



## تعیین فعالیت آشکارپذیر کمینه برای طیف‌سنج گامای AT1315

صالح اشرفی\*، طاهره حدیثی‌نیا

گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، صندوق پستی: ۱۶۳-۵۱۶۶۵، تبریز - ایران

**چکیده:** فعالیت آشکارپذیر کمینه، حداقل فعالیت است که سیستم می‌تواند، با یک سطح اطمینان از پیش تعیین شده، آن را به طور متمایز از زمینه آشکار کند. در نمونه‌هایی که فعالیت آن‌ها پایین است باید از سیستمی استفاده شود که مقدار فعالیت آشکارپذیر کمینه در آن قابل مقایسه با شمارش نمونه است. در این پژوهش، مقدار فعالیت آشکارپذیر کمینه برای طیف‌سنج AT1315 به روش تجربی تعیین، میزان تغییرات آن با زمان اندازه‌گیری و جرم نمونه‌ها بررسی شده است. هم‌چنین وجود یک رابطه بین فعالیت آشکارپذیر کمینه و این کمیت‌ها و ضرورت تعیین مجدد آن با تغییر هر یک از این پارامترها تأیید شد. به منظور اجتناب از اندازه‌گیری‌های مکرر، یک رابطه‌ی نظری برای محاسبه‌ی فعالیت آشکارپذیر کمینه به دست آمد و سپس مقادیر نظری و تجربی فعالیت آشکارپذیر کمینه با هم مقایسه شدند.

**کلیدواژه‌ها:** طیف‌سنج گاما، AT1315، فعالیت آشکارپذیر کمینه

## Determination of Minimum Detectable Activity (MDA) for AT1315 Gamma Spectrometer

S. Ashrafi\*, T. Hadisi Nia

Nuclear Physics Department, Physics Faculty, University of Tabriz, P.O.Box: 51665-163, Tabriz - Iran

**Abstract:** The minimum detectable activity (MDA) is the activity that a system can detect with a given confidence level and good discrimination against the background radiation. When low levels of activities are counted, the MDA of gamma spectrometer must be comparable to the number of sample counts. In this research, the MDA of AT1315 spectrometer has been experimentally determined and a theoretical correlation between the MDA and experimental parameters such as the sample mass and counting time has been established. Using the correlation, the frequent and cumbersome MDA measurements can be avoided. A quantitative comparison of the theoretical and experimental MDA approaches has been performed.

**Keywords:** Gamma Spectrometer, AT1315, Minimum Detectable Activity (MDA)





## ۱. مقدمه

قابل اندازه‌گیری در بالای زمینه است. در نمونه‌های شمارش-پایین به دلیل نزدیکی آهنگ شمارش ناخالص نمونه به زمینه، آهنگ شمارش خالص به طور میانگین برابر صفر است که به دلیل خاصیت آماری تابش، توزیعی حول صفر دارد. لذا  $L_C$  از تعبیر آماری وابسته به یک آهنگ شمارش خالص صفر حقیقی نتیجه گرفته شده و محاسبات آن با فرض نول (غیرفعال) بودن نمونه انجام گرفته است. با در نظر گرفتن این توزیع به شکل نرمال با میانگین صفر برای آهنگ شمارش خالص، محل قرارگیری  $L_C$  که وابسته به میزان  $\alpha$  قراردادی است به صورت شکل ۱ است.

طبق شکل ۱ تعدادی از شمارش‌ها در محدوده‌ی زیر  $L_C$  و تعدادی دیگر در محدوده‌ی بالای آن اتفاق می‌افتد؛ از این رو محل دقیق  $L_C$  باید طوری تعیین شود که برای یک نمونه‌ی بدون فعالیت، شمارش خالص در بیش‌ترین دفعات اندازه‌گیری کم‌تر از  $L_C$  شود تا بتوان حکم درستی مبنی بر فعال نبودن نمونه صادر کرد. پس  $L_C$  به اندازه‌ی ضریبی از  $\sigma_0$  (انحراف معیار آهنگ شمارش خالص) از میانگین توزیع فاصله دارد

$$L_C = k_\alpha \sigma_0 \quad (1)$$

که در آن،  $k_\alpha$  ضریب مربوط به تعداد بی‌نهایت اندازه‌گیری است، در حالی که مقدار آن برای  $n$  اندازه‌گیری، با توجه به مفاهیم آماری حد تصمیم‌گیری که ضریب آن وابسته به درجه‌ی آزادی  $v$  می‌باشد، این است

$$L_C = t(v)_{1-\alpha} \sigma_0 \quad (2)$$

$$v = n - 1 \quad (3)$$

که در آن،  $t(v)_{1-\alpha}$  در واقع همان ضریب  $k_\alpha$  وابسته به تعداد اندازه‌گیری‌ها و درجه‌ی اطمینان  $(1-\alpha)$  است که مقدار آن با توجه به نوع توزیع و درجه‌ی اطمینان از پیش تعیین شده، در جدول‌های آماری مربوط به آزمون  $t$  یافت می‌شود [۷]. اما جامعه‌ی آماری لازم برای تعیین دقیق  $\sigma_0$  برابر با تعداد نامتناهی اندازه‌گیری است که تعیین دقیق آن ناممکن است، لذا باید آن را به نحوی تخمین زد. به طور کلی داده‌های خروجی یک اندازه‌گیری در آشکارساز شامل پارامترهای زیر است.

در طیف‌سنجی نمونه‌های شمارش-پایین، به دلیل نزدیکی سطح شمارش خالص و زمینه‌ی سیستم‌های آشکارسازی، نتیجه‌ی کار از خطای بالایی برخوردار است. بنابراین یکی از معیارهای انتخاب طیف‌سنج‌ها، به ویژه در بررسی چنین نمونه‌هایی، توانایی سیستم در تشخیص شمارش‌های کم از زمینه است. میزان شمارشی که سیستم توانایی تمایز آن از زمینه را با حد اطمینان ۹۵٪ داشته باشد، با  $L_D^{(1)}$  نشان داده شده و مقدار فعالیت معادل آن فعالیت آشکارپذیر کمینه  $(MDA)^{(2)}$  نامیده می‌شود [۱، ۲، ۳]. در نتیجه  $MDA$  را برای هر سیستم به عنوان یکی از مشخصه‌های آن تعیین می‌کنند تا از آشکارساز با دقت مناسب استفاده شود. به عنوان مثال، این مقدار در نوعی از طیف‌سنج‌های گازی و چرنکوف که برای اندازه‌گیری فعالیت نمونه‌های شمارش-پایین محیطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به ترتیب برابر با  $0.13$  و  $0.37 \text{ Bq kg}^{-1}$  تعیین شده است که نشان‌دهنده‌ی توانایی بالای این سیستم‌ها در تعیین مقادیر بسیار پایین فعالیت است [۴]. در این مقاله بررسی‌ها بر روی طیف‌سنج AT1315 به انجام رسیده است.

## ۲. محاسبات نظری MDA

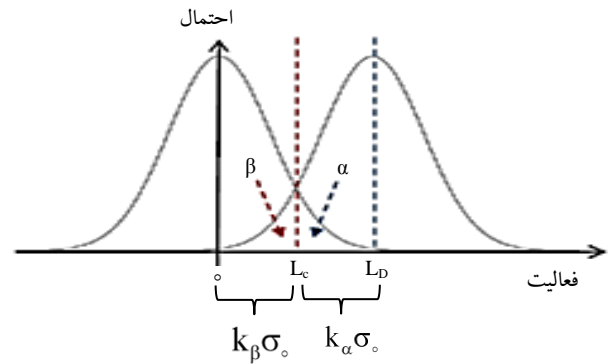
اساس محاسبه‌ی  $MDA$  بر پایه‌ی استفاده از آزمون فرضیه‌ای  $(H_0)$  که شامل دو فرضیه‌ی نول  $(H_0)$  و فرضیه‌ی مقابل نول  $(H_1)$  است، قرار دارد [۵، ۶]. البته این دو فرضیه در پیش‌بینی نتایج، دارای خطاهایی به اندازه‌ی  $\alpha$  و  $\beta$  هستند؛ در حیطه‌ی اندازه‌گیری فعالیت معمولاً میزان  $\alpha$  و  $\beta$  با یکدیگر برابر و مساوی ۵٪ در نظر گرفته می‌شود. براساس این آزمون ابتدا با استفاده از حد بحرانی  $L_C^{(4)}$  درباره‌ی این که نمونه شامل و یا فاقد فعالیت است تصمیم‌گیری می‌شود. یعنی یک نمونه‌ی شمارش-پایین با احتمال  $(1-\alpha)$  درصد فاقد فعالیت فرض می‌شود مگر این که (آهنگ) شمارش نمونه از حد بحرانی  $L_C$  پیشی بگیرد. سپس با فرض فعال بودن نمونه کم‌ترین مقدار (آهنگ) شمارش قابل اندازه‌گیری آن با کمک حد  $L_D$  تعیین می‌شود که در بخش‌های بعدی به تفصیل شرح داده شده‌اند.

۱.۲ محاسبه‌ی  $L_C$ 

طبق تعریف،  $L_C$  (آهنگ) شمارش خالصی است که باید (آهنگ) شمارش خالص نمونه از آن پیشی بگیرد تا با یک سطح اطمینان از پیش تعیین شده بتوان گفت که نمونه شامل فعالیت


**جدول ۱.** نتایج اندازه گیری به صورت پارامتری

شمارش	میانگین حقیقی	مقدار مشاهده شده	انحراف معیار	رابطه ی $\mu$ و $\sigma$ در توزیع پواسون
زمینه	$\mu_B$	B	$\sigma_B$	$\mu_B = \sigma_B^2$
ناخالص	$\mu_{B+S}$	S+B	$\sigma_{B+S}$	$\mu_{B+S} = \sigma_{B+S}^2$
خالص	$\mu_S$	S	$(\sigma_B^2 + \sigma_{B+S}^2)^{\frac{1}{2}}$	$\mu_S = \sigma_B^2 + \sigma_{B+S}^2$


**شکل ۱.** توزیع گاوسی شمارش صفر و غیر صفر.  $\alpha$  و  $\beta$ ، به ترتیب، احتمال خطای نوع اول و دوم اند.

که در آن،  $\Gamma$  تابع گاما است. با توجه به رابطه های (۲) و (۷)،  $L_C$  به شکل زیر برای تعیین فعال بودن یا نبودن هر نمونه مورد استفاده قرار می گیرد

$$L_C = t(v)_{1-\alpha} \frac{\sigma_B \sqrt{1+1/n}}{(\frac{4n-4}{4n-3})} \quad (۸)$$

### ۲.۲ پایین ترین حد شمارش $L_D$ و MDA

بر خلاف حد تصمیم گیری که رابطه های مربوط به آن براساس یک نمونه ی نول تعیین می شود، در این جا رابطه ها براساس نمونه ای ثابت می شود که غیر نول بوده و دارای یک فعالیت هر چند با مقدار اندک است. یعنی مقدار  $L_D$  هر چه باشد به اندازه ی مقدار  $X$  بالای حد تصمیم گیری است که به دلیل طبیعت آماری شمارش، حول مقدار واقعی اش توزیع گاوسی دارد، لذا با توجه به شکل ۱ داریم

$$L_D = L_C + X, \quad X = k_\beta \sigma_D \quad (۹)$$

مشابه ضریب  $k_\alpha$  می توان  $k_\beta$  را، که برای تعداد بی نهایت اندازه گیری است، برای تعداد محدودی اندازه گیری بازنویسی کرد

$$L_D = L_C + t(v)_{1-\alpha} \sigma_D \quad (۱۰)$$

در این حالت، میانگین شمارش خالص واقعی  $\mu_S$  برابر با  $L_D$  است. در نتیجه رابطه ی (۴) برای محاسبه ی  $\sigma_D$  چنین خواهد بود

$$\sigma_D^2 = (L_D + \mu_B) + \frac{\mu_B}{n} = L_D + \sigma_0^2 \quad (۱۱)$$

با انجام آزمون مجذور کای ( $\chi^2$ ) بر روی داده های زمینه ی این سیستم و در نتیجه تأیید حاکم بودن فرض توزیع پواسون برای داده ها و با توجه به جدول ۱،  $\sigma_0$  چنین به دست می آید

$$\sigma_0^2 = \sigma_{S+B}^2 + \sigma_B^2 = (\mu_S + \mu_B) + \frac{\mu_B}{n} \quad (۴)$$

تعریف کلیه ی کمیت ها و رابطه های بینشان در جدول ۱ قابل مشاهده است. در رابطه ی بالا به دلیل نامشخص بودن زمینه ی طیف سنج، ابتدا مقدار میانگین آن پس از  $n$  اندازه گیری محاسبه می شود. در مرحله ی بعد،  $\sigma_B$  که انحراف معیار میانگین زمینه ی طیف سنج بوده و با توجه به قضیه ی حد مرکزی به صورت  $\frac{\mu_B}{n}$  تعیین می شود، جایگزین  $\sigma_B$  می گردد. اما  $L_C$  حد تصمیم گیری در مورد نمونه ی نول است یعنی، وقتی که  $\mu_S = 0$ ؛ در نتیجه با قرار دادن آن در رابطه ی (۴) خواهیم داشت

$$\sigma_0^2 = \mu_B + \frac{\mu_B}{n} = \mu_B (1 + 1/n) \quad (۵)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\mu_B (1 + 1/n)} \quad (۶)$$

$\sqrt{\mu_B}$  انحراف معیار شمارش زمینه است که به دلیل نامعلوم بودن، با استفاده از تعداد  $n$  اندازه گیری تخمین زده شده و با تقسیم آن به ضریب تصحیح  $C_4$  به انحراف معیار تجربی تبدیل می شود که مستقل از دفعات اندازه گیری است [۸]. لذا  $\sigma_0$  چنین محاسبه می شود

$$\sigma_0 = \frac{\sqrt{\mu_B (1 + 1/n)}}{(\Gamma(n/2)/(\Gamma(n-1/2))\sqrt{2/(n-1)})} = \frac{\sigma_B \sqrt{1+1/n}}{(\frac{4n-4}{4n-3})} \quad (۷)$$



شامل ۹۹۰ گرم از نمک KCl ریخته شده در درون ظرف یک لیتری به شکل مارینلی و تعیین شمارش خالص زیر قله‌ی ۱۴۶۱ keV و برازش آن با یک منحنی گاوسی در محدوده‌ی منطقه‌ی مورد توجه<sup>(۵)</sup> (ROI) (کانال‌های انرژی از ۴۳۷ تا ۵۱۶) و با استفاده از رابطه‌ی زیر تعیین شد

$$\varepsilon = \frac{\text{Net count in ROI}}{A Y T} = 1,11 \times 10^{-2} \quad (15)$$

که در آن، A فعالیت پرتوزایی نمونه‌ی مورد اندازه‌گیری و برابر ۱۶۰۹۰ Bq، Y بهره‌ی واپاشی گامایی برابر با ۱۰/۶۷٪ و T زمان اندازه‌گیری معادل با ۱۰۸۰۰ s است. به جز در موارد ذکر شده، تمامی اندازه‌گیری‌ها در زمان ثابت سه ساعت انجام گرفته و از نمک KCl با فراوانی ۰/۰۱۱۷٪ برای رادیوایزوتوپ پرتوزای  $^{40}\text{K}$  استفاده شده است.

#### ۴. نتایج

۴.۱ تعیین MDA طیف‌سنج به روش تجربی (روش پرتوسنجی) محلول‌هایی از نمک KCl با غلظت‌های مختلف تهیه و طیف حاصل از هر محلول به وسیله‌ی سیستم ثبت شد. غلظت هر محلول به همراه فعالیت نظیرش که طبق مرحله‌ی قبل محاسبه شد، در جدول ۲ آمده است. در ستون دوم، فعالیت واقعی نمونه براساس روش پیشینه راست‌نمایی<sup>(۶)</sup> ارائه شده [۹] و با توجه به درصد خطای نسبی بزرگ‌تر از ۵٪ که برای فعالیت‌های پایین‌تر از ۳۲ Bq/kg غیر قابل چشم‌پوشی است، ملاحظه می‌شود که سیستم توانایی تعیین فعالیت‌هایی را که به طور تقریبی از این مقدار کم‌تراند، ندارد. از این رو کم‌ترین فعالیتی که این سیستم می‌تواند برای نمونه‌های یک لیتری آشکارسازی کند (MDA) به صورت کاملاً تجربی برابر با ۳۲ Bq/kg تعیین می‌شود.

جدول ۲. فعالیت واقعی و فعالیت حاصل از پرتوسنجی برای غلظت‌های مختلف

وزن KCl در یک لیتر آب مقطر (gr)	فعالیت واقعی نمونه (Bq/kg)	فعالیت اندازه‌گیری شده به روش پرتوسنجی (Bq/kg)	درصد خطای نسبی
۱۰	۱۶۲،۵۲	۱۴۳،۵۸±۱۱،۴۸	۱۱،۶۵
۷	۱۱۳،۷۷	۱۱۷،۱۳±۱۱،۲۰	۲،۹۵
۴	۶۵،۰۱	۶۳،۶۹±۱۰،۸۴	۲،۰۳
۲	۳۲،۵۰	۳۴،۱۵±۱۰،۷۰	۵،۰۷
۱،۵	۲۴،۳۸	۳۲،۰۲±۱۰،۶۴	۳۱،۳۴
۱	۱۶،۲۵	۲۹،۴۵±۱۰،۶۵	۸۱،۲۳
۰،۹	۱۴،۶۲	۲۸،۰۸±۱۰،۵۹	۹۲،۰۶

حل هم‌زمان معادله‌های (۱۰) و (۱۱) برای  $L_D$  چنین نتیجه می‌دهد

$$L_D = t_{1-\alpha}^2 + 2t_{1-\alpha}\sigma_0 \quad (12)$$

$L_D$  که در واقع کم‌ترین شمارش قابل اندازه‌گیری سیستم است طبق رابطه‌ی زیر به فعالیت آشکارپذیر کمینه (MDA) تبدیل می‌شود

$$MDA = A = \frac{L_D}{\varepsilon Y T M} \quad (13)$$

که در آن، T زمان اندازه‌گیری برحسب ثانیه، M جرم نمونه برحسب کیلوگرم، Y بهره‌ی واپاشی گامایی و  $\varepsilon$  بازده آشکارسازی طیف‌سنج است.

در نتیجه رابطه‌ی نظری برای محاسبه‌ی MDA با توجه به

رابطه‌های (۷)، (۱۲) و (۱۳) چنین خواهد بود

$$MDA = \frac{2,89 + 3,39\sigma_B(\sqrt{4n-3})\sqrt{1+1/n}/(4n-4)}{\varepsilon Y T M} \quad (14)$$

که در آن،  $\sigma_B$  از ۳۰ بار اندازه‌گیری زمینه و انجام محاسبات آماری لازم، برابر با ۱۰۶،۶۵ و فاصله‌ی اطمینان  $t_{(1-\alpha)}$  برای  $v=29$  از جدول آزمون t برابر ۱،۶۹۹ تعیین شد [۷]

#### ۳. طیف‌سنج AT1315

طیف‌سنج AT1315 از دو سوسوزن برای اندازه‌گیری پرتوهای گاما و بتا و یک محفظه‌ی سربی به ضخامت ۵cm برای کاهش تابش زمینه تشکیل شده و در آن از یک سوسوزن NaI(Tl) به ابعاد ۶۳×۶۳ mm برای آشکارسازی پرتو  $\gamma$  و یک سوسوزن پلاستیکی به ابعاد ۱۲۸×۸ mm برای آشکارسازی هم‌زمان پرتو  $\beta$  استفاده می‌شود. علاوه بر این، طیف‌سنج شامل یک رایانه به همراه واحد پردازنده‌ی داده‌ها (DPU)، منبع تغذیه‌ی ولتاژ-بالا، دو عدد تحلیل‌گر ۱۰۲۴ کاناله و نرم‌افزار مخصوص برای تحلیل طیف‌های گاما و بتا [۹] نیز است.

#### ۱.۳ تعیین بازده حجمی قله‌ی نوری $^{40}\text{K}$

بازده حجمی طیف‌سنج در انرژی قله‌ی نوری  $^{40}\text{K}$  که در محاسبات مورد استفاده قرار گرفت با طیف‌گیری از نمونه‌ی

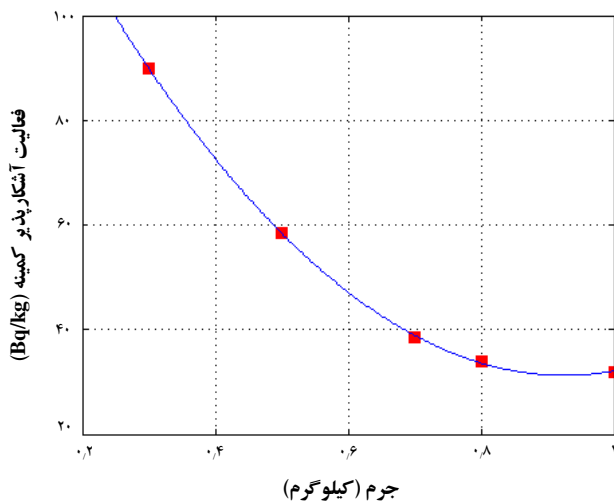


**جدول ۳.** مقایسه‌ی MDA نظری و تجربی برای جرم‌های مختلف نمونه و زمان اندازه‌گیری ۳ ساعت

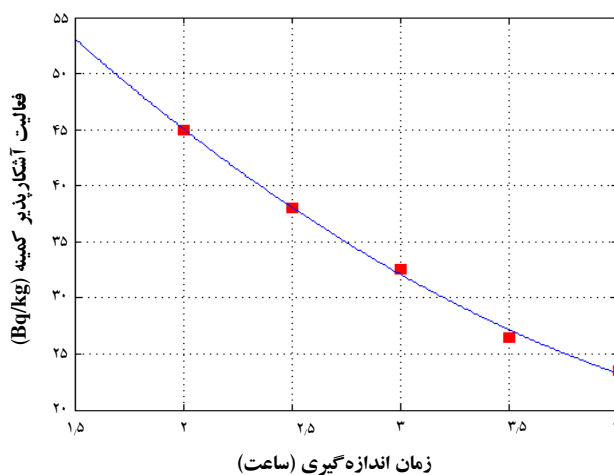
MDA		جرم نمونه (kg)
نظری Bq/kg	تجربی Bq/kg	
۲۹,۲۷	۳۲	۱
۳۶,۵۹	۳۴	۰,۸
۴۱,۸۲	۳۹	۰,۷
۵۸,۵۴	۵۹	۰,۵
۹۷,۵۸	۹۰	۰,۳

**جدول ۴.** مقایسه‌ی MDA نظری و تجربی یک نمونه‌ی ۱ کیلوگرمی برای زمان‌های مختلف اندازه‌گیری

MDA		زمان اندازه‌گیری (h)
نظری Bq/kg	تجربی Bq/kg	
۲۱,۹۶	۲۳	۴
۲۵,۱۰	۲۶	۳,۵
۲۹,۲۷	۳۲	۳
۳۵,۱۴	۳۸	۲,۵
۴۳,۹۲	۴۵	۲



**شکل ۲.** تغییرات فعالیت آشکارپذیر کمیته (MDA) با جرم نمونه برای زمان اندازه‌گیری ۳ ساعت.



**شکل ۳.** تغییرات فعالیت آشکارپذیر کمیته (MDA) با زمان اندازه‌گیری برای نمونه با جرم ۱ کیلوگرم.

#### ۲.۴ وابستگی MDA به جرم نمونه و زمان اندازه‌گیری

برای نمونه‌های با جرم و زمان اندازه‌گیری متفاوت، مقادیر MDA طیف‌سنج تعیین شد. به عنوان مثال برای محاسبه‌ی MDA تجربی مربوط به نمونه با جرم ۰,۸ کیلوگرم، ابتدا محلول‌هایی با غلظت متفاوت از نمک KCl تهیه شد. در مرحله‌ی بعد، فعالیت این نمونه‌ها، مشابه جدول ۲ به وسیله‌ی طیف‌سنج اندازه گرفته شده و با توجه به درصد خطای نسبی قابل قبول (کم‌تر از ۵٪)، قابل قبول‌ترین مقدار آن به عنوان MDA اندازه‌گیری شده در جدول ثبت شد. برای مطالعه‌ی اثر جرم نمونه بر MDA سیستم، این فرایند برای پنج نمونه با جرم‌های ۳,۰۰، ۵,۰۰، ۷,۰۰، ۸,۰۰ و ۱۰,۰۰ گرم تکرار شد که نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

هم‌چنین برای جرم معینی از نمونه، با افزایش زمان اندازه‌گیری نیز می‌توان فعالیت‌های پایین را با دقت قابل‌قبولی اندازه‌گیری نمود. اثر تغییر زمان اندازه‌گیری روی فعالیت آشکارپذیر کمیته به طور تجربی تعیین و در شکل ۳ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود MDA طیف‌سنج بستگی به زمان اندازه‌گیری و جرم نمونه دارد و بستگی آن به جرم نمونه بیش‌تر از زمان اندازه‌گیری است. لذا به منظور اجتناب از اندازه‌گیری‌های طولانی مدت، یک رابطه‌ی نظری برای تعیین MDA براساس حد تصمیم‌گیری کوری<sup>(۷)</sup> نتیجه گرفته شده و مقدار آن با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده به طور تجربی در جدول‌های ۳ و ۴ مقایسه شده است.

#### ۵. نتیجه‌گیری

MDA تجربی در طیف‌سنج AT1315 برای نمک KCl با جرم و زمان اندازه‌گیری معین تعیین، و چگونگی تغییرات آن با زمان و جرم نمونه مشخص شد؛ اطلاعات مربوط به آن، به ترتیب، در جدول ۲ و در شکل‌های ۲ و ۳ آمده است. در ادامه یک رابطه‌ی نظری برای تعیین MDA بر مبنای حد تصمیم‌گیری کوری نتیجه گرفته شد. سپس مقدار معادل MDAهای تعیین شده به روش تجربی، با استفاده از رابطه‌ی نظری نتیجه گرفته شده، محاسبه شد؛ براساس اطلاعات جدول ۳، نتایج حاصل از محاسبات نظری توافق خوبی با تجربه دارد که نشان می‌دهد رابطه‌ی نظری (۱۴) جای‌گزین مناسبی برای اندازه‌گیری‌های طولانی مدت است. ضمن این‌که این رابطه توانایی تعیین فعالیت با تغییر Y و E را نیز خواهد داشت و با معلوم بودن راندمان آشکارساز آن را می‌توان برای طیف‌سنج‌های دیگر نیز به کار برد.



- |  |  |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. L.A. Curie, Detection and Qualification Limit, Applied Radiation and Isotopes, 61 (2004) 145-149.</li> <li>2. Ch. Hurtgen, S. Jerome, How Low Can You Go?, Applied Radiation and Isotopes, 53 (2000) 45-50.</li> <li>3. G. Avwiri, Determination of Radionuclide Levels in Soil and Water Around Cement Companies in Port Harcourt, J. Applied Radiation and Isotop, 68 (2003) 219-222.</li> <li>4. F. Vaca, G. Manjon, Factor of Merit and Minimum Detectable Activity for Determinations by Gas-Flow Proportional or Cherenkov Counting, Applied Radiation and Isotopes, 55 (2001) 849-851.</li> <li>5. K. Gouri, Bhattacharya, Statistical Concepts and Methods, John Wiley and Sons (1977).</li> <li>6. <a href="http://www.stats.gla.ac.uk/steps/glossary/hypothesis_testing.html">http://www.stats.gla.ac.uk/steps/glossary/hypothesis_testing.html</a>.</li> <li>7. USA Nuclear Regulatory Commission, Multi-Agency Radiological Laboratory Analytical Protocols Manual, (2004), Appendix G.2.</li> <li>8. Richard M. Brugger, A Note on Unbiased Estimation of the Standard Deviation, The American Statistician, (23) 4 p. 32 (1969).</li> <li>9. AT1315 Spectrometer User Manual.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lower Limit of Detection</li> <li>2. Minimum Detectable Activity</li> <li>3. Hypothesis Testing</li> <li>4. Critical Level</li> <li>5. Region of Interest</li> <li>6. Maximum Likelihood</li> <li>7. Curie Decision Limit</li> </ol> |
|--|--|