مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۲، شمارهٔ ۱، زمستان ۱۳۹۲

بررسی مقایسه‌ای پاسخ‌دهی و رفتار دزسنج‌های گرماتاب فردی نوترون-گاما در میدان‌های ^{241}Am-Be و ^{252}Cf

سمانه برادران[۱و۲*]، فریدون میانجی[۱و۲] و بردیا حاجی‌زاده[۲]

[۱] پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

[۲] نظام ایمنی هسته‌ای کشور، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.

*امور حفاظت در برابر اشعه، نظام ایمنی هسته‌ای کشور، سازمان انرژی اتمی، تهران، کد پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵

پست الکترونیکی: sbaradaran@aeoi.org.ir

چکیده

دز سنجی فردی نوترون موضوعی چالش برانگیز در زمینه دزسنجی است. دزسنج گرماتاب یا TLD یکی از انواع دزسنج‌های فردی می‌باشد که در تعیین میزان پرتوگیری از چشمه‌های نوترون کاربرد بسیار زیادی دارد. بطور معمول، این دزسنج‌هاپس از کالیبره شدن با یک گونه منبع پرتوزای نوترونی استاندارد، در مراکز مختلف با کاربردهای گوناگون که در آنها امکان پرتوگیری نوترونی وجود دارد بکار گرفته می‌شوند. برای کاربرد TLD در اهداف دزسنجی فردی معمولا از موادی نظیر (LiF) که عدد اتمی‌مؤثر آن (۸/۲) نزدیک بافت نرم است استفاده می‌شود. اما، نکته مهم وابستگی شدید بیناب نوترون به منبع آن و شرایط هندسی مکان پرتوگیری است که برآورد درست دز دریافتی و به ویژه دز معادل را بسیار دشوار می‌سازد. در این پژوهش رفتار دزسنج‌های گرماتاب TLD600-700 ساخت شرکت هارشا که در ارائه خدمات دزسنجی فردی نوترون- گاما کشور به کار می‌روند مورد بررسی قرار گرفته اند. این دزسنج‌هادر میدان‌های استاندارد چشمه‌های Am -Be ^{241} و Cf ^{252} در دزهای پایین تا نسبتا بالا پرتودهی شده (۵۰mSv تا ۱Sv) و پاسخ آنها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. همچنین اطلاعات مهمی‌در زمینه نسبت پاسخ این دزسنج‌هادر پرتودهی با چشمه‌های Am-Be ^{241} و Cf ^{252} ارائه گردیده است که از اهمیت کاربردی زیادی در کارآمد سازی و بالاتر بردن دقت در دزسنجی فردی نوترون برخوردار می‌باشد.

کلیدواژگان: دزسنجی فردی، TLD600-700، چشمه‌های نوترونی، پاسخ نسبی.

۱. مقدمه

هم‌زمان با رشد فنّاوری هسته‌ای، کاربرد پرتوهای یونساز در صنعت و پزشکی، بسیار توسعه یافته است. در تأسیسات هسته‌ای و به‌ویژه در تولید برق در راکتورهای هسته‌ای نیز با این‌گونه پرتوها مواجهیم. در این میان، می‌توان به پرتوهای نوترون و گاما به‌دلیل فراوانی و اهمیت آن‌ها اشاره کرد؛ از این رو، برای حفاظت کارکنان و مردم در برابر پرتوها، دسترسی به روش‌های برتر جهت تعیین میزان پرتوگیری افراد، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. برخی از مواد نیمه‌هادی یا عایق درصورتی‌که ابتدا پرتودهی و سپس گرمادهی شوند، نور مرئی انتشار می‌دهند. به این پدیده گرماتابی (TL) می‌گویند؛ بنابراین، گرماتاب انتشار نور مرئی از مادهٔ پرتودهی‌شده (نیمه‌هادی یا عایق) در اثر تحریک گرمایی می‌باشد. موادی را که دارای این خاصیت می‌باشند، مواد گرماتاب می‌نامند. بلورهای مورد استفاده در پدیدهٔ گرماتاب، دارای یک شبکه بلوری منظم مانند لیتیوم

فلوراید LiF هستند که به ناخالصی‌ها و عیوب شبکه‌ای آلائیده شده‌اند [۱-۳]. همهٔ دزسنج‌های گرماتاب از جمله ^{7}LiF برای اندازه‌گیری پرتوهای ایکس، گاما و بتا قابل استفاده‌اند، اما تنها برخی از آن‌ها مانند ^{6}LiF (به‌دلیل سطح مقطع بالای ^{6}Li در واکنش با نوترون حرارتی) نسبت به پرتوهای نوترون نیز حساسیت دارند [۲ و ٤].

دزسنجی نوترون برخلاف دزسنجی گاما به‌دلیل وابستگی شدید طیف نوترون به شرایط هندسی مکان پرتوگیری و ناهمسان بودن ضریب توزین پرتو نوترون در انرژی‌های گوناگون (بخش‌های طیفی)، از پیچیدگی‌های زیادی برخوردار است [۳-۱]. همیشه تابش نوترون با تابش گاما همراه است که حاصل آن یک میدان مرکب می‌باشد. به‌عبارتی، میدان تابش اطراف چشمه‌های نوترونی همیشه یک میدان مرکب است. یعنی طیف‌های گوناگون نوترون و پرتو گاما وجود دارد. برای جداسازی دز نوترون حرارتی و گاما در میدان‌های مرکب، از دو ترکیب TLD-600و TLD-700 به‌طور هم‌زمان استفاده می‌کنند. دزسنج‌های TLD600-700 نسبت به پرتو گاما حساسیت یکسان دارند. درصورتی‌که دو دزسنج با دز یکسانی مورد پرتودهی گاما قرار دهیم، پیک یکسانی خواهیم داشت؛ ولی پاسخ TLD600 نسبت به نوترون‌های حرارتی به‌دلیل سطح مقطع بالای واکنش ^{6}Li برای آن‌ها خیلی سریع است. همچنین، TLD-600 و TLD-700 نسبت به نوترون‌های سریع، پاسخ یکسانی به‌ازای انرژی‌های بیشتر از یک مگا الکترون ولت دارند، لذا برای دزسنجی نوترون‌های حرارتی و سریع از جفت دزسنج‌های TLD-600 و TLD-700 استفاده می‌کنیم. برای آشکارسازی نوترون‌های حرارتی از جفت TLD-600 و TLD-700 بدون پوشش در میدان‌های مختلط نوترون‌های حرارتی و گاما استفاده می‌کنیم. بدین‌گونه که پاسخ TLD-700 را در میدان مختلط از پاسخ TLD-600 کم می‌کنیم تا دز نوترون‌های حرارتی را به‌دست آوریم. برای دزسنجی نوترون‌های سریع در یک میدان مختلط از جفت TLD-600 و TLD-700 همراه با یک پوشش کادمیومی برای حذف شار نوترن‌های حرارتی محیطی (آلبدو برگشته از بدن) استفاده می‌کنیم (شکل ۱) [۵ و ٦]. سهم دز نوترون و گاما در دزسنج‌های مرکب TLD600-700 با توجه به میزان حساسیت و پاسخ‌دهی ^{7}Li و ^{6}Li به نوترون حرارتی و گاما در جدول (۱) آورده شده است [۷ و ۸].

جدول ۱: مقایسهٔ حساسیت دزسنج‌های TLD-600 و TLD-700 به نوترون حرارتی و گاما [۸]

TLD Material	6Li ٪	7Li ٪	حساسیت نسبی به γ	حساسیت نسبی به n_{th}
^{7}LiF(TLD-700)	0.007	99.993	0.86	1.1×10-2
^{6}LiF(TLD-600)	95.62	4.38	1.06	15.2

محاسبهٔ دز برای گاما، نوترون‌های حرارتی و سریع با استفاده از دزسنج‌های TLD 600-700 از روابط زیر پیروی می‌کند:

Gamma Dose: $H_P(10) = TL'_2 \times k_P$ (۱)

Thermal neutron dose: $H_{th}(10) = [\ (TL'_4 - TL'_3)\ ] \times k_{th}$ (۲)

Fast neutron dose: $H_f(10) = (TL'_1 - TL'_4) \times k_f$ (۳)

k_p ضریب کالیبراسیون گاما، k_{th} ضریب کالیبراسیون نوترون حرارتی و k_F ضریب کالیبراسون برای نوترون سریع است. برای استفاده از دزسنج TLD 600-700 نوترون گاما بر پایهٔ روش‌های استاندارد نخست، بایستی دزسنج‌ها در میدان‌های مرجع در دزهای گوناگون تحت پرتودهی قرار گیرند تا بتوان ضریب دز- پاسخ آن‌ها را تعیین کرد (در واقع، دز معادل- پاسخ که از این پس، برای سادگی با دز- پاسخ نشان داده می‌شود) [٤]. درخصوص پرتوهای گاما، این امر نسبتاً به‌آسانی انجام می‌پذیرد و ثابت شده که پاسخ دزسنج‌های گرماتاب از وابستگی کمی به انرژی در محدوده‌ای که بیشتر کاربردها در آن قرار می‌گیرند، برخوردار است [۷-۹]. اما کالیبره‌کردن این دزسنج‌ها با یک نوع منبع پرتوزای نوترونی و به‌کارگیری آن‌ها در میدان‌های کاری گوناگون، همواره مورد پرسش بوده است. متأسفانه در این زمینه، تنها یک منبع وجود دارد که پیشنهاد آن بدون اعمال ضرایب اصلاحی تجربی در کشور (آزمایشگاه‌های مرجع یا تأسیساتی که از این دزسنج‌ها بهره می‌گیرند) قابل کاربرد نیست؛ زیرا بر روی گونه و دستهٔ مشخصی از دزسنج‌های فردی گرماتاب انجام شده است؛ به همین دلیل،

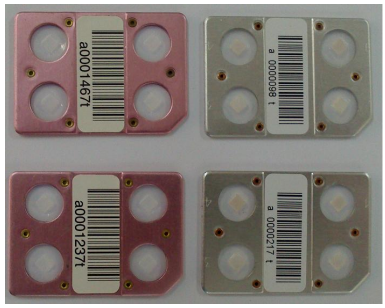
نتایج آن مستقل از نمونهٔ به‌کاررفته نیست [٤]. این پژوهش به بررسی تجربی وابستگی پاسخ دزسنج‌های گرماتاب نوترون-گامای به‌کاررفته در خدمات دزسنجی فردی کشور پرداخته و بر پایهٔ اطلاعات به‌دست‌آمده، ضریب مناسبی برای اصلاح پاسخ دزسنج‌های کالیبره‌شده در یک میدان نوترونی، به دز ثبت‌شده در میدان دیگر ارائه می‌کند.

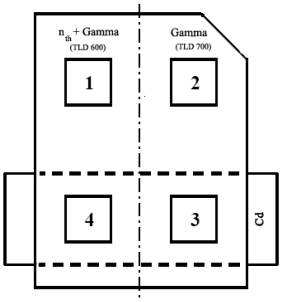
۲. روش کار

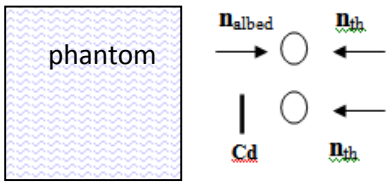
در این تحقیق کارت TLD دزسنجی نوترون-گاما ، حاوی دو کریستال TLD-600 و دو کریستال TLD-700 با آرایش ٦٧٧٦ است (در این نمایه ٦ نماینده TLD-600 و ٧ نماینده TLD-700 است) استفاده شده است. با توجه به اینکه TLD-600 نسبت به پرتوهای گاما و نوترون حساسیت دارد و TLD-700صرفاً دز گاما را اندازه‌گیری می‌کند، سهم دزهای نوترون و گاما تفکیک‌پذیرند. اتم‌های Li-6 موجود در TLD-600 طی برهم‌کنش با نوترون‌های حرارتی به‌صورت واکنش $^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$ با سطح مقطع ۹٦۰ بارن، منجر به تولید اکتیویتهٔ درونی ناشی از تریتیوم ^{3}H با نیمه‌عمر تقریباً ۱۲ سال می‌شود. عدد اتمی LiF (۸/۱٤) تقریباً نزدیک عدد اتمی بافت (۷/٤) است؛ این دزسنج یکی از گزینه‌های مناسب برای دزسنج فردی در میدان‌های آمیخته نوترون-گاما می‌باشد [۱]. در این تحقیق، پاسخ دزسنج‌های گرماتاب از TLD600-700 ساخت شرکت هارشا مورد بررسی قرار گرفته شده است. این کریستال‌ها دارای ابعاد حدود ۳/۱ × ۳/۱ میلی‌متر و به ضخامت ۰/٤ میلی‌مترند. کارت‌های TLD در میدان نوترونی چشمه‌های ^{241}Am-Be و ^{252}Cf در دزهای ۵۰ mSv تا ۱ Sv در هوا پرتودهی شده‌اند. سپس فرایند خوانش و بررسی پاسخ و تفسیر داده‌ها انجام شده است. همچنین، نسبت پاسخ این دزسنج برای چشمه‌های ^{241}Am-Be و ^{252}Cf نیز تعیین شده است.

۱.۲. پاسخ دزسنج‌های TLD600-700 ساخت هارشا در میدان نوترونی چشمه‌های ^{241}Am-Be و ^{252}Cf در دزهای مختلف

در این بررسی، از ٤ کارت TLD 600-700 ٤ کریستالی (با آرایش ٦٧٧٦) استفاده شده است. کارت‌ها در فاصلهٔ ۲۰ سانتی‌متری از چشمه‌های ^{241}Am-Be و ^{252}Cf در هوا پرتودهی شده‌اند. چشمهٔ ^{241}Am-Be موجود در آزمایشگاه کالیبراسیون بخش پایش پرتوی، دارای پرتوزایی ۳۷۰ GBq داخل استوانه ضد زنگ استیلی به قطر ۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ٦۰ میلی‌متر قرار گرفته است. شار نوترونی این چشمه 1.97×10^{7} (n/s) است. نیمه‌عمر ^{241}Am-Be ^{241} حدود ٤۰۰ سال است. چشمهٔ ^{252}Cf دارای شار نوترونی 2.97×10^{7} (n/s) و نیمه‌عمر ۲/٦۵ سال است. آرایش و چگونگی پرتودهی کریستال‌های کارت TLD در میدان نوترون، در شکل (۱) آمده است.







TL_1 : n_{th} + n_{albedo} + gamma

TL_2 : gamma

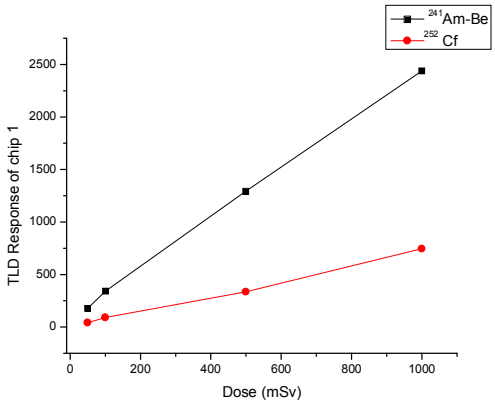
TL_3 : gamma

TL_4 : n_{th} + gamma

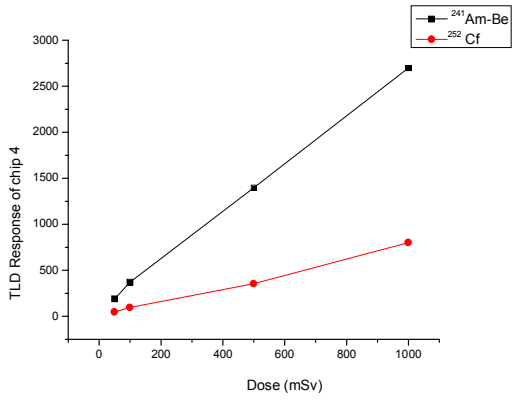
شکل ۱: کارت TLD600-700 ۴ بلوری استفاده‌شده در پرتودهی با چشمه‌های نوترون- گاما

۳. نتایج

شکل‌های (۱) و (۲) داده‌های به‌دست‌آمده از قرائت دزسنج‌های TLD 600-700 ساخت هارشا است که در حال حاضر، در خدمات دزسنجی نوترون- گاما کشور استفاده می‌شود و با چشمه‌های Am-Be ^{241} و Cf ^{252}، در دزهای پایین و نسبتاً بالا پرتودهی شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند پاسخ از دزهای پایین تا دزهای نسبتاً بالا، خطی‌بودن پاسخ دزسنج را نشان می‌دهد [۱۰]. یکی دیگر از نگرانی‌های موجود در به‌کارگیری دزسنج‌های گرماتاب، به‌ویژه در پرتوگیری‌های بالای نوترونی، تخلیه نشدن آن‌ها در خوانش کامل است که بررسی حاضر، قابلیت اطمینان مناسب در این زمینه را تأیید می‌کند؛ زیرا پرتودهی با دز بالا پیش از پرتودهی با برخی دزهای پایین صورت گرفته، اما اثر دز باقی‌مانده (Residual Dose) در آن‌ها مشاهده نشده است.



شکل ۲: روند پاسخ بلور ۱ (^{6}LiF) کارت‌های TLD 600-700 در دزهای مختلف



شکل ۳: روند پاسخ بلور ۴ (^{6}LiF) کارت‌های TLD 600-700 در دزهای مختلف

۱.۳. به‌دست آوردن پاسخ دزسنج‌های نوترون گاما برای چشمهٔ ^{241}Am-Be جهت به‌کارگیری در چشمهٔ ^{252}Cf

برای ارزیابی پاسخ چشمه‌های Am-Be ^{241} و Cf ^{252} از ٤ کارت TLD 600-700 استفاده می‌کنیم. ٤ کارت TLD داخل بج، روی فانتوم، در فاصلهٔ ۵۰ سانتی‌متری از چشمه‌های Am-Be ^{241} و Cf ^{252} در دز ۱۰ mSv پرتودهی شده‌اند. جدول (۲) نسبت پاسخ به دز (Response/ Dose(nC/mSv)) کارت‌های TLD 600-700 پرتودهی با چشمهٔ Cf ^{252} و Am-Be^{241} در دز ۱۰ mSv نشان می‌دهد و قابل مقایسه با نتایج سایر بررسی‌ها می‌باشد [۵]. بعد از محاسبهٔ پاسخ‌های تصحیح‌شده، برای نوترون حرارتی پاسخ TL_4 را از پاسخ TL_3 و برای نوترون آلبدو پاسخ TL_1 را از پاسخ TL_4 کم کرده تا پاسخ نوترون نرمال و آلبدو به‌دست آید (شکل ۱).

پاسخ نسبی برای نوترون حرارتی ($TL'_4 - TL'_3$) در پرتودهی با چشمهٔ Am -Be ^{241} به چشمهٔ Cf ^{252} برابر است با:

$$\frac{67.9 \pm 1.68}{64.62 \pm 3.65} = 1.05$$

پاسخ نسبی برای نوترون آلبدو ($TL'_1 - TL'_4$) در پرتودهی با چشمهٔ Am-Be ^{241} به چشمهٔ Cf ^{252} برابر است با:

$$\frac{51.5 \pm 4.91}{41.80 \pm 1.38} = 1.30$$

فرمول محاسبهٔ TLهای تصحیح‌شده با اعمال فاکتورهای RL و ECC و Background نیز در زیر آمده است:

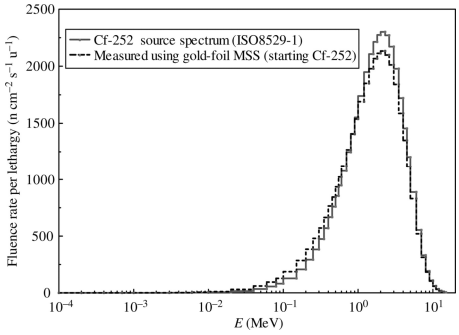
$$corrected TL_i = TL_i' = (TLi \times \frac{RL0}{RLi} \times ECC_i - TL_{iBG} \times \frac{RL0}{RL_{iBG}} \times ECC_{iBG}) \quad (٤)$$

- Reference Light (Rl): پاسخ ذاتی سیستم الکترونیکی قرائتگر است که به عنوان یک ضریب تصحیح در خروجی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- Element Correction Coefficient (ECC): ضریب تصحیح المان است که برای همسان سازی بین کریستال‌های TLD از نظر مشخصات ذاتی در تصحیح پاسخ کریستال بعد از قرائت استفاده می‌شود.

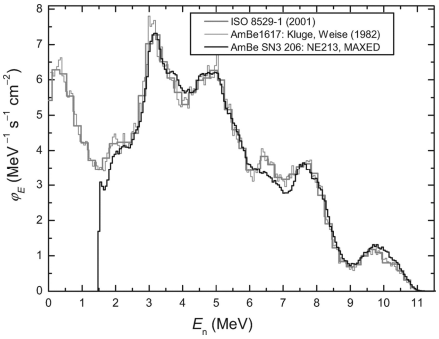
جدول ۲: نسبت پاسخ به دز کارت‌های TLD 600-700 پرتودهی با چشمهٔ ^{252}Cf و ^{241}Am-Be در دز ۱۰ mSv

Response/Dose (nC/mSv)	TL600-1	TL700-2	TL700-3	TL600-4
^{241}Am-Be	15.3 ±0.7	4. 08 ±0.57	3. 07 ±0.51	9. 84 ±0.28
^{252}Cf	11.63 ±0.67	0.6 ±0.1	0.987 ±0.17	7. 44 ±0.54

طیف چشمهٔ ^{252}Cf نسبت به چشمهٔ ^{241}Am-Be از نوترون‌های نرمال‌تری برخوردار است و انرژی نوترون‌های چشمهٔ ^{241}Am-Be بیشتردر دستهٔ نوترون‌های سریع قرار می‌گیرد (شکل‌های ٤ و ٥). حساسیت TLD 600 هم بیشتر برای نوترون‌های نرمال است؛ بنابراین، پاسخ TLD 600 برای چشمهٔ ^{252}Cf بهتر است، ولی در بخش نوترون‌های سریع، پاسخ برای چشمهٔ ^{241}Am-Be بهتر می‌شود. سطح مقطع واکنش TLD 600 برای نوترون‌های حرارتی 924.4 بارن است [۱۱].



شکل ۴: طیف نوترونی چشمهٔ ^{252}Cf



شکل ۵: طیف نوترونی چشمهٔ ^{241}Am- Be

٤. بحث و نتیجه‌گیری

امروزه استفاده از دزسنج‌های گرماتاب ^{7}LiF و ^{6}LiF در دزسنجی میدان‌های مختلط نوترون- گاما رواج بسیاری یافته است. مبنای این توانمندی در استفاده از بج‌های مجهز به فیلتر کادمیوم و کارت‌های TLD 600-700 است که این دزسنج‌هارا قادر به تفکیک دزهای گاما، نوترون تند و حرارتی می‌سازد. در کنار این قابلیت‌ها، ویژگی‌های مهمی مانند وابستگی پاسخ به دز و انرژی و نیز اثر باقی‌ماندن انرژی در کریستال پس از پرتوگیری با دزهای بالای نوترونی در منابع به‌طور کمّی، مورد اشارهٔ کامل قرار نگرفته است. به همین دلیل، پژوهش حاضر به ارزیابی کمّی این ویژگی‌های بسیار مهم پرداخته است. تحقیق تجربی انجام‌شده روی TLDهای مورد استفاده در سرویس خدمات دزسنجی فردی نوترون_ گامای کشور نشان می‌دهد که پاسخ TL آن‌ها در رنج گسترده‌ای از دزهای پرتودهی‌شده با چشمه‌های ^{241}Am-Be و ^{252}Cf از روند خطی برخوردار است. همچنین، مقاوم بودن آن‌ها در دزهای نسبتاً بالا، برای کاربردهای بعدی مورد تأیید قرار گرفت (وابستگی کم به تاریخچهٔ کاربرد). سومین ویژگی مهم بررسی‌شده، پاسخ دزسنج به طیف انرژی نوترونی بود که اطلاعا کمّی لازم در مورد آن وجود نداشت. نشان داده شد که TLDهای مورد بررسی از وابستگی سریع پاسخ به انرژی در دزسنجی نوترون برخوردارند. این وابستگی به‌طور کمّی سنجیده شد. با برآورد پاسخ دزسنج نوترون گاما برای چشمه‌های ^{241}Am-Be و ^{252}Cf به عنوان دو چشمهٔ پرکاربرد در صنعت و شباهت دومی به طیف راکتور، ضریب اصلاح مناسب برای تبدیل دز ثبت‌شده در میدان یک چشمه به دز واقعی، با توجه به چشمه‌ای که برای کالیبره‌کردن دزسنج‌ها به‌کار گرفته شده، ارائه گردیده است.

٥. مراجع

[1] F. Manouchehri,, F. Torkzadeh, N. Mirzajani, Sh. Jalilian. Thermal Neutron Fluence Measurements Using Thermoluminescence Dosimeter TLD-600. J. Nuclear Sci. and Tech. No. 42, (2008) 1-6.

[2] R. Mendez, M.P. Iniguez, R. Barquero, A. Mananeset and et.al. Response Componets of LiF: Mg, Ti Around A Moderated Am-Be Neutron Source. Radiat. Prot. Dosim. Vol 98, No. 2. (2002) 173-178.

[3] M. Hajek, Applied Neutron Spectrometry, PhD Thesis,Austria; 2002.

[4] R.J. Tanner, D.J. Thomas, D.T. Bartllet, L.G. Hager,

N. Horwood, G.C. Taylor. Effect of the Energy Dependence of Response of Neutron Personal Dosemeters Routinely Used in the UK on Accuracy of Dose Estimation, NRPB – W25;(2002).

[5] E.B.Souto and L.L Campos, Brazilian Gamma-Neutron Dosimeter: Response to ^{241}Am-Be and ^{252}Cf Neutron Sources, Radiat. Prot. Dosim. (2003) 1 -3.

[6] R.V. Griffith, D.E. Hankins, R.B. Gammage, et.al., Recent developments in personal neutron dosimeter, Health Phys. 36 (1977), 235 .

[7] V.I. Karpova et al., Collected Papers on Several Problems in the Dosimetry and Radiometry of Ionizing Radiation [inRussian],Yu.V. Sivintsev, ed., Atomizdat, No.i, p.98, Moscow (1990).

[8] H.B. Greiss, Neutron Spectrum of Am-Be Source, Nucleonik (In German)10 , (1968) 283-287.

[9] F. F. Morehead and F. DanielsThermoluminescence and Coloration of Lithium Fluoride Produced by Alpha Particles, Electrons, Gamma Rays, and Neutrons , J. Chem. Phys. 27 (1957) 1318.

[10] Y.S. Yoo, P.S. Kim and P.S. Moon. A study on the neutron dosimetry with LiF themoluminescent. J. Korean. Nucl. Soci. Vol. 7, No. 3, (1975) 191-199.

[11] N. Goldstein, W. G. Miller and P. F. Rago, Additivity of neutron and gamma exposures for TLD dosimeters. Health Phys. 18(1970) 157-158.