



SBUspect، نرم‌افزاری برای طیف‌سنجی پرتو گاما

مجید شهریار، شهریار بدیعی*، محمدصادق ناصری
دانشکده‌ی مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱، تهران - ایران

چکیده: طیف‌نمایی پرتو گاما در بسیاری از مسایل فیزیک و کاربردهای مختلف پرتو نظیر تجزیه‌ی مواد، استفاده‌ی گسترده‌ای دارد. طیف به دست آمده از چشمه‌های گاما که معمولاً با آشکارسازهای ژرمانیم یا سوسوزن‌های معدنی ثبت می‌شود، حاوی اطلاعاتی در زمینه‌ی انرژی پرتو و فعالیت چشمه‌ی نظیر آن است. SBUspect از روش ماریسکوتی برای تشخیص قله‌های موجود در طیف استفاده می‌کند و هم‌چنین توانایی برازش این قله‌ها با تابع گاوسی مناسب، شناسایی ایزوتوپ‌های موجود در چشمه، محاسبه‌ی فعالیت و فعالیت قابل تشخیص کمینه‌ی (MDA) ایزوتوپ‌های موجود در چشمه را دارد. صحت عملکرد این نرم‌افزار با استفاده از طیف‌های استاندارد سری G ارایه شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی ارزیابی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که برنامه‌ی SBUspect از ثبات خوبی برخوردار بوده و در پیدا کردن تک قله‌ها موفق عمل می‌کند. همانند اغلب نرم‌افزارهای تجاری موجود، این نرم‌افزار نیز در تشخیص و تجزیه و تحلیل قله‌های چندگانه و ضعیف دارای ضعف‌هایی است که نیاز به بهبود و توسعه دارد.

کلیدواژه‌ها: طیف‌سنجی، پرتو گاما، نرم‌افزار، SBUspect

SBUspect, a Software for Gamma Radiation Spectrometry

M. Shahriyari, Sh. Badiiei*, M.S. Naseri
Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1983969411, Tehran - Iran

Abstract: Gamma ray spectroscopy has extensive applications in many problems of physics and in varieties of radiation applications, such as material analysis. The obtained spectrum from a Gamma emitting source, which is usually detected by Germanium or inorganic scintillator detectors, contains information for the energy and activity of the source. The SBUspect uses Mariscotti method to detect the existing peaks in the spectrum. Furthermore, it has the ability to fit these peaks with appropriate Gaussian functions, to detect the elements in the source and to calculate the activity and the MDA of the existing elements in the source. The accuracy of the software is assessed by the I.A.E.A standard G series spectra. The results showed that the SBUspect has acceptable stability and functions well in finding single peaks. Like most other available commercial softwares, this software needs to be improved and developed in detecting and analyzing multiple and weak peaks.

Keywords: Spectrometry, Gamma Radiation, Software, SBUspect



۱. مقدمه

تاکنون نرم‌افزارهای متنوعی برای طیف‌نمایی پرتو گاما در دنیا ارایه شده است. مرور جامعی از نرم‌افزارهای مختلف در این زمینه به همراه عیب‌ها و مزیت‌های ویژه‌ی هر کدام در مرجع [۱] آمده است. نرم‌افزارهایی نظیر Gamma Plus، Gamma-Vision، Gamma Track، ActAn و GANAAS نمونه‌هایی از این نرم‌افزارها هستند. هم‌چنین در گزارش‌های فنی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، هر از چند گاهی به مقایسه‌ی نرم‌افزارهای طیف‌نمایی پرداخته شده و مزیت‌ها و عیب‌ها و کارآیی آن‌ها بررسی شده است [۲]. از نرم‌افزارهای موفق می‌توان به Gamma Vision اشاره نمود که از بسیاری از جنبه‌ها نرم‌افزار مورد بحث شباهت زیادی به آن دارد. برای مثال از روش ماریسکتی برای جستجوی قله‌ها، و چند جمله‌ای درجه دو برای مقیاس‌بندی انرژی استفاده می‌کند. در تولید نرم‌افزار SBUspect سعی شده است از ویژگی‌های مثبت نرم‌افزارهای مختلف بهره گرفته شود.

این نرم‌افزار در محیط زبان برنامه‌نویسی C++ و برای اجرا بر روی رایانه‌های شخصی نوشته شده است. استفاده از نرم‌افزار، آسان بوده و گزینه‌های مورد نیاز یا قابل استفاده برای کاربر به راحتی در اختیار وی قرار می‌گیرد.

ورودی نرم‌افزار فایل طیف پرتو گاما در قالب chn است که در آن بعد از یک قسمت عنوان^(۱) ۳۲ بایتی، شمارش هر کانال در داده‌های درست ۴ بایتی ذخیره شده است. نرم‌افزار ابتدا قسمت عنوان را که حاوی اطلاعات طیف است نمایش داده و سپس داده‌های عددی طیف را برای تحلیل مرحله‌های بعد می‌خواند. نتایج تحلیل علاوه بر ظاهر شدن روی صفحه‌ی نمایش، برای مراجعه‌های بعدی، در فایل‌های گزارش نیز ذخیره می‌شود.

هم‌چنان که در بخش ارزیابی عملکرد نرم‌افزار می‌توان دید SBUspect از لحاظ کارآیی با برنامه‌های تجاری دنیا قابل مقایسه است.

۲. الگوریتم‌ها و روش‌های ریاضی و محاسباتی

۱.۲ مدل ریاضی برای قله‌ها و زمینه‌ی مربوط به هر قله برای مدل کردن قله‌ها از تابع گاوسی ساده و برای زمینه از خط راست استفاده شده است [۳]

$$N_i = A \exp\left[-(i - i_0)^2 / (2\sigma^2)\right] + B + C(i - i_0) \quad (1)$$

که در آن، C ، B ، A ، σ و i_0 ، به ترتیب، شیب، عرض از مبدأ خط راست مربوط به زمینه، دامنه، انحراف معیار و مرکز تابع گاوسی مربوط به قله، i شماره‌ی کانال و N_i شمارش مربوط به هر کانال است.

علت استفاده مدل (۱) به الگوریتم جستجوی قله مربوط است و در بخش ۲.۲ به آن پرداخته شده است.

رابطه‌ی بین پهنا‌ی نیم‌ارتفاع^(۲) FWHM و انحراف استاندارد هر قله این است [۳]

$$FWHM = \Gamma = 2.355\sigma \quad (2)$$

۲.۲ جستجوی قله

برای جستجوی قله از الگوریتم ماریسکتی استفاده شده است [۱]، [۳]. در این روش از طیف، مشتق دوم گسسته گرفته می‌شود. زمینه، چون با خط راست مدل شده است، در فرایند دو بار مشتق‌گیری حذف می‌شود و از رابطه‌ی (۱) تنها مشتق دوم تابع گاوسی باقی می‌ماند. در نتیجه قله‌ها در جایی وجود دارند که مشتق دوم طیف غیر صفر باشد.

نکته‌ی مهم این است که طیف مشتق دوم، نوسان و افت و خیز آماری بالایی دارد و لازم است هموار شود. ماریسکتی اثبات کرده است که مقدار بهینه‌ی تعداد فرایند هموارسازی ۵ بار است [۳]. یعنی اگر طیف مشتق دوم را ۵ بار هموار کنیم به بهترین طیف برای تحلیل مراحل بعد می‌رسیم. وی هم‌چنین نشان داده است که ضریب‌هایی وجود دارند که اگر در طیف اصلی ضرب شوند، فرایند دو بار مشتق‌گیری و ۵ بار هموارسازی هم‌زمان و به راحتی انجام می‌شود.

در نرم‌افزار SBUspect این ضریب‌ها در برنامه‌ی جداگانه‌ای محاسبه و برای استفاده به برنامه‌ی فرعی جستجوی قله ارسال می‌شوند.

هموارسازی، فرایندی است که در آن هر نقطه با تعدادی نقطه‌های برابر در دو سمت خود در نظر گرفته می‌شود، سپس یک تابع چند جمله‌ای از هر درجه‌ی دلخواه کاربر بر این مجموعه از نقطه‌ها برازش می‌شود. در نهایت عرض تابع براز شده، عرض نقطه‌ی وسط را اصلاح می‌کند. در نتیجه برای هموارسازی نیاز به برازش خطی است. البته در عمل، هموارسازی به روش ساده‌تری انجام می‌شود. با استفاده از جبر خطی و روابط ماتریسی، ضریب‌هایی به دست می‌آید که اگر در این مجموعه از



وجود ندارد. روی محور، شماره‌ی کانال از طریق مقیاس‌بندی انرژی به انرژی تبدیل می‌شود. برای این کار ۶ زوج کانال/ انرژی به نرم‌افزار داده می‌شود. سپس یک رابطه‌ی درجه ۲ چند جمله‌ای به این مجموعه، برازش می‌شود،

$$E(\text{keV}) = a \times ch^2 + b \times ch + c \quad (3)$$

که در آن، a ، b و c ثابت‌های چندجمله‌ای درجه ۲ هستند که به وسیله‌ی برنامه‌ی فرعی برازش خطی محاسبه می‌شوند. ch شماره‌ی کانال و E انرژی نظیر را نشان می‌دهد.

۵.۲ مقیاس‌بندی بازده

هدف این بخش به دست آوردن رابطه‌ی برای بازده آشکارسازی برحسب انرژی است:

$$\varepsilon = f(E) \quad (4)$$

بازده، حاصل تقسیم تعداد پرتوهای به طور کامل جذب شده در آشکارساز به تعداد کل پرتوهای گسیل شده از چشمه است. در این مرحله، ابتدا حالت‌های خاصی مثلاً آشکارسازهای HPGe و NaI(Tl) برای چشمه‌ی نقطه‌ای در فاصله‌ی ۵ cm در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. اطلاعات مربوط به بازده در این حالت‌های خاص پیش از این به وسیله‌ی کد MCNP محاسبه شده و تابع مناسب، بر آن‌ها برازش داده شده و پارامترهای آن در اختیار کاربر قرار می‌گیرد.

اگر این حالت‌های خاص مربوط به آزمایش کاربر نبود، گزینه‌ای برای ورود مجموعه‌ی دلخواه انرژی/ بازده برای هر تعداد نقطه‌ی دلخواه کاربر وجود دارد.

بعد از اتمام ورود داده‌ها توسط کاربر، یک سهمی برای لگاریتم بازده برحسب لگاریتم انرژی به طور خطی برازش شده و ثابت‌های برازش به کاربر نمایش داده می‌شود

$$\ln(\varepsilon) = a \times (\ln(E))^2 + b \times \ln(E) + C \quad (5)$$

a ، b و C ثابت‌های برنامه‌ی فرعی برازش هستند.

نقطه‌ها ضرب شود، عرض نقطه‌ی وسط را اصلاح می‌کند. اطلاعات جامع درباره‌ی هموارسازی و این ضریب‌ها در مرجع [۴] در دسترس است.

با توجه به این که تعداد نقطه‌ها در دو سمت نقطه‌ی مورد نظر یکسان است، تعداد کل نقطه‌ها، عددی فرد خواهد بود. با انجام آزمایش‌های مختلف روی طیف‌های پرتو گاما، مشخص شد که بهترین نتایج با تعداد پنج نقطه حاصل می‌شود و این مقدار به طور پیش فرض به کد SBUspect وارد شد.

در صورت نیاز می‌توان طیف هموار شده را از نو هموار نمود و این عمل را تا حصول نتیجه‌ی دلخواه ادامه داد.

با اعمال شرط‌هایی بر روی طیف مشتق دوم، قله‌های احتمالی استخراج، و سپس با اعمال شرط‌های بیش‌تر قله‌های زاید حذف می‌شوند تا در نهایت قله‌های درست، فهرست شوند [۳]. یکی از این شرط‌ها این است که داده‌ی مربوط به طیف مشتق دوم در کانال قله، از دو برابر انحراف معیار این کانال بزرگ‌تر باشد. شرط‌های ریاضی دیگر، تعداد نقطه‌های مورد انتظار در نواحی مختلف طیف مشتق دوم را برآورد می‌کند.

نرم‌افزار SBUspect برای کاربرد خودکار طراحی شده است و اگر قله‌ای را پیدا نکند، امکان ورود دستی قله به برنامه وجود ندارد.

۳.۲ برازش قله‌ها

قله‌ها بعد از شناسایی شدن، باید با مدل (۱) برازش شوند. نرم‌افزار SBUspect برای برازش از روش حداقل مربع‌ها^(۳) بهره می‌گیرد [۵].

در مدل ریاضی مورد استفاده‌ی نرم‌افزار SBUspect، ۵ پارامتر غیرخطی σ ، C ، B ، A و I_0 باید به وسیله‌ی برنامه‌ی فرعی برازش محاسبه شوند [۱]. برای حدس اولیه‌ی I_0 ها (مکان قله‌ها) از خروجی برنامه‌ی فرعی جستجوی قله استفاده می‌شود و با توجه به موقعیت هر قله، نرم‌افزار می‌تواند یک حدس اولیه‌ی حدودی برای سایر پارامترها در نظر گیرد و برازش را انجام دهد.

۴.۲ مقیاس‌بندی انرژی

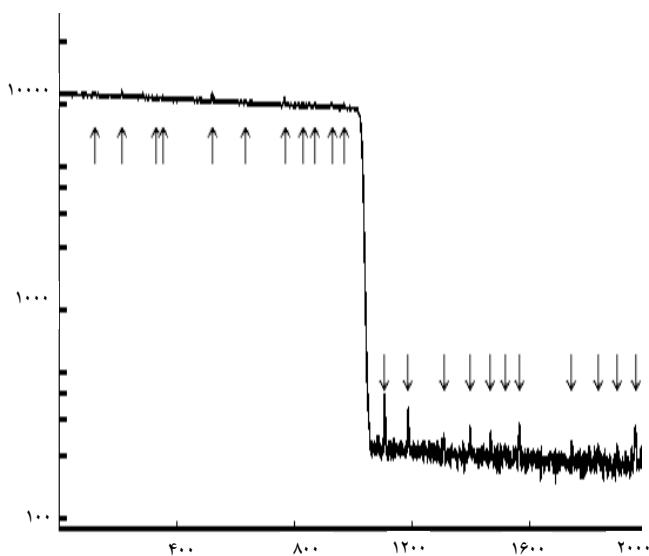
در تمام نرم‌افزارهای طیف‌نمایی پرتو گاما این بخش ضروری وجود دارد، زیرا بدون مقیاس‌بندی انرژی امکان شناسایی عناصر

طیف، G1100، شامل ۲۰ قله‌ی معمولی است. طیف دیگر، G1200، شامل ۲۲ قله‌ی بسیار ضعیف است (شکل ۱) و قدرت نرم‌افزارها را در شناسایی قله‌های ضعیف می‌سنجد. طیف‌های G1300 تا G1305 تقریباً ۶ طیف یکسان هستند که هر کدام در معرض نوفه‌ی آماری جداگانه‌ای قرار گرفته و ثابت نرم‌افزارها را در مواجهه با تغییرات تصادفی و آماری در طیف‌ها می‌سنجند (شکل ۲). طیف آخر، G1400، شامل ۹ قله‌ی دوگانه با فواصل بین دو قله‌ی متفاوت است و قدرت نرم‌افزارها را در مواجهه با قله‌های دوگانه تعیین می‌کند (شکل ۳).

۲.۳ آزمایش برنامه‌های SBUspect، Gamma vision و Hypermet-pc با طیف‌های استاندارد

طیف‌های استاندارد با استفاده از SBUspect مورد تحلیل قرار گرفته و مقایسه‌ی نتایج تحلیل این نرم‌افزار با نتایج تحلیل نرم‌افزارهای تجاری Gamma vision و Hypermet-pc در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. برای امکان‌پذیر نمودن مقایسه‌ی کیفیت برازش در نرم‌افزارهای مختلف، مقدار خطای نسبی مساحت سطح زیر هر قله، از رابطه‌ی زیر محاسبه شد،

$$\left| \frac{\text{مساحت سطح زیر قله‌ی محاسبه شده - مساحت سطح انتظاری}}{\text{مساحت سطح انتظاری}} \right| = \text{خطای نسبی مساحت} \quad (9)$$



شکل ۱. طیف مرجع G1200.

۶.۲ مساحت سطح قله‌ها، شناسایی ایزوتوپ‌ها و محاسبه‌ی فعالیت آن‌ها و MDA^(۴) هر قله

مساحت سطح زیر هر قله با انتگرال‌گیری از تابع گاوسی برازش داده شده با قله به دست می‌آید [۱]

$$S = 1,064 \times A \times FWHM \quad (6)$$

نرم‌افزار به کتابخانه‌ای از رادیونوکلیدهای مهم گاماها به همراه انرژی پرتوهای گامای گسیل شده از آن‌ها و تعداد پرتو به ازای یک واپاشی مجهز است. اطلاعات کتابخانه از نرم‌افزارهای تجاری معتبر نظیر Gamma Vision و Nuclear Chart استخراج شده است.

بعد از جستجوی قله و مقیاس‌بندی انرژی، انرژی قله‌های پیدا شده در طیف، مشخص و از مقایسه‌ی آن با انرژی ایزوتوپ‌ها در کتابخانه (نزدیکی در حد یک حد مجاز قابل تنظیم در نرم‌افزار) ایزوتوپ شناسایی و فعالیت آن محاسبه می‌شود

$$\text{Activity (Bq)} = \frac{S}{\epsilon \eta_{\gamma} t_c} \quad (7)$$

که در آن، η_{γ} تعداد پرتو گاما در هر واپاشی، t_c زمان طیف‌گیری، ϵ بازده مطلق تمام انرژی آشکارساز در انرژی مورد نظر و S مساحت سطح خالص زیر قله است.

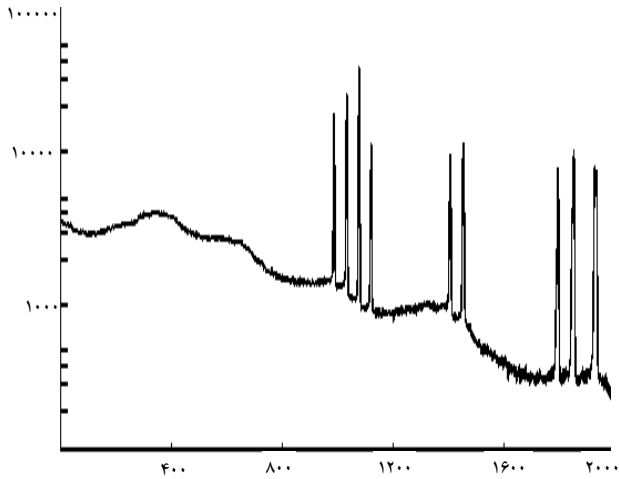
مطابق رابطه‌ی کوری فعالیت قابل تشخیص کمینه برای ایزوتوپ شناسایی شده محاسبه می‌شود [۶]،

$$\text{MDA(Bq)} = \frac{N_D}{\epsilon \eta_{\gamma} t_c}, \quad N_D = 4,653 \sqrt{N_B} + 2,706 \quad (8)$$

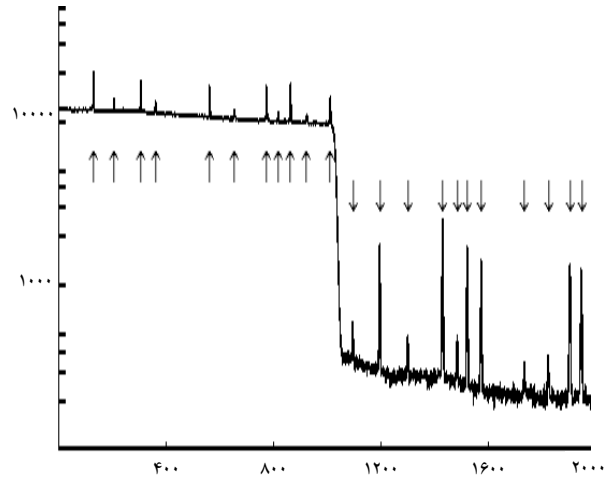
که در آن، N_B مجموع شمارش‌های زمینه‌ی زیر قله‌ی مورد نظر می‌باشد.

۳. ارزیابی عملکرد نرم‌افزار

۱.۳ طیف‌های آزمون سری G1 آژانس بین‌المللی انرژی اتمی این طیف‌ها مشتمل بر ۹ طیف استاندارد ارایه شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی برای مقایسه‌ی نرم‌افزارها است [۷]. اولین



شکل ۳. طیف مرجع G1400.



شکل ۲. طیف‌های مرجع G1300 تا G1305.

جدول ۱. نتایج مربوط به طیف G1300

موقعیت قله	مساحت سطح انتظاری زیر قله	SBUSpect			Gamma vision			Hypermet-pc		
		موقعیت قله	سطح زیر قله	خطای نسبی سطح زیر قله	موقعیت قله	سطح زیر قله	خطای نسبی سطح زیر قله	موقعیت قله	سطح زیر قله	خطای نسبی سطح زیر قله
129,26	23521,00	129,26	24482±34	0,04	129,26	23086±4	0,02	130,31	23557±317	0,02
206,18	4913,89	206,14	5244±353	0,07	206,08	5091±42	0,04	207,25	5373±218	0,09
305,31	19070,25	305,33	20480±35	0,07	305,34	19039±5	0,02	306,38	19346±376	0,01
360,50	5459,41	-	-	-	360,60	5183±51	0,05	361,50	5380±404	0,01
562,13	18241,21	562,13	14610±34	0,2	562,12	18908±5	0,04	563,22	18341±345	0,05
654,68	4943,85	654,61	4540±357	0,08	654,72	5239±49	0,06	655,69	5338±347	0,08
773,95	21972,79	773,89	23692±32	0,03	773,90	22534±5	0,03	775,00	22565±430	0,03
816,95	4598,07	817,31	4530±359	0,01	816,98	5064±56	0,1	818,18	5267±310	0,15
862,66	25772,68	862,78	28949±32	0,12	862,66	25383±5	0,02	863,80	27115±435	0,05
923,59	5053,27	923,48	6907±320	0,37	923,46	5975±55	0,18	924,55	5408±380	0,07
1010,6	18315,59	1010,65	33677±28	0,24	1010,93	56678±1	2,1	1012,11	12383±6576	0,32
1094,4	1088,40	1094,53	1399±60	0,29	1094,43	1181±10	0,09	1095,57	1122±72	0,03
1194,7	6067,20	1194,80	7628±62	0,26	1194,78	6118±12	0,08	1195,90	6279±122	0,03
1299,2	922,88	1299,12	2295±66	1,5	1299,06	941±113	0,02	1300,26	987±76	0,07
1429,3	8708,66	1429,36	10786±55	0,24	1429,33	9956±14	0,14	1430,43	10224±137	0,17
1483,3	861,64	1483,32	2348±69	1,6	1483,38	1041±10	0,2	1484,62	1072±77	0,25
1521,0	7000,00	1521,00	10174±34	0,45	1521,11	6901±13	0,01	1522,12	6965±116	0,05
1573,1	5404,99	1573,17	6513±69	0,2	1573,19	5513±12	0,02	1574,37	5573±124	0,03
1733,9	637,79	-	-	-	1733,75	755±96	0,2	1734,80	784±59	0,25
1823,0	5000,00	1822,54	2089±34	3,2	1822,51	925±99	0,85	1823,59	1041±86	1,08
1903,3	5864,01	1903,35	5906±76	0,07	1903,34	5833±13	0,07	1904,46	5970±133	0,02
1947,0	7500,00	1946,09	6887±62	0,08	1946,96	5757±12	0,23	1947,19	5970±133	0,2



جدول ۲. نتایج مربوط به طیف G1۴۰۰

موقعیت انتظاری قله	مساحت سطح انتظاری زیر قله	SBUspect			Gamma vision			Hypermet-pc		
		موقعیت قله	سطح زیر قله	خطای نسبی سطح زیر قله	موقعیت قله	سطح زیر قله	خطای نسبی سطح زیر قله	موقعیت قله	سطح زیر قله	خطای نسبی سطح زیر قله
۹۸۵,۶۱	۶۱۲۰,۲۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۹۸۶,۶۱	۶۱۲۰,۴۴	۹۸۶,۵۳	۶۳۱۰۵±۲۰۱	۰,۰۳	۹۸۶,۵۱	۶۸۳۲۶±۳۳۷	۰,۱۲	۹۸۷,۶۳	۶۹۷۷۴±۵۳۱	۰,۱۴
۱۰۳۱,۶۱	۲۳۵۴,۱۹	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۰۳۲,۶۱	۷۰۶۲۳,۵۸	۱۰۳۲,۳۸	۹۶۲۷۴±۲۰۰	۰,۳۶	۱۰۳۲,۳۵	۹۵۷۳۹±۳۶۹	۰,۳۶	۱۰۳۳,۴۷	۹۷۰۷۸±۵۲۶	۰,۳۷
۱۰۷۶,۴۳	۷۴۵۵۳,۰۲	۱۰۷۶,۹۲	۱۴۴۰۱۵±۲۰۰	۰,۹۳	۱۰۷۶,۹۱	۱۴۷۳۲۰±۴۲۷	۰,۹۸	۱۰۷۸,۰۰	۱۴۹۶۷۲±۸۶۰	۱
۱۰۷۷,۴۳	۷۴۵۵۳,۰۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۱۱۷,۴۳	۴۱۴۱,۹۸	-	-	-	-	-	-	۱۱۱۸,۷۳	۶۱۲۰±۴۵۸	۰,۴۸
۱۱۲۰,۴۳	۴۱۴۲,۸۲	۱۱۲۰,۳۲	۴۳۱۸۹±۱۸۲	۰,۰۴	۱۱۲۰,۲۷	۴۴۷۴۲±۲۷۴	۰,۰۸	۱۱۲۱,۵۶	۳۹۰۴۶±۵۷۷	۰,۰۶
۱۴۰۳,۳۵	۱۰۱۴۲,۶۳	-	-	-	-	-	-	۱۴۰۴,۳۸	۱۲۲۲۱±۴۶۹	۰,۰۲
۱۴۰۶,۳۵	۳۰۴۲۶,۴۹	۱۴۰۵,۷۹	۴۷۵۳۱±۲۰۴	۰,۵۶	۱۴۰۵,۷۵	۴۷۰۳۳±۲۹۵	۰,۵۵	۱۴۰۷,۴۵	۳۵۳۷۸±۸۰۸	۰,۱۶
۱۴۵۱,۳۵	۲۸۵۲۶,۵۵	۱۴۵۲,۸۲	۷۲۳۹۳±۲۰۱	۱,۵۴	۱۴۵۲,۸۹	۶۶۵۵۶±۳۲۰	۱,۳۳	۱۴۵۳,۸۳	۶۸۷۹۲±۲۳۳۳	۱,۴۱
۱۴۵۴,۳۵	۲۸۵۲۶,۵۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۷۸۹,۰۰	۳۰۶۵۸,۳۶	-	-	-	-	-	-	۱۷۸۹,۹۶	۳۳۶۰±۱۵۷	۰,۸۹
۱۷۹۵,۰۰	۴۰۶۳۵,۰۰	۱۷۹۴,۶۹	۳۵۵۷۶±۱۷۲	۰,۱۲	۱۷۹۴,۶۷	۳۶۰۹۱±۲۵۱	۰,۱۱	۱۷۹۵,۸۳	۳۹۵۴۳±۲۹۴	۰,۰۳
۱۸۴۶,۰۰	۶۹۵۴۸,۰۰	-	-	-	-	-	-	۱۸۴۶,۸۲	۱۶۶۸۲±۱۹۰	۰,۷۶
۱۸۵۲,۰۰	۳۶۵۴,۰۰	۱۸۶۰,۸۹	۲۵۴۶۵±۶۵۰	۰,۰۳	۱۸۵۱,۵۱	۶۷۹۲۵±۳۲۲	۰,۸۷	۱۸۵۲,۷۹	۵۱۹۰۶±۲۹۵	۰,۴۳
۱۹۲۸,۰۰	۲۱۵۴۳,۳۶	۱۹۲۶,۶۷	۱۳۷۲۱±۲۵۵	۰,۳۶	۱۹۲۹,۷۵	۷۶۰۵۶±۳۳۷	۲,۵۳	۱۹۲۸,۱۳	۳۹۱۴۲±۳۵۹	۰,۸۲
۱۹۳۴,۰۰	۳۲۵۶۴,۰۰	-	-	-	-	-	-	۱۹۳۴,۱۰	۳۸۵۳۳±۳۷۳	۰,۱۸

جدول ۳. نتایج مربوط به طیف G1۲۰۰

موقعیت انتظاری قله	مساحت سطح انتظاری زیر قله	SBUspect			Gamma vision			Hypermet-pc		
		موقعیت قله	سطح زیر قله	خطای نسبی سطح زیر قله	موقعیت قله	سطح زیر قله	خطای نسبی سطح زیر قله	موقعیت قله	سطح زیر قله	خطای نسبی سطح زیر قله
۱۱۸,۲۶	۵۲۱,۱۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۲۱۳,۱۳	۱۵۰۵,۱۷	۲۱۲,۹۸	۱۱۱۷±۵۳	۰,۲۶	۲۱۲,۹۸	۱۴۰۶±۷۴	۰,۰۷	-	-	-
۲۸۴,۳۰	۹۰۰,۸۲	۲۸۴,۳۳	۲۳۸۶±۱۵۵	۱,۶۵	۲۸۴,۱۹	۹۳۳±۲۵	۰,۰۴	-	-	-
۳۵۲,۴۹	۴۸۷,۲۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۵۲۰,۱۱	۲۶۷۸,۷۵	۵۱۹,۳۲	۱۸۳۴۸±۴۵۵	۵,۸۵	۵۲۰,۰۲	۲۷۲۰±۳۶	۰,۰۲	۵۲۰,۹۵	۳۲۵۵±۵۱	۰,۲۲
۶۳۱,۶۷	۱۱۶۸,۰۵	۶۳۱,۱۸	۴۲۵۰±۶۹	۲,۶۴	۶۳۱,۲۳	۹۱۴±۲۳	۰,۲۲	۶۳۲,۲۴	۱۳۶۴±۱۸	۰,۱۷
۷۶۵,۹۳	۲۲۶۴,۳۲	۷۶۶,۱۷	۲۴۵۲±۳۰	۰,۰۸	۷۶۶,۱۷	۲۰۵۴±۳۵	۰,۰۹	۷۶۷,۱۲	۲۴۳۳±۲۹	۰,۰۷
۸۲۵,۹۳	۱۳۷۴,۰۲	۸۲۵,۵۳	۳۹۵۳±۳۰۵	۱,۸۸	۸۲۵,۵۰	۹۹۱±۷۴	۰,۲۸	۸۲۶,۹۴	۱۵۲۲±۵۷	۰,۱۱
۸۶۹,۶۲	۱۱۹۴,۳۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۹۲۶,۵۵	۱۹۰۰,۳۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۹۶۶,۵۹	۱۵۲۸,۰۰	-	-	-	-	-	-	۹۶۸,۰۸	۱۷۸۴±۵۶	۰,۱۷
۱۱۰۶,۴۰	۸۰۵,۵۳	۱۱۰۵,۷۹	۲۵۷۱±۲۵۰	۲,۱۹	۱۱۰۶,۵۴	۷۶۹±۱۲	۰,۰۴	۱۱۰۷,۶۴	۸۷۲±۱۸	۰,۰۸
۱۱۸۶,۷۶	۵۴۲,۳۸	۱۱۸۶,۷۰	۱۲۶۶±۴۶	۱,۳۴	۱۱۸۶,۷۵	۵۹۷±۲۰	۰,۱۰	۱۱۸۷,۷۹	۵۵۳±۴۲	۰,۰۲
۱۳۰۸,۲۰	۲۵۲,۴۹	۱۳۰۸,۳۰	۳۶۴±۸	۰,۴۴	-	-	-	-	-	-
۱۳۹۷,۳۵	۲۶۹,۷۱	-	-	-	۱۳۹۷,۶۱	۳۲۶±۱۴	۰,۲۱	-	-	-
۱۴۶۶,۳۵	۲۵۸,۵۲	۱۴۶۶,۷۳	۸۷۲±۴۶	۲,۳۸	۱۴۶۶,۵۲	۲۸۷±۱۵	۰,۱۱	۱۴۶۷,۷۸	۲۶۱±۱۷	۰,۰۱
۱۵۱۶,۰۹	۱۰۶,۳۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۵۶۵,۱۷	۴۸۱,۸۴	۱۵۶۵,۲۷	۱۲۱۲±۸۰	۱,۵۲	-	-	-	۱۵۶۶,۰۸	۵۲۳±۳۰	۰,۰۹
۱۷۴۲,۸۹	۱۷۰,۵۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۸۳۳,۶۲	۱۳۶,۱۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۸۹۸,۲۹	۸۷,۴۹	-	-	-	-	-	-	۱۹۰۰,۰۵	۱۴۸±۱۰	۰,۰۷
۱۹۵۹,۹۲	۵۰۵,۸۱	۱۹۶۰,۳۴	۵۸۳±۳۱	۰,۱۵	۱۹۵۹,۷۱	۵۴۲±۳۸	۰,۰۷	۱۹۶۰,۹۰	۴۸۱±۲۴	۰,۰۵



۴. بحث و نتیجه‌گیری

۱.۴ نتایج مربوط به برنامه‌ی SBUSpect

نتایج مربوط به طیف ۱۲۰۰ رضایت‌بخش نیست بدین معنی که برنامه برای یافتن قله‌های بسیار ریز باید تقویت شود. نتایج مربوط به طیف‌های ۱۳۰۰ تا ۱۳۰۵ رضایت‌بخش است. قله‌های این طیف‌ها به خوبی پیدا شده‌اند و تعداد قله‌های پیدا نشده در هر طیف حدود ۲ تا است. در هر طیف نهایتاً یک قله اضافی پیدا شده است. نتایج این طیف‌ها نشان می‌دهد که نرم‌افزار از ثبات خوبی برخوردار است. در برخی موارد اختلافی بین مساحت محاسبه شده‌ی زیر قله و مساحت مورد انتظار وجود دارد که ناشی از خطا در برنامه‌ی فرعی برازش غیرخطی است. در برازش غیرخطی از روش‌های تکراری استفاده می‌شود و به محض این که اختلاف مجذور کی طیف در دو مرحله‌ی متوالی از یک مقدار خطا کم‌تر شود، به اجرای برنامه فرعی بعدی خاتمه داده شده و پارامترها گزارش می‌شود. ممکن است پارامترها، تابع گاوسی را کمی بزرگ‌تر یا کمی کوچک‌تر از مقدار آرمانی ارائه دهند. خطا جزء جدا ناشدنی برازش غیرخطی است. البته می‌توان با بهره‌گیری از روش‌های قوی‌تر برازش نظیر مارکوورت-لونبرگ^(۵) و هم‌چنین تحمیل شرایط دقیق‌تر هنگام خروج از برنامه‌ی فرعی به نتایج دقیق‌تری دست یافت. یک دلیل دیگر اختلاف مساحت‌ها می‌تواند ریشه در انحراف شکل قله از یک تابع گاوسی آرمانی داشته باشد که در این صورت با اصلاح مدل نتایج دقیق‌تری حاصل خواهد شد.

نتایج مربوط به طیف ۱۴۰۰ نشان می‌دهد که برنامه برای جداسازی قله‌های دوگانه باید تقویت شود.

۲.۴ مقایسه با نتایج برنامه‌ی Gamma vision

نتایج مربوط به جستجوی قله‌های طیف‌ها بسیار نزدیک به نتایج برنامه‌ی Gamma vision است. برنامه‌ی Gamma vision مساحت قله‌ها را به طور نسبی بهتر محاسبه می‌کند. نتایج مربوط به طیف ۱۲۰۰ نشان می‌دهد که برنامه‌ی Gamma vision نیز باید در مورد قله‌های ضعیف تقویت شود. نتایج مربوط به طیف ۱۴۰۰ (قله‌های دوگانه) بسیار نزدیک به نتایج Gamma vision است.

۳.۴ مقایسه با نتایج برنامه‌ی Hypermet-pc

نتایج مربوط به برنامه‌ی قبلی بسیار نزدیک به این برنامه است. در مورد نقاط قوت این برنامه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مکان قله‌ها را با دقت خوبی محاسبه می‌کند.
- مساحت قله‌ها نیز خطای نسبتاً قابل قبولی دارد.
- برنامه در جستجوی قله‌های دوگانه قوی عمل می‌کند (طیف G1400).

برنامه نقطه‌ی ضعف‌هایی نیز دارد، نظیر:

- قله‌های زاید شناسایی شده تعداد بالایی دارد،
- مساحت سطح زیر قله‌های دوگانه با خطا همراه است (طیف G1400)،
- ثبات برنامه نسبتاً پایین است (طیف‌های G1305-G1300)،

پی‌نوشت‌ها

۱. Header
۲. Full Width at Half Maximum
۳. Least Squares
۴. Minimum Detectable Activity
۵. Marquardt-Levenberg



1. Sh. Badiee, Supervised by: M. Shahriari, M.S. Naseri, Development of a software for gamma ray spectrometry, Thesis for the degree of Masters of Science, Shahid Beheshti University (2010).
2. Intercomparison of gamma ray analysis software packages, IAEA Tecdoc (1998).
3. M.A. Mariscotti, A method for automatic identification of peaks in the presence of background and its application to spectrum analysis, Nuclear Instrument and Methods, 50(2) (1967) 309–320.
4. A. Savitzky, M.J.E. Golay, Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, Analytical Chemistry, 36(8) (1964) 1627-1639.
5. Ph. R. Bevington, D. Keith. Robinson, Data reduction and error analysis for the physical sciences, Third edition (2003).
6. N. Tsoufanidis, Measurement and detection of radiation (1995).
7. D. Gilmore, www.Test Spectra-Practical Gamma-Ray Spectroscopy. mht, Edition (2) (2010).