



## استفاده از دزیمر ترمولومینسانس ۱۰۰-TLD برای اندازه‌گیری شاریدگی نوترون‌های حرارتی با روش پرتوزاسازی LiF

محسن چیت‌سازان مقدم، فلامرز ترک‌زاده\*، پرویز حسین‌خانی

پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

**چکیده:** در این پژوهش برای اندازه‌گیری شاریدگی نوترون‌های حرارتی در قلب رآکتور تحقیقاتی تهران، ترمولومینسانس حاصل از پرتوزاسازی  ${}^6\text{Li}$  موجود در دزیمر ۱۰۰-TLD استفاده شد. برای به دست آوردن پاسخ دزیمرها، نوترون‌های حرارتی قلب رآکتور تهران در گستره‌ی شاریدگی  $10^{11}$  تا  $10^{16}$  n/cm<sup>2</sup> تنظیم شد. در این روش، دز خودزای حاصل از پرتوزایی تریتم که بعد از دوره‌ی کوتاه نگهداری بین ۱ تا ۳ روز، درون دزیمر به وجود آمده است، برای اندازه‌گیری شاریدگی نوترون‌های حرارتی استفاده شد. بعد از عملیات حرارتی ویژه روی دزیمر و تثبیت پاسخ آن و اندازه‌گیری کاهش حساسیت، نمودار رابطه‌ی خطی بین شاریدگی نوترون و دز خودزا در ۱۰۰-TLD به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده‌ی بازه‌ی اندازه‌گیری بیش‌تر، هم‌چنین وسعت بیش‌تر دامنه‌ی بالای اندازه‌گیری شاریدگی نوترون‌های حرارتی نسبت به ۶۰۰-TLD و وسعت بیش‌تر دامنه‌ی پایین نسبت به ۷۰۰-TLD است.

**کلیدواژه‌ها:** شاریدگی نوترون حرارتی، ترمولومینسانس، واکنش  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ ، پرتوزاسازی TLD

## Application of Thermoluminescence Dosimeter TLD-100 to Measure Thermal Neutron Fluence by LiF Activation Method

M. Chitsazan Moghaddam, F. Torkzadeh\*, P. Hossein Khani

Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran – Iran

**Abstract:** In this study, TL signal induced after activation of  ${}^6\text{Li}$  present in TLD-100 was applied in order to measure the thermal neutron fluence in the Tehran Research Reactor Core (TRRC). To obtain the TLD thermal neutron responses, the TRRC neutron fluences were set in the range of  $10^{10}$  to  $10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>. With this technique, the self-dose as a consequence of  ${}^3\text{H}$  activity, which was raised after a relative short storage time of 1 to 3 days, was used to measure the thermal neutron fluence. After a special thermal treatment, aimed to stabilize the dosimeters and subsequent assessment of sensitivity reduction factors, a linear relationship between the neutron fluence and the induced self-dose was found in the TLD-100. The results showed an extended range for the thermal neutron fluence measurement by the TLD-100, an extended upper limit compared to the TLD-600, as well as, extended lower limit in comparison to the TLD-700.

**Keywords:** Thermal neutron fluence, Thermoluminescence,  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$  reaction, TLD activation

\*email: ftorkzadeh@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۵/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۲/۲۰



## ۱. مقدمه

برای اندازه‌گیری شار<sup>(۱)</sup> نوترون در رآکتور، روش‌های گوناگونی با استفاده از آشکارسازهای فعال مانند کالری‌سنج و روش‌های غیرفعال با استفاده از روش پرتوزاسازی مفتول‌ها مثل مس و طلا و پولک‌های آشکارساز آستانه‌ی انرژی با جنس‌های مختلف مانند In, Ta, Au, Cu, Fe, Ag, Na, Sc بررسی شده‌اند. اخیراً نیز سوگاجی و همکاران با استفاده از آلیاژهای طلا-آلمومینیم، شار نوترون‌ها را در یک رآکتور مینیاتوری 30 kW اندازه‌گیری کردند [۱]. این پژوهش نشان داد، با استفاده از پرتوزاسازی دزیمترهای ترمولومینسانس<sup>(۲)</sup> (TLD) نیز می‌توان به عنوان روشی جای‌گزین در کنار دیگر روش‌ها، شاریدگی<sup>(۳)</sup> نوترون‌های حرارتی را اندازه‌گیری کرد. در این روش، انرژی واپاشی اتم‌های تریتم ( $^3\text{H}$ ) با نیم-عمر  $T_{1/2}=12.32\text{a}$ ، که در نتیجه‌ی واکنش  $^6\text{Li}(n-\alpha)^3\text{H}$  درون TLD جذب می‌شود، به صورت خروجی TL توسط یک خوانش‌گر ترمولومینسانس اندازه‌گیری می‌شود. روشی که در این مقاله مطالعه شد مبتنی بر پرتوزاسازی است ولی در آن به جای ذراتی مثل آلفا، بتا و گاما، شدت TL اندازه‌گیری می‌شود که به شاریدگی نوترون و زمان نگه‌داری بستگی دارد.

پیش از این، در پژوهش‌های دیگر از دزیمتر 600-TLD و 700-TLD برای اندازه‌گیری شاریدگی نوترون به ترتیب در بازه‌های  $10^{11}$  تا  $10^{13}$  n/cm<sup>2</sup> و  $10^{14}$  تا  $10^{18}$  n/cm<sup>2</sup> استفاده شد [۲، ۳].

در این پژوهش، 100-TLD برای اندازه‌گیری شاریدگی نوترون حرارتی در بازه‌ای وسیع‌تر بین  $10^{10}$  تا  $10^{16}$  n/cm<sup>2</sup> در قلب رآکتور استفاده شد. نمونه‌های 100-TLD به دلیل ترکیب طبیعی آن‌ها [ $^6\text{Li}$  (۷.۵٪) و  $^7\text{Li}$  (۹۲.۵٪)] از نظر واکنش با نوترون‌های حرارتی دارای پاسخ یکسانی هستند، و از این نظر نسبت به 600-TLD و 700-TLD که طی فرایند خالص‌سازی  $^6\text{LiF}$  و  $^7\text{LiF}$  تولید می‌شوند، قابل دسترس‌تر بوده و با هزینه‌ی کم‌تری قابل تولید هستند.

## ۲. تئوری

در محدوده‌ی خطی منحنی پاسخ دز، میزان خوانش دز خودزا<sup>(۴)</sup> با تعداد واپاشی‌های اتم‌های تریتم درون TLD متناسب است، به همین دلیل این خوانش با شاریدگی جذب شده در TLD و در نتیجه با شاریدگی نوترون‌های حرارتی موجود در رآکتور نیز متناسب است [۴].

برای استفاده از این تناسب، باید به دو نکته مهم توجه شود:

- اول این که پاسخ و حساسیت دزیمترها پس از پرتودهی با دزهای بالا کاهش می‌یابد. این کاهش از دز 10 kGy برای گاما و شاریدگی  $10^9$  n/cm<sup>2</sup> برای نوترون‌های حرارتی شروع و با میزان دز افزایش می‌یابد [۵]. از آنجایی که معیار بزرگی دز خودزا، TL ناشی از آن است، در نظر نگرفتن کاهش حساسیت دزیمتر موجب خطای اندازه‌گیری در تعیین دز خودزا می‌شود. برای این منظور، لازم است بعد از تثبیت حساسیت دزیمتر به وسیله‌ی عملیات گرمایی ویژه و اعمال ضریب تصحیح فردی، پاسخ کاهش یافته هر دزیمتر اصلاح شود.

- دوم این که (به منظور جلوگیری از رفتار فراخطی) زمان نگه‌داری برای شکل‌گیری TL خودزا، مناسب با پرتوزایی درونی TLD انتخاب شود [۶]. این زمان با اندازه‌گیری آزمایشی برای دزیمتر پرتودهی شده در بالاترین شاریدگی نوترون، طوری انتخاب شد که سیگنال TL مربوط به دز خودزا (معادل دز گاما) در محدوده‌ی خطی پاسخ دز قرار گیرد.

اتم‌های  $^6\text{Li}$  موجود در 100-TLD هنگام برهم‌کنش با نوترون‌های حرارتی به صورت واکنش  $^6\text{Li}(n-\alpha)^3\text{H}$  با سطح مقطع  $960\text{ b}$ ، منجر به تولید پرتوزایی درونی ناشی از تریتم با نیم-عمر 12.32 سال می‌شود.

همراه با این واکنش، واکنش‌های هسته‌ای دیگری نیز در LiF رخ می‌دهند که منجر به تولید رادیوایزوتوپ‌هایی با نیم-عمرهای کوتاه خواهند شد. به جز واکنش  $^3\text{H}^* \rightarrow ^3\text{He} + e + \nu$ ، دیگر ایزوتوپ‌های پرتوزای تولید شده، در مدت زمان چند ثانیه واپاشی می‌نمایند [۲].



$F_{Cd}$  ضریب تصحیح برای عبور نوترون‌های حرارتی از کادمیوم است که به ضخامت آن بستگی دارد. ضریب تناسب  $k$  در رابطه‌ی ۴، مبدل انرژی جذب شده از واپاشی تریتم به نور TL اندازه‌گیری شده است که از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید [۷]:

$$k = \frac{\eta \times E(\beta^* + {}^3\text{He}^*) \times 1.6 \times 10^{-4}}{\rho \times V} \quad (5)$$

در رابطه‌ی ۵،  $E(\beta^* + {}^3\text{He}^*)$  بیان‌کننده‌ی میزان کل انرژی جذب شده به ازای هر واپاشی،  $\rho$  و  $V$  به ترتیب چگالی و حجم هر تراشه،  $\eta$  بازدهی TL برای ذره‌ی بتا با انرژی ۱۸٫۶ keV و  ${}^3\text{He}$  برگشتی است.

شدت TL در روابط بالا (یعنی  $I_{TL}$ ) طبق رابطه‌ی ۶ بعد از اندازه‌گیری به دلیل کاهش حساسیت در اثر القای پرتو در تراشه‌های دزیتر، باید نسبت به حساسیت فردی دزیترها قبل از پرتودهی  $R_0$  و حساسیت آن‌ها بعد از پرتودهی  $R$ ، تصحیح شوند:

$$I_{TL} = I_{TL0} \frac{R_0}{R} \quad (6)$$

### ۳. روش کار

در این پژوهش، ۶ عدد تراشه TLD-۱۰۰ به ابعاد  $0.89 \times 3.17 \times 3.17$  میلی‌متر مکعب از شرکت هارشا<sup>(۷)</sup> با حساسیت‌های نزدیک به هم انتخاب شدند. دزیترها قبل از هر پرتودهی با استفاده از عملیات بازپخت<sup>(۸)</sup> استاندارد، یک ساعت در دمای  $400^\circ\text{C}$  و دو ساعت در دمای  $100^\circ\text{C}$  قرار گرفتند. قبل از پرتودهی با نوترون، حساسیت دزیترها نسبت به پرتو بتا محاسبه شد. بعد از پرتودهی در میدان نوترون-گاما در قلب رآکتور تحقیقاتی، جهت تثبیت حساسیت، دزیترها به مدت هشت ساعت در دمای  $400^\circ\text{C}$  حرارت‌دهی و سپس با آهنگ حرارتی طبیعی تا رسیدن به دمای آزمایشگاه سرد شدند. برای عملیات بازپخت، از کوره‌ی حرارتی ATRA مدل ۸۳۹۵ با دقت  $\pm 2^\circ\text{C}$  استفاده شد.

به منظور افزایش دقت در به دست آوردن میزان کاهش پاسخ ناشی از پرتودهی بالا، اندازه‌گیری حساسیت پس از پرتودهی در رآکتور دوبار تکرار شد. با محاسبه‌ی نسبت پاسخ‌های قبل و بعد

برای بررسی نوع ارتباط بین پرتوزاشدن نوترونی با خروجی TL ناشی از دز خودزا، از روابط مربوط به پرتوزاسازی نوترون استفاده شده است. برای تعیین تعداد اتم‌های تریتم،  $N_t$ ، موجود در دزیتر ۱۰۰-TLD از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$N_t = \sigma_{th} \Phi n VG \quad (1)$$

در رابطه‌ی ۱،  $\sigma_{th}$  سطح مقطع جذب،  $\Phi$  شاریدگی نوترون حرارتی و نیمه حرارتی،  $n$  تعداد اتم‌های  ${}^6\text{Li}$  در واحد حجم دزیتر ( $V$ ) و  $G$  ضریب خودمانعی دزیتر هستند [۴]. با توجه به استفاده از دزیترهای پوشیده با و بدون پوشش کادمیوم ( $\text{Cd}$ )، با در نظر گرفتن انرژی آستانه‌ی<sup>(۵)</sup> جذب برای کادمیوم، تعداد اتم‌های پرتوزا شده توسط نوترون‌های حرارتی،  $N_{th}$ ، از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

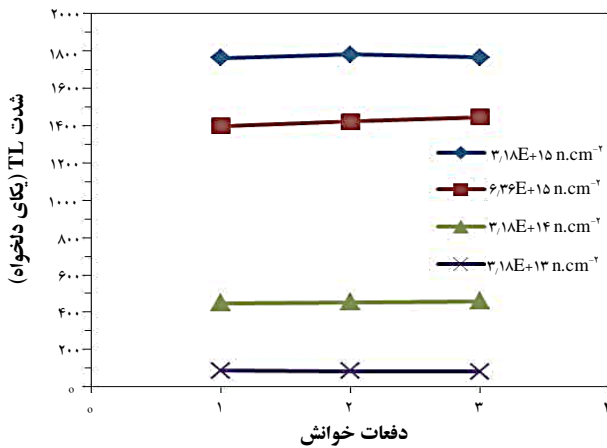
$$N_{th} = N_t - F_{Cd} \times N_{Cd} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)،  $N_{Cd}$  تعداد اتم‌های تریتم تولید شده به وسیله‌ی نوترون‌های با انرژی بیش از  $0.4 \text{ eV}$  (با پوشش کادمیوم) و  $F_{Cd}$  ضریب نسبت نوترون‌های فوق حرارتی به حرارتی<sup>(۶)</sup> هستند. بعد از گذشت مدت زمان نگه‌داری  $t$  از زمان پرتودهی تا شروع اندازه‌گیری، تعداد اتم‌های تریتم،  $N_d$ ، برابر است با:

$$N_d = N_{th} e^{-\lambda t} \quad (3)$$

که در این رابطه  $\lambda$  ثابت واپاشی تریتم است. تعداد اتم‌های تریتم واپاشیده بعد از گذشت زمان  $t$  برابر با  $N_{th} - N_d$  است که با شدت ترمولومینسانس حاصل از برخورد نوترون‌های حرارتی  $[I_{TL}(th)]$  متناسب است. در ناحیه‌ی خطی منحنی مشخصه‌ی دز و برای زمان‌های  $t \ll T_{1/2}$ ، شدت نور منتشر شده در اثر پرتوزاسازی نوترون‌های حرارتی  $[I_{TL}(th)]$  با حذف سهم شدت نور مربوط به پرتوزاسازی نوترون‌های فوق حرارتی  $I_{Cd}$ ، از شدت نور کل،  $I_{Bare}$  از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$I_{TL}(th) = I_{Bare} - I_{Cd} \times F_{Cd} = k \times (N_{th} - N_d) \quad (4)$$



شکل ۱. حساسیت دزیمرهای TLD-100 پرتودهی شده در شاریدگی‌های مختلف، بعد از عملیات تثبیت حرارتی، برای سه خوانش پی در پی، هر یک بعد از سه روز زمان نگهداری.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بعد از انجام عملیات حرارتی، پاسخ دزیمرها با بیشینه انحراف از معیار  $2.1\%$  مربوط به نمونه با میزان پرتودهی  $(\Phi=3.18 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2)$  با تکرارپذیری مناسبی ثابت شده است. جدول ۱ نتایج مربوط به استخراج اطلاعات مربوط به شاریدگی نوترون‌های حرارتی داده شده و خوانش‌های ترمولومینسانس مربوطه که در بازه‌های زمانی نگهداری سه روزه به دست آمده است را نشان می‌دهد. این زمان به صورتی انتخاب شده است که خوانش دز خودزا (برای دزیمرهای تحت شاریدگی پایین) بیش از سه برابر خوانش دزیمر پرتون‌نیدیده (در حدود  $1 \text{ nC}$ ) باشد. در سطر آخر این جدول، کم‌ترین خوانش  $3.2 \text{ nC}$  مربوط به شاریدگی  $6.36 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$  است. خوانش مربوط به بالاترین شاریدگی در حدود  $57 \mu\text{C}$ ، معادل با دز جذبی  $5 \text{ Gy}$  گامای  $^{60}\text{Co}$  است که در محدوده‌ی خطی منحنی مشخصه‌ی دز برای این نوع دزیمر است.

ستون دوم در جدول ۱ مربوط به نتایج خوانش بدون تصحیح ضریب تصحیح تکی و ستون سوم مربوط به نتایج بعد از اعمال این ضریب از دست رفته، است.

با استفاده از نتایج خوانش میانگین دزیمرهایی که در شاریدگی‌های مختلف نوترون پرتودهی شده‌اند، می‌توان تناسب بین شاریدگی نوترون‌ها و خوانش دزیمرهای ترمولومینسانس را با استفاده از رابطه‌ی ۶ و اعمال ضریب تصحیح تکی به دست آورد. این تناسب در شکل ۲ نشان داده شده است.

از پرتودهی در دزهای بالا، ضریب کاهش حساسیت دزیمرها تعیین شد. این ضرایب به عنوان ضریب تصحیح تکی<sup>(۹)</sup> (ECC) در محاسبه‌ی شاریدگی نوترون در پرتودهی‌های درون رآکتور استفاده شدند [۳]. سطح زیر منحنی درخشندگی در فاصله‌ی دمایی  $100$  تا  $300^\circ\text{C}$  که به وسیله‌ی دستگاه خوانش گر مدل  $4500$  هارشا در شرایط برقراری گاز  $\text{N}_2$  به دست می‌آید، برای اندازه‌گیری TL استفاده شد.

برای پرتودهی‌های مربوط به تعیین ضرایب حساسیت، از پرتو بتای چشمه  $^{90}\text{Sr-Y}$  استفاده شد. برای افزایش دقت در مواردی که پرتو بتای خودزا مقادیر بالایی داشت، از دز بتای بالاتری استفاده شد به طوری که تفاضل خوانش حاصل از پرتودهی بتا و خوانش حاصل از پرتو بتای خودزا، حداقل بیش از سه برابر انحراف از معیار اندازه‌گیری‌های مربوط به خوانش حاصل از پرتو بتای خودزا در مرحله تثبیت حرارتی خوانش دزیمرها باشد. به منظور افزایش دقت در محاسبه‌ی ضریب حساسیت از دزی استفاده شد که کمینه‌ی تفاضل مربوطه در حدود یک سوم خوانش حاصل از پرتو بتای خودزا باشد.

#### ۴. نتایج و بحث

دزیمرها در قلب رآکتور تحقیقاتی تهران با تغییر دو عامل زمان پرتودهی و قدرت در رآکتور، در برابر شاریدگی نوترون حرارتی بین  $10^{11}$  تا  $10^{16} \text{ n/cm}^2$  قرار گرفتند. به منظور استفاده از اطلاعات شاریدگی نوترونی ذخیره شده در دزیمرها با استفاده از روش پرتو سازی، لازم بود ناپایداری خوانش دزیمرها نسبت به عملیات گرمایی تثبیت شود. این کار با استفاده از پژوهش‌های گذشته بر روی TLD-600 و TLD-700 [۳،۲] در یک بازپخت طولانی مدت، با حداقل زمان ۸ ساعت در دمای  $400^\circ\text{C}$  انجام شد. شکل ۱ نتیجه‌ی بررسی تغییرات حساسیت دزیمرهای پرتودهی شده با دز بالای نوترون-گاما برای شاریدگی‌های مختلف نوترون، بعد از این عملیات گرمایی را نشان می‌دهد. برای کنترل پاسخ و ثبت آن‌ها، دزیمرها سه بار بعد از عملیات بازپخت و نگهداری، خوانده شدند. در این نمودار دزیمرهایی که در شاریدگی‌های نوترون حرارتی کم‌تر از  $10^{13} \text{ n/cm}^2$  پرتودهی و با کاهش حساسیت کمی روبه‌رو شده بودند، شرکت ندارند.

گردید. این پژوهش نشان می‌دهد با استفاده از TLD-۱۰۰ می‌توان گستره‌ی وسیع‌تری از شاریدگی نوترون‌های حرارتی را نسبت به TLD-۶۰۰ و TLD-۷۰۰ اندازه‌گیری کرد.

### پی‌نوشت‌ها

1. Flux
2. Thermoluminescence dosimeter
3. Fluence
4. Self-dose
5. Cut off energy
6. Cadmium ratio
7. Harshaw
8. Annealing
9. Element correction coefficient

### مرجع‌ها

[1] R.B.M. Sogbadji, B.J.B. Nyarko, E.H.K. Akaho, R.G. Abrefah, Determination of Neutron Fluxes and Spectrum Shaping Factors in Irradiation Sites of Ghana's Miniatures Neutron Source Reactor, World Journal of Nuclear Science and Technology, 1 (2011) 50-56.

[2] F. Torkzadeh, F. Manouchehri, Thermal neutron fluence measurement in a research reactor using Thermoluminescence dosimeter TLD-600, J. Radiol. Prot, 26 (2006) 97-103.

[3] F. Torkzadeh, F. Manouchehri, F. Yoosefi nejad, S. Baradaran, In-core thermal neutron fluence measurement by TLD-activation method, Nucl. Instr. Meth. 580 (2007) 1410-1413.

[4] S.I. Tanaka, Y. Futura, Usage of a Thermoluminescence dosimeter as a thermal neutron detector with high sensitivity, Nucl. Instr. Meth. 133 (1976) 485-499.

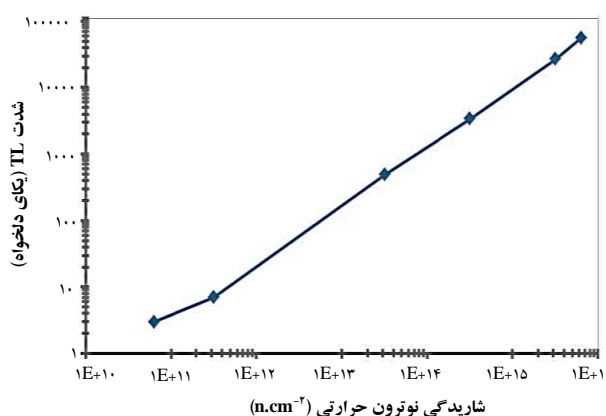
[5] E. Piesch, B. Burgkhardt, A. M. Sayed, Activation and Damage Effect in TLD-600 after Neutron Irradiation, Nucl. Instr. Meth. 157 (1978) 179-184.

[6] F. Torkzadeh, Neutronen dosimetrie mit LiF-thermoluminescence dosimeter, Diplomarbeit, Atominsttitut d. Osterr. Uni (1994).

[7] Y.S. Horowitz, S. Freeman, A. Dubi, Limitations of the paired LiF TLD-600, 700 Technique for the Estimation of gamma Ray dose in mixed n-g Radiation fields: The Effect of the thermal Neutrons, Nucl. Instr. meth., 169 (1979) 317-320.

**جدول ۱.** نتایج خوانش دزیمترهای TLD-۱۰۰ بعد از ۷۲ ساعت زمان نگهداری

شاریدگی (n/cm <sup>2</sup> )	میانگین خوانش TL <sub>۰</sub> (nC)	TL(nC) تصحیح شده
$6.36 \times 10^{15}$	$1414 \pm 23$	۵۶۴۸۵
$3.18 \times 10^{15}$	$1768 \pm 9$	۲۶۶۵۷
$3.18 \times 10^{14}$	$455 \pm 5$	۳۳۶۳
$3.18 \times 10^{13}$	$85.6 \pm 2.7$	۴۸۷
$3.18 \times 10^{11}$	$2.1 \pm 0.5$	۷.۱
$6.36 \times 10^{10}$	$0.7 \pm 0.5$	۳.۲



**شکل ۲.** نمودار لگاریتمی روند خوانش دزیمترهای TLD-۱۰۰ با شاریدگی نوترون‌های حرارتی در قلب رآکتور.

این نتیجه در مقایسه با پژوهش‌هایی که بر روی TLD-۷۰۰ و TLD-۶۰۰ برای اندازه‌گیری در محدوده‌های شاریدگی به ترتیب  $10^{14}$  تا  $10^{18}$  n/cm<sup>2</sup> و  $10^{13}$  تا  $10^{16}$  n/cm<sup>2</sup> به کار گرفته شدند، نشان می‌دهد با استفاده از دزیمتر TLD-۱۰۰ می‌توان بازه‌ی وسیع‌تری از شاریدگی نوترون‌های حرارتی را اندازه‌گیری کرد.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روشی برای تعیین شاریدگی نوترون‌های حرارتی با استفاده از پرتوزاسازی TLD-۱۰۰ ارائه شده است. پرتوزایی دزیمترهای TLD در نتیجه‌ی تولید تریتم‌های واکنش  ${}^6\text{Li}(n-\alpha){}^3\text{H}$  و ترمولومینسانس ناشی از آن، اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطه‌ی خطی آن با پرتوزایی درونی دزیمتر، شاریدگی نوترون حرارتی به دست آمد. به وسیله اعمال عملیات حرارتی ویژه و ضریب تصحیح تکی مربوط به کاهش حساسیت تکی دزیمترها، اثر تخریبی دز شدید داخل قلب رآکتور حذف