مبتنی بر پردازش خطی مشترک مکان-انرژی تعداد فوتون‌های شمارش‌شده حاصل از پایش و استفاده از خواص مدل SARIMA، علاوه بر حذف نویز و اطلاعات غیرضروری، به دسته‌بندی مناسب داده‌ها می‌انجامد تا از این طریق بتوان حجم مؤثر کریستال آشکارساز را افزایش داد و بنابراین از آشکارساز با کریستال کوچک‌تری با بازده مشابه با یک مجموعه پایش هوایی متداول استفاده کرد. نتایج نشان می‌دهد که گرچه خروجی چارچوب پیشنهادی بایاس است، ولی مقادیر متوسط مربع خطا و میان‌ه قدرمطلق انحراف در هر چهار عنصر پرتوزا بسیار کم است. بنابراین در مجموع چارچوب پیشنهادی، داده‌های اندازه‌گیری واقعی پایش هوایی را به‌خوبی مدل کرده است و اعتبارسنجی مدل و نیز داده‌های شمارش واقعی فوتون‌های گاما مؤید این است که مدل‌سازی پیشنهادی مناسب و کارا است.



شکل (۱۲): خروجی چارچوب پیشنهادی برای  $^{57}\text{Co}$  با اکتیویته ۱/۱۹ میکروکوری در مقایسه با داده واقعی.



شکل (۱۳): خروجی چارچوب پیشنهادی برای  $^{60}\text{Co}$  با اکتیویته ۰/۸۴ میکروکوری در مقایسه با داده واقعی.

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن این‌که طراحی و ساخت یک سیستم پایش هوایی در حد مقدرات و با محدودیت‌های پایش روی پژوهشگران با هدف سبک‌سازی و کوچک‌سازی سامانه پایش هوایی همراه با افزایش دقت و حساسیت است، روش مدل‌سازی با الگوی میانگین متحرک خودهمبسته یکپارچه فصلی (SARIMA) همراه با خورد و اصلاح توسط پردازش مشترک مکان-انرژی پیشنهاد شد تا با کاهش حجم کریستال

## ۶. مراجع

- [1] R. Casanovas, J.J. Morant and M. Salvadó. Development and calibration of a real-time airborne radioactivity monitor using gamma-ray spectrometry on a particulate filter, 2012 18th IEEE-NPSS Real Time Conference, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/RTC.2012.6418383.
- [2] D. Srinivas, VR. Babu, I. Patra, S. Tripathi, MS. Ramayya and AK. Chaturvedi. Assessment of Background Gamma Radiation Levels Using Airborne Gamma Ray Spectrometer Data over Uranium Deposits, Cuddapah Basin, India – A Comparative Study of Dose Rates Estimated by AGRS and PGRS; *J. Environ. Radioact.* 2017, 16, 1–12.
- [3] M. Abasnezhad, M. Askari, M. Ahmadi, M. Einian and M. Shayesteh. Simulation of Snow White Sampler in order to Create a Native Nuclear Treaty System; *Adv. Defence Sci. & Technol.* 2014, 4, 211-218.
- [4] M. Moosavi, Y. Moosavi and A. Gholami. Synthesis of POPOP, a Scintillator Used In the Nuclear Radiation Detectors, *Adv. Defence Sci. & Technol.* 2012, 3,5- 11.
- [5] E. Wilhelm, S. Gutierrez, N. Arbor, S. Ménard and A.M. Nourreddine. Study of Different Filtering Techniques Applied to Spectra from Airborne Gamma Spectrometry, *Proc. Int. Conf. on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods & their Applications, ANIMMA, Lisbon, 2015, 1-5.*
- [6] IAEA. Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying, IAEA Technical Report Series 323, 1998.
- [7] R. Moonjuna, D.P. Shrestha, V. Jettena and F. Ruitenbeeka. Application of Airborne Gamma-Ray Imagery to Assist Soil Survey: A Case Study from Thailand, *Geoderm*, 2017, 289, 196–212.
- [8] M. Rezaei, M. Ashoor and L. Sarkhosh. Airborne gamma ray spectrometry improvement using autoregressive integrated moving average model. *Iranian Journal of Radiation Safety and Measurement (IJRSM)*, 2018, 6(2), 33-44
- [9] M. Rezaei, M. Ashoor and L. Sarkhosh. Numerical evaluation of gamma radiation monitoring, *Nuclear Engineering and Technology*, Volume 51, Issue 3, 2019, Pages 807-817, ISSN 1738- 5733, <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.12.020>.
- [10] ED Feigelson, GJ Babu and GA Caceres. Autoregressive Times Series Methods for Time Domain Astronomy, *Front. Phys.* 6:80. 2018, doi: 10.3389/fphy.2018.00080
- [11] Z. Xinxiang, Z. Bo and F. Huijuan. A comparison study of outpatient visits forecasting effect between ARIMA with seasonal index and SARIMA, *Int. Conf. on Progress in Informatics and Computing (PIC)*, Nanjing, China, 2017, 362-366.
- [12] J.M. Palms, B.K. Tanner, R.E. Wood and F.W. Boone. A Baseline Ground-Level Airborne Radionuclide Survey for a Nuclear Fuel Reprocessing Plant, *IEEE T. Nucl. Sci.*, 1974, 21,585-595.
- [13] K. Gröchenig. *Foundations of Time-Frequency Analysis*, Springer Science & Business Media, 2003.
- [14] B.R.S. Minty. Airborne GammaRay Spectrometric Background Estimation Using Full Spectrum Analysis, *Geophysics*, 1992, 57.
- [15] IAEA. International Nuclear Verification Series, No1 Rev2; IAEA, 2011.
- [16] S. Peter. Gamma Detector Data Files, Physics Department, California State Polytechnic University, Pomona, CA 91768, USA, [Online]. Available: 2018 <http://www.cpp.edu/~pbsiegel/nuclear.html>.

