



## مدل جدید مرتبه‌ی اول ترمولومینسانس به صورت تابعی از شدت و دمای قله با در نظر گرفتن اثر فروکشی دمایی

سمیه هارونی<sup>\*</sup>، سکینه طاهری حسن‌آباد

گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، صندوق پستی: ۵۳۱۵۳-۸۳۳۱۷، کاشان- ایران

\*Email: harooni@kashanu.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۸/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱

### چکیده

رابطه‌ی شدت ترمولومینسانس براساس مدل سینتیک مرتبه‌ی اول بدون در نظر گرفتن اثر فروکشی دمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این در حالی است که اثر فروکشی دمایی به عنوان یک واقعیت فیزیکی باید در روابط بیان‌کننده‌ی شدت ترمولومینسانس مورد توجه قرار گیرد. در این کار با در نظر گرفتن اثر فروکشی دمایی برای مدل سینتیک مرتبه‌ی اول، تابع جداسازی منحنی تابش ترمولومینسانس جدیدی برحسب شدت و دمای قله به دست آمد. به نحوی که تابع جدید با حذف مشخصه‌های فروکشی دمایی، به همان رابطه‌ی قبلی خود تبدیل می‌شود. که در این کار منحنی تابش ترمولومینسانس دزیمتر (CaF<sub>2</sub>:Mn (TLD-۴۰۰) مورد توجه و بررسی قرار گرفت. با توجه به این‌که رابطه‌ی شدت ترمولومینسانس طبق مدل جدید با مدل قبلی متفاوت است، مشاهده شد که مشخصه‌های سینتیک حاصل از برازش منحنی‌های تابش ترمولومینسانس تجربی با مدل جدید و مدل قبلی آن که بدون در نظر گرفتن اثر فروکشی دمایی است، یکسان نیست. از آنجایی که در مدل جدید اثر فروکشی دمایی به عنوان یک واقعیت فیزیکی وارد شده است، می‌توان گفت که مشخصه‌های سینتیکی که طبق مدل جدید به دست آمده، دقیق‌تر و به واقعیت نزدیک‌تر است.

**کلیدواژه‌ها:** ترمولومینسانس، سینتیک مرتبه‌ی اول، آهنگ گرمادهی، فروکشی دمایی، مشخصه‌های سینتیک، CaF<sub>2</sub>:Mn (TLD-۴۰۰)

## New first order model of thermoluminescence as a function of peak temperature and intensity considering thermal quenching effect

S. Harooni\*, S. Taheri- Hasanabad

Department of Nuclear Physics, Faculty of Physics, University of Kashan, P.O.Box: 87317-53153, Kashan – Iran

Research Article

Received 9.11.2021, Accepted 20.2.2022

### Abstract

The thermal quenching effect has not been considered in current research on the first-order kinetics of thermoluminescence. In contrast, thermal quenching as a reality should be contained in theoretical models. In this work, a new fitting function of the thermoluminescence glow curve in terms of peak temperature and intensity is obtained by considering the thermal quenching effect for the first-order kinetics model. The new function reduces to the known first-order fit function by removing thermal quenching parameters. The obtained function was applied to the glow curve of the CaF<sub>2</sub>:Mn (TLD-400) dosimeter. Since the new model differs from the known first-order fit function, different kinetic parameters extract as the result of the fitting procedure. As the new model involves the thermal quenching effect as a physical entity, the kinetic parameters obtained from the presented model are more accurate and realistic.

**Keywords:** Thermoluminescence, First order of kinetics, Heating rate, Thermal quenching, Kinetic parameters, CaF<sub>2</sub>:Mn (TLD-400)



## ۱. مقدمه

الکترون‌هایی که به واسطه‌ی تحریک گرمایی از مرکزگیراندازی خارج می‌شوند، در مرکز بازترکیب با حفره بازترکیب شده و فوتون آزاد می‌کنند [۸]. در نقطه‌ی مقابل مدل سینتیک مرتبه‌ی دوم قرار دارد که در آن فرض می‌شود که سهم عمده‌ی الکترون‌هایی که از مرکزگیراندازی خارج می‌شوند، مجدداً بازگیراندازی می‌شوند. مدل سینتیک مرتبه‌ی دوم نیز حالت خاص دیگری از مجموعه‌ی معادلات دیفرانسیل توصیف‌کننده‌ی پدیده‌ی TL است و مبنای فیزیکی دارد [۹]. معادله دیفرانسیل توصیف‌کننده‌ی مدل سینتیک مرتبه‌ی اول به صورت زیر است:

$$I(T) = -\beta \frac{dn}{dT} = n s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (2)$$

که در آن  $I(T)$  شدت TL،  $\beta$  (K/s) آهنگ گرمادهی ثابت،  $n$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) چگالی تعداد الکترون‌های واقع در مرکزگیراندازی،  $s$  ( $\text{s}^{-1}$ ) ضریب بسامد و  $E$  (eV) انرژی فعال‌سازی مرکزگیراندازی است. با حل معادله‌ی (۲) رابطه‌ی شدت TL به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$I(T) = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left(-\frac{s}{\beta} \int_0^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right) \quad (3)$$

که در آن  $n_0$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) چگالی اولیه‌ی تعداد الکترون‌های واقع در مرکزگیراندازی است. انتگرال موجود در رابطه‌ی (۳) را نمی‌توان به روش تحلیلی حل کرد و از این‌رو تقریبی به صورت زیر برای آن در نظر گرفته می‌شود [۱۰]:

$$\int_0^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \cong \frac{kT^\tau}{E} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left(1 - \frac{\tau kT}{E}\right) \quad (4)$$

مشخصه‌های شدت بیشینه منحنی ( $I_m$ ) و دما در نقطه بیشینه منحنی ( $T_m$ ) به راحتی از روی شکل منحنی‌های تابش TL تخمین زده می‌شود. به همین علت رابطه‌ی (۳) به رابطه‌ای برحسب مشخصه‌های  $T_m$  و  $I_m$  تبدیل می‌شود تا مشخصه‌های سینتیک از طریق برازش با منحنی‌های تابش TL راحت‌تر تعیین شود. بر این اساس رابطه‌ی شدت TL براساس مدل سینتیک مرتبه‌ی اول به صورت زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$I(T) = I_m \exp\left(\frac{E}{kT} \left(\frac{T - T_m}{T_m}\right)\right) \exp\left[\left(1 - \frac{\tau k T_m}{E} - \frac{T^\tau}{T_m^\tau} \exp\left(\frac{E}{kT} \left(\frac{T - T_m}{T_m}\right)\right) \left(1 - \frac{\tau k T}{E}\right)\right)\right] \quad (5)$$

در رابطه‌ی فوق اثر TQ وارد نشده است. در مواردی که منحنی‌های تابش TL تحت اثر TQ قرار داشته باشند و

منحنی تابش ترمولومینسانس<sup>۱</sup> (TL) حاصل گرم کردن نمونه‌هایی است که در معرض اشعه یونیزان قرار گرفته‌اند و دارای خاصیت TL نیز هستند. در اثر گرم کردن این نمونه‌ها، الکترون می‌تواند از مرکزگیراندازی الکترون خارج و به نوار هدایت تحریک شود و در برگشت از نوار هدایت به مرکز بازترکیب گذار کرده و در اثر بازترکیب با حفره، فوتون تولید شود. میزان فوتون‌های تولید شده به ازای دماهای مختلف نموداری از شدت برحسب دما را نشان می‌دهد که به آن منحنی تابش ترمولومینسانس گفته می‌شود. حال اگر در اثر بازترکیب الکترون و حفره به جای فوتون فونون تولید شود، یعنی بازترکیب غیرتابشی رخ داده است. در این صورت الکترون و حفره از چرخه‌ی TL خارج می‌شوند اما شدتی به ازای آن‌ها ثبت نمی‌شود و بنابراین شدت TL کم‌تر از مقدار مورد انتظار می‌شود. در بررسی منحنی‌های تابش ترمولومینسانس در صورتی که با افزایش آهنگ گرمادهی دمای نقطه‌ی بیشینه به سمت دماهای بالاتر منتقل شود و در عین حال شدت بیشینه نیز کاهش یابد، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌ی مورد بررسی تحت اثر فروکشی دمایی<sup>۲</sup> (TQ) قرار دارد. تحت این اثر که ناشی از افزایش احتمال بازترکیب‌های غیرتابشی در دمای بالاتر است، بخش نزولی منحنی تابش TL که در دمای بالاتر قرار دارد، بیش از مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل نظری افت می‌کند. ضمن این‌که هرچه منحنی در دمای بالاتری قرار داشته باشد، بیش‌تر تحت اثر TQ قرار می‌گیرد [۱، ۲]. از جمله ترکیباتی که اثر TQ در آن‌ها مشاهده شده است، می‌توان به کوارتز [۳، ۴]، TLD-۱۰۰ [۵، ۶]، TLD-۲۰۰، TLD-۴۰۰ [۱] و TLD-۵۰۰ [۷] اشاره کرد. برای توصیف اثر TQ رابطه‌ی برای بازده ترمولومینسانس به صورت تابعی از دما و به صورت زیر مطرح می‌شود:

$$Q(T) = \frac{1}{1 + C \exp(-W / kT)} \quad (1)$$

که در آن  $C$  و  $W$  (eV) مشخصه‌های فروکشی دمایی،  $k$  (eV/K) ثابت بولتزمن و  $T$  (K) دما است [۷].

برای توصیف منحنی‌های تابش TL مدل‌های مختلفی ارائه شده است. یکی از آن‌ها مدل سینتیک مرتبه‌ی اول است که به عنوان یک مدل فیزیکی که از مجموعه‌ی معادلات دیفرانسیل توصیف‌کننده‌ی پدیده‌ی TL قابل استخراج است، شناخته می‌شود. در این مدل فرض می‌شود که سهم عمده‌ی

1. Thermoluminescence
2. Thermal Quenching



$$\left. \frac{dI(T)}{dT} \right|_{T=T_m} = 0 \quad (7)$$

و با فرض این‌که:

$$W'(T) = \frac{CW}{\exp(W/kT) + C} \Rightarrow W'(T_m) = W'_m \quad (8)$$

طبق رابطه‌ی (۶) رابطه‌ای به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$s = \beta \frac{E - W'_m}{kT_m} \exp\left(\frac{E}{kT_m}\right) \quad (9)$$

با در نظر گرفتن رابطه‌ی (۴) و قرار دادن رابطه‌ی (۹) در رابطه‌ی (۶)، رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$I(T) = \frac{1}{1 + C \exp(-W/kT)} n_0 \beta \frac{E - W'_m}{kT_m} \exp\left(\frac{E}{kT} \left(\frac{T - T_m}{T_m}\right)\right) \exp\left[-\frac{E - W'_m}{kT_m} \exp\left(\frac{E}{kT} \left(\frac{T - T_m}{T_m}\right)\right) \frac{kT}{E} \left(1 - \frac{\gamma kT}{E}\right)\right] \quad (10)$$

با قرار دادن  $T = T_m$  در رابطه فوق و در نظر گرفتن  $I(T_m) = I_m$  به دست می‌آید:

$$I_m = \frac{n_0 \beta}{1 + C \exp(-W/kT_m)} \frac{E - W'_m}{kT_m} \exp\left[-\frac{E - W'_m}{E} \left(1 - \frac{\gamma kT_m}{E}\right)\right] \quad (11)$$

با توجه به روابط (۱۰) و (۱۱) و حذف  $n_0 \beta$  از رابطه‌ی (۱۰)، رابطه‌ی نهایی شدت TL طبق مدل سینتیک مرتبه‌ی اول به صورت  $I_m - T_m$  و با در نظر گرفتن اثر TQ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I(T) = I_m \frac{1 + C \exp(-W/kT_m)}{1 + C \exp(-W/kT)} \exp\left(\frac{E}{kT} \left(\frac{T - T_m}{T_m}\right)\right) \exp\left\{\left[1 - \frac{W'_m}{E}\right] \left[\left(1 - \frac{\gamma kT_m}{E}\right) - \frac{T}{T_m} \exp\left(\frac{E}{kT} \left(\frac{T - T_m}{T_m}\right)\right) \left(1 - \frac{\gamma kT}{E}\right)\right]\right\} \quad (12)$$

با قرار دادن  $C = 0$  می‌توان اثر فروکشی دمایی را از رابطه‌ی فوق حذف کرد. که در این صورت  $W'_m = 0$  و رابطه‌ی (۱۲) به رابطه‌ی (۵) تبدیل می‌شود.

با استفاده از رابطه‌ی به دست آمده براساس مدل سینتیک مرتبه‌ی اول جدید می‌توان نحوه‌ی تغییرات مشخصه‌های  $T_m$  (K) و  $E$  (eV) را مورد بررسی قرار داد. نتایج این بررسی در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

هم‌چنین از سینتیک مرتبه‌ی اول پیروی کنند، نمی‌توان از رابطه‌ی (۵) برای توصیف منحنی‌های تابش TL آن استفاده کرد و باید از رابطه‌ی جدید مطرح شده در این کار که اثر TQ نیز در آن وارد شده، استفاده نمود.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که وقتی منحنی‌های تابش TL به واسطه‌ی افزایش آهنگ گرمادهی به دمای بالاتر انتقال می‌یابند، ضریب تقارنشان تغییر می‌کند [۱۲].

از جمله مواردی که منحنی‌های تابش TL دارای سینتیک مرتبه‌ی اول هستند، می‌توان به کار یازی چی و همکارانش اشاره کرد. آن‌ها در کار خود منحنی تابش ترمولومینسانس  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  (TLD-۴۰۰) را ترکیبی از ۵ قله معرفی می‌کنند که همگی دارای سینتیک مرتبه‌ی اول هستند. آن‌ها با بررسی منحنی‌های تابش ترمولومینسانس  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  (TLD-۴۰۰) مشاهده کردند که به ازای مقادیر مختلف دز، دمای قله تغییر نمی‌کند و از این‌رو نتیجه گرفتند که این منحنی‌ها دارای سینتیک مرتبه‌ی اول هستند. هم‌چنین برای تعیین تعداد قله‌ها نیز از چند روش و از جمله روش  $T_m - T_{\text{stop}}$  استفاده کرده‌اند [۱۳]. بنابراین با توجه به این‌که منحنی‌های تابش ترمولومینسانس  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  (TLD-۴۰۰) تحت اثر TQ قرار دارند و هم‌چنین از سینتیک مرتبه‌ی اول پیروی می‌کنند، در این کار ضمن به دست آوردن رابطه‌ی شدت TL طبق مدل سینتیک مرتبه‌ی اول با در نظر گرفتن اثر TQ، برازش منحنی‌های تابش TL حاصل از این دزیتر با مدل جدید نیز علاوه بر مدل قبلی (رابطه‌ی (۵)) انجام و نتایج با هم مقایسه شده است.

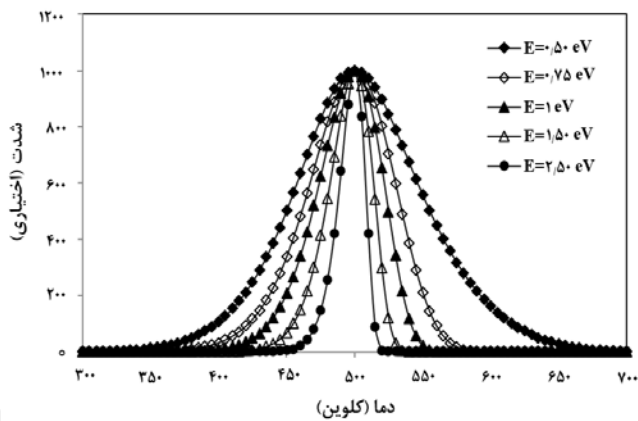
## ۲. تابع جداسازی منحنی تابش TL پیشنهادی

برای وارد کردن اثر TQ در رابطه‌ی (۵) نمی‌توان مستقیماً رابطه‌ی (۱) را در آن ضرب کرد. چون در این صورت  $T_m$  مفهوم فیزیکی خود را به عنوان دمای شدت بیشینه از دست می‌دهد. بدین معنا که با تغییر  $T_m$  در رابطه‌ی شدت به دست آمده لزوماً دمای شدت بیشینه‌ی منحنی تغییر نمی‌کند. برای این منظور باید ابتدا رابطه‌ی (۱) در رابطه‌ی (۳) به صورت زیر ضرب شود:

$$I(T) = \frac{1}{1 + C \exp(-W/kT)} n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left(-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right) \quad (6)$$

با توجه به رابطه‌ی زیر:





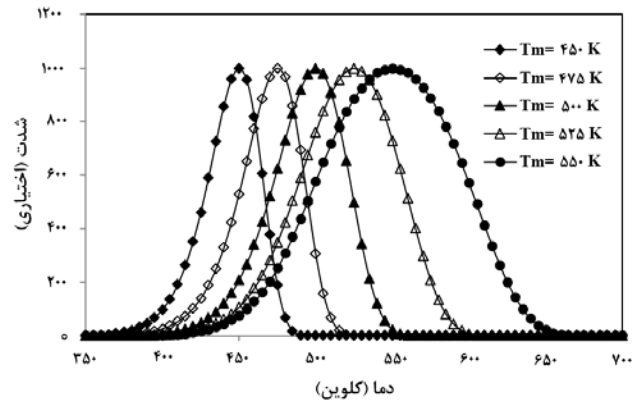
شکل ۲. قله‌های شدت TL تولید شده براساس مدل سینتیک مرتبه‌ی اول جدید با در نظرگرفتن اثر TQ (طبق رابطه‌ی (۱۲)) و با فرض  $I_m=1000$ ،  $T_m=500$  K،  $C=1 \times 10^{11}$  و  $W=1$  eV به ازای مقادیر مختلف E نشان داده شده است.

### ۳. برازش قله‌های تابش TL تولید شده براساس مدل سینتیک مرتبه اول جدید با مدل قبلی

برای نشان دادن تفاوت دو مدل سینتیک مرتبه‌ی اول با در نظر گرفتن اثر TQ و بدون در نظرگرفتن این اثر، برازش قله‌های TL تولید شده براساس مدل جدید با مدل سینتیک مرتبه‌ی اول بدون در نظرگرفتن اثر TQ انجام شد و نتایج آن در جدول ۱ به ازای مقادیر مختلف  $T_m(K)$  و در جدول ۲ به ازای مقادیر مختلف E نشان داده شده است. برای برازش رابطه‌ی قله‌های حاصل از مدل جدید، از یک برنامه کامپیوتری ++C استفاده شده است که بر اساس الگوریتم لوبنبرگ-مارگارت<sup>۱</sup> و روش حداقل مربعات کار می‌کند و در آزمایشگاه فیزیک هسته‌ای دانشگاه کاشان تولید شده است. داده‌های ورودی که همان ضرایب سینتیک هستند، باید به صورت تخمین اولیه به برنامه داده شود و بعد از اجرای برنامه بهترین ضرایبی که حداقل اختلاف میان داده‌های نظری و تجربی را ایجاد می‌کنند، به عنوان خروجی داده می‌شود. معیار بهترین انطباق نیز رابطه‌ی FOM<sup>۲</sup> و به صورت زیر است:

$$FOM = \frac{\sum_i |y_i - f_i|}{\sum_i y_i} \times 100 \quad (13)$$

که در آن  $y_i$  مربوط به داده‌های نمودار اولیه و  $f_i$  بهترین مقداری است که از طریق برازش به دست می‌آید [۱۴].



شکل ۳. قله‌های شدت TL تولید شده براساس مدل سینتیک مرتبه‌ی اول جدید با در نظرگرفتن اثر TQ (طبق رابطه‌ی (۱۲)) و با فرض  $I_m=1000$ ،  $E=1$  eV،  $C=1 \times 10^{11}$  و  $W=1$  eV به ازای مقادیر مختلف  $T_m$  نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، با تغییر  $T_m$  قله‌ی TL ضمن جابه‌جایی به سمت دماهای بالاتر پهن‌تر نیز می‌شود. در عین حال  $T_m$  مفهوم اصلی خود را به عنوان دما در نقطه‌ی بیشینه حفظ کرده است. چون با افزایش دمای نقطه بیشینه، قله نیز به همان میزان به سمت دماهای بالاتر جابه‌جا می‌شود و طبیعی است که باید چنین اتفاقی رخ دهد. در واقع این جابه‌جایی نشان می‌دهد که دمای نقطه بیشینه همچنان مفهوم اصلی خود را در رابطه‌ی جدید به دست آمده در این کار (رابطه‌ی (۱۲)) حفظ کرده است. نحوه‌ی تغییرات شکل قله‌ی TL با تغییر E نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش انرژی فعال‌سازی ضمن ثابت بودن  $T_m$ ، پهنای قله‌ی TL کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در رابطه‌ی (۳) با افزایش E منحنی تابش TL به سمت دماهای بالاتر جابه‌جا می‌شود و این کاملاً قابل توجیه است. چون افزایش E به معنای افزایش عمق مرکزگیراندازی است و بنابراین احتمال خروج الکترون از این مرکز با افزایش دما بیشتر می‌شود. اما وقتی این رابطه به رابطه‌ی برحسب  $I_m$  و  $T_m$  تبدیل می‌شود، نحوه‌ی تغییرات ضرایب متفاوت می‌شود. در این حالت با بررسی نحوه‌ی تغییرات ضرایب مختلف می‌توان راحت‌تر تخمین اولیه‌ای از ضرایب سینتیک منحنی‌های تابش ترمولومینسانس تجربی به دست آورد.

1. Levenberg-Marquart

2. Figure of Merit



می‌شود. در این حالت با افزایش E چون پهنای قله کاهش می‌یابد، ضمن افزایش کیفیت برازش، درصد اختلاف بین مشخصه‌های حاصل از برازش با مدل سینتیک مرتبه‌ی اول بدون در نظر گرفتن اثر TQ با مدل جدید کاهش می‌یابد.

همان‌طور که طبق جدول ۱ دیده می‌شود، با افزایش  $T_m$  که قله‌ی TL به سمت دماهای بالاتر جابه‌جا می‌شود، ضمن کاهش کیفیت برازش، درصد اختلاف بین مشخصه‌های حاصل از برازش مدل سینتیک مرتبه‌ی اول بدون در نظر گرفتن اثر TQ با مدل جدید افزایش می‌یابد. مشابه چنین حالتی در جدول ۲ نیز دیده

جدول ۱. مشخصه‌های سینتیک حاصل از برازش رابطه‌ی شدت TL طبق مدل سینتیک مرتبه‌ی اول (رابطه‌ی (۵)) با رابطه‌ی شدت TL طبق مدل جدید (رابطه‌ی (۱۲)) به ازای مقادیر مختلف  $T_m$

| FOM (%) | E (eV) | $T_m$ (K) | $I_m$ | در نظر گرفتن اثر TQ (✓)<br>در نظر نگرفتن اثر TQ (✗) | حالت‌ها |
|---------|--------|-----------|-------|---|---------|
| ۰٫۰۲۱   | ۱٫۰۰۰  | ۴۵۰٫۰     | ۱۰۰۰  | ✓   | ۱       |
|         | ۰٫۹۹۶  | ۴۵۰٫۰     | ۹۹۹٫۹ | ✗   |         |
| -----   | ۰٫۴۰۰  | ۰٫۰۰۰     | ۰٫۰۱۰ | (/.) اختلاف   |         |
| ۰٫۱۴۲   | ۱٫۰۰۰  | ۴۷۵٫۰     | ۱۰۰۰  | ✓   | ۲       |
|         | ۰٫۹۷۵  | ۴۷۵٫۲     | ۹۹۹٫۹ | ✗   |         |
| -----   | ۲٫۵۰۰  | ۰٫۰۴۲     | ۰٫۰۱۰ | (/.) اختلاف   |         |
| ۰٫۵۳۷   | ۱٫۰۰۰  | ۵۰۰٫۰     | ۱۰۰۰  | ✓   | ۳       |
|         | ۰٫۸۹۳  | ۵۰۰٫۸     | ۱۰۰۲  | ✗   |         |
| -----   | ۱۰٫۷۰  | ۰٫۱۶۰     | ۰٫۲۰۰ | (/.) اختلاف   |         |
| ۱٫۱۳۵   | ۱٫۰۰۰  | ۵۲۵٫۰     | ۱۰۰۰  | ✓   | ۴       |
|         | ۰٫۷۳۳  | ۵۲۷٫۳     | ۱۰۱۰  | ✗   |         |
| -----   | ۲۶٫۷۰  | ۰٫۴۳۸     | ۱٫۰۰۰ | (/.) اختلاف   |         |
| ۱٫۶۷۰   | ۱٫۰۰۰  | ۵۵۰٫۰     | ۱۰۰۰  | ✓   | ۵       |
|         | ۰٫۵۶۶  | ۵۵۴٫۳     | ۱۰۲۸  | ✗   |         |
| -----   | ۴۳٫۴۰  | ۰٫۷۸۲     | ۲٫۸۰۰ | (/.) اختلاف   |         |

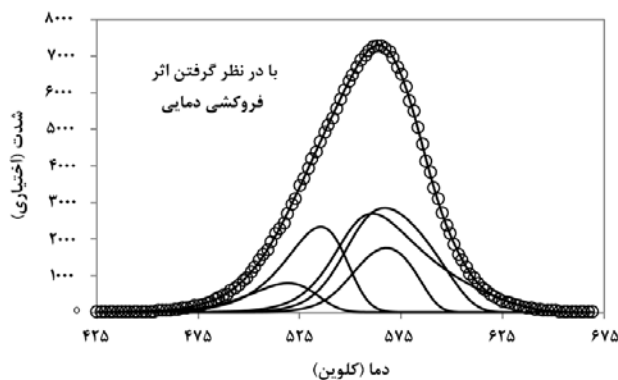
جدول ۲. مشخصه‌های سینتیک حاصل از برازش رابطه‌ی شدت TL طبق مدل سینتیک مرتبه‌ی اول (رابطه‌ی (۵)) با رابطه‌ی شدت TL طبق مدل جدید (رابطه‌ی (۱۲)) به ازای مقادیر مختلف E

| FOM (%) | E (eV) | $T_m$ (K) | $I_m$ | در نظر گرفتن اثر TQ (✓)<br>در نظر نگرفتن اثر TQ (✗) | حالت‌ها |
|---------|--------|-----------|-------|---|---------|
| ۲٫۶۱۷   | ۰٫۵۰۰  | ۵۰۰٫۰     | ۱۰۰۰  | ✓   | ۱       |
|         | ۰٫۴۲۴  | ۵۰۵٫۴     | ۹۵۴٫۷ | ✗   |         |
| -----   | ۱۵٫۲۰  | ۱٫۰۸۰     | ۴٫۵۳۰ | (/.) اختلاف   |         |
| ۰٫۹۶۷   | ۰٫۷۵۰  | ۵۰۰٫۰     | ۱۰۰۰  | ✓   | ۲       |
|         | ۰٫۶۶۴  | ۵۰۲٫۰     | ۹۹۵٫۱ | ✗   |         |
| -----   | ۱۱٫۴۷  | ۰٫۴۰۰     | ۰٫۴۹۰ | (/.) اختلاف   |         |
| ۰٫۵۳۷   | ۱٫۰۰۰  | ۵۰۰٫۰     | ۱۰۰۰  | ✓   | ۳       |
|         | ۰٫۸۹۳  | ۵۰۰٫۸     | ۱۰۰۲  | ✗   |         |
| -----   | ۱۰٫۷۰  | ۰٫۱۶۰     | ۰٫۲۰۰ | (/.) اختلاف   |         |
| ۰٫۲۰۰   | ۱٫۵۰۰  | ۵۰۰٫۰     | ۱۰۰۰  | ✓   | ۴       |
|         | ۱٫۳۵۸  | ۵۰۰٫۱     | ۱۰۰۳  | ✗   |         |
| -----   | ۹٫۴۶۷  | ۰٫۲۰۰     | ۰٫۳۰۰ | (/.) اختلاف   |         |
| ۰٫۰۷۶   | ۲٫۵۰۰  | ۵۰۰٫۰     | ۱۰۰۰  | ✓   | ۵       |
|         | ۲٫۳۱۹  | ۴۹۹٫۹     | ۱۰۰۱  | ✗   |         |
| -----   | ۷٫۲۴۰  | ۰٫۲۰۰     | ۰٫۱۰۰ | (/.) اختلاف   |         |

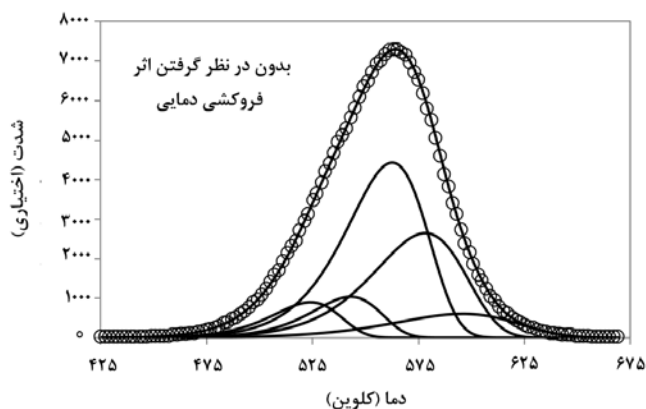


جدول ۳. مشخصه‌های سینتیک حاصل از برازش قله‌های تابش TL دزیمتر  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  (TLD-۴۰۰) طبق مدل سینتیک مرتبه‌ی اول با در نظر گرفتن اثر فروکشی دمایی (رابطه‌ی (۱۲)) و بدون آن (رابطه‌ی (۵))

| E (eV) | $T_m$ (K) | $I_m$ | در نظر گرفتن اثر TQ (✓)<br>در نظر نگرفتن اثر TQ (✗) | قله |
|--------|-----------|-------|---|-----|
| ۱,۳۷۰  | ۵۱۹,۲     | ۸۰۳,۹ | ✓   | ۱   |
| ۱,۴۴۰  | ۵۲۳,۸     | ۸۹۴,۴ | ✗   |     |
| ۴,۹۶۷  | ۰,۸۹۱     | ۱۱,۲۵ | اختلاف (%)  |     |
| ۱,۵۳۹  | ۵۳۵,۴     | ۲۳۳۳  | ✓   | ۲   |
| ۱,۵۲۰  | ۵۴۲,۷     | ۱۰۳۳  | ✗   |     |
| ۱,۴۳۰  | ۱,۳۷۲     | ۵۵,۷۲ | اختلاف (%)  |     |
| ۲,۱۰۵  | ۵۶۰,۹     | ۲۷۰۲  | ✓   | ۳   |
| ۱,۳۹۵  | ۵۶۲,۳     | ۴۴۲۶  | ✗   |     |
| ۳۳,۷۳  | ۰,۲۵۵     | ۶۳,۷۹ | اختلاف (%)  |     |
| ۲,۵۶۳  | ۵۶۶,۹     | ۲۸۵۷  | ✓   | ۴   |
| ۱,۲۹۱  | ۵۷۷,۸     | ۲۶۴۷  | ✗   |     |
| ۴۹,۶۳  | ۱,۹۳۱     | ۷,۳۴۷ | اختلاف (%)  |     |
| ۳,۰۱۰  | ۵۶۷,۸     | ۱۷۶۵  | ✓   | ۵   |
| ۱,۰۰۹  | ۵۹۵,۳     | ۵۹۸,۰ | ✗   |     |
| ۶۶,۴۸  | ۴,۸۵۵     | ۶۶,۱۳ | اختلاف (%)  |     |



شکل ۳. برازش منحنی تابش TL دزیمتر  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  (TLD-۴۰۰) با مدل سینتیک مرتبه‌ی اول با در نظر گرفتن اثر فروکشی دمایی (طبق رابطه‌ی (۱۲)) نشان داده شده است. همچنین مقدار FOM به دست آمده در این برازش ۰,۴۸۳ است.



شکل ۴. برازش منحنی تابش TL دزیمتر  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  (TLD-۴۰۰) با مدل سینتیک مرتبه‌ی اول بدون در نظر گرفتن اثر فروکشی دمایی (طبق رابطه‌ی (۵)) نشان داده شده است. همچنین مقدار FOM به دست آمده در این برازش ۰,۴۵۹ است.

#### ۴. برازش قله‌های تابش TL تجربی با مدل سینتیک مرتبه‌ی اول با و بدون در نظر گرفتن اثر TQ

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، منحنی تابش TL دزیمتر  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  (TLD-۴۰۰) ترکیبی از ۵ قله مرتبه‌ی اول است که تحت اثر فروکشی دمایی نیز قرار دارند [۱، ۱۳]. به همین دلیل برازش منحنی تابش TL این دزیمتر با مدل سینتیک مرتبه‌ی اول با و بدون در نظر گرفتن اثر TQ مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار ابتدا و به منظور حذف اثرات تابش‌های قبلی، دزیمتر  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  (TLD-۴۰۰) تحت رژیم گرمایی استاندارد قرار گرفت. به این ترتیب که ابتدا به مدت نیم ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و سپس در دمای اتاق سرد شد. بعد از آن تحت تابش دز گامای چشمه‌ی کبالت ۶۰، ۰/۵ گری دز دریافت کرد و سپس با آهنگ گرمادهی ۱ درجه سلسیوس بر ثانیه با استفاده از دستگاه TLD-reader ساخت شرکت هارشاوا<sup>۱</sup> قرائت شد. منحنی تابش TL دزیمتر  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  (TLD-۴۰۰) که تحت برازش با مدل سینتیک مرتبه‌ی اول با و بدون در نظر گرفتن اثر TQ قرار گرفت، در شکل‌های ۳ و ۴ با دایره‌های توخالی مشخص شده است. نتایج حاصل از این برازش‌ها نیز در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود درصد اختلاف میان مشخصه‌های به دست آمده از دو مدل به ازای قله‌های واقع در دماهای بالاتر که اثر TQ بر روی آن‌ها قوی‌تر است، افزایش می‌یابد. ضمن این‌که همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ نیز دیده می‌شود، نتایج حاصل از برازش منحنی تابش TL دزیمتر  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  (TLD-۴۰۰) با دو مدل جدید و مدل قبلی، قله‌های تفکیک شده‌ی متفاوتی را نیز نتیجه داده است.

مشخصه‌های فروکشی دمایی مورد استفاده در برازش منحنی تابش TL دزیمتر  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  (TLD-۴۰۰) به صورت  $C=2,1 \times 10^{27}$  و  $W=3$  eV در نظر گرفته شده است [۱۵].

1. Harshaw



## ۵. نتیجه‌گیری

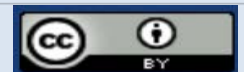
برای تعیین مشخصه‌های سینتیک منحنی‌های تابش TL مدل‌های مختلفی ارایه شده است. یکی از ساده‌ترین آن‌ها مدل سینتیک مرتبه‌ی اول است که مبنای فیزیکی نیز دارد. در صورتی که یک منحنی تابش TL تجربی از مدل سینتیک مرتبه‌ی اول تبعیت کند، به راحتی می‌توان از این مدل برای تعیین مشخصه‌های سینتیک آن منحنی استفاده نمود. از طرفی در بررسی پدیده‌ی TL واقعیت‌های فیزیکی مختلفی وجود دارد که لزوماً در بررسی نظری این پدیده و از جمله در مدل سینتیک مرتبه‌ی اول در نظر گرفته نشده است. یکی از این واقعیت‌ها اثر TQ است. در این کار اثر TQ به عنوان یک واقعیت فیزیکی در رابطه‌ی شدت TL بر اساس مدل سینتیک مرتبه‌ی اول وارد شده و رابطه‌ی جدیدی حاصل شده است. ضمن این‌که رابطه‌ی به دست آمده در حالت خاصی که اثر TQ حذف شود، (با فرض C مساوی صفر) دقیقاً به همان رابطه‌ی شدت TL بدون در نظر گرفتن اثر TQ برای مدل سینتیک مرتبه‌ی اول تبدیل می‌شود. با توجه به این‌که منحنی‌های تابش TL دزیمتر  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  (TLD-۴۰۰) ترکیبی از ۵ قله مرتبه‌ی اول هستند و در عین حال تحت اثر TQ نیز قرار دارند، در این کار مورد توجه قرار گرفت. با بررسی مشخصه‌های سینتیک منحنی‌های تابش TL این دزیمتر با در نظر گرفتن اثر TQ (طبق مدل جدید) و بدون آن (طبق مدل قبلی) دیده شد که به ازای قله‌های واقع در داماهای بالاتر به دلیل تأثیر بیش‌تر TQ بر روی شکل منحنی‌ها، درصد اختلاف میان مشخصه‌های سینتیک حاصل از دو مدل جدید و مدل قبلی بیش‌تر می‌شود. همچنین دیده شد که با در نظر گرفتن اثر TQ مقادیر بزرگ‌تری نیز برای انرژی فعال‌سازی به دست می‌آید. از آنجایی که در مدل جدید یک واقعیت فیزیکی تحت عنوان اثر TQ نیز وارد شده است، می‌توان نتیجه گرفت که مشخصه‌های سینتیک حاصل از مدل جدید به واقعیت نزدیک‌تر هستند.

## مراجع

3. A. Kadari, D. Kadri, *New numerical model for thermal quenching mechanism in quartz based on two-stage thermal stimulation of thermoluminescence model*, *Arab. J. Chem.*, **8(6)**, 798-802 (2015).
4. B. Subedi, et al, *Thermal quenching of thermoluminescence in quartz samples of various origin*, *Nucl. Instr. and meth.*, B, **269(6)**, 572-581 (2011).
5. S. Harooni, M. Zahedifar, Z. Ahmadian, *Determination of thermal quenching parameters of TLD-100 dosimeter*, *Iran. J. Radiat. Safety and Meas.*, **5(1)**, 29-34 (2017) (In Persian).
6. S. Harooni, et al, *A new thermoluminescence general order glow curve fit function considering thermal quenching effect*, *Radiat. Prot. Dosim.*, **187(2)**, 103-107 (2019).
7. M.S. Akselrod, et al, *Thermal quenching of F-center luminescence in  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$* , *J. Appl. Phys.*, **84(6)**, 3364-3373 (1998).
8. J.T. Randall, M.H.F. Wilkins, *Phosphorescence and electron traps: I. the study of trap distribution*, *Proc. Roy. Soc. London A*, **184(999)**, 365-389 (1945).
9. C.E. May, J.A. Partridge, *Thermoluminescence kinetics of alpha irradiated alkali halides*, *J. Chem. Phys.*, **40(5)**, 1401-1415 (1964).
10. R. Chen, S.W.S. McKeever, *Theory of thermoluminescence and related phenomena*, *World Scientific*, 44 (1997).
11. G. Kitis, J.M. Gomez-Ros, J.W.N. Tuyn, *Thermoluminescence glow curve deconvolution function for first, second and general orders of kinetics*, *J. phys. D. Appl. phys.*, **31(19)**, 2636-2641 (1998).
12. B. Subedi, G. Kitis, V. Pagonis, *Simulation of the influence of thermal quenching on the thermoluminescence glow-peaks*, *Phys. Status Solidi A*, **207(5)**, 1216-1226 (2010).
13. A.N. Yazici, M. Bedir, A.S. Sokucu, *The analysis of dosimetric thermoluminescence glow peak of  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  after  $\beta$ -irradiation*, *Nucl. Instr. and meth. B*, **259(2)**, 955-965 (2007).
14. H.G. Balian, N.W. Eddy, *Figure of merit (FOM), and improved criterion over the normalized chi-squared test for assessing goodness of fit of gamma ray spectra peaks*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **145(2)**, 389-395 (1977).
15. S. Harooni, et al, *Determination of thermal quenching parameters in  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  (TLD-400) thermoluminescent dosimeter*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **41(3)**, 130-134 (2020) (In Persian).
1. V.E. Kafadar, *Thermal quenching of thermoluminescence in TLD-200, TLD-300 and TLD-400 after  $\beta$ -irradiation*, *Physica*, B, **406(3)**, 537-540 (2011).
2. S.G. Gorbics, A.E. Nash, F.H. Attix, *Thermal quenching of luminescence in six thermoluminescent dosimetry phosphors II: Quenching of Thermoluminescence*, *Int. J. Appl. Radiat. Isotops*, **20(12)**, 843-846 (1969).

## COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

سمیه هارونی، سکینه طاهری حسن‌آباد (۱۴۰۲)، مدل جدید مرتبه‌ی اول ترمولومینسانس به صورت تابعی از شدت و دمای قله با در نظر گرفتن اثر فروکشی دمایی، ۱۰۳، ۴۰-۴۶

DOI: 10.24200/NST.2023.1370

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1370.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1370.html)

