

## اندازه‌گیری دز گامای ایجاد شده توسط نوترون‌های حرارتی در دزسنج TLD-700

فلامرز ترک‌زاده<sup>۱\*</sup> و منصور جعفری‌زاده<sup>۲،۱</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> امور حفاظت در برابر اشعه کشور، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

\* تهران، انتهای خیابان کارگر شمالی، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، کدپستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵

پست الکترونیکی: [ftorkzadeh@aeoi.org.ir](mailto:ftorkzadeh@aeoi.org.ir)

### چکیده

پاسخ ایجاد شده توسط واکنش نوترون‌های حرارتی با فانتوم آب و مواد تشکیل دهنده بچ-دزسنج TLD-600,700 در تراشه TLD-700 در یک میدان مختلط نوترون حرارتی-گاما اندازه‌گیری شد. با استفاده از رابطه‌ی مستقیم بین شارش نوترون‌های حرارتی و پاسخ گرماتابی حاصل از واکنش نوترون‌های حرارتی با فانتوم آب و مواد تشکیل دهنده بچ-دزسنج گرماتاب، که در تراشه TLD-700 ایجاد می‌شود، یک رابطه تجربی برای بدست آوردن دز مضاعف ایجاد شده توسط نوترون‌های حرارتی، بدست آمد. اندازه‌گیری در دو میدان مخلوط نوترون-گامای متفاوت نشان داد که استفاده از این رابطه تجربی، بسته به میزان شارش نوترون حرارتی میدان نوترون-گاما، خطا را در تعیین دز گامای محیط تا چندین برابر کاهش می‌دهد.

کلیدواژه‌گان: TLD-700، نوترون حرارتی، میدان نوترون-گاما، گامای ثانویه.

### ۱. مقدمه

کادمیوم امکان پذیر نیست که این خود موجب خطای اندازه‌گیری در دز نوترون، چه حرارتی و چه نوترون سریع می‌شود [۳]. برای جلوگیری از نشت نوترون‌های حرارتی بعضی از بچ‌های دزسنج با بور ترکیب شده‌اند و برای عبور نوترون‌های حرارتی یک پنجره کوچک در نظر گرفته شده است [۱]. با اینحال عبور نوترون‌های حرارتی از این پنجره منتهی به واکنش آن‌ها با مواد درون بچ شده و موجب افزایش پاسخ TLD-700 و در نتیجه خطا در اندازه‌گیری دز گاما می‌شود.

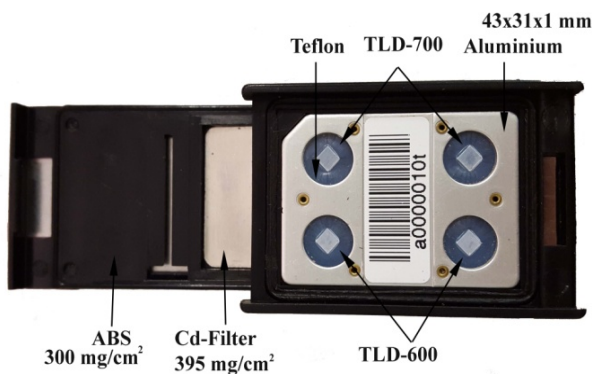
گرچه میزان حساسیت TLD-700 به نوترون‌های حرارتی بدنبال واکنش  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$  با در نظر گرفتن مقدار بسیار کم  ${}^6\text{Li}$  موجود در TLD-700 ناچیز است، ولی با افزایش نوترون‌های حرارتی مقدار این حساسیت افزایش می‌یابد و با گذشتن زمان، از زمان پرتوهی هسته‌های ایزوتوپ ناپایدار  ${}^3\text{H}$

برای اندازه‌گیری دز نوترون و گامای پرتوکاران در میدان مخلوط نوترون-گاما معمولاً از دزسنج‌های گرماتاب TLD-600 ( ${}^6\text{Li} \ 95/6$ ) و  ${}^7\text{Li} \ 4/4$  و TLD-700 ( ${}^6\text{Li} \ 0/007$ ) و  ${}^7\text{Li} \ 99/993$  در یک بچ نگهدارنده مجهز به یک فیلتر کادمیوم برای تفکیک نوترون‌های حرارتی از نوترون‌های آلبدو سریع و جداگانه، برای اندازه‌گیری نوترون‌های سریع از یک فیلم ردپای هسته‌ای از جنس پلی‌کربنات یا CR-39 استفاده می‌شود [۱،۲]. با توجه به اینکه TLD-700 به پرتوگاما و TLD-600 به نوترون‌های حرارتی و پرتوگاما حساس است، دز نوترون در TLD-600 با حذف سهم دز گاما که بوسیله‌ی TLD-700 ثبت شده است، بدست می‌آید. برای تمایز نوترون‌های حرارتی از نوترون‌های آلبدو سریع نیز از یک فیلتر کادمیوم استفاده می‌شود. برای اغلب دزسنج‌های آلبدو جلوگیری کامل از نشت نوترون‌های حرارتی با استفاده از فیلتر

گامای دریافتی توسط بیمار دز گامای محیط را نیز بدست آورد. در این تحقیق میزان اثر نوترون‌های حرارتی بر پاسخ TLD-700 مورد بررسی تجربی قرار گرفته است و برای اندازه‌گیری و محاسبه پاسخ ایجاد شده در TLD-700، در نتیجه‌ی واکنش با نوترون‌های حرارتی یک رابطه تجربی ارائه شده است.

## ۲. ابزار و روش

برای انجام این تحقیق از ۵ کارت دزسنج TLD ساخت شرکت هارشا-بایکرون (در حال حاضر Thermo Scientific) که مطابق شکل ۱ هر یک دارای ۴ تراشه شامل ۲ عدد TLD-600 و ۲ عدد TLD-700 به ابعاد  $3/2 \times 3/2 \times 0/9 \text{ mm}^3$  استفاده شد. این چهار دزسنج بین دو لایه تغلون که خود در محل چهار حفره کارت آلومینیومی قرار دارند، پرس شده‌اند. یک جفت تراشه TLD-600 و TLD-700 با یک نوار کادمیوم ( $28 \times 13 \times 0/4 \text{ mm}^3$ ) در مقابل پرتو فیلتر شده‌اند. این کارت-دزسنج‌ها در میدان گامای یک چشمه  $^{60}\text{Co}$  با آهنگ دز  $2/5 \text{ mSv/h}$  با دزهای  $0/5$  تا  $50 \text{ mGy}$  به منظور کالیبراسیون گاما مورد پرتودهی قرار گرفتند. برای هر پرتودهی یک بچ-دزسنج مدل ۸۸۱۴ همراه با یک کارت دزسنج 6776 مطابق شکل ۱، جلوی فانتوم تخت محتوی آب به ابعاد  $3 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$  قرار گرفت. برای پرتودهی دزسنج‌ها با نوترون‌های حرارتی از پرتودهی انجام گرفته توسط آژانس بین المللی انرژی اتمی [IAEA] و همین‌طور از یک پرتودهی با استفاده از رآکتور صفر قدرت اصفهان استفاده شد.



شکل (۱): کارت-دزسنج نوترون-گاما TLD600-700 همراه با

بچ ۸۸۱۴

تشکیل شده با نیمه عمر  $12/323$  سال، انرژی واپاشی و انرژی ذرات بتا را با انرژی بیشینه  $18 \text{ keV}$  به دزسنج TLD-700 منتقل می‌کند. علاوه بر این، واکنش نوترون‌های حرارتی با فانتوم آب و مواد دیگر موجود در بچ دزسنج مانند کادمیوم، پلاستیک ABS، آلومینیوم و فلوتور موجود در LiF نیز باعث ایجاد ذرات بتا و گاما می‌شود که با شارش نوترون‌های حرارتی متناسب است. کاریلو یک ساختار بچ را برای منزوی کردن TLD-700 در مقابل نشت نوترون‌های حرارتی پیشنهاد کرده است [۴]. ولی تلاش برای منزوی کردن TLD-700 در مقابل نوترون‌های حرارتی از یک طرف، مانع عبور محصولات واکنش بچ و محتویات آن به TLD-700 نمی‌شود و از طرف دیگر باعث پایین آمدن پاسخ دزسنج‌های TLD-600 نیز می‌شود و بنابراین خطا در اندازه‌گیری دز گاما بجا می‌ماند.

لی‌یو منشأ پاسخ به نوترون‌های حرارتی را فقط وجود مقدار  $^{6}\text{Li} / 0/007$  در TLD-700 و واکنش  $^{6}\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$  می‌داند و برای حذف آن یک رابطه تحلیلی مرتبط با شارش بر اساس واکنش نوترون‌های حرارتی با  $^{6}\text{Li}$  و استفاده از فیلتر را پیشنهاد می‌کند [۵]. ولی نسبت حدود تنها ۳۰ برابری پاسخ TLD-600 به TLD-700 برای نوترون‌های حرارتی نشان می‌دهد که (با در نظر گرفتن فاکتور خودمانعی  $0/427$  برای TLD-600) فقط واکنش  $^{6}\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$  در ایجاد این پاسخ در TLD-700 نقش ندارد بلکه انرژی واکنش نوترون‌های حرارتی با دیگر مواد تشکیل دهنده بچ مانند فیلتر کادمیوم، پلاستیک ABS یا اکریلونیتریل بوتادین استیرن، آلومینیم (بکار رفته در کارت دزسنج) و فلوتور موجود در LiF بصورت ذرات بتا و فوتون‌ها به TLD-700 منتقل می‌شود. علاوه بر این، هندسه بچ-دزسنج نیز در این پاسخ نقش دارد که در تحقیق "می‌یو" به آن اشاره‌ای نشده است. برای اندازه‌گیری دقیق دز گاما در میدان مختلط نوترون-گاما ابتدا باید سهم پاسخ ایجاد شده بوسیله مواد تشکیل دهنده بچ را تعیین و حذف کرد. برای اندازه‌گیری یا تخمین پاسخ ایجاد شده بوسیله واکنش نوترون‌های حرارتی، به اطلاعات شارش نوترون حرارتی در میدان پرتو احتیاج است. یکی از مواردی که با شارش بالایی از نوترون‌های حرارتی و نیمه حرارتی مواجه هستیم، مورد استفاده از پرتو نوترون در روش پرتودرمانی BNCT است. با استفاده از اطلاعات طیف نوترون در این روش، می‌توان علاوه بر دز

جدول (۱): نتایج دز اندازه‌گیری شده با کارت دزسنج TLD-600-700 و

دزسنج مرجع پرتودهی IAEA		
شارش $\phi = 3.37 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$		
دز نوترون حرارتی (mSv)	دز گاما (mSv)	
۳/۳۷	۰/۱۲	اندازه‌گیری دستگاه
۴/۲	۱/۰	اندازه‌گیری TLD
۰/۸۳	۰/۸۸	تفاضل ردیف ۱ و ۲

مطابق نتایج این پرتودهی در جدول ۱ دز نوترون حرارتی  $3.37 \text{ mSv}$  با در نظر گرفتن ضریب تبدیل شارش به دز  $(\text{Hp}(10)/\phi (\text{pSv.cm}^{-2})) [7] 10$  شارش نوترون حرارتی  $3.37 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$  بدست می‌آید که با دز گامای موجود در میدان  $D_g = 0.12 \text{ mSv}$  همراه بوده است. تفاضل نتایج مربوط به اندازه‌گیری دستگاه و اندازه‌گیری TLD-700 یعنی دز  $0.88 \text{ mSv}$  ناشی از دز مضاعفی است که در نتیجه واکنش نوترون‌های حرارتی با فانتوم آب و مواد موجود در بیج ایجاد شده است و با دز نوترون حرارتی رابطه مستقیم دارد.

در چهارچوب این اندازه‌گیری مقایسه‌ای بین‌المللی، مقدار دز نوترون حرارتی نیز با استفاده از TLD-600mSv اندازه‌گیری شد. بعد از تاثیر دادن اثر نشت نوترون‌های حرارتی از اطراف و درون کادمیوم که بر اساس تخمین هنکینز [۳] حدود  $40\%$  است مقدار تصحیح شده،  $4.2 \text{ mSv}$  برای دز نوترون‌های حرارتی بدست آمد. تفاضل نتایج بین ردیف اول و دوم ناشی از مجموع خطاهای اندازه‌گیری و خطای محاسباتی تخمین هنکینز یعنی نشت  $40\%$  است که به هندسه دزیمتر-بیج مرتبط است. با در نظر گرفتن مقدار  $50\%$  نشت نوترون‌های حرارتی بجای  $40\%$  این خطا به حداقل می‌رسد، که بررسی این مطلب، خود نیاز به تحقیق جداگانه‌ای دارد. برای حذف مقدار پاسخ دزسنج‌های TLD-700 به واکنش‌های نوترون‌های حرارتی در بیج و دزسنج‌ها، با استفاده از رابطه مستقیم بین مقدار این پاسخ اضافی و شارش نوترون‌های حرارتی، در محدوده‌ی خطی پاسخ دزیمترهای TLD-600 و TLD-700 (یعنی معادل دز گامای  $10 \text{ Sv}$ )، می‌توان از روابط تجربی زیر استفاده نمود.

$$D_g = I_{\text{TLD}} \times k_g - I_{\phi} \times \phi_{\text{th}} \quad (1)$$

$$D_g = I_{\text{TLD}} \times k_g - I_D \times D_{\text{th}} \quad (2)$$

در پرتودهی IAEA که در چهارچوب یک اندازه‌گیری مقایسه‌ای بین‌المللی تحت عنوان دزسنجی مقایسه‌ای بین‌المللی برای اندازه‌گیری کمیت معادل دز  $H_p(d)$  در میدان‌های مخلوط نوترون-گاما<sup>۱</sup> انجام شد، دزسنج‌های نصب شده روی فانتوم آب با دزهای مختلف نوترون و گاما از جمله نوترون‌های حرارتی با دز  $D_n = 3.37 \text{ mSv}$  و دز گاما  $D_g = 0.12 \text{ mSv}$  مورد پرتودهی قرار گرفتند. این پرتودهی با استفاده از یک میدان پرتو نوترون حرارتی، با آلودگی کم نوترون‌های نیمه حرارتی و سریع انجام شد به طوری که شار کل نوترون‌ها  $1770 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$  و سهم نوترون‌های حرارتی  $88/4\%$  بوده است. در پرتودهی توسط رآکتور صفر قدرت اصفهان دزسنج‌ها روی سطح خارجی دیواره گرافیت رآکتور با شار  $\phi = 2170 \pm 0.5 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$  پرتودهی شدند. برای هر دو پرتودهی با نوترون حرارتی، یک کارت-دزسنج به منظور اندازه‌گیری دز زمینه، در طول زمان ارسال تا زمان دریافت و قرائت دزسنج‌ها در محیط دور از پرتودهی نگهداری و مقدار دز زمینه‌ی اندازه‌گیری شده از مقادیر دز دزسنج‌ها کم شد. برای قرائت دزسنج‌ها از دستگاه قرائت‌گر Harshaw مدل ۶۶۰۰ استفاده شد.

### ۳. نتایج

برای بدست آوردن نسبت تناسب بین دز گامای ایجاد شده در فانتوم آب و بیج و شارش یا دز نوترون حرارتی از نتایج قرائت کارت‌های دزسنج TLD کالیبره شده با پرتو نوترون حرارتی و پرتو گاما در میدان نوترون-گامای ارائه شده از طرف آژانس بین‌المللی انرژی اتمی استفاده شد. نتایج پرتودهی در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول دز گامای ارائه شده  $0.12 \text{ mSv}$  دز اولیه گاما مربوط به میدان است و دز ثانویه حاصل از واکنش نوترون‌ها با فانتوم آب و بیج در آن لحاظ نشده است ولی دز اندازه‌گیری شده با TLD یعنی  $1 \text{ mSv}$  شامل دز گامای میدان و دز ثانویه است که پرتوکار یا بیمار دریافت می‌کند. اندازه‌گیری هر دوی این مقادیر دز با یک دزسنج TLD-700 بطور همزمان انجام می‌شود.

<sup>1</sup>Intercomparison on measurements of quantity personal dose equivalent  $H_p(d)$  in mixed field (neutron-gamma) fields

همخوانی دارد دز گامای کل شامل دز میدان و دز ثانویه  $0.160 \text{ mSv}$  با استفاده از قرائت TLD-700 اندازه‌گیری شد.

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه پاسخ دزسنج‌های TLD-700 در میدان نوترون-گاما علاوه بر پرتو گاما به نوترون‌های حرارتی و محصولات واکنش نوترون‌های حرارتی با مواد موجود در درون بیج نیز مربوط می‌شود بررسی‌هایی که در این تحقیق انجام شد نشان داد که با افزایش شارش نوترون‌های حرارتی پاسخ دزسنج‌های TLD-700 نیز افزایش می‌یابد و موجب خطای قابل ملاحظه‌ای در اندازه‌گیری دز می‌شود. در صورت عدم تصحیح این خطا، میزان تاثیر پاسخ دز نوترون حرارتی در TLD-700 می‌تواند به اندازه‌گیری چندین برابری دز گامای میدان منتهی شود. با استفاده از یک رابطه تجربی که در این تحقیق ارائه شده است می‌توان این پاسخ متناسب با شارش نوترون حرارتی را محاسبه و از دز گامای اندازه‌گیری شده بوسیله‌ی TLD-700 (دز بیمار یا پرتوکار) کسر نمود و دز میدان را بدست آورد. در این روش از یک ضریب ثابت که به بیج-دزسنج بستگی دارد، استفاده می‌شود و در صورت استفاده از یک بیج-دزسنج دیگر لازم است جداگانه مطابق روش ارائه شده در این تحقیق، مقدار آن محاسبه شود.

در رابطه ۱،  $D_g$  دز گامای میدان،  $I_{TLD}$  نتیجه قرائت دزسنج TLD-700،  $I_\phi$  یک ضریب ثابت مربوط به بیج-دزسنج است که بر اساس نسبت پاسخ ایجاد شده  $0.118 \text{ mSv}$  به شارش نوترون یعنی  $\phi_{th} = 3.37 \times 10^6 \pm 5\% \text{ n/cm}^2$  وارد شده و مقدار آن  $I_\phi = 2.61 \times 10^{-8} \pm 5\% \text{ mSv per n/cm}^2$  است. رابطه ۲ مانند رابطه ۱ است، با این تفاوت که برای محاسبه دز گاما از دز نوترون حرارتی  $D_{th}$  به جای شارش نوترون حرارتی و ضریب ثابت  $I_D = 0.26 \text{ mSv/D}_{th}$  استفاده می‌شود. جدول ۲ نتیجه پرتودهی بمدت  $11.5 \pm 5\%$  دقیقه با نوترون‌های حرارتی با شار  $217.0 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$  در رآکتور صفر قدرت ZPR اصفهان را نشان می‌دهد.

جدول (۲): نتایج اندازه‌گیری دز گاما در ZPR اصفهان.

شارش $\phi = 1.49 \times 10^6 \pm 0.7 \text{ n/cm}^2$			
D <sub>g</sub> میدان mSv	I <sub>φ</sub> × φ <sub>th</sub> mSv	قرائت TLD-700 mSv	دز نوترون حرارتی mSv
0.156 ± 1.5%	0.039 ± 5%	0.160	0.15 ± 5%

با توجه به شارش  $\phi = 1.49 \times 10^6 \text{ n/cm}^2$  و دز نوترون حرارتی  $0.15 \text{ mSv}$  میزان پاسخ ایجاد شده در نتیجه واکنش نوترون-های حرارتی با استفاده از رابطه ۱ معادل  $0.156 \text{ mSv}$  بدست می‌آید که با دز پایین پرتو نوترون‌های حرارتی اعمال شده

#### ۵. مراجع

- [1] E. Piesch and B. Burgkhardt. Albedo Neutron Dosimetry in Radiation Protection. Radiat. Prot. Dosim. 10 1-4 (1985) 175-188.
- [2] IAEA, Neutron Monitoring for Radiological Protection. Technical Reports Series 252 (1985).
- [3] D.E. Hankins. Progress in personal neutron dosimetry. Univ. of Calif. Los Alamos Scientific Lab, Los Alamos, New Mexico 87544 (1969).
- [4] R.E. Carrillo, R.M. Uribe, G.L. Woodruff, T.G. Stoebe. Lithium Fluoride TLD-700 response to a mixed field therm. neutron and gamma field. Radiat. Prot. Dosim. 103 1 (2003) 29-34.
- [5] H.M. Liu, P.C. Hsu, T.F. Liaw. Gamma Dose Measurement in a water Phantom irradiated with the BNCT facility at THOR, Rad. Prot. Dos. 95 No. 4 (2001) 353-358.
- [6] H. Schumacher, R.C. Soares, J.L. Pochar, IAEA. Intercomparison on measurements of the quantity personal dose equivalent  $H_p(d)$  in mixed (neutron-gamma) fields – Analysis of results (2003).
- [7] IAEA, Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments. Safety Reports Series 16 (2000).