

## توسعه روش فعال سازی با نوترون حرارتی (TNA) برای تشخیص و ردیابی مین های ضد نفر

فرناز قاضی مرادی\*<sup>۱</sup> - عظیم احمدی نیار - جواد رحیقی -

مرتضی جعفرزاده - حسین قدس - مهرداد عزیزی شمامی

سازمان انرژی اتمی - مرکز تحقیقات هسته ای - گروه فیزیک نوترون

### چکیده

در این تحقیق امکان تشخیص مین های پلاستیکی ضد نفر VS-50 و T-72A با استفاده از چشمه  $^{252}\text{Cf}$  به روش TNA در شرایط میدانی بررسی شده است. بررسی آماری نتایج تجربی نشان داده که تشخیص مین VS-50 با خطای ۱۰٪ با سیستم طراحی شده امکان پذیر است. با استفاده از محاسبات مونت کارلو شرایط هندسی و حفاظ گذاری مناسب، برای نوترون و گاما به منظور کاهش زمینه و افزایش دقت اندازه گیری مورد بررسی قرار گرفته است.

**کلید واژه ها:** فعال سازی نوترونی، تشخیص مواد منفجره، مین یابی، گامای آنی

### مقدمه

یکی از مشکلاتی که بشر امروز برای خود و نسل آینده بوجود آورده است، مدفون شدن بیش از صد میلیون مین در خاک است که جان صدها هزار انسان بی گناه را تهدید می کند. برآوردهای کارشناسی وجود ۱۰ تا ۱۶ میلیون مین در اراضی کشورمان را که از جنگ تحمیلی به جامانده است، تأیید می کند. سالیانه صدها نفر انسان بی گناه در اثر انفجار مین در اراضی آلوده کشته یا زخمی می شوند و این مسئله مانع از بازگشت زندگی عادی به منطقه جنگ زده و محیط زندگی مردم بخشی از خاک کشورمان شده است. در سالهای اخیر بکارگیری روشهای نوین هسته ای در ردیابی مواد منفجره مدفون شده در خاک، از جمله مین ها و گلوله های خمپاره عمل نکرده حاوی مواد منفجره مانند TNT، RDX و ترکیبات شیمیایی به جا مانده از جنگها به صورت گسترده ای توسعه یافته است. برای این منظور معمولاً از یک دستگاه مولد نوترون قابل حمل و یا چشمه نوترون  $^{252}\text{Cf}$  استفاده می شود، که اساس کار بر مبنای برهمکنش هسته ای  $(n, \gamma)$  با عناصر تشکیل دهنده مواد منفجره و جمع آوری طیف گامای آنی و تأخیری حاصل از این برهمکنش استوار است. چشمه  $^{252}\text{Cf}$  با نیمه عمر ۲/۶۵ سال و راندمان نوترونی  $2/3 \times 10^9$  n/s/mgr و میانگین انرژی نوترون ۲/۳ MeV برای استفاده در این روش چشمه مناسبی است. به ویژه دز کم گامای چشمه  $^{252}\text{Cf}$  (۰/۱۴ R/hr/mgr) و نیز

کم بودن انرژی گامای حاصل از شکافت خودبخودی کالیفرنیوم، بسته بندی آسانتر و قابل حمل بودن این چشمه از دیگر ویژگی های منحصر به فرد این چشمه نوترونی می باشد.

### ترکیب شیمیایی و خواص مواد منفجره

مهمترین عناصر تشکیل دهنده مواد منفجره عبارتند از: اکسیژن، نیتروژن، کربن و هیدروژن که عنصر اکسیژن جزء اساسی ترکیبات مواد منفجره جهت ایجاد واکنش انفجاری است. در جدول (۱) بعضی از خواص فیزیکی و شیمیایی مواد اولیه ای که عموماً در ساخت مواد منفجره از آنها استفاده می شود، ارائه شده است. [۱]

جدول (۱)- خواص فیزیکی و شیمیایی چند ماده منفجره

| Symbol | Name             | Molecular Weight | C | H | N | O  | Density (g/cm <sup>3</sup> ) |
|--------|------------------|------------------|---|---|---|----|------------------------------|
| TNT    | Trinitrotolene   | 227.13           | 7 | 5 | 3 | 6  | 1.65                         |
| RDX    | Hexogen          | 222.26           | 3 | 6 | 6 | 6  | 1.83                         |
| HMX    | Octogen          | 296.16           | 4 | 8 | 8 | 8  | 1.96                         |
| PETN   | Nitropenta       | 316.2            | 5 | 8 | 4 | 12 | 1.78                         |
| NG     | Nitroglycerin    | 227.09           | 3 | 5 | 3 | 9  | 1.59                         |
| AN     | Ammonium Nitrate | 80.05            | - | 4 | 2 | 3  | 1.59                         |
| DNB    | Dinitrobenzene   | 168.11           | 6 | 4 | 2 | 4  | 1.58                         |

برای ساخت مواد منفجره معمولاً از ترکیبات TNT، RDX، PETN و HMX با مقدار کمی از ترکیبات آلی از قبیل مومها (Waxes)، مواد پلاستیکی (Plasticizers)، تثبیت کننده ها (Stabilizers) و روغنها (Oiles) استفاده می شود. مشهورترین مواد منفجره عبارتند از ترکیب B (RDX-TNT)، ترکیب C4 (PETN-RDX-TNT)، ترکیب octal (HMX-TNT) و ترکیب Semtex-H (RDX-PETN)، که علاوه بر اکسیژن و نیتروژن دارای ترکیبات آلی از قبیل ترکیبات نیترو، نترات، کلرات و پرکلرات نیز هستند. [۲]

### استفاده در مین یابی

روشهای متفاوتی در آشکارسازی مواد منفجره با استفاده از نوترون وجود دارد. در اکثر این روشها، برهمکنش نوترون با عناصر موجود در مواد منفجره تولید پرتوگاما می کند که این پرتوهای گاما در یک سیستم طیف سنجی (Gamma Spectroscopy) مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. از آنجا که انرژی گامای حاصل به نوع برهمکنش انجام گرفته بین نوترون و هسته هدف و همچنین نوع عنصر هدف بستگی دارد، باجمع آوری طیف گامای حاصل و تجزیه و تحلیل این طیف می توان به نوع عناصر هسته هدف و نسبت این عناصر پی برد. در جدول (۲) تعدادی از این برهمکنش ها که در آشکارسازی مواد منفجره اهمیت دارند ارائه شده است.

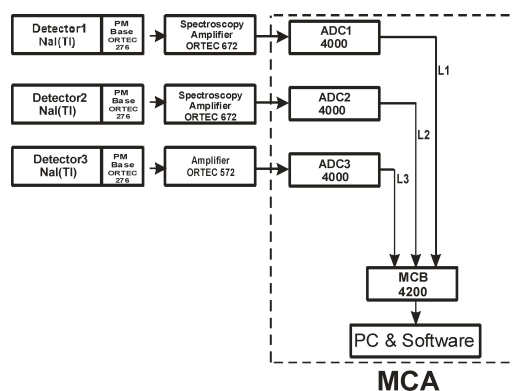
کلیه سیستم‌هایی که بر این اساس کار می‌کنند مانند (TNA (Thermal Neutron Analysis و FNA (Fast Neutron Analysis) حداقل باید دارای یک چشمه نوترون یا نوترون ژنراتور و یک سیستم آشکارسازی گاما باشند. متعارف‌ترین چشمه نوترونی مورد استفاده در روش TNA چشمه  $^{252}\text{Cf}$  با نیمه عمر ۲/۶ سال است که جدول (۲) - برهمکنش‌های هسته‌ای مورد استفاده در آشکارسازی و تشخیص مواد منفجره

| Element | Reactions                                  | Neutron Energy | Reaction Type       |
|---------|--|----------------|---------------------|
| H       | $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$           | Thermal        | Prompt              |
| C       | $^{12}\text{C}(n,n'\gamma)^{12}\text{C}$   | Fast(>5Mev)    | Prompt              |
| N       | $^{14}\text{N}(n,\gamma)^{13}\text{N}$     | Thermal        | Prompt              |
| N       | $^{14}\text{N}(n,n'\gamma)^{14}\text{N}$   | Fast(>3Mev)    | Prompt              |
| N       | $^{14}\text{N}(n,2n)^{13}\text{N}$         | Fast(>14Mev)   | Activation(9.9 min) |
| O       | $^{16}\text{O}(n,n'\gamma)^{16}\text{O}$   | Fast(>7Mev)    | Prompt              |
| O       | $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{O}$          | Fast(>9Mev)    | Activation(9.9 min) |
| Cl      | $^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$   | Thermal        | Prompt              |
| Cl      | $^{35}\text{Cl}(n,n'\gamma)^{35}\text{Cl}$ | Fast(>3Mev)    | Prompt              |
| Cl      | $^{37}\text{Cl}(n,p)^{37}\text{S}$         | Fast(>14Mev)   | Activation(9.9 min) |

نوترونهای حاصل از این چشمه در اثر شکافت خودبخودی با انرژی میانگین ۲/۵ MeV تولید می‌شود. [۳]

### سیستم اندازه‌گیری و طیف‌سنجی

در این تحقیق از یک هد از جنس پلی‌اتیلن به همراه سه آشکارساز یدورسیدیم مطابق شکل (۱) استفاده شده و آرایه الکترونیکی مطابق شکل (۲) برای جمع‌آوری طیف گاما بکارگرفته شده است. سیگنال خروجی از تقویت‌کننده‌ها به ورودی سه ADC جداگانه و خروجی ADC به ورودی یک MCB سه پارامتری متصل شده است. این سیستم طوری طراحی شده است که قابل حمل بوده و جابجایی آن توسط یک یا دو نفر به عنوان کاربر امکان‌پذیر باشد.



شکل (۲) - الکترونیک مورد استفاده در سیستم



شکل (۱) - آرایش هندسی سیستم اندازه‌گیری

هر کدام از آشکارسازهای موجود در سیستم با عناوین D1، D2، D3 و خطوط آشکارسازی به ترتیب با عناوین Line1، Line2، Line3 معرفی شده اند. اندازه گیری ها ابتدا با نمونه های اوره با اوزان متفاوت و سپس با دو عدد مین ضد نفر [T-72A, VS-50] انجام پذیرفته است. از آنجا که از MCB سه پارامتری و سه ADC بکار گرفته شده در این تحقیق برای اولین بار استفاده شده است، به منظور بررسی کارایی سیستم و تعیین میزان دقت دستگاهها در شرایط آزمایش، اندازه گیری ها بصورت تکرار متوالی از نمونه های اوره (۱۵۰ و ۱۰۰ و ۵۰ گرم) و مین های ضد نفر با چشمه  $^{252}\text{Cf}$  و نیز چشمه های استاندارد  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{60}\text{Co}$  انجام گرفته است. علاوه بر MCB و ADC، مشخصات آشکارسازهای یدور سدیم [بازده و قدرت تفکیک انرژی (FWHM)]، لامپ تکثیر کننده الکترونی و پیش تقویت کننده، مشخصات و پارامترهای تقویت کننده ها و عملکرد آنها در آهنگ های شمارش کم و زیاد (بیشتر از ۲۰۰۰۰ CPS) و (pole zero & shaping time) تاثیر آن در افزایش pileup بویژه در آهنگ شمارش زیاد و افزایش زمان مرگ (Dead time) در ADC، بررسی خطی بودن عملکرد ADC در شمارشهای بالا و نیز تاثیر افزایش LLD در عملکرد ADC، با استفاده از پالسر بصورت جامع مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و پس از این بررسی ها پارامترهای مناسب برای اجزای تشکیل دهنده سیستم آشکارسازی انتخاب شده است. [۴]

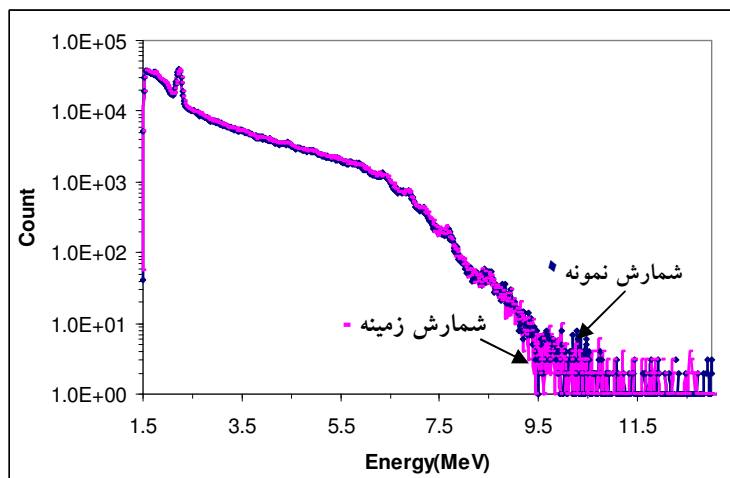
## نتایج

– اندازه گیری نمونه ۵۰ گرم اوره و مین های ضد نفر

پس از جمع آوری و ثبت طیف های گامای حاصل از ۵۰ گرم اوره و مین های ضد نفر [T-72A, VS-50]، مقادیر حد اطمینان برای شمارش زمینه مشخص شد. سپس با استفاده از آزمون جواب های انحرافی (Outliers test) امکان وجود جوابهای انحرافی در نتایج حاصل از ۵۰ گرم اوره و مین های ضد نفر برای ۹ سری اندازه گیری بررسی شد. اختلاف بین شمارش های حاصل از نمونه و زمینه برای ۶ سری اندازه گیری متوالی بدست آمده و جمع شمارش خالص خطوط آشکارسازی ۱ و ۲ برای ۵۰ گرم اوره و مین های VS-50 و T-72A به ترتیب برابر ۱۳۴ و ۲۳۸- بدست آمد. نتایج آزمون  $t$  نشان دهنده معنی دار بودن تفاوت بین شمارش های مربوط به نمونه و زمینه می باشد (جدول ۳).

جدول (۳) – نتایج حاصل از شمارش سه آشکارساز برای ۵۰ گرم اوره و مین های VS-50 و T-72A

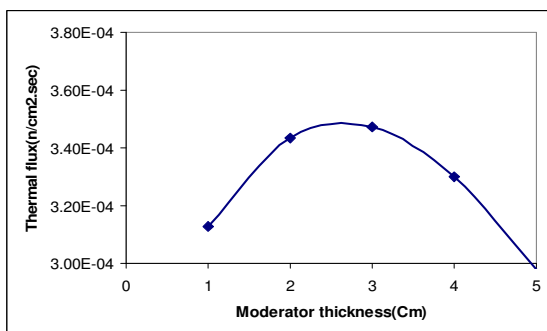
|               | ۵۰ گرم اوره | VS-50 | T-72A |
|---------------|-------------|-------|-------|
| تعداد داده ها | ۶           | ۶     | ۶     |
| میانگین       | ۵۱۰         | ۵۰۷   | ۴۹۵   |
| انحراف معیار  | ۹/۰۴        | ۴/۶۵  | ۷/۳۴  |
| آزمون $t$     | ۷/۲۳        | ۵/۵۰  | ۱/۸۲  |



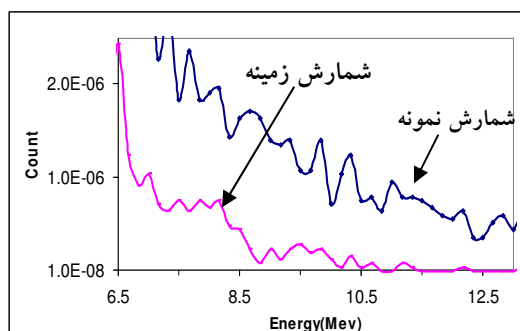
شکل (۳) - مقایسه طیف زمینه و طیف حاصل از نمونه ۵۰ گرم اوره توسط آشکارساز NaI(Tl)

- انتخاب آرایش هندسی مناسب با استفاده از کد MCNP

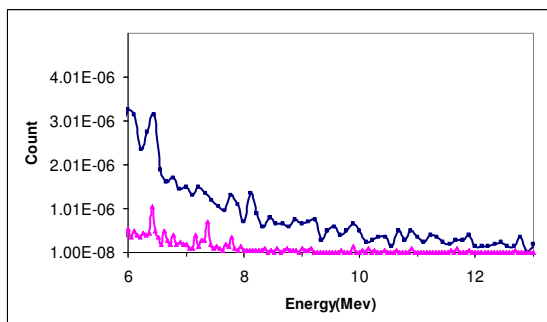
معمولاً برای محاسبات مربوط به تعیین ضخامت بهینه حفاظ سربی و آرایش هندسی مناسب از کدهای MCNP یا GEANT استفاده می‌شود [۵ و ۶]. در این تحقیق به منظور شبیه سازی سیستم آشکارسازی محاسبات مونت کارلو با استفاده از کد MCNP انجام پذیرفته و ضخامت بهینه کندکننده نوترون و زاویه مناسب آشکارسازها محاسبه شده است که نتایج محاسبات در شکل های (۴) تا (۷) نشان داده شده است.



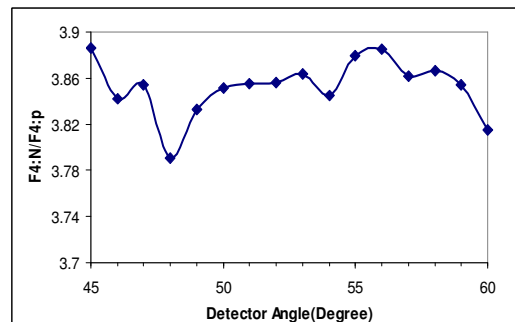
شکل (۵) - نمودار شار نوترون حرارتی بر حسب ضخامت کند کننده



شکل (۴) - مقایسه طیف زمینه و طیف حاصل از نمونه ۵۰ گرم اوره



شکل (۷) - مقایسه طیف حاصل از نمونه ۵۰ گرم اوره در زاویه های  $0^\circ$  و  $48^\circ$  در ناحیه انرژی (۹/۵-۱۱/۵ Mev)



شکل (۶) - تغییرات نسبت تعداد نوترون به فوتون به ازاء تغییرات زاویه در محل آشکارساز

## بحث و نتیجه گیری

بنابراین با تعیین دقیق ناحیه انرژی نیتروژن ( $9/5-11/5$  Mev)، سیستم آشکارسازی هد بدون حفاظ سربی (شکل ۱) قابلیت تشخیص ۵۰ گرم اوره را با خطای ۵٪ درصد و مین ضد نفر VS-50 را با خطای ۱۰٪ درصد در فاصله ۱۰ سانتیمتری از چشمه  $^{252}\text{Cf}$  و در سطح خاک را دارد. نتایج محاسبات مونت کارلو نشان می دهد که زاویه مناسب برای آشکارسازها ۴۸° نسبت به محور عمودی (شکل ۱) ماکزیمم شار نوترون حرارتی به ازای ۳ سانتی متر ضخامت کندکننده پلی اتیلنی در مقابل چشمه حاصل می شود (شکل ۵). به نظر می رسد با اعمال تغییرات حاصل از محاسبات MCNP در آرایش هندسی و حفاظ گذاری، امکان تشخیص مین T-72A (کوچکترین مین ضدنفر) نیز فراهم خواهد شد که در ادامه این تحقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## مراجع

[1]- Landmine Detection, DOD'S Research program Needs a Comprehensive Evaluation Strategy, April 2001.

[2]- Hidden Killers 1998, The global Landmine Crisis.  
<http://WWW.state.gov/www/global/arms/rpt-9809-demine-toc.html>

[3]- Californium-252 Symposium, Proceedings of a Symposium Edited by James J. Barker January 1969.

[۴]- جواد رحیقی-عظیم احمدی نیار-حسین قدس-مرتضی جعفرزاده-فرناز قاضی مرادی، توسعه روشهای نوین هسته ای در ردیابی مواد منفجره، گزارش داخلی - سازمان انرژی اتمی - مرکز تحقیقات هسته ای - گروه فیزیک نوترون، تاریخ تهیه تابستان سال ۱۳۸۵

[5]- T.Cousin's, T.A. Jones, The Development of a Thermal neutron Activation (TNA) System as a confirmatory Non-metallic Landmine Detector, Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry, Vol.235, No.1-2, 53-58(1998).

[6]- M.Palomba, G.D'Erasmus, A. Pantaelo, the Monte Carlo code CSSE for the simulation of realistic thermal neutron sensor devices for Humanitarian Demining, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, Vol(498), 384-396,(2003)