

## تفکیک دز نوترون و گاما در میدان‌های آمیخته $n-\gamma$ ( $^{137}\text{Cs}$ , $\text{Am-Be}$ ) با استفاده از دزیمتر TLD-500

احسان صادقی<sup>۱\*</sup>، مصطفی زاهدی<sup>۲</sup> فر<sup>۱</sup> و محسن محرابی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

<sup>۲</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران.

\* اصفهان، کاشان، کیلومتر ۶ بلوار قطب راوندی، دانشگاه کاشان، پژوهشکده علوم و فناوری نانو، کد پستی: ۸۷۳۱۷-۵۱۱۶۷

پست الکترونیکی: [sdgh@kashanu.ac.ir](mailto:sdgh@kashanu.ac.ir)

### چکیده

در این تحقیق، امکان استفاده از دزیمتر  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  (TLD-500) برای تخمین دز گاما در میدان‌های مرکب نوترون و گاما با استفاده از روش نسبت دو قله بررسی شد. قله اصلی این دزیمتر از دو قله همپوش تشکیل شده است. نسبت شدت گرماتابی قله ۲ به قله ۱ این دزیمتر در میدان خالص گاما ( $^{137}\text{Cs}$ )  $1/49$  و برای میدان نوترون  $\text{Am-Be}$  این نسبت  $1/12$  به دست آمد. قرص های TLD-500 مشخص به طور جداگانه، از ۷ درصد تا ۴۸ درصد دز کل در ۶ مرحله پرتودهی شدند. نتایج به دست آمده موفقیت استفاده از این دزیمتر در روش نسبت دو قله را نشان می دهند. کلیدواژگان: گرماتابی، دزیمتری نوترون،  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ ، میدان آمیخته، نسبت دو قله.

### ۱. مقدمه

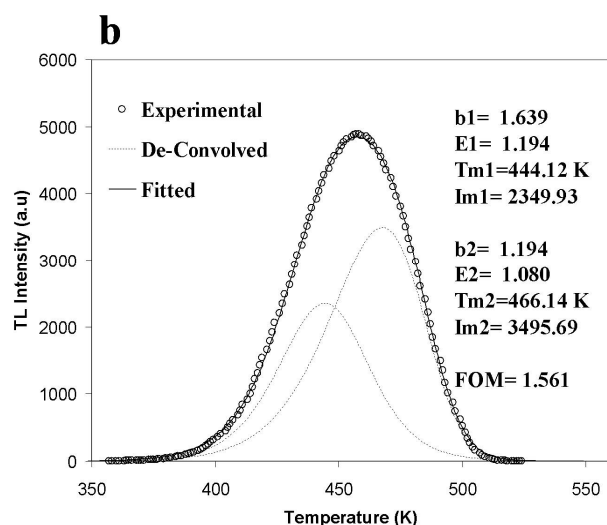
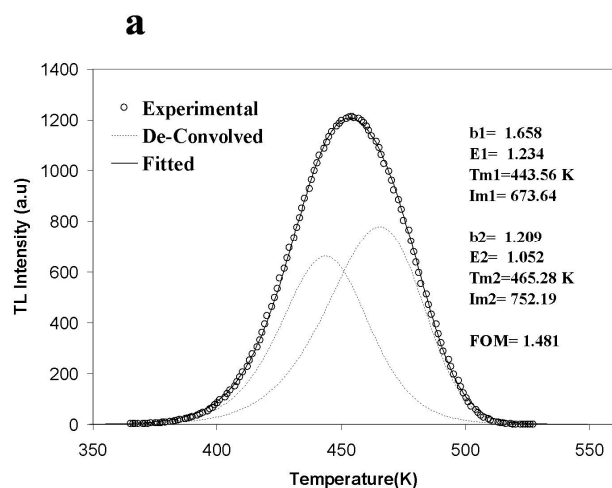
$\text{LiF:Mg,Ti}$  انجام گرفته است [۶ و ۷]. کار برد اصلی این روش در مورد  $\text{LiF:Mg,Ti}$  است [۸ و ۹]. پاسخ متفاوت قله های گرماتابی یک دزیمتر نسبت به پرتوهای با (linear LET (energy transfer) کم و LET زیاد مبنای استفاده از روش دو قله در تفکیک دز گاما و نوترون است.

دزیمتر TLD-500 ماده ای است که از حساسیت گرماتابی بالایی برخوردار است و از این دزیمتر هم در دزیمتری نوترون و هم در دزیمتری میدان های مرکب (به روش فعال سازی) استفاده شده است [۱۰-۱۴]. در این پژوهش، برای اولین بار، تخمین دز گاما در میدان های مرکب نوترون و گاما به روش نسبت دو قله با استفاده از دزیمتر  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  (TLD-500) انجام شد.

جداسازی و تعیین مقدار دز هر کدام از تابش های گاما و نوترون در میدان های مرکب، یکی از مهم ترین اهداف دزیمتری نوترون است، زیرا همواره تابش نوترون با تابش گاما همراه است. تاکنون مطالعات فراوانی در احقاق این امر صورت پذیرفته است. در این مطالعات، روش ها و مواد گوناگونی به کار رفته است. یکی از این روش ها استفاده از پدیده گرماتابی است. بدین منظور، دزیمترهایی همچون  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ ، TLD-200، TLD-400، TLD-100 و... در روش های مختلفی به کار رفته اند [۱-۵]. روش هایی همچون روش فعال سازی TLD و روش نسبت دو قله در دزیمتری میدان های آمیخته استفاده شده اند. روش نسبت دو قله اغلب با استفاده از دزیمترهای  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  و

## ۲. مراحل آزمایش

که در آن،  $b$  (پارامتر سیپتیک) بین ۱ و ۲،  $T_m$  دمای بیشینه،  $E$  انرژی فعال سازی و  $k$  ثابت بولتزمن است. منحنی برازش شده دزیتر  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  در پرتوهای گاما و نوترون در شکل (۱) (a و b) مشاهده می شود.



شکل ۱: منحنی برازش شده دزیتر  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  در پرتوهای msv (a) نوترون (b) گاما. پارامترهای گیراندازی به دست آمده از برازش انجام شده در شکل مشاهده می شود.

برای تعیین میزان انطباق منحنی گرماتابی تئوری و تجربی، از رابطه FOM به صورت زیر استفاده شد:

$$FOM = \sum_{j_f} \frac{100[y_i - y(x_i)]}{A} \quad (2)$$

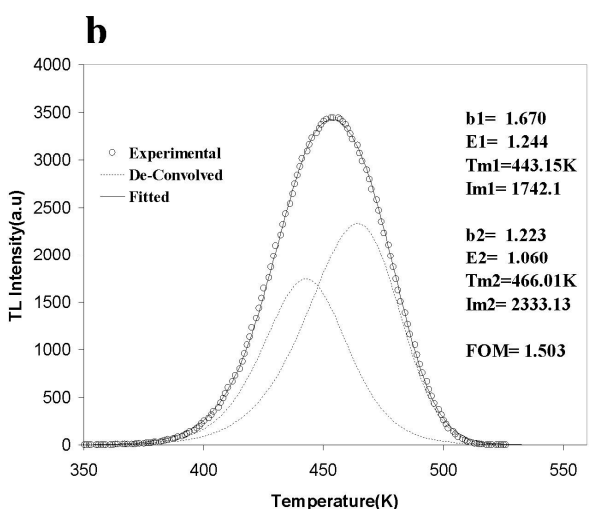
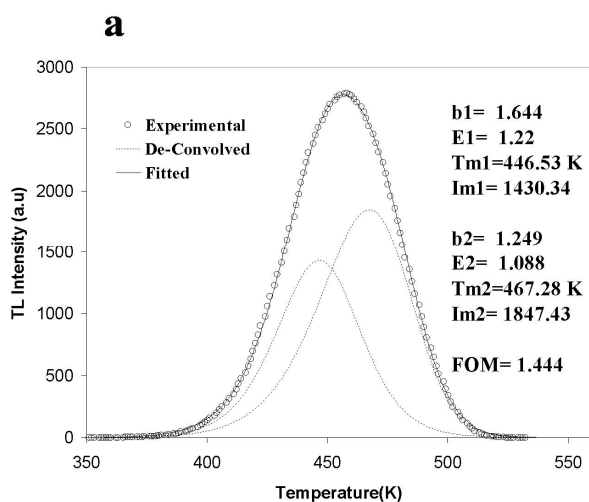
در این کار، از دزیتر TLD-500 که به شکل تراشه هایی با قطر ۵ mm و ضخامت ۱ mm هستند، استفاده شد. پرتوهای گاما با استفاده از چشمه  $^{137}\text{Cs}$  و پرتوهای نوترون با استفاده از چشمه  $^{241}\text{Am-Be}$  انجام گرفت. انرژی بیشتر نوترون های این چشمه بین ۳ MeV تا ۶ MeV است. چشمه  $\text{Am-Be}$  درون یک قالب فولادی قرار داشت. در میدان پرتوهای نوترون، حدود ۳ درصد گاما وجود داشت که تصحیح مربوط به آن در پرتوهای انجام شده در نظر گرفته شد. به منظور تخلیه کامل دام های سطحی و عمیق، نمونه ها به مدت ۶۰ دقیقه در دمای  $500^\circ\text{C}$  گرمادهی شدند. برای قرائت نمونه ها از دستگاه TLD-reader مدل Harshaw 4500 استفاده شد. بعد از پرتو دهی، قرائت نمونه ها از دمای  $50^\circ\text{C}$  تا دمای  $300^\circ\text{C}$  با آهنگ گرمایی  $1^\circ\text{C/s}$  انجام شد. به دلیل حساسیت نسبت به نور، تمام مراحل آزمایش در محیطی تاریک انجام شد.

## ۳. نتایج

هنگامی که دزیتر  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  (TLD-500) با دز یکسانی مورد پرتو دهی نوترون و گاما قرار گرفت، مشاهده شد که با وجود شکل یکسان، پاسخ های متفاوتی را از خود نشان می دهد؛ یعنی سطح زیر قله در هر دو حالت یکسان نیست. این اختلاف در اثر پاسخ متفاوت این دزیتر به پرتو های با LET مختلف است. نوترون دارای LET زیاد و گاما دارای LET کم است. این تفاوت در پاسخ به هر کدام از پرتوها، منجر به نسبت قله متفاوت در تابش نوترون نسبت به تابش گاما می شود. منحنی مربوط به تابش های نوترون و گاما با مدل مرتبه عام (CGCD) جداسازی شد [۱۵]:

$$I(T) = I_m b^{\frac{b}{b-1}} \exp\left(\frac{E(T-T_m)}{kTT_m}\right) \times \left\{ \frac{T^2}{T_m^2} (b-1) \left(1 - \frac{2kT}{E}\right) \exp\left(-\frac{E(T-T_m)}{kTT_m}\right) + 1 + (b-1) \frac{2kT_m}{E} \right\}^{\frac{b}{b-1}} \quad (1)$$

پرتودهی در میدان مرکب از سهم دز گامای ۷٪ تا ۴۸٪ دز کل، در ۶ مرحله انجام شد. در پرتودهی در هر کدام از نسبت‌ها ( $U$ ) یک منحنی تابش به دست آمد و با جداسازی آن،  $R_{m2,1}$  مربوط به آن  $U$  به دست آمد. در شکل (۲) (a و b) دو نمودار مربوط به سهم دز ۱۸ و ۳۰ درصد گاما مشاهده می‌شود.



شکل ۲: منحنی برازش شده دزیمتر  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  در پرتودهی (a) ۳۰ msv و (b) ۱۷ msv گاما و ۴۰ msv نوترون. پارامترهای گیراندازی به دست آمده از برازش انجام شده در شکل مشاهده می‌شود.

در جدول (۱)، مقادیر دز گاما و نوترون در میدان‌های مرکب به همراه نسبت قله‌های آن‌ها مشاهده می‌شود.

که در آن،  $y_i$  مربوط به مقادیر اصلی یا داده‌های تجربی،  $A$  سطح زیر منحنی و  $y(x_i)$  بهترین مقداری است که از طریق این انطباق به دست می‌آید [۱۶]. با جداسازی نمونه‌های مختلف پرتودهی شده با  $40\text{ msv}$  گامای خالص و نوترون تقریباً خالص، میانگین نسبت قله ۲ به ۱ در منحنی گرماتابی دزیمتر TLD-500 در میدان گاما و نوترون خالص به دست آمد. برای انجام مطالعات روابط زیر استفاده شد:

$$X = \frac{I_{2gm}}{I_{2m}} \quad (3)$$

$$X = \frac{I_{2gm}}{I_{2m}} = \frac{R_{m2,1} - R_{n2,1}}{R_{g2,1} - R_{n2,1}} \quad (4)$$

$$I_{2n} = a_n D_n \quad (5)$$

$$I_{2g} = a_g D_g \quad (6)$$

$$U = \frac{D_g}{D_g + D_n} \quad (7)$$

$$U = \frac{X}{X + (1 - X)w} \quad (8)$$

$$U = \frac{R_{m2,1} - R_{n2,1}}{(R_{m2,1} - R_{n2,1})(1 - w) + (R_{g2,1} - R_{n2,1})w} \quad (9)$$

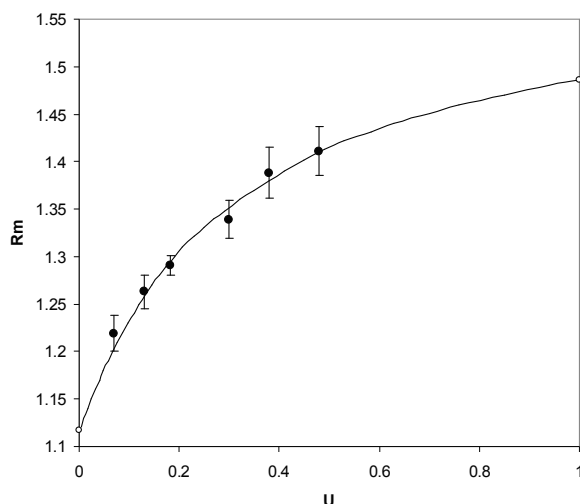
که در آن‌ها  $I_{1g}$  و  $I_{2g}$  به ترتیب شدت قله‌های ۱ و ۲ در میدان گامای خالص،  $I_{1n}$  و  $I_{2n}$  به ترتیب شدت قله‌های ۱ و ۲ در میدان نوترون،  $D_n$  و  $D_g$  دز گاما و نوترون و  $w$  نسبت  $a_g$  به  $a_n$  هستند. همچنین،  $R_{g2,1} = \frac{I_{2g}}{I_{1g}}$  (نسبت قله ۲ به قله ۱ در میدان گامای خالص)،  $R_{n2,1} = \frac{I_{2n}}{I_{1n}}$  (نسبت قله ۲ به قله ۱ در میدان نوترون) و  $R_{m2,1} = \frac{I_{2m}}{I_{1m}}$  (نسبت قله ۲ به قله ۱ در میدان مرکب نوترون و گاما) می‌باشند. روابط ۸ و ۹ از روابط قبلی قابل محاسبه‌اند.

با توجه به نتایج برازش، مقادیر  $R_{n2,1} = 1/117$  و  $1/486$   $R_{g2,1} = 1/12$  و  $w = 1/12$  به دست آمدند. بعد از مشخص شدن این ثابت‌ها، پرتودهی در میدان‌های آمیخته نوترون و گاما شروع شد.

با قرار دادن ثابت های  $R_{g2,1} = 1/486$  و  $R_{n2,1} = 1/117$  و  $w = 4/12$  در رابطه (۹) به عبارت ساده شده (۱۰) می‌رسیم:

$$R_{m2,1} = \frac{1.117 + 4.97U}{1 + 3.1U} \quad (10)$$

با رسم  $R_{m2,1}$  برحسب داده‌های تجربی به دست آمده  $U$  و نمودار حاصل از رابطه (۱۰)، شکل (۴) به دست خواهد آمد.



شکل ۴: تطبیق نقاط تجربی و منحنی تئوری به دست آمده برای  $R_{m2,1}$  برحسب  $U$

مشاهده می‌شود که نقاط تجربی با تقریب نسبتاً خوبی روی منحنی تئوری قرار گرفته‌اند. این نشان می‌دهد که شرایط لازم برای استفاده از TLD-500 به منظور تفکیک دز گاما و نوترون در میدان آمیخته، به روش نسبت دو قله برقرار هستند و از این نمونه می‌توان به این منظور، به خوبی بهره برد. بنابراین، می‌توان با تعیین نسبت  $R_{m2,1}$  در میدان آمیخته از منحنی گرماتابی این دزیمتر و استفاده از نمودار فوق مقدار دز گامای مربوط به آن میدان آمیخته را به دست آورد.

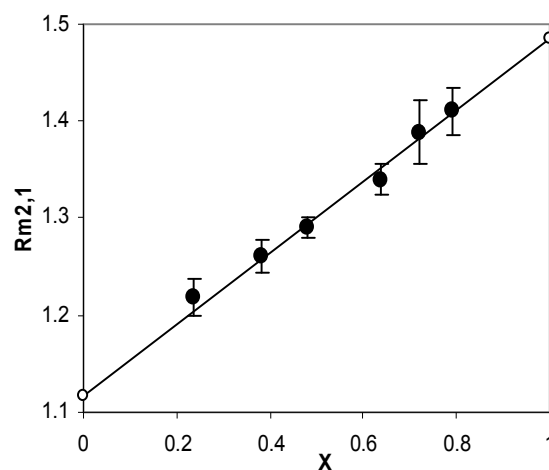
#### ۴. نتیجه گیری

استفاده از نسبت قله ۲ به ۱ منحنی تابش TLD-500 برای تفکیک دز گاما از نوترون در میدان مرکب (Am-Be,  $^{137}\text{Cs}$ ) پیشنهاد شد. نتایج مربوط به نسبت قله ۲ به ۱ این نمونه نشان می‌دهند که این نسبت ( $R_{m2,1}$ ) با اضافه شدن درصد گاما در میدان مرکب، افزایش می‌یابد تا اینکه در میدان گامای خالص

جدول (۱): مقدار دز گاما و نوترون در میدان مرکب به همراه  $R_{m2,1}$

$D_g$ (msv)	$D_n$ (msv)	$U = \frac{D_g}{D_g + D_n}$	$R_{m2,1}$ Measured
۳	۴۰	۰/۰۷	۱/۲۱۹
۶	۴۰	۰/۱۳	۱/۲۶۲
۹	۴۰	۰/۱۸	۱/۲۹۱
۱۷	۴۰	۰/۳۰	۱/۳۳۹
۲۵	۴۰	۰/۳۸	۱/۳۸۸
۳۷	۴۰	۰/۴۸	۱/۴۱۱

در ادامه، نمودار  $R_{m2,1}$  برحسب  $X$  و  $U$  رسم شد. برای رسم نمودار  $X$  از رابطه (۳) استفاده شد که مقدار آن در میدان نوترون، تقریباً خالص  $X = 0$  و  $R_{n2,1} = 1/117$  و در میدان گامای خالص مقدار  $X = 1$  و  $R_{g2,1} = 1/486$  به دست آمد. بدین ترتیب، خط راستی این دو نقطه را به یکدیگر وصل می‌کند که نقاط تجربی باید با این خط همخوانی داشته باشند. نمودار  $R_{m2,1}$  برحسب  $X$  در شکل (۳) مشاهده می‌شود.



شکل ۳: تطبیق نقاط تجربی و منحنی تئوری به دست آمده برای  $R_{m2,1}$  برحسب  $X$

با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که نقاط تجربی به دست آمده برای  $X$  با منحنی تئوری، توافق خوبی دارند. این توافق بین نتایج تئوری و تجربی خود، نشان‌دهنده کارایی دزیمتر استفاده شده در تخمین دز گاما در میدان آمیخته است.

اندازه‌گیری شده و با چشم‌پوشی از خطای گامای موجود در میدان نوترون، میزان دقت این روش تقریباً ۳ درصد پیش‌بینی می‌شود. در استفاده از این دزیتر، این نکته حائز اهمیت است که این ماده به‌شدت از عوامل محیطی تأثیرپذیر است.

به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این افزایش در  $R_{m2,1}$  به‌گونه‌ای اتفاق می‌افتد که اگر نمودار آن برحسب هریک از مقادیر  $X$  یا  $U$  رسم شود، مشاهده می‌شود که نقاط تجربی به شکل مناسبی با نمودار تئوری در توافق‌اند. این نکته نشان‌دهنده کارایی این ماده به‌منظور شرح داده شده است. براساس خطاهای

## ۵. مراجع

- [1] M. Benabdesselam, P. Iacconi, D. Lapraz, J. Dherrmain, J. Laugier. Characterisation of a clothing material for gamma dosimetry in mixed neutron-gamma fields. *Radiat. Prot. Dosim.* 70 (1997) 461-465.
- [2] T.L. Wang. On the use of TLD for gamma ray dosimetry evaluation in mixed fast neutron and gamma ray fields. *Radiat. Prot. Dosim.* 33 (1990) 359-363.
- [3] F. Becker, S. Nagels, B. Burgkardt, R. Böttger, A. Lizon Aguilar, G. Hampel, B. Wortmann. Mixed gamma-neutron radiation; energy compensation filters;  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  detectors. *Radiat. Meas.* 43 (2008) 921-924.
- [4] M. Weinstein, U. German, Z. B. Alfassi. On neutron-gamma mixed field dosimetry with  $\text{LiF:Mg,Ti}$  at radiation protection dose levels. *Radiat. Prot. Dosim.* 119 (2006) 314-318.
- [5] V. Chernov, B. Rogalev, A. Nepomnyaschikhand, V. Cherepanov. Error analysis of neutron dose measurement in mixed Gamma-Neutron fields by a two peak TL Method. *Radiat. Prot. Dosim.* 49 (1993) 443-449.
- [6] E.X. Rank, R.B. Theus. Neutron dosimetry with  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ , *IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-26* (1979) 1590-1592.
- [7] J. B. Dielhof, A. J. J. Boss, J. Zoetelief, J. J. Broerse. Sensitivity of  $\text{CaF}_2$  thermoluminescent materials to fast neutrons. *Radiat. Prot. Dosim.* 23 (1988) 405-408.
- [8] J.C. Liu, C.S. Sims. In: *Proc. 8th Int. Congress on Radiation Protection*, (1992). 90-97.
- [9] D. Youssian and Y. S. Horowitz. Estimation of gamma dose in neutron dosimetry using peak 4 to peak 5 ratios in  $\text{LiF:Mg,Ti}$  (TLD-100/600). *Radiat. Prot. Dosim.* 77 (1998) 151-158.
- [10] M.R. Komor, M. Osvay, I. Dvornik, T. Biro. Fast neutron detection with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thermoluminescence dosimeter. *Nucl. Instrum. Meth.* 212 (1983) 383-386.
- [11] S.V. Nikiforov, V.S. Kortov, I.I. Milman. Thermoluminescent dosimeters based on TLD-500 detectors for control of neutron fields. *Radiat. Prot. Dosim.* 101 (2002) 125-128.
- [12] G.A. Klemic, N. Azziz, S.A. Marino. The Neutron Response of  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ ,  $^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$  and  $^7\text{LiF:Mg,Ti}$  TLDs. *Radiat. Prot. Dosim.* 65 (1996) 221-226.
- [13] M.R. Komora, S. Miljanica, S. Blagusa, Z. Knemevica, M. Osvay. Selective assessment of the fast neutron component in mixed neutron-gamma field using TLD activation. *Radiat. Phys. Chem.* 67 (2003) 581-585.
- [14] I.I. Milman, S.V. Nikiforov, V.S. Kortov. Dosimetry of mixed gamma-neutron Fields using TLD-500K detectors based on anion-defective corundum. *Radiat. Meas.* 33 (2001) 561-564.
- [15] G.G. Kitis, J.M. Gomez Ros, J.W.N. Tuyn. Thermoluminescence glow curve deconvolution functions for first, second and general orders of kinetics, *J. Phys. D:Appl. Phys.* 31 (1998) 2636-2641.
- [16] H.G. Balian, N.W. Eddy. Figure of merit (FOM),

an improved criterion over the normalized  
chisquared test for assessing goodness-of-fit of

gamma-ray spectra peaks. *Nucl. Instr. Meth.* 145  
(1977) 389-393.