



انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران

مقاله پژوهشی



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۱۱ شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، صفحه ۱۴۱-۱۴۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۱۶، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳

بررسی کاهش حساسیت و روش بازیابی دزیمتر ترمولومینسانس (TLD- $\text{CaF}_2:\text{Mn}$) تحت تابش دز بالای گاما

سمیه هارونی^{۱*} و سحر اکبری^۱

^۱ دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

*اصفهان، کاشان، کیلومتر ۶ بلوار قطب راوندی، دانشگاه کاشان، دانشکده فیزیک، کدپستی ۸۷۳۱۷-۵۳۱۵۳

پست الکترونیکی: harooni@kashanu.ac.ir

چکیده

تغییر حساسیت دزیمتر ترمولومینسانس (TLD- $\text{CaF}_2:\text{Mn}$) تحت تابش دز بالا مورد مطالعه قرار گرفته است. به این صورت که ابتدا نمونه تحت تابش دز به میزان ۱ kGy قرار گرفته و بعد از قرار گرفتن تحت فرآیند گرمادهی استاندارد، کاهش حساسیت آن به ازای دز دریافتی به میزان ۱ Gy در مقایسه با دزیمتر کنترل که همان میزان دز ۱ Gy را دریافت کرده، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با اعمال فرآیندهای گرمادهی مختلف، مدت زمان گرمادهی مناسب برای بازیابی حساسیت از دست رفته به دست آمده است. ضمن این که پارامترهای سینتیک منحنی‌های تابش ترمولومینسانس TLD- $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ قبل و بعد از دریافت دز بالا، در هر مرحله از فرآیند گرمادهی و بعد از بازیابی حساسیت نیز تعیین و نحوه تغییرات آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای سینتیک از طریق برازش داده‌های تجربی با منحنی تئوری حاصل از مدل مرتبه عام و با استفاده از یک برنامه کامپیوتری به دست آمده است.

کلیدواژه‌ها: ترمولومینسانس، (TLD- $\text{CaF}_2:\text{Mn}$)، دز بالا، کاهش حساسیت، بازیابی، پارامترهای سینتیک، مدل مرتبه عام.

۱. مقدمه

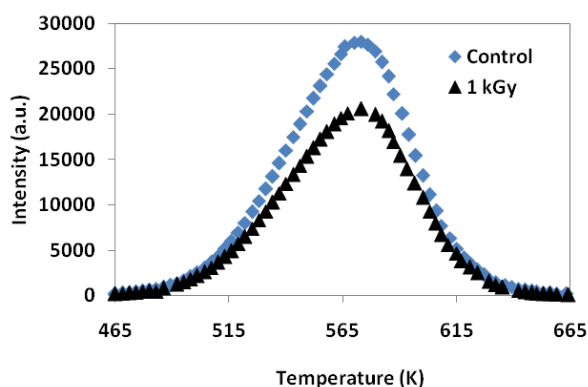
جذب کردن دز، بیشتر شبیه استخوان عمل می‌کند [۶]. چنانچه بخواهیم به معایب TLD- $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ نیز اشاره کنیم، می‌توانیم وابستگی منحنی تابش به غلظت منگنز، کاهش پاسخ ترمولومینسانس هنگام استفاده مجدد و پایداری اندک آن در مقابل تکرار فرآیند گرمادهی را نام ببریم [۴-۲]. فرآیند گرمادهی استاندارد به منظور حذف اثرات ناشی از استفاده‌های قبلی و استفاده مجدد این دزیمتر، گرمادهی در دمای ۵۰۰ °C به مدت نیم ساعت است. مطالعات تجربی متعددی که بر پایه روش‌های حذف گرمایی انجام شده است، نشان می‌دهند که منحنی تابش اصلی TLD- $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ شامل یک قله منفرد نیست و

دزیمتر TLD- $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ در گروه دزیمترهای پر کاربرد قرار دارد. از جمله دلایل محبوبیت این دزیمتر می‌توان به پاسخ خطی که در گستره وسیعی از دزهای دریافتی است، اشاره کرد. این دزیمتر در بازه دزهای ۵۰ mGy تا ۱ kGy رفتار خطی داشته و پس از آن وارد ناحیه فوق خطی می‌شود [۳-۱]. همچنین ساختار منحنی تابش آن بسیار ساده و حساسیت آن حدود ۱۰ برابر (TLD- LiF:Mg,Ti) است [۲، ۴]. این دزیمتر که اولین بار توسط گینزر و کرک معرفی شد [۵]، برای دزیمتری محیطی مناسب‌تر از دزیمتری شخصی می‌باشد. زیرا عدد اتمی مؤثر آن در مقایسه با عدد اتمی مؤثر بافت بسیار بالاست و در

ساعت صورت گرفته و سپس با دریافت دز ۱ Gy در پایان هر مرحله از گرمادهی، منحنی تابش ترمولومینسانس از طریق قرائت نمونه ثبت شده است. به این ترتیب اثر فرآیندهای گرمادهی مختلف بر روی پاسخ دز در هر مرحله و نیز بازیابی حساسیت مورد مطالعه قرار گرفته است. ضمن این که پارامترهای سینتیک منحنی های تابش ترمولومینسانس ۴۰۰ TLD- نیز به ازای مراحل مختلف گرمادهی تعیین و تغییرات آنها نسبت به پارامترهای سینتیک حاصل از دزیمترهای کنترل مورد بررسی قرار گرفت.

۳. نتایج

همانطور که اشاره شد، با دریافت دز بالای ۱ kGy تا سطح دزیمتر ترمولومینسانس ۴۰۰-TLD کاهش حساسیت در مقایسه با دزیمتر کنترل دیده می شود که نتیجه به دست آمده مطابق شکل ۱ با کاهش سطح زیر منحنی همراه است. با توجه به این که علی رغم کاهش حساسیت شکل منحنی تابش تغییر نکرده است، می توان مدعی شد که آسیب ناشی از تابش با دز بالا بر روی مراکز بازترکیب اثر و آنها را از دسترس خارج کرده است.



شکل (۱): کاهش حساسیت نمونه ۴۰۰-TLD که ابتدا تحت تأثیر دز بالا به میزان ۱ kGy و بعد از فرآیند گرمادهی استاندارد تحت تابش دز به میزان ۱ Gy قرار گرفته، در مقایسه با دزیمتر کنترل که فقط دز بالا دریافت نکرده، نشان داده شده است.

فرآیند گرمادهی اعمال شده شامل پنج مرحله بود که مجموع زمان های گرمادهی در دمای ۵۰۰ °C در پایان مراحل اول تا پنجم به ترتیب به ۳/۵، ۹، ۱۷، ۲۷/۵ و ۴۰/۵ ساعت رسید.

از چندین قله تشکیل شده است. روش های شکل پیک و جداسازی کامپیوتری منحنی تابش از جمله روش هایی بودند که نشان دادند قله اصلی متشکل از سه قله همپوش است که مربوط به مراکز گیراندازی مختلف می باشند [۹-۷].

۲. روش کار

دزیمترهای مورد استفاده در این پژوهش تراشه هایی با ابعاد ۳ mm × ۰/۹ mm × ۳ mm و ساخت شرکت هارشاو^۱ بودند. تراشه ها ابتدا به مدت نیم ساعت در دمای ۵۰۰ °C (فرآیند گرمادهی استاندارد) گرمادهی شدند تا اثرات احتمالی ناشی از تابش های قبلی حذف شود. چند نمونه از آنها به عنوان دزیمتر کنترل تحت تابش دز به میزان ۱ Gy قرار گرفته و با آهنگ گرمادهی ۲ °C/s قرائت شدند و بقیه نمونه ها دز بالا به میزان ۱ kGy را دریافت کردند. نمونه های قرار گرفته تحت تابش با دز بالا دوباره تحت فرآیند گرمادهی استاندارد قرار گرفته و سپس دز ۱ Gy را دریافت کردند. پس از آن با همان آهنگ گرمادهی ۲ °C/s قرائت شدند که در این حالت کاهش حساسیت نمونه هایی که دز بالا دریافت کرده بودند، در مقایسه با دزیمتر کنترل مشاهده شد. پرتو دهی نمونه ها با چشمه ^{۶۰}Co صورت گرفته و قرائت آنها نیز با دستگاه قرائت کننده TLD مدل ۴۵۰۰ ساخت شرکت هارشاو انجام شده است. فرآیند مورد استفاده برای بازیابی حساسیت بر اساس افزایش مدت زمان گرمادهی در دمای استاندارد بود. به این ترتیب که نمونه ها بعد از اعمال فرآیند گرمادهی استاندارد، به مدت ۲/۵ ساعت در دمای ۵۰۰ °C گرمادهی شده (در مجموع ۳/۵ ساعت گرمادهی تا این مرحله) و سپس با دریافت دز ۱ Gy قرائت شدند. در مرحله دوم پس از فرآیند گرمادهی استاندارد، گرمادهی نمونه ها در دمای ۵۰۰ °C به مدت ۲/۵ ساعت دو مرتبه تکرار شد (در مجموع ۹ ساعت گرمادهی تا این مرحله) و سپس با دریافت دز ۱ Gy قرائت شدند. در مراحل بعد نیز، به ازای هر مرحله یک مرتبه افزایش در تعداد دفعات گرمادهی در دمای ۵۰۰ °C به مدت ۲/۵

^۱ Harshaw

^۲ TLD-Reader

بازیابی حساسیت نمونه‌ها همان ۲۷/۵ ساعت گرمادهی در نظر گرفته شد.

در ادامه این پژوهش پارامترهای سینتیک مربوط به قله‌های تشکیل دهنده منحنی تابش ترمولومینسانس TLD-۴۰۰ نیز به ازای مراحل گرمادهی مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. این بررسی از طریق برآزش داده‌های تجربی با رابطه شدت ترمولومینسانس تئوری مربوط به مدل مرتبه‌عام که به صورت زیر است، انجام گرفت:

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

که در آن b مرتبه سینتیک، E انرژی فعال سازی، I_m شدت در نقطه بی‌شینه، T_m دما در نقطه بی‌شینه و k ثابت بولتزمن است [۱۰]. برای انجام برآزش نیز از یک برنامه کامپیوتری ++C که بر اساس الگوریتم لئونبرگ-مارگارت و روش حداقل مربعات کار می‌کند و در آزمایشگاه تحقیقاتی فیزیک هسته‌ای دانشگاه کاشان تهیه شده، استفاده شده است. معیار بهترین انطباق میان داده‌های تجربی با منحنی تئوری FOM است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

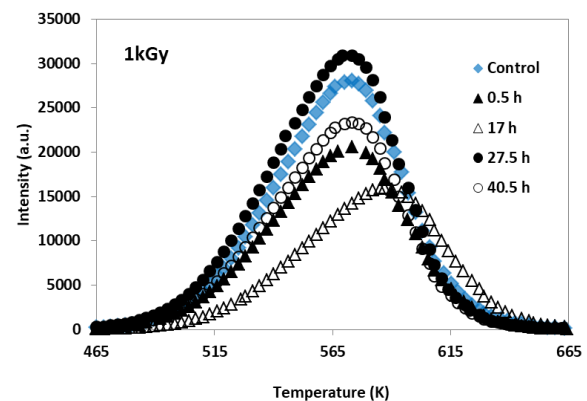
$$FOM (\%) = \frac{\sum_i |y_i - f_i|}{A} \times 100 \quad (2)$$

که در آن y_i مربوط به مقادیر اصلی یا داده‌های تجربی، f_i بهترین مقداری است که از طریق این انطباق به دست می‌آید و A سطح زیر منحنی است. مقادیر FOM کمتر از ۲/۵ در صد به معنای انطباق خوب میان داده‌های تجربی با منحنی تئوری است [۱۱].

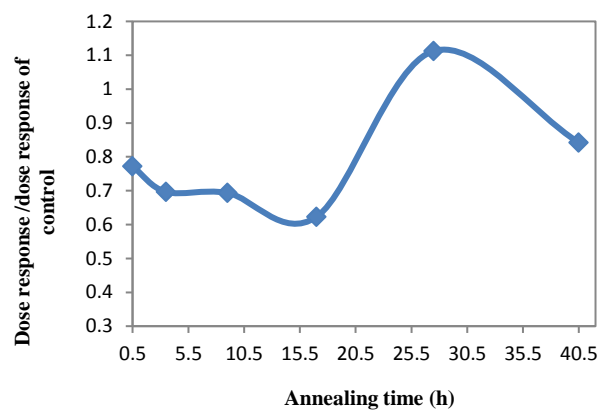
جدول (۱): پارامترهای سینتیک قله‌های تشکیل دهنده منحنی تابش

ترمولومینسانس TLD-۴۰۰ برای دزیمتر کنترل به ازای دز ۱ Gy

همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، افزایش فرآیند گرمادهی ابتدا باعث کاهش بیشتر حساسیت می‌شود. اما با ادامه این فرآیند، سرانجام در مرحله چهارم و پس از ۲۷/۵ ساعت گرمادهی حساسیت نمونه‌ها بازیابی می‌شود. در واقع این فرآیند گرمادهی قادر است مراکز بازترکیب آسیب دیده را بهبود ببخشد.



شکل (۲): منحنی‌های تابش ترمولومینسانس نمونه TLD-۴۰۰ که ابتدا تحت تأثیر دز بالا به میزان ۱ kGy قرار گرفته و بعد از اعمال فرآیندهای گرمادهی مختلف، تحت تابش دز به میزان ۱ Gy قرار گرفته است.



شکل (۳): نسبت پاسخ دزیمتر TLD-۴۰۰ به پاسخ دزیمتر کنترل پس از هر مرحله از فرآیند گرمادهی و دریافت دز به میزان ۱ Gy نشان داده شده است.

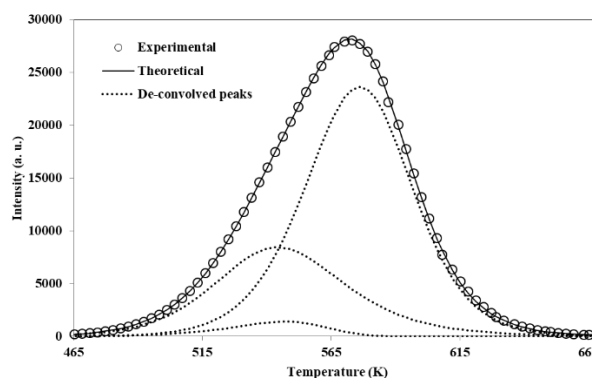
برای اطمینان از نتیجه به دست آمده فرآیند گرمادهی یک مرحله دیگر نیز ادامه یافت و مشاهده شد که ادامه این روند موجب کاهش حساسیت مجدد نمونه‌ها می‌شود. لذا زمان

نشان داده شده است. مقدار FOM به دست آمده در این حالت ۱۷۱ درصد است.

نتایج حاصل از برازش منحنی تابش ترمولومینسانس TLD-۴۰۰ برای نمونه کنترل در جدول ۱ و نمودار حاصل از آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

پارامترهای سینتیک به دست آمده برای منحنی‌های تابش ترمولومینسانس TLD-۴۰۰ پس از هر مرحله از فرآیند گرمادهی و دریافت دز به میزان ۱ Gy نیز در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر FOM به دست آمده می‌توان گفت انطباق خوبی میان داده‌های تجربی به دست آمده با منحنی تئوری وجود دارد. در ادامه نمودارهای مربوط به داده‌های جدول‌های ۱ و ۲ در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. این نمودارها تغییر پارامترهای سینتیک به دست آمده در هر مرحله از فرآیند گرمادهی را در مقایسه با پارامترهای سینتیک به دست آمده برای دزیتر کنترل نشان می‌دهند.

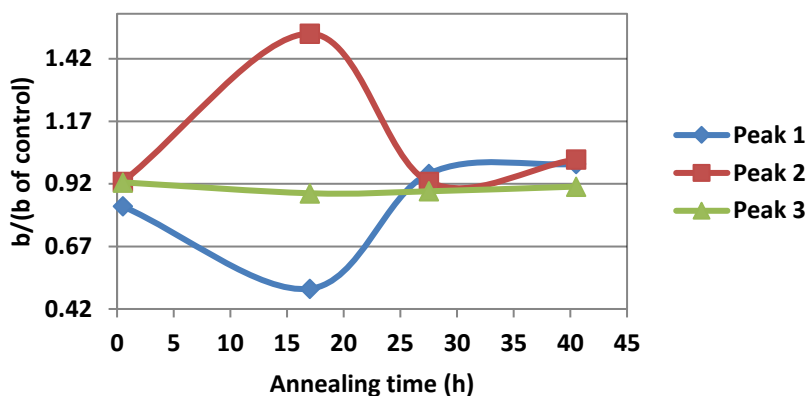
| شماره قله | T_m (K) | E (eV) | b |
|-----------|-----------|--------|-------|
| ۱ | ۵۴۴ | ۱/۴۴۲ | ۱/۹۹۹ |
| ۲ | ۵۴۷ | ۱/۴۲۳ | ۱/۰۷۸ |
| ۳ | ۵۷۶ | ۱/۷۷۵ | ۱/۶۵۱ |



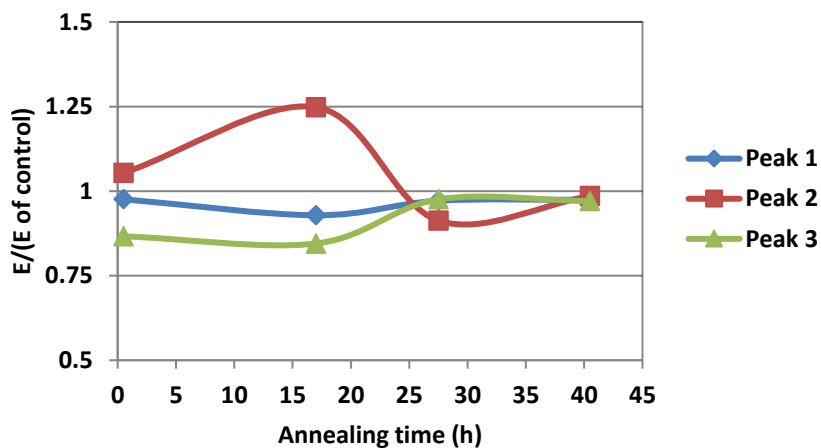
شکل (۴): برازش منحنی تابش ترمولومینسانس TLD-۴۰۰ برای دزیتر کنترل نشان داده شده است.

جدول (۲): پارامترهای سینتیک به دست آمده برای منحنی‌های تابش ترمولومینسانس TLD-۴۰۰ پس از هر مرحله از فرآیند گرمادهی و دریافت دز به میزان ۱ Gy نشان داده شده است.

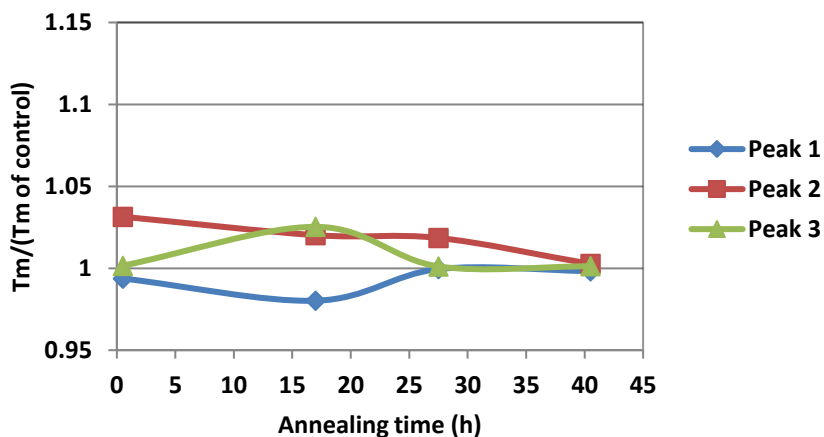
| FOM (%) | b | E (eV) | T_m (K) | شماره قله | زمان گرمادهی (h) |
|---------|-------|--------|-----------|-----------|------------------|
| ۰/۲۷۲ | ۱/۶۶۰ | ۱/۴۰۷ | ۵۴۱ | ۱ | ۰/۵ |
| | ۱/۰۰۱ | ۱/۴۹۹ | ۵۶۵ | ۲ | |
| | ۱/۵۲۹ | ۱/۵۳۸ | ۵۷۷ | ۳ | |
| ۰/۱۸۲ | ۱/۰۰۱ | ۱/۳۳۹ | ۵۳۳ | ۱ | ۱۷ |
| | ۱/۶۳۹ | ۱/۷۷۶ | ۵۵۹ | ۲ | |
| | ۱/۴۵۷ | ۱/۵۰۰ | ۵۹۱ | ۳ | |
| ۰/۲۹۷ | ۱/۹۲۰ | ۱/۴۰۱ | ۵۴۴ | ۱ | ۲۷/۵ |
| | ۱/۰۰۱ | ۱/۲۹۹ | ۵۵۸ | ۲ | |
| | ۱/۴۷۰ | ۱/۷۳۲ | ۵۷۷ | ۳ | |
| ۰/۲۳۹ | ۱/۹۹۹ | ۱/۴۰۵ | ۵۴۳ | ۱ | ۴۰/۵ |
| | ۱/۰۹۷ | ۱/۴۰۲ | ۵۴۹ | ۲ | |
| | ۱/۵۰۱ | ۱/۷۲۲ | ۵۷۷ | ۳ | |



شکل (۵): تغییرات نسبت مرتبه سینتیک به مرتبه سینتیک دزیمتر کنترل پس از مراحل مختلف گرمادهی نشان داده شده است.



شکل (۶): تغییرات نسبت انرژی فعالسازی به انرژی فعالسازی دزیمتر کنترل پس از مراحل مختلف گرمادهی نشان داده شده است.



شکل (۷): تغییرات نسبت دمای پیشینه قله به دمای پیشینه قله دزیمتر کنترل پس از مراحل مختلف گرمادهی نشان داده شده است.

تابش دزهای بالا می‌تواند به مراکز بازترکیب و یا به مراکز گیراندازی آسیب برساند. با توجه به این‌که تحت تابش، شکل منحنی تغییر نکرده است، می‌توان گفت مراکز گیراندازی در امان بوده‌اند و آسیب ناشی از تابش به مراکز بازترکیب وارد شده است و فرآیند گرمادهی مناسب سبب بهبود مراکز بازترکیب آسیب دیده و در نتیجه بازیابی حساسیت ترمولومینسانس دزیمتر شده است.

همچنین با بررسی پارامترهای سینتیک قله‌های تشکیل دهنده منحنی تابش ترمولومینسانس TLD-۴۰۰ قبل و بعد از دریافت دز بالا به میزان ۱ kGy دیده می‌شود که پارامترهای سینتیک نیز تغییر می‌کنند به نحوی که با اعمال فرآیند گرمایی که منجر به بازیابی حساسیت می‌شود، همان‌طور که در شکل‌های ۵ تا ۷ نیز قابل مشاهده است، پارامترهای سینتیک به پارامترهای سینتیک دزیمتر کنترل نزدیک می‌شوند.

چنانچه انتظار داریم پس از همان زمان ۲۷/۵ ساعت گرمادهی که حساسیت بازیابی می‌شود، پارامترهای سینتیک نیز به مقادیر مربوط به دزیمتر کنترل نزدیک می‌شوند.

۴. نتیجه‌گیری

حساسیت دزیمترهای ترمولومینسانس تحت اثر عواملی همچون تابش دزهای بالا، فرآیندهای گرمادهی غیر معمول و ... ممکن است تغییر کند. در این پژوهش حساسیت دزیمتر TLD-۴۰۰ تحت تابش دز گاما به میزان ۱ kGy مورد بررسی قرار گرفت و دیده شد که کاهش حساسیت ناشی از این مقدار دز برای دزیمتر TLD-۴۰۰ در حدود ۳۰ درصد است. با اعمال مراحل مختلف گرمادهی، همان‌طور که در شکل ۳ نیز دیده می‌شود، بعد از ۲۷/۵ ساعت گرمادهی، نه تنها حساسیت بازیابی شده، بلکه از مقدار اولیه نیز بیشتر شده است.

۵. مراجع

1. D. L. Fehel, D. I. Muron, B. R. Suijka, D. W. Vehar, L. I. Lorence, R. L. Westfall, S. C. Jones, I. A. Sweet. Characterization of a two dimensional, thermoluminescent, dose-mapping system: uniformity, reproducibility, and calibrations. *Rev. Sci. Instrum.* 65 (10) (1994) 3243-3251.
2. M. Topaksu, V. Correcher, J. Garcia-Guinea. Luminescence emission of natural fluorite and synthetic CaF₂: Mn (TLD-400). *Radiat. Phys. Chem.* 119 (2016) 151-156.
3. M. Danilkin, A. Lust, A. Ratas, V. Seeman, M. Kerikmäe. Afterglow kinetics and storage mechanism in CaF₂: Mn (TLD-400). *Radiat. Meas.* 43 (2008) 300-302.
4. A. N. Yazici, M. Bedir, A. S. Sökücü. The analysis of dosimetric thermoluminescent glow peak of CaF₂: Mn after β -irradiation. *Nucl. Instr. and meth. B.* 259 (2) (2007) 955-965.
5. R. J. Ginther, R. D. Kirk. The Thermoluminescence of CaF₂: Mn. *J. Electrochem. Soc.* 104 (6) (1957) 365-369.
6. M. Danilkin, A. Lust, M. Kerikmäe, V. Seeman, H. Mändar, M. Must. CaF₂: Mn extreme dosimeter: Effects of Mn concentration on thermoluminescence mechanisms and properties. *Radiat. Meas.* 41 (6) (2006) 677-681.
7. H. E. Wang, P. S. Weng, P. C. Hsu. An annealing treatment for eliminating residual dose in CaF₂: Mn. *Nucl. Instr. and meth. B.* 103 (1) (1995) 73-78.
8. L. A. R. Da Rosa, H. P. Nette. Thermoluminescent dosimeters for exposure assessment in gamma or x radiation fields with unknown spectral distribution. *Appl. Radiat. Isot.* 39 (3) (1988) 191-197.
9. S. Akbari, S. Harooni, M. Zahedifar. Recovery of thermoluminescence sensitivity in CaF₂: Mn (TLD-400) dosimeter under heating process, *Iran. J. Radiat. safety Meas.* 7 (3) (2019) 9-12.
10. 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.
11. H. G. Balian, N. W. Eddy. Figure of merit (FOM), an improved criterion over the normalized chi-squared test for assessing goodness of fit of gammaray spectra peaks. *Nucl. Instr. Meth.* 145 (2) (1977) 389-395.