

## بهبود طیف‌سنجی گاما در پایش هوایی پرتویی با استفاده از الگوی میانگین متحرک خودهمبسته یکپارچه

محسن رضایی\*، منصور عاشور و لیلا سرخوش

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

\*تهران، انتهای کارگر شمالی، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹

پست الکترونیکی: rezaei@iran.ir

### چکیده

مدل‌سازی دقیق و به هنگام فوتون دریافتی از منابع پرتوزای گاما، نقش مهم در فراهم آوردن اطلاعات پیشینی جهت پایش هوایی گاما دارد. در این مقاله از الگوی میانگین متحرک خودهمبسته یکپارچه (ARIMA) به منظور مدل‌سازی پایش هوایی گاما استفاده شده است. روش پیشنهادی، با استفاده از منابع شناخته‌شده، مدل ARIMA منبع پرتوی گاما و اختلال‌های محیطی را تهیه می‌کند تا به عنوان اطلاعات پیش‌آگاهی در اختیار پردازشگر پایش هوایی برای آنالیز داده‌های اندازه‌گیری قرار دهد. فرآیند استخراج مدل و آموزش به صورت آفلاین و با منابع متعدد پرتوزا از منظر نوع و اندازه انجام گرفته و سپس مدل‌های استخراج‌شده با استفاده از توابع ارزیابی اعتبار سنجی شده، برای تعیین نوع و مقدار ماده پرتوزا در پایش هوایی پرتوی گاما در هنگام عملیات شناسایی به صورت برخط مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین به منظور سنجش مدل‌سازی صورت گرفته، روش ARIMA پیشنهادی با سایر روش‌های مدل‌سازی فرآیندها، از جمله روش میانگین متحرک خودهمبسته یا ARMA در سه معیار بایاس، میان‌قدر مطلق انحراف و متوسط مربع خطا مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی، تعداد فوتون دریافتی را با دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌های رایج مدل‌سازی کرده است.

**کلیدواژگان:** پایش هوایی پرتوی، ماده پرتوزا، مدل‌سازی، طیف‌سنجی گاما، میانگین متحرک خودهمبسته یکپارچه

### ۱. مقدمه

افزایش دقت اندازه‌گیری سیستم‌های کوچک‌تر و سبک‌وزن‌تر منجر خواهد شد. این روش‌ها مشتمل بر انواع روش‌های کاهش نویز آماری، کالیبراسیون تجهیزات، تنظیم پنجره‌های انرژی و این قبیل اقدامات است [۱].

با توجه به مسائل، مخاطرات و هزینه‌های ناشی از بکارگیری سیستم‌های متداول و سنگین‌وزن پایش هوایی گاما، اخیراً به کوچک‌سازی بخش آشکارساز هوایی توجه بیشتری شده است. این رویکرد به‌ویژه با استفاده از تکنیک‌های طیف‌سنجی و روش‌های مختلف کاهش خطا و نویز، به

در این مقاله مدل‌سازی دقیق و بهنگام فوتون دریافتی به‌عنوان یکی از اجزای اصلی پایش هوایی فوتون‌های گاما مطرح می‌شود. در پژوهش حاضر، از فرآیندهای  $ARIMA^1$  برای مدل‌سازی تعداد فوتون‌های شمارش شده در اندازه‌گیری هوایی استفاده شده است. در این روش الگوی میانگین متحرک خودهمبسته، برای پردازش داده‌های واقعی تعداد فوتون دریافتی از منابع شناخته شده پرتوزا استفاده شد، مدل‌های استخراج شده از طریق توابع ارزیابی اعتبارسنجی، و برای پایش هوایی گاما مورد استفاده قرار گرفت.

تعداد فوتون دریافتی از جمله سری‌های زمانی ناپایدار و مدل‌سازی تعداد فوتون دریافتی عموماً یک کار پیچیده با شرایط غیرمطمئن و همراه با ضعف در پایگاه داده است. تاکنون برای این منظور مدل‌کننده خاصی که از نظر همگان به‌عنوان بهترین روش شناخته شود، توسعه نیافته است. یکی از این روش‌ها، روش  $AR$  یا روش خودبرگشتی است که می‌توان از آن هم به‌صورت خطی و هم به‌صورت غیرخطی استفاده کرد. روش  $ARMA^2$  یا میانگین متحرک خودهمبسته، سری مورد انتظار را به‌صورت میانگین متحرک و خودبرگشتی در نظر گرفته و در نهایت به مدل‌سازی آن می‌پردازد. روش  $ARIMA$  که به نام‌های  $ARMA-X$  و  $ARMAX$  نیز خوانده شده و مورد پیشنهاد این مقاله است، منظور مدل‌سازی دقیق‌تر علاوه بر سری مورد نظر از سری‌های اندازه‌گیری شده دیگر نیز استفاده می‌کند.

روش‌های کلاسیک هنوز هم در کنار روش‌های هوشمند مبتنی بر سامانه‌های محاسباتی و محاسبات هوشمند برای مدل‌سازی سری‌های زمانی در حال پیشرفت است. اخیراً مدل میانگین متحرک خودهمبسته ( $ARMA$ ) و تعمیم یافته آن، مدل میانگین متحرک خودهمبسته یکپارچه ( $ARIMA$ )، مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. ممیز اصلی مدل‌های کلاسیک،

“ایستایی” سری زمانی است، به صورتی که مدل  $ARMA$  برای سری‌های ایستا و تعمیم یافته آن یعنی  $ARIMA$  برای سری ناپایستا به‌کار می‌رود. ایستایی در انواع مختلف خود شامل ایستایی ضعیف، ایستایی کوواریانس و ایستایی مرتبه دوم به ترتیب با شاخص‌های میانگین ثابت، واریانس ثابت و کوواریانس ثابت در دوره‌های مشخص، تعریف می‌شود. عموماً رفتار سیستم خطی تحت تأثیر اغتشاش پنهان گاوسی توسط  $ARMA$  مدل می‌شود که قابلیت‌های مؤثری در مدل‌سازی شهودی و پیش‌بینی سیگنال دارد، ولی هنوز محاسبه کارای پارامترهای بیشینه‌کننده احتمال مرزی داده‌های  $ARMA$  به‌عنوان مسأله باز مطرح است. در بین مدل‌های تعمیم یافته سری‌های زمانی، به‌کارگیری مدل  $ARIMA$  به علت مقاوم بودن در برابر ناپایستگی، امکان استفاده از مزایای مدل  $ARMA$  در سیگنال ناپایستای طیف گاما در پایش هوایی پرتویی را فراهم می‌کند.

پایش هوایی، اقتصادی‌ترین، سریع‌ترین و مناسب‌ترین روش برای جمع‌آوری اطلاعات پرتویی سطح زمین به‌منظور تهیه نقشه پرتوزایی مناطق مختلف کشور مخصوصاً در شرایط بحران است [۲]. علاوه بر پرتوزایی طبیعی، برخی اقدامات بشری و یا بروز سوانح هسته‌ای منجر به آزادسازی مواد پرتوزا در محیط می‌شوند. اقدامات ایمنی و حفاظتی دقیق و هدفمند، اولین واکنش‌های ضروری در مواجهه با چنین رویدادهایی است، این دقت و هدفمندی تنها می‌تواند با شناخت نوع و میزان مواد پرتوزا محقق شود. ایمن‌ترین روش برای بررسی مقدار و نوع عناصر پرتوزای پراکنده شده در پی یک سانحه هسته‌ای و یا نشت مواد پرتوزا، استفاده از روش “پایش هوایی گاما” است [۳]. با توجه به برد پرتوی گاما در هوا این امکان وجود دارد تا ضمن حفظ فاصله مناسب و ایمن از پرتوها و ذرات پرتوزا، که می‌توانند به افراد و حتی تجهیزات اندازه‌گیری آسیب جدی وارد کنند، تخمین قابل‌اعتمادی از “نوع” و

<sup>1</sup> AutoRegressive Integrated Moving Average

<sup>2</sup> Auto Regressive-Moving-Average

مدل‌های پیش‌آگاهی، در مورد سوانح پرتویی که اقدامات حفاظتی و رفع آلودگی پس از سانحه باید با زمان‌بندی، ترتیب اجرایی و دقت به انجام برسند، از اهمیت زیادی برخوردار هستند. در به‌کارگیری مدل‌های مناسب پیش‌آگاهی در پدافند پرتویی، شناخت نوع و میزان پرتوهای محیطی و تغییرات آن‌ها، چگونگی و سرعت تفکیک و تشخیص منابع طبیعی و غیرطبیعی، و تغییرات آن‌ها در مراحل اندازه‌گیری، تفکیک و تشخیص نوع و مقدار آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. پرتو گاما یکی از بهترین انتخاب‌ها برای سنجش از راه دور پرتوهای سطح زمین است. اگر هدف از آشکارسازی پرتو گاما، طیف‌سنجی باشد و امکان این کار وجود داشته باشد، به دلیل اینکه هر پرتو گاما انرژی مشخصی دارد و این انرژی که امضای گاما نامیده می‌شود، مشخصه ایزوتوپ مربوط به آن پرتو گاما است و به کمک آن نوع و میزان آن ایزوتوپ قابل تخمین است [۹]. در این مقاله مدل‌سازی امضای گاما عناصر مختلف پرتوزا به کمک ARIMA و روش‌های پیش‌آگاهی طیف‌سنجی پرتوهای طبیعی یا طیف‌سنجی پرتوهای پس از یک سانحه هسته‌ای پیشنهاد شده است.

## ۲. فرآیند شمارش فوتون‌های گاما

به دنباله‌ای از مشاهدات تصادفی مرتب‌شده در فواصل زمانی مساوی به صورت زیر اصطلاحاً سری زمانی اطلاق می‌شود  $(\dots, x_{t-1}, x_t, x_{t+1}, \dots, x_{t+k}, x_{t+k+1}, \dots)$ ، که روند تصادفی یا فرآیند احتمالی موجود در سری زمانی ممکن است میزانی از همبستگی از یک مشاهده به مشاهده دیگر را نشان دهد. در صورت وجود ساختار همبسته، می‌توان با تجزیه و تحلیل آن، مدلی (شامل اجزاء قطعی و تصادفی) را برای درک و بیان سازوکار تولید مشاهدات ارائه کرده و از آن برای پیش‌بینی (کوتاه‌مدت) مقادیر آینده سری فقط بر اساس مقادیر گذشته

"میزان" مواد پرتوزا و آلودگی پرتوی محیط با دقت مناسبی به دست آورد. جمع‌آوری و مدل‌سازی اطلاعات مربوط به وضعیت پرتوهای و سطوح تشعشعات در محیط آلوده و نیز تشعشعات خارج از سایت، از ابزارهای اولیه و ضروری برای تصمیم‌گیری مناسب در چنین مواقعی است. این‌گونه تصمیمات، باید به کمک مدل‌های پیش‌آگاهی<sup>۱</sup> و اندازه‌گیری‌های جامع محیطی که به صورت اضطراری و در شرایط بحران انجام می‌شوند اتخاذ، و به طور مستمر مورد اصلاح و بازنگری قرار گیرند. عادی شدن وضعیت و بازگشت از حالت فوق‌العاده به شرایط طبیعی هم، به کمک نتایج اندازه‌گیری‌های پی‌درپی مشخص و به افراد در معرض پرتو و یا محدوده سانحه یا منطقه آلوده اطلاع داده می‌شود.

روش طیف‌سنجی هوایی گاما<sup>۲</sup> با قابلیت تحرک زیاد، همراه با جمع‌آوری داده‌ها و نمونه‌برداری محیط، نقش مهمی در واکنش سریع و اقدام مناسب و به موقع در سوانحی که آزاد شدن عناصر پرتوزا را در پی دارند ایفا می‌کند. پایش وضعیت ید فعال آزادشده ( $I^{131}$ ) در پی سوانح هسته‌ای [۴]، جستجوی چشمه‌های دزدیده یا مفقودشده، یافتن باقیمانده ماهواره‌ها یا سایر پرتابه‌هایی که به زمین اصابت کرده‌اند، میزان آب معادل بارش برف [۵]، وضعیت سطح و ارتفاع آب دریاچه‌ها [۶]، تغییرات در وضعیت خاک مناطق با پوشش سبز [۷] مثال‌هایی مختلف از کاربردهای گسترده، جالب و متنوع، آشکارسازی هوایی گاما هستند که به کمک تشخیص آنومالی‌ها یا تغییرات پرتوی محیط میسر می‌شوند [۸].

مدل‌های پیش‌آگاهی در مورد پدیده‌هایی که طبیعت آماری دارند، با استفاده از روش‌های آماری و استفاده از شاخص‌هایی که بروز و وقوع پدیده موردنظر، در پی ظهور یا تغییر مقدار آن شاخص‌ها با قطعیت زیادی اتفاق می‌افتد، به کار می‌روند. این

<sup>1</sup> Prognostic models

<sup>2</sup> Airborne Gamma Spectrometry

می‌توان گفت که یک فرآیند ایستای اکید با دو گشتاور اول متناهی، ایستای ضعیف نیز هست. اگر تابع توزیع توأم یک فرآیند ایستای نرمال نیز باشد در اصطلاح فرآیند ایستای گوسی نامیده می‌شود.

یکی از مدل‌های سری زمانی خطی و تک متغیره که در الگوسازی وضعیت‌های دنیای واقعی از اهمیت زیادی برخوردار است مدل خود برگشتی (اتورگرسیو) از مرتبه  $p$  یا  $AR(p)$  است:

$$x_t - \mu = \phi_1(x_{t-1} - \mu) + \dots + \phi_p(x_{t-p} - \mu) + a_t \quad (4)$$

واضح است که  $x_t$  ترکیبی خطی از جدیدترین  $P$  مقدار گذشته خودش به علاوه یک جمله اغتشاش  $a_t$  است و هر چیز تازه‌ای در زمان  $t$  که به وسیله مقادیر گذشته بیان نشده است را در سری منظور می‌کند بنابراین فرض می‌شود  $a_t$  مستقل از  $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-p}$  است. به عنوان حالتی خاص می‌توان به فرآیند ساده و درعین حال پرکاربرد اتورگرسیو مرتبه اول  $AR(1)$  اشاره کرد:

$$x_{t-1} - \mu = \phi_1(x_{t-1} - \mu) + a_t \quad (5)$$

برای برقراری شرط ایستایی باید پارامتر خود برگشتی  $|\phi| < 1$  باشد [۱۱].

### ۳. روش پیشنهادی برای مدل‌سازی امضای گامی

#### عناصر پرتوزا

در این مقاله مدل‌های سری تک متغیره به منظور مدل‌سازی تعداد فوتون گاما دریافتی در آشکارساز پیشنهاد می‌شود. این مدل‌ها اساساً مدل‌هایی هستند که بر پایه تعداد مشخص و نسبتاً کم‌تر متغیر بنا شده است. در مدل‌های تک متغیره مدل به گونه‌ای پایه‌ریزی می‌شود که فقط تعداد شمارش شده فوتون

استفاده کرد. باکس و جنکینز<sup>۱</sup> [۱۰] استراتژی سه مرحله‌ای تشخیص مدل، برازش مدل و بررسی درستی مدل را برای یافتن مدل مناسب و منطبق بر سری زمانی گسسته (مشاهدات در فواصل مساوی) پیشنهاد کرده‌اند. بسیاری از مدل‌های احتمال سری زمانی بر مبنای ایستایی سری استوار است. مفهوم اساسی ایستایی این است که قوانین احتمالی حاکم بر فرآیند با زمان تغییر نمی‌کند و فرآیند در تعادل آماری می‌ماند. یک سری زمانی را ایستای اکید می‌نامند هرگاه برای هر  $n = 1, 2, \dots$  و هر تأخیر زمانی  $k$  رابطه زیر برقرار باشد:

$$F(x_{t_1}, \dots, x_{t_n}) = F(x_{t_1+k}, \dots, x_{t_n+k}) \quad (1)$$

که  $F(x_{t_1}, \dots, x_{t_n})$  تابع توزیع توأم  $n$  - بعدی است. در عمل، تعیین تابع توزیع توأم بسیار مشکل یا غیرممکن است. بنابراین، در تحلیل سری‌های زمانی، اغلب مفهوم ضعیف‌تری از ایستایی برحسب گشتاورهای فرآیند بکار می‌رود. هرگاه تمام گشتاورهای توأم یک سری زمانی تا مرتبه  $n$  موجود بوده و نسبت به زمان تغییر نکند ایستای ضعیف از مرتبه  $n$  خواهد بود. بدین ترتیب، فرآیندی با دو گشتاور اول  $E(x_t)$  و  $E(x_t^2)$  متناهی، ایستای ضعیف مرتبه دوم (یا ایستای کوواریانس) است و میانگین و واریانس ثابت دارد. همچنین، تابع اتو کوواریانس آن فقط به اختلاف زمانی  $k$  بین مشاهدات بستگی دارد:

$$\gamma_k = \text{cov}(x_t, x_{t+k}) \quad (2)$$

بدین ترتیب، تابع خودهمبستگی برای محاسبه میزان همبستگی میان مشاهدات با اختلاف زمانی  $k$ ، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho_k = \frac{\text{cov}(x_t, x_{t+k})}{\sqrt{\text{Var}(x_t)}\sqrt{\text{Var}(x_{t+k})}} = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} \quad (3)$$

<sup>1</sup> Box & Jenkins

الگوی میانگین متحرک خود همبسته یکپارچه می‌دهد که در آن تفاضل مرتبه  $d$  ام آن  $W_t = \nabla^d Z_t$  یک فرآیند ARMA ایستا است و می‌توان چنین فرآیندی را به‌عنوان  $ARIMA(p, d, q)$  مدل کرد.

در این مقاله مقادیر شمارش شده از تعداد فوتون‌های دریافتی توسط آشکارساز هوایی توسط میانگین متحرک خود همبسته ARMA مدل شد و مقادیر  $p$ ،  $q$  و  $d$  برای فرآیند ARIMA آن وابسته به تعداد واحدهای انرژی‌های پیشین درگیر در اندازه‌گیری، تعداد اختلال، بازده آشکارساز، حساسیت جهتی، قدرت تفکیک، زمان مرگ و عوامل مؤثر در ایجاد شکل پالس واقعی توسط طیف نگارها تعیین شدند. مدل استخراجی تعداد فوتون‌های دریافتی توسط آشکارساز هوایی برای هر یک از مواد پرتوزا و همچنین محیط‌های مختلف ایجاد اختلال همانند شکل ۱ تهیه و در فرآیند تعیین نوع و مقدار ماده پرتوزای گاما توسط آشکارساز هوایی به‌کارگیری شدند.

در انرژی‌های پایین‌تر مدنظر قرار گیرد. فرم کلی چنین مدل‌هایی به‌صورت زیر است:

$$x_n = f(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, u_n) \quad (6)$$

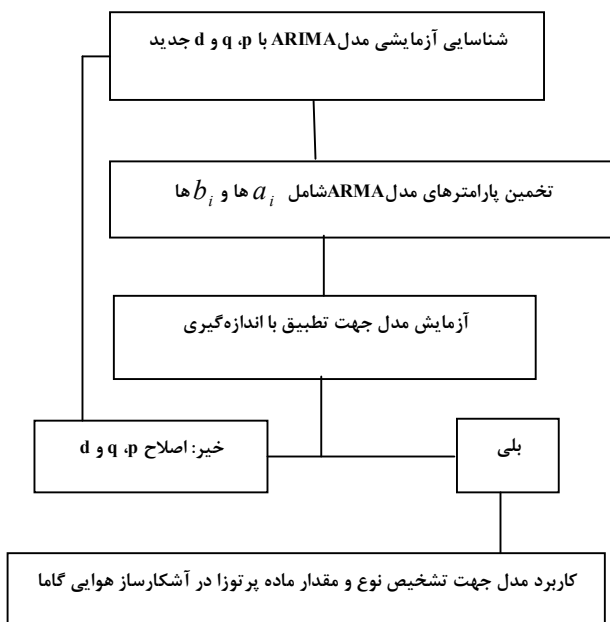
در فرمول بالا  $u_n$  حاصل جمع تعدادی اختلال به‌صورت نویز سفید است که به‌صورت یک  $MA(q)$  می‌توان آن را مدل کرد که در آن  $\varepsilon_n$  اختلال اندازه‌گیری در انرژی  $n$  ام است [۱۲]. در این فرمول واحد، زمان قابل اندازه‌گیری و قابل تفکیک توسط آشکارساز و در واقع زمان مرگ آشکارساز است، زمان مرگ به زمان موردنیاز برای اینکه آشکارساز پس از آشکارسازی یک فوتون بتواند فوتون مجزای دیگری را آشکار کند اطلاق می‌شود. برای یک آشکارساز هر چه این مقدار کم‌تر باشد بهتر است، چراکه زمان سپری شده برای فرآیند شمارش کل فوتون‌های آشکار شده کاهش می‌یابد. برخی از فوتون‌ها ممکن است درحالی‌که فقط به‌صورت جزئی انرژی خود را از دست می‌دهند از آشکارساز فرار کنند و بنابراین انرژی اندرکنش آن‌ها مقداری کمتر از انرژی فوتون ورودی نشان داده شود. در این حالت وضعیت پراکندگی کامپتون رخ می‌دهد [۱۳].

$$u_n = \varepsilon_n - b_1 \varepsilon_{n-1} - \dots - b_q \varepsilon_{n-q} \quad (7)$$

با ترکیب دو معادله فوق با یکدیگر یک مدل خود برگشتی میانگین متحرک شکل می‌گیرد که اصطلاحاً به آن فرآیند  $ARMA(p, q)$  گفته می‌شود و به شکل زیر خواهد بود.

$$x_n = a_1 x_{n-1} + a_2 x_{n-2} + \dots + a_p x_{n-p} + \varepsilon_n - b_1 \varepsilon_{n-1} - \dots - b_q \varepsilon_{n-q} \quad (8)$$

در ساخت فرمول فوق سه مشخصه وجود دارد: ۱- مدل تابعی، ۲- تعداد وقف‌ها یا  $p$ ، ۳- تعداد جملات اختلال یا  $q$ . اگر اندازه‌گیری‌های تعداد فوتون‌های دریافتی گاما توسط آشکارساز، بافاصله زمانی بزرگ‌تر از زمان مرگ آشکارساز تکرار شود، اطلاعات تجمیع شده تشکیل یک فرآیند  $Z$  از یک



شکل (۱): روش پیشنهادی جهت به‌کارگیری فرآیند ARIMA در

مدل‌سازی پرتوزایی گاما.

## ۴. پیاده‌سازی

شمارش به‌جز در یک مورد به مدت ۳۰۰ ثانیه صورت گرفته است. چشمه‌ها عبارت بودند 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
۵. چشمه  $^{57}\text{Co}$  با اکتیویته ۱/۱۹ میکروکوری در تاریخ ۲۶ مارس ۱۹۹۱

بر اساس روش ارائه‌شده در قسمت قبل، مدل‌سازی داده‌های تعداد فوتون دریافتی توسط ARIMA برای منابع پرتوزای مختلف انجام گرفت و مورد اعتبار سنجی قرار گرفت. برای مقایسه و ارزیابی نتایج حاصل از روش پیشنهادی، مدل‌سازی داده‌های تعداد فوتون دریافتی با استفاده از روش ARIMA انجام گرفت. نتایج حاصل از هریک در جداول و نمودارهای مختلف نمایش داده شده است. در شکل ۲ نمودار مربوط به مقادیر حقیقی اندازه‌گیری شده نمایش داده شده است.

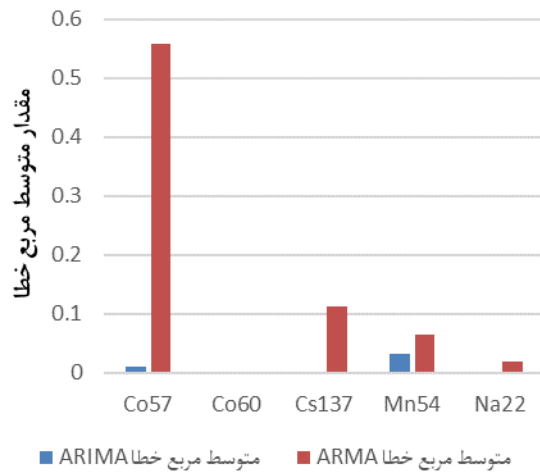
شکل‌های ۲ تا ۵ میزان خطای مدل‌سازی امضای گاما مواد پرتوزا با استفاده از مدل با روش ARMA و مدل پیشنهادی ARIMA برای داده‌های آزمایشی و اعتبار سنجی را با سه معیار بایاس، میانه قدر مطلق انحراف و متوسط مربع خطا را نمایش می‌دهد.

معمولاً در سامانه‌های پایش هوایی برای آشکارسازی گاما از آشکارسازهای سوسوزن و در بیش‌تر موارد از آشکارساز سوسوزن یدور سدیم که به آن ناخالصی TL اضافه‌شده استفاده می‌شود. نتیجه پراکندگی یا جذب پرتو گامای ورودی در بلور آشکارساز، تولید یک یا چند الکترون پراثرژی است. بلور سوسوزن اثرژی داده‌شده به الکترون را به یک تپ نوری تبدیل می‌کند. معمولاً یک فوتون گامای ورودی، قبل از جذب چندین مرتبه پراکندگی کامپتون را تجربه می‌کند. در بسیاری از آشکارسازهای سوسوزن فعلی، یک لامپ تکثیرکننده فوتونی<sup>۱</sup> که وظیفه آشکارسازی و تقویت پرتوی نوری را دارد به بلور متصل می‌شود. فوتون نوری پس از انعکاس، تقویت و با تشدید الکترون‌های ایجادشده توسط فتوکاتد به کمک داینودها در نهایت یک سیگنال الکتریکی در خروجی لامپ به دست می‌آید.

آشکارسازهای NaI(TL) در جذب فوتون‌های کم انرژی نسبت به فوتون‌های پراثرژی بازده بالاتری دارند و این یکی از دلایل نرخ شمارش بالاتر فوتون‌های کم انرژی در این نوع آشکارساز است. همچنین چیدمان جانب به‌جانب ورقه‌های بلور، سطح مقطع وسیع‌تری برای برخورد فوتون‌های وارده از سمت پائین وسیله پرنده، نسبت به فوتون‌های وارده از وجوه جانبی ایجاد کرده و بنابراین حساسیت جهتی برای آشکارساز ایجاد می‌کند.

اندازه‌گیری‌های این تحقیق همگی توسط آشکارساز یدور سدیم سه اینچی با مشخصات یکسان ولتاژ تکثیرکننده فوتونی ۶۵۰ ولت، بهره ۸۰ بازده ۰/۹. درحالی‌که چشمه‌ها در موقعیت یکسان نسبت به آشکارساز قرار گرفته‌اند، انجام شده است [۱۴].

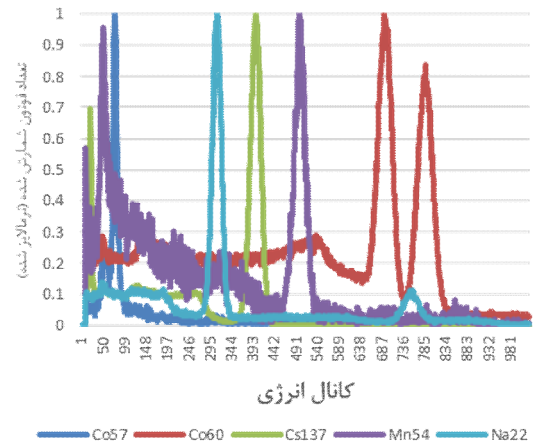
<sup>1</sup> Photo Multiplier tube



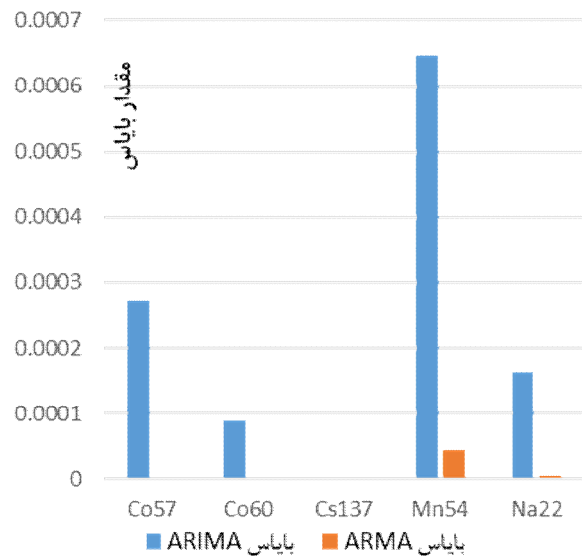
شکل (۵): مقایسه متوسط مربع خطا روش پیشنهادی ARIMA با مدل خطی ARMA.

بایاس یا سوگیری که لفظ اریب نیز درباره آن به کار می رود، تفاوت بین حد بی‌نهایت تخمین‌گر یک پارامتر و مقدار حقیقی آن است. شکل ۳ نشان می‌دهد که گرچه مدل ARIMA نارایتز از مدل ARMA برای تخمین پایش هوایی گاما می‌باشد ولی در هر دو مورد میزان این بایاس برای عناصر مختلف پرتوزا بسیار کم است.

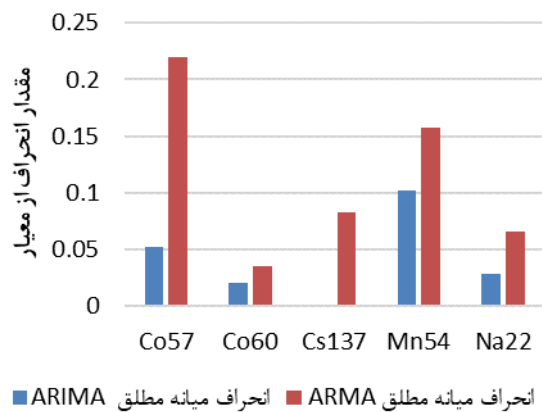
متوسط مربع خطا (MSE) و میانه قدر مطلق انحراف (MAD)، معیارهایی مقاوم از میزان تغییرات مقدارهای تخمین زده شده از تعداد شمارش شده فوتون‌های گاما است. آزمون MSE و MAD به صورت متوسط مربع خطاها و میانه قدر مطلق انحراف از میانه کل داده تعریف می‌شود. برای محاسبه این معیارها، ابتدا فاصله تخمین‌ها توسط مدل پیشنهادی ARIMA و مدل ARMA با میانه آن‌ها به دست آورده می‌شود. سپس میانه قدر مطلق این فاصله‌ها را به عنوان خروجی آزمون MAD در شکل ۴ و میزان MSE در شکل (۵) نمایش داده شده‌اند. کاربرد MAD عموماً در محاسبه میزان پراکندگی تخمین است و MAD یک شاخص مقاوم نسبت به داده‌های پرت است. این آزمون در زمینه داده‌های پرت مقاوم‌تر از انحراف استاندارد عمل می‌کند. در انحراف استاندارد مجذور فاصله‌ها از میانگین محاسبه می‌شوند و در



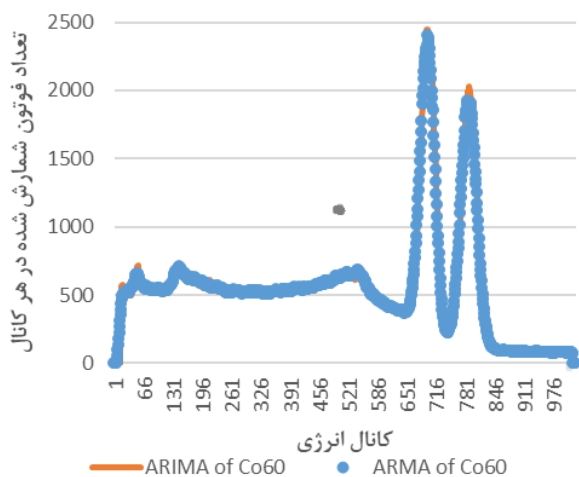
شکل (۲): مقادیر حقیقی اندازه‌گیری شده از چشمه‌های مختلف (تمامی شمارش‌ها برای عناصر مختلف پرتوزا بر اساس بیش‌ترین تعداد فوتون شمارش شده نرمالیزه شده است).



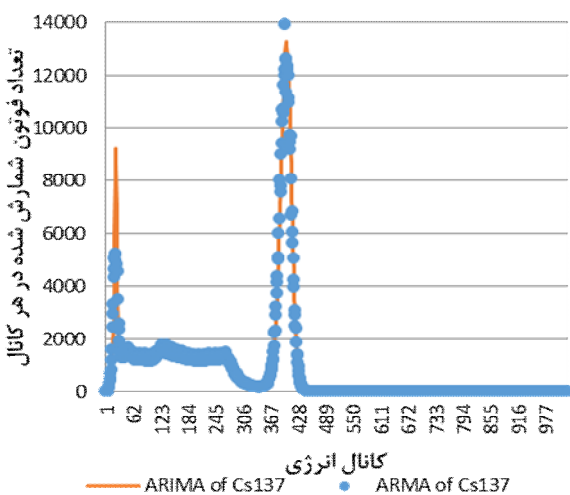
شکل (۳): مقایسه بایاس روش پیشنهادی ARIMA با مدل ARMA.



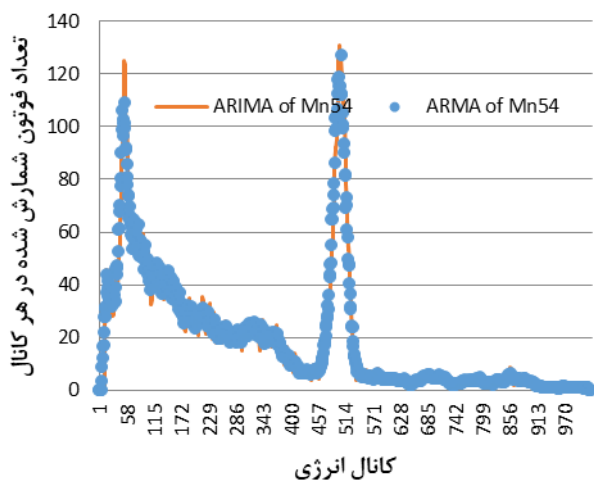
شکل (۴): مقایسه میانه قدر مطلق انحراف روش پیشنهادی ARIMA با مدل خطی ARMA.



شکل (۷): مقایسه روش پیشنهادی ARIMA با مدل خطی ARMA برای چشمه  $^{60}\text{Co}$  با اکتیویته ۰/۸۴ میکروکوری.



شکل (۸): مقایسه روش پیشنهادی ARIMA با مدل خطی ARMA برای چشمه  $^{137}\text{Cs}$  با اکتیویته ۱/۱۲ میکروکوری.

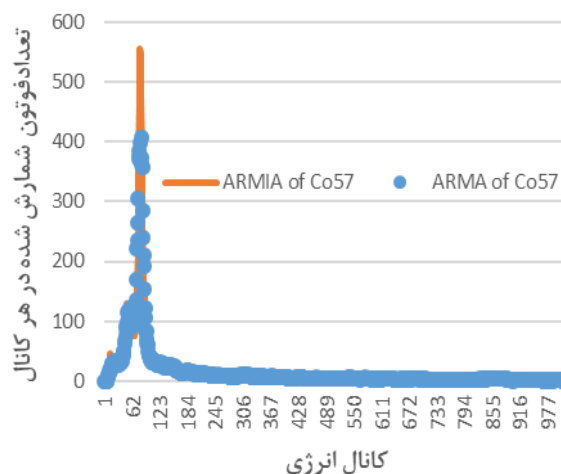


شکل (۹): مقایسه روش پیشنهادی ARIMA با مدل خطی ARMA برای چشمه  $^{54}\text{Mn}$  با اکتیویته ۱/۰۷ میکروکوری.

نتیجه داده‌های دورتر وزن بیشتری می‌گیرند. به همین دلیل است که داده‌های پرت تاثیر فراوانی بر آن می‌گذارند. در آزمون MAD ولی انحراف تعداد کمی از داده‌های پرت بی‌تأثیر خواهد بود. معیار MAD از انحراف استاندارد یا واریانس مقاوم‌تر است.

در شکل ۶ تا ۱۰ تطابق خروجی مدل ARMA و مدل پیشنهادی ARIMA با داده‌های واقعی اندازه‌گیری تعداد فوتون‌ها در انرژی‌های مختلف برای پنج چشمه  $^{22}\text{Na}$  با اکتیویته ۱/۱۶ میکروکوری،  $^{54}\text{Mn}$  با اکتیویته ۱/۰۷ میکروکوری،  $^{60}\text{Co}$  با اکتیویته ۰/۸۴ میکروکوری،  $^{137}\text{Cs}$  با اکتیویته ۱/۱۲ میکروکوری،  $^{57}\text{Co}$  با اکتیویته ۱/۱۹ میکروکوری، نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل‌های زیر ملاحظه می‌شود، برای کلیه عناصر پرتوزای مورد آزمایش، مدل پیشنهادی ARIMA علاوه بر پوشش کامل تخمین ARMA پیک‌های شمارش را دقیق‌تر مدل کرده است.

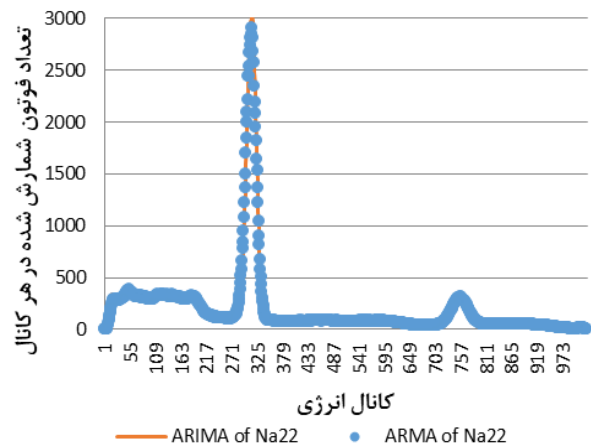


شکل (۶): مقایسه روش پیشنهادی ARIMA با مدل خطی ARMA برای چشمه  $^{57}\text{Co}$  با اکتیویته ۱/۱۹ میکروکوری.



آشکارسازی هوایی است. این خطاها که می‌تواند از ذات طراحی آشکارساز نشأت بگیرد یا خطاهای مربوط به سامانه الکترونیکی و محاسباتی مستقر در آن باشد، به صورت مستقیم بر نتایج حاصله تأثیر می‌گذارد و توسط تحلیل‌های مبتنی بر ریاضی و محاسبات قابل کاهش نیستند. عموم چنین خطاهایی ناشی از هندسه و خواص فیزیکی آشکارسازها و عواملی از قبیل اندازه، بازده و سرعت آشکارساز و همچنین عوامل محیطی نظیر رطوبت خاک، بارش، گیاهان و پرتوایی موجود در سطح پایین اتمسفر هستند. عموماً راه‌کار اصلی کاهش خطاهای آشکارسازی و بالطبع مدل‌سازی در این سطح علاوه بر دقت و بازنگری در طراحی آشکارساز هوایی با تکرار چندباره آشکارسازی منبع مشخص به روش مونت کارلو و نهایتاً کالیبراسیون سامانه امکان‌پذیر می‌شود.

خطاهای مربوط به روش‌های مدل‌سازی پرتوهای دریافتی گاما را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: خطای مربوط به انتخاب مدل، خطای مربوط به تعیین پارامترهای مدل انتخاب‌شده و نهایتاً خطای مربوط به استفاده از مدل خاصی که پارامترهای آن توسط داده‌های آموزشی تعیین شده‌اند. خطای مربوط به انتخاب مدل می‌تواند از سه منبع نشأت بگیرد: یکی ضعف ذاتی مدل، بدین معنا که مدل پیشنهادشده برای داده اخذشده مناسب نباشد. این مسئله به‌عنوان یک مسئله باز همچنان در علوم مرتبط با روش‌های مدل‌سازی مطرح است و هرروز معرفی روش‌های مدل‌سازی جدیدتر و کاراتری مشاهده می‌شود. نتایج فصل قبل نشان می‌دهد که به‌طورقطع مدل ARIMA از منظر منطبق بودن مدل بر داده‌های شمارش تعداد فوتون دریافتی بهترین مدل نیست و راه برای به‌کارگیری روش‌های مدل‌سازی دیگر باز است ولی آنچه در انتخاب مدل علاوه بر خطای فی‌مابین مقدار پیش‌بینی‌شده از مدل و مقدار اندازه‌گیری شده واقعی همیشه موردنظر بوده و هست، سادگی و قابل پیاده‌سازی بودن مدل است.



شکل (۱۰): مقایسه روش پیشنهادی ARIMA با مدل خطی ARMA برای چشمه  $^{22}\text{Na}$  با اکتیویته  $1/16$  میکروکوری.

## ۵. مزایا و معایب روش پیشنهادی ARIMA در مدل‌سازی تعداد فوتون دریافتی

اندازه‌گیری تعداد فوتون دریافتی در پایش هوایی و بالطبع مدل‌سازی آن با صحت کامل امکان‌پذیر نیست و همواره هم‌اندازه‌گیری و هم مدل‌سازی دارای خطا هستند. این بخش در پی بحث و تحلیل و نهایتاً پی‌بردن به علت و عوامل این خطاها در اندازه‌گیری مقدار واقعی و به‌صورت متمرکزتر در مدل‌سازی تعداد فوتون‌های دریافتی و چگونگی ورود خطاهای مختلف در مدل‌سازی به روش پیشنهادی ARIMA است.

بررسی و علت‌یابی خطاهای اندازه‌گیری تعداد فوتون دریافتی، اولین قدم در جهت کاهش خطای مدل‌سازی آن است. خطاهای سیستماتیکی که این مقاله برای این حوزه شناسایی کرده است را می‌توان در سه مجموعه دسته‌بندی کرد: خطاهای آشکارسازی و شمارش، خطاهای مربوط به روش‌ها، مخصوصاً روش پیشنهادی ARIMA و نهایتاً خطاهای تصادفی غیر فرآیندی یا Non-stochastic.

خطاهای آشکارسازی و شمارش تعداد فوتون دریافتی عمدتاً شامل خطاهای مربوط به طراحی، ساخت و بهره‌برداری

ممکن است نتایج تجربی شمارش فوتون‌های گاما از یک آشکارساز به آشکارساز هوایی دیگر، حتی پس از در نظر گرفتن همه خطاهای سیستمی مربوط به روش‌های مدل‌سازی مخصوصاً روش پیشنهادی ARIMA متفاوت باشد. این تفاوت‌ها ناشی از عوامل جزئی و متعددی از طراحی گرفته تا پیاده‌سازی، پرواز، اندازه‌گیری و تحلیل هستند که علم از بسیاری از آن‌ها بی‌اطلاع است و حتی ممکن است از یک آزمایش به آزمایش دیگر توسط یک آشکار یکسان در محیط یکسان با منبع پرتوزای یکسان تغییر کند. به همین علت محققین این پژوهش در تحقیقات خود در آشکارسازی تعداد فوتون دریافتی تمام اتفاقات و اختلالات ناشناخته را در هم ادغام شده و فرآیند تصادفی در نظر گرفته‌اند و طبیعتاً خطاهای ناشی از این عوامل ناشناخته ایستا محققین را به تحلیل خطاهای تصادفی راهنمون کرده است.

ممکن است خطاهای تصادفی مانند اثر عوامل خارجی بر آشکارساز که ماهیت آن‌ها فرآیندی نیست در روش اندازه‌گیری و بالطبع در مدل‌سازی خطا ایجاد کنند. دما، فشار، رطوبت، غبار، ارتعاش، میدان‌های مغناطیسی و الکترواستاتیکی از جمله عواملی هستند که وجود آن‌ها اثر خطاهای غیر فرآیندی بر آشکارساز دارند. این عدم قطعیت‌ها ممکن است نه فقط منشأ احتمالاتی داشته بلکه نیاز به تحلیل فازی نیز داشته باشند و به‌عنوان کار آینده می‌توان از منظر عدم قطعیت احتمالاتی نیز به تحلیل تعداد فوتون‌های دریافتی نگریست.

## ۶. نتیجه‌گیری

مسئله عملکرد سریع و به‌موقع در تعیین نوع و اندازه‌گیری مقدار مواد پرتوزای گاما برای به‌عنوان یکی از مسائل روز فناوری هسته‌ای مطرح است و این مقاله به پیشنهاد راه‌کاری برای مدل‌سازی خطی تعداد فوتون‌های آشکارسازی شده در

به‌طورقطع مدل ARMA یکی از ساده‌ترین روش‌های مدل‌سازی از منظر میزان محاسبات و حافظه مورد نیاز بوده و پیاده‌سازی آن به‌صورت زمان واقعی امکانپذیر است. این موضوع حائز اهمیت است که مسأله پیچیدگی محاسباتی و قابلیت پیاده‌سازی زمان واقعی دو مسئله مجزا هستند. یعنی ممکن است روشی در ذات طراحی خود مجبور باشد به داده‌هایی از زمان آینده (بعدی) برای تحلیل درستی محاسبات زمان فعلی دسترسی داشته باشد که این بافر موجب ایجاد تأخیر در سامانه شده و با افزایش قدرت محاسبات و حافظه قابل حل نیست که روش پیشنهادی این مقاله یعنی ARIMA برای مدل‌سازی تعداد پرتوگامای دریافتی از این منظر بسیار مناسب است.

در سال‌های اخیر برای تحلیل سری‌های زمانی، شیوه‌های آماری غیر پارامتری مورد توجه جدی پژوهشگران قرار گرفته است که محققین این مقاله نیز به این موضوع از منظر ماشین‌های کرنل توجه زیادی کرده‌اند. تفاوت اصلی مدل‌های غیر پارامتری و مدل‌های پارامتری برای فرآیندهایی مانند تعداد فوتون شمارش شده گاما، در رهایی روش‌های مدل‌سازی غیر پارامتری، از پیش‌فرض توزیع آماری فرآیند است. پیش‌بینی می‌شود معیارهای ارزیابی با استفاده از روش‌های مبتنی بر ماشین‌های کرنل، در مقایسه با روش پیشنهادی ARIMA در مدل‌سازی تعداد فوتون دریافتی به نتایج بهتری منجر شود ولی همان‌طور که گفته شد میزان پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی این مقاله به‌شدت کم‌تر است و البته هر دو قابلیت پیاده‌سازی به‌صورت زمان واقعی را دارند. برای تعیین دقیق پارامترهای مدل تعداد فوتون دریافتی، به تعداد مناسبی داده آموزشی بدست آمده در شرایط شناخته‌شده از قبیل منبع پرتوزای مرجع، ارتفاع مشخص، آشکارساز استاندارد و ... نیاز است. دقت تعیین پارامترهای مدل ARIMA با افزایش تعداد نمونه آموزشی مورد اطمینان بهبود پیدا می‌کند.

برای چشمه‌های مختلف با استفاده از روش میانگین متحرک خود همبسته ARMA نیز انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که گرچه بایاس مدل پیشنهادی ARIMA بیش‌تر از روش مدل‌سازی ARMA است ولی مقادیر متوسط مربع خطا (MSE)، میانه قدر مطلق انحراف (MAD) در هر پنج عنصر پرتوزا برای مدل پیشنهادی ARIMA کم‌تر از روش مدل‌سازی ARMA است.

بنابراین در مجموع روش پیشنهادی ARIMA در شرایط یکسان، داده‌های اندازه‌گیری واقعی پایش هوایی را بهتر مدل کرده و اعتبارسنجی مدل و نیز داده‌های شمارش واقعی فوتون‌های گاما مؤید این است که مدل‌سازی توسط الگوی ARIMA از روش ARMA بهتر عمل می‌کند.

انرژی‌های مختلف انواع مواد پرتوزا گاما پرداخته است. با به‌کارگیری این مدل‌های خطی، تعیین میزان و نوع آلودگی پرتوی با سرعت و دقت بیش‌تری انجام می‌گیرد و در نتیجه نوع و نحوه مقابله با گسترش آثار پرتوی سریع‌تر انجام می‌شود که این خود منجر به کاهش مشکلات و اثرات متعاقب حوادث هسته‌ای می‌شود. مدل‌سازی امضای گامای مواد پرتوزا به روش خطی قسمتی از طراحی سامانه پایش تعداد فوتون گاما است که در این مقاله به آن پرداخته شده است. پژوهش حاضر، الگوی میانگین متحرک خود همبسته یک‌پارچه (ARIMA) برای مدل‌سازی تعداد فوتون دریافتی از هر ماده پرتوزا را پیشنهاد می‌دهد. برای مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی ARIMA، مدل‌سازی شمارش تعداد فوتون گاما

## ۷. مراجع

- [1] R. Casanovas, J.J. Morant, M. Salvadó. Development and Calibration of a Real-Time Airborne Radioactivity Monitor Using Gamma-Ray Spectrometry on a Particulate Filter, IEEE Transactions on Nuclear Science, 61(2) (2014) 727–731.
- [2] E. Wilhelm, S. Gutierrez, N. Arbor, S. Ménard, A.M. Nourreddine. Study of different filtering techniques applied to spectra from airborne gamma spectrometry, 164 (2016) 268–279.
- [3] D. Srinivas, V. Ramesh Babu, I. Patra, S. Tripathi, M.S. Ramayya, A.K. 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, Journal of Environmental Radioactivity, 167 (2017) 1–12.
- [4] IAEA Technical report series 323, Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying, (1998).
- [5] R.L. Sander, M. Nadeau, R.L. Grasty. An airborne gamma snow survey in the James Bay region, Proceedings of the 65th Annual Eastern Snow Conference, Fairlee (Lake Morey), Vermont, USA (2008).
- [6] H. Loijens. Measurement of snow water storage in the lake superior basin using aerial gamma-ray spectrometry, Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques, 5(4) (2013) 40–54.
- [7] D.L. Dent, R.A. MacMillan, T.L. Mayr, W.K. Chapman, S.M. Berch. Use of Airborne Gamma Radiometric to Infer Soil Properties for a Forested Area in British Columbia, Journal of Ecosystems and Management, 14(1) (2013) 1–12.
- [8] R. Moonjuna, D.P. Shresthaa, V.G. Jettena, F. J.A. van Ruitenbeeka. Application of airborne gamma-ray imagery to assist soil survey: A case study from Thailand, Geoderma, 289(1) (2017) 196–212.
- [9] راستخواه، الهام، ذاکری. فریده، فرشیدپور. محمدرضا، رجب پور. محمدرضا. دزسنجی زیستی با استفاده از سنجش ریزهسته. مجله سنجش و ایمنی پرتو. ۵ (۲) (۱۳۹۶) ۳۹–۴۸.

- [10] G.E.P. Box, G.M. Jenkins, *Time Series Analysis, Forecasting and Control*, 5th Edition Holden-Day, Inc. San Francisco, CA, USA (2015) ISBN: 978-1-118-67502-1.
- [11] G. U. Yule. On a method of investigating periodicities in disturbed series, with special reference to Wolfer's sunspot numbers, *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*, 226 (1927) 67–298.
- [۱۲] رضائی مقدم. احمد، نظیفی فرد. محمد. بررسی رفتار الکترونیکی یک مدار دیودی در معرض تابش برای آشکارسازی پرتوهای گاما. *مجله سنجش و ایمنی پرتو*. ۱ (۳) (۱۳۹۲) ۲۶–۲۱.
- [13] B.R.S. Minty. Airborne gamma ray spectrometric background estimation using full spectrum analysis, *Geophysics*, 57(2) (1992) 279–287.
- [14] P.B. Siegel. Gamma Spectroscopy of Environmental Samples, *American Journal of Physics*, 81 (2013) 381–388.