

اثر فروکشی دمایی در پارامترهای سینتیک منحنی تابش ترمولومینسانس دزیمتر

CaF₂:Mn (TLD-۴۰۰)

راضیه فتحی باغبادرانی و سمیه هارونی*

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

با بررسی منحنی‌های تابش ترمولومینسانس به‌ازای مقادیر مختلف آهنگ گرمادهی، در صورتی که نقطه‌ی بیشینه قله به سمت دماهای بالاتر جابه‌جا شود و شدت بیشینه و سطح زیر منحنی کاهش یابند، می‌توان نتیجه گرفت که آن منحنی تحت اثر فروکشی دمایی قرار دارد. یکی از دزیمترهایی که تحت اثر فروکشی دمایی قرار دارد، CaF₂:Mn (TLD-۴۰۰) است. از طرفی منحنی تابش ترمولومینسانس این دزیمتر ترکیبی از ۵ قله معرفی می‌شود که همگی از سینتیک مرتبه اول پیروی می‌کنند. در این کار با معلوم بودن پارامترهای فروکشی دمایی این دزیمتر، پارامترهای سینتیک منحنی تابش ترمولومینسانس با و بدون در نظر گرفتن اثر فروکشی دمایی، طبق مدل سینتیک مرتبه اول تعیین شد. این کار از طریق برازش منحنی‌های تابش ترمولومینسانس تجربی با رابطه‌ی تئوری به‌ازای مقادیر مختلف آهنگ گرمادهی انجام شد. از آنجایی که رابطه شدت ترمولومینسانس با و بدون در نظر گرفتن اثر فروکشی دمایی متفاوت است، مشاهده شد که پارامترهای سینتیک حاصل از برازش منحنی‌های تابش ترمولومینسانس تجربی با و بدون در نظر گرفتن اثر فروکشی دمایی یکسان نیستند.

کلیدواژه‌گان: ترمولومینسانس، CaF₂:Mn (TLD-۴۰۰)، آهنگ گرمادهی، مدل مرتبه اول، فروکشی دمایی، پارامترهای سینتیک.

۱. مقدمه

یک آهنگ گرمادهی مشخصی حرارت‌دهی شود، الکترون از مرکز گیراندازی خارج شده و به باند هدایت گذار می‌کند. در برگشت دو امکان برایش وجود دارد. یکی این‌که، به مرکز بازترکیب رفته و با حفره ترکیب شده و فوتون آزاد شود که در این صورت می‌توان نموداری از شدت TL برحسب دما رسم کرد که به آن منحنی تابش TL گفته می‌شود. امکان دوم، نیز این است که الکترون واقع در باند هدایت مجدداً به مرکزگیراندازی باز گردد. توصیف فیزیکی این پدیده، براساس یک سری

ترمولومینسانس (TL) پدیده‌ای است که در بسیاری از مواد چه دارای ساختار طبیعی مثل بازالت [۱] و کوارتز [۲] و چه دارای ترکیب مصنوعی و تجاری مثل LiF:Mg,Ti(TLD-۱۰۰) [۳]، CaF₂:Mn(TLD-۴۰۰) [۴] و Al₂O₃:C(TLD-۵۰۰) [۵] قابل مشاهده است. وقتی این نمونه‌ها در معرض تابش پرتوهای یون‌ساز قرار می‌گیرند، مراکز گیراندازی و بازترکیب واقع در ناحیه‌ی گاف انرژی به‌ترتیب توسط الکترون و حفره اشغال می‌شوند. حال اگر نمونه‌ی مورد بررسی، بعد از این مرحله با

ثابت، $E (eV)$ انرژی فعال‌سازی و $k (eVK^{-1})$ ثابت بولتزمن است. طبق رابطه (۱)، رابطه‌ی شدت TL براساس مدل سینتیک مرتبه اول به‌صورت زیر می‌شود [۷]:

$$I(T) = n_0 \frac{s}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left(-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right) \quad (2)$$

که در آن $n_0 (cm^{-3})$ چگالی تعداد حامل‌های بار اولیه است. رابطه (۲)، می‌تواند به رابطه‌ای برحسب شدت بیشینه (I_m) و دما در شدت بیشینه (T_m) که به‌راحتی از روی شکل منحنی تابش TL قابل تعیین هستند، تبدیل شود. در این‌صورت رابطه (۲)، به رابطه‌ای به‌صورت زیر تبدیل می‌شود [۹]:

$$I(T) = I_m \exp\left(\frac{1 - \frac{\gamma k T_m}{E} + \frac{E}{kT} \frac{T - T_m}{T_m} - \frac{T^\gamma}{T_m^\gamma} \exp\left(\frac{E}{kT} \frac{T - T_m}{T_m}\right) \left(1 - \frac{\gamma k T}{E}\right)}{\right)} \quad (3)$$

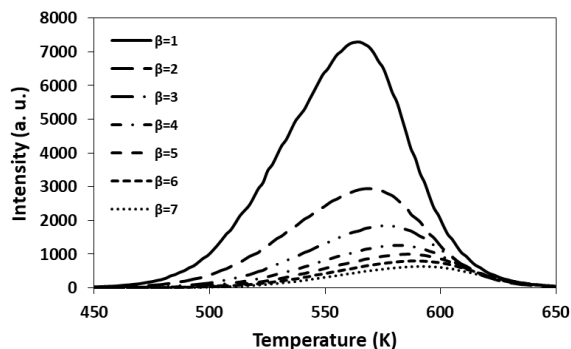
نکته‌ای که در بررسی پدیده‌ی TL باید مورد توجه قرار گیرد، این است که طی فرآیند TL بخشی از الکترون‌هایی که به‌هنگام تحریک گرمایی به‌باند هدایت‌گذار می‌کنند و سپس به‌مرکز بازترکیب رفته و با فوتون ترکیب می‌شوند، ممکن است به‌جای فوتون، فونون تولید کنند. یعنی در عین حال که از چرخه‌ی TL خارج می‌شوند، اما شدت TL به‌ازای آن‌ها توسط دستگاه قرائت‌گر ثبت نمی‌شود و انرژی آزاد شده به‌صورت فونون و صرف‌گرم شدن شبکه می‌شود. در این حالت به‌دلیل وجود بازترکیب‌های غیرتابشی گفته می‌شود که منحنی تابش TL تحت اثر فروکشی دمایی (TQ) قرار دارد [۱۰]. از جمله موادی که اثر TQ در آن‌ها مشاهده شده است، می‌توان به کوارتز [۲، ۱۱]، TLD-۱۰۰ [۳، ۱۲] و TLD-۴۰۰ [۴، ۱۳] اشاره کرد. ضمن این‌که، در مواد دارای خاصیت TQ، با بررسی منحنی‌های تابش TL به‌ازای مقادیر مختلف آهنگ گرمادهی مشاهده می‌شود که با افزایش آهنگ گرمادهی، T_m افزایش و I_m کاهش می‌یابد. این در حالی است که اثر TQ در بررسی تئوری پدیده TL طبق رابطه‌ی (۳) مورد توجه قرار نگرفته است. بر این اساس رابطه شدت TL با در نظرگرفتن اثر TQ طبق مدل سینتیک مرتبه اول به‌صورت زیر مطرح شده است [۱۴]:

معادلات دیفرانسیل انجام می‌شود که اولین بار توسط هالپرین و برانر در سال ۱۹۶۰ مطرح شد [۶]. در صورتی که در طی فرآیند TL احتمال بازترکیب بیش‌تر باشد، می‌توان از مجموعه معادلات دیفرانسیل توصیف‌کننده این پدیده به یک مدل ساده‌تری تحت عنوان مدل سینتیک مرتبه اول رسید که اولین بار توسط راندال و ویلکینز در سال ۱۹۴۵ مطرح شد [۷]. در صورتی که در طی فرآیند TL احتمال بازگیراندازی توسط مرکزگیراندازی بیش‌تر باشد، می‌توان از مجموعه‌ی معادلات دیفرانسیل توصیف‌کننده این پدیده، به حالت حدی دیگری تحت عنوان مدل سینتیک مرتبه دوم رسید که این مدل اولین بار توسط گارلیک و گیسون در سال ۱۹۴۸ مطرح شد [۸]. مهم‌ترین ویژگی این دو مدل، در مقایسه با معادلات دیفرانسیل توصیف‌کننده پدیده TL، در این است که، با استفاده از این مدل‌ها می‌توان به روابط تحلیلی مربوط به شدت TL برحسب دما رسید و برای برازش با منحنی‌های تابش TL تجربی و تعیین پارامترهای سینتیک مورد استفاده قرار داد. همچنین، این دو مدل به‌دلیل این‌که از طریق معادلات دیفرانسیل توصیف‌کننده پدیده TL نتیجه می‌شوند، مدل‌های فیزیکی به‌حساب می‌آیند. همچنین ویژگی منحنی‌های تابش TL تولید شده با استفاده از مدل سینتیک مرتبه اول این است که دارای قله‌های نامتقارنی هستند. در حالی که با استفاده از رابطه شدت TL براساس مدل سینتیک مرتبه دوم، قله‌های متقارنی حاصل می‌شود. بنابراین در بررسی منحنی‌های تابش TL تجربی، بسته به این‌که دارای چه مرتبه سینتیکی هستند، می‌توان از یکی از روابط شدت TL براساس مدل سینتیک مرتبه اول یا دوم استفاده کرد. مدل سینتیک مرتبه اول به‌صورت زیر مطرح شد:

$$I(T) = -\frac{dn}{dT} = n \frac{s}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (1)$$

که در آن $I(T)$ شدت TL در دمای $T(K)$ ، $n (cm^{-3})$ چگالی تعداد الکترون‌های واقع در مرکزگیراندازی در دمای $T(K)$ ، $s (s^{-1})$ فاکتور فرکانس، $\beta (Ks^{-1})$ آهنگ گرمادهی

قبل، به مدت نیم ساعت در دمای °C ۵۰۰ (فرآیند گرمادهی استاندارد) گرمادهی شده و سپس در دمای اتاق سرد شدند. سپس نمونه‌ها در معرض تابش یونساز چشمه کبالت ۶۰ قرار گرفته و دزی به میزان نیم گری را دریافت کردند و بعد از گذشت ۲۴ ساعت از پرتودهی، با آهنگ‌های گرمادهی مختلف قرائت شدند. قرائت نمونه‌ها توسط دستگاه ۴۵۰۰ TLD-reader ساخت شرکت هارشاو انجام شد. مقادیر مختلف آهنگ گرمادهی برای قرائت نمونه‌ها به صورت ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و °C/s ۷ بود که روی بازه‌ی دمایی ۱۰۰ تا °C ۴۶۰ انجام شد. منحنی‌های حاصل از قرائت نمونه‌ها به‌ازای مقادیر مختلف آهنگ گرمادهی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): منحنی‌های تابش TL مربوط به دزیمتر TLD-۴۰۰ به‌ازای مقادیر مختلف آهنگ گرمادهی نشان داده شده است.

برای به‌دست آوردن پارامترهای گیراندازی روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از آن‌ها برازش منحنی است. برای تعیین پارامترهای گیراندازی برای قله‌هایی که با یکدیگر همپوشانی دارند، از روش جداسازی کامپیوتری منحنی تابش (CGCD)^۲ به روش حداقل مربعات استفاده می‌شود. برازش منحنی، یعنی پیدا کردن پارامترهایی که با توجه به آن‌ها منحنی تابش TL تجربی و منحنی تابش TL تئوری با یکدیگر تطابق خوبی داشته باشند. جداسازی منحنی تابش TL به قله‌های منفرد و به‌دست آوردن پارامترهای سینتیک آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار

$$I(T) = I_m \frac{1 + C \exp(-W/kT_m)}{1 + C \exp(-W/kT)} \exp\left(\frac{E}{kT} \left(\frac{T - T_m}{T_m}\right)\right) \times \exp\left\{\left(1 - \frac{CW/E}{\exp(W/kT_m) + C}\right) \left[\frac{1 - \frac{W}{kT_m}}{T_m} - \frac{T^\gamma}{T_m^\gamma} \exp\left(\frac{E}{kT} \left(\frac{T - T_m}{T_m}\right)\right) \left(1 - \frac{W}{kT}\right)\right]\right\} \quad (۴)$$

که در آن C و W (eV) پارامترهای TQ هستند. به نحوی که با مساوی صفر قرار دادن C که منجر به حذف اثر TQ می‌شود، رابطه (۴) به رابطه (۳) تبدیل می‌شود. بنابراین در صورتی که ماده‌ی دارای خاصیت TL هم از سینتیک مرتبه اول تبعیت کند و هم تحت اثر TQ باشد، می‌توان از رابطه (۴) برای توصیف منحنی‌های تابش TL آن استفاده نمود.

از جمله دزیمترهای تجاری که هم از سینتیک مرتبه اول پیروی می‌کند و هم تحت اثر فروکشی دمایی قرار دارد، TLD-۴۰۰ است [۱۵]. از این‌رو در این کار منحنی‌های تابش TL مربوط به این دزیمتر به‌ازای مقادیر مختلف آهنگ گرمادهی با مدل سینتیک مرتبه اول با در نظر گرفتن اثر TQ (طبق رابطه (۴)) و نیز بدون در نظر گرفتن این اثر (طبق رابطه (۳)) مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای سینتیک حاصل از قله‌های مختلف آن تعیین شد. ضمن این‌که، پارامترهای فروکشی دمایی مورد استفاده برای این دزیمتر به منظور برازش منحنی‌های تابش TL تجربی آن با روابط تئوری به صورت $C = 2/1 \times 10^{27}$ و $W = 3eV$ در نظر گرفته شده است [۴].

دزیمتر TLD-۴۰۰ دارای ناحیه‌ی خطی گسترده‌ای بین ۵۰ mGy تا ۱ kGy است و پس از آن وارد ناحیه‌ی فوق خطی می‌شود [۱۶]. همچنین به‌دلیل این‌که عدد اتمی مؤثر آن از عدد اتمی مؤثر بافت بدن بزرگتر و به استخوان شبیه‌تر است، به‌عنوان دزیمتر محیطی بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷].

۲. روش کار و نتایج

دزیمترهای TLD-۴۰۰ مورد استفاده در این کار تراشه‌هایی با ابعاد ۰/۹ mm × ۳ mm × ۳ mm و ساخت شرکت هارشاو^۱ هستند. ابتدا به منظور حذف اثرات احتمالی ناشی از تابش‌های

^۲ Computerized glow curve deconvolution

^۱ Harshaw

است. زیرا با توجه به پارامترهای سینتیک می‌توان به خصوصیات مواد ایجاد کننده‌ی منحنی‌های تابش TL پی برد. برای انجام برازش از یک برنامه‌ی C++ که براساس الگوریتم لونبرگ-مارگارت^۱ و روش حداقل مربعات کار می‌کند و در آزمایشگاه

جدول (۱): پارامترهای سینتیک حاصل از برازش قله‌های تابش TL دزیمر TLD-۴۰۰ به‌ازای مقادیر مختلف آهنگ گرمادهی طبق مدل سینتیک مرتبه اول با و بدون در نظر گرفتن اثر TQ به همراه درصد اختلاف آن‌ها نشان داده شده است.

FOM (%)	قله ۵		قله ۴		قله ۳		قله ۲		قله ۱		بدون اثر TQ (x)	با اثر TQ (✓)	β
	T _m (K)	E (eV)	T _m (K)	E (eV)	T _m (K)	E (eV)	T _m (K)	E (eV)	T _m (K)	E (eV)			
۰/۴۶	۵۹۶	۱/۰۲	۵۷۷	۱/۲۶	۵۶۲	۱/۳۹	۵۴۱	۱/۴۸	۵۲۳	۱/۴۶	x		
۰/۵۲	۵۷۰	۲/۶۳	۵۶۷	۲/۷۴	۵۵۷	۱/۸۴	۵۳۴	۱/۶۷	۵۱۶	۱/۳۸	✓		۱
---	۴/۶۱	۲/۶۳	۱/۸۰	۵۳/۹	۰/۸۲	۲۴/۴	۱/۳۰	۱۱/۳	۱/۴۰	۵/۴۴	(%)	اختلاف	
۰/۵۴	۶۰۵	۱/۰۰	۵۹۴	۱/۴۲	۵۷۳	۱/۳۰	۵۵۴	۱/۳۱	۵۳۱	۱/۳۰	x		
۰/۸۳	۵۶۳	۲/۲۶	۵۷۷	۳/۱۴	۵۶۰	۲/۰۴	۵۳۸	۱/۹۶	۵۲۵	۱/۲۶	✓		۲
---	۷/۴۳	۵۵/۸	۳/۰۳	۵۴/۸	۲/۲۹	۳۶/۴	۳/۱۱	۳۳/۳	۱/۰۹	۲/۵۳	(%)	اختلاف	
۰/۴۸	۶۱۶	۱/۰۵	۵۹۳	۱/۲۸	۵۷۶	۱/۳۶	۵۵۶	۱/۴۰	۵۳۶	۱/۴۰	x		
۱/۱۴	۵۶۷	۲/۶۰	۵۸۳	۲/۹۰	۵۸۰	۳/۰۰	۵۴۲	۲/۱۰	۵۳۰	۱/۳۷	✓		۳
---	۸/۶۹	۵۹/۸	۱/۷۵	۵۵/۹	۰/۶۲	۵۴/۵	۲/۶۵	۳۳/۱	۱/۲۱	۲/۴۷	(%)	اختلاف	
۰/۵۲	۶۲۳	۱/۰۴	۶۰۱	۱/۳۰	۵۸۳	۱/۳۸	۵۶۱	۱/۴۳	۵۴۰	۱/۴۲	x		
۰/۷۴	۵۷۵	۲/۷۶	۵۸۰	۲/۸۹	۵۸۲	۳/۲۲	۵۴۹	۲/۲۰	۵۳۵	۱/۴۷	✓		۴
---	۸/۲۱	۶۲/۳	۳/۵۹	۵۵/۱	۰/۰۷	۵۷/۰	۲/۱۴	۳۴/۹	۰/۹۴	۳/۶۲	(%)	اختلاف	
۰/۴۴	۶۲۴	۱/۰۰	۶۰۳	۱/۲۹	۵۸۵	۱/۳۷	۵۶۰	۱/۴۸	۵۴۱	۱/۵۷	x		
۰/۶۸	۵۸۰	۲/۸۴	۵۸۱	۲/۹۰	۵۸۹	۳/۵۰	۵۴۷	۲/۶۵	۵۳۶	۱/۴۴	✓		۵
---	۷/۶۱	۶۴/۷	۳/۸۳	۵۵/۳	۰/۰۷	۶۰/۹	۲/۳۳	۴۴/۲	۱/۰۵	۸/۷۵	(%)	اختلاف	
۰/۵۴	۶۲۸	۱/۰۹	۵۹۸	۱/۱۵	۵۸۴	۱/۲۹	۵۵۹	۱/۵۷	۵۴۱	۱/۸۲	x		
۰/۷۳	۵۸۶	۲/۹۱	۵۸۹	۳/۰۲	۵۹۰	۳/۴۶	۵۴۹	۲/۷۰	۵۳۷	۱/۴۴	✓		۶
---	۷/۲۴	۶۲/۷	۱/۵۲	۶۱/۸	۱/۰۴	۶۲/۷	۱/۹۱	۴۲/۰	۰/۷۷	۲۶/۱	(%)	اختلاف	
۰/۶۶	۵۳۱	۱/۰۰	۶۰۶	۱/۱۸	۵۸۸	۱/۲۵	۵۶۵	۱/۹۵	۵۴۲	۲/۰۰	x		
۰/۹۰	۵۷۸	۲/۸۲	۵۸۸	۳/۲۰	۶۱۲	۳/۵۰	۵۵۰	۳/۰۰	۵۳۵	۱/۵۹	✓		۷
---	۹/۱۱	۶۴/۶	۳/۰۵	۶۳/۰	۳/۸۸	۶۴/۴	۲/۶۹	۳۵/۰	۱/۲۵	۲۵/۶	(%)	اختلاف	

$$FOM (\%) = \frac{\sum |y_i - f_i|}{A} \times 100 \quad (5)$$

معیار بهترین انطباق میان داده‌های تجربی با منحنی تئوری

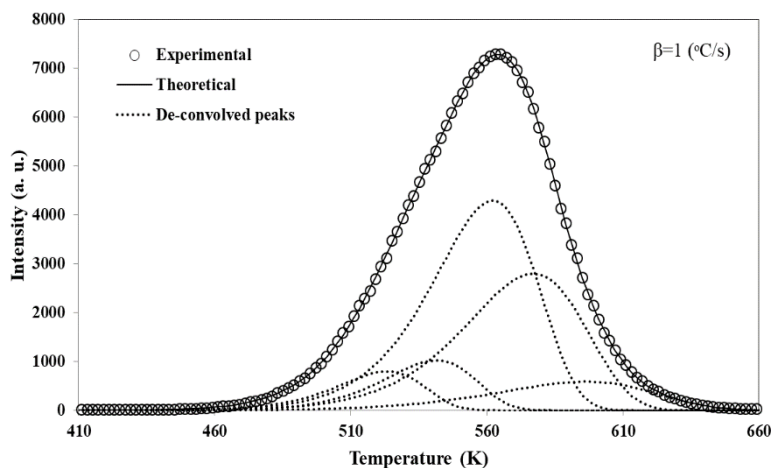
FOM^۱ است که به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۱۸]:

^۲ Figure Of Merit

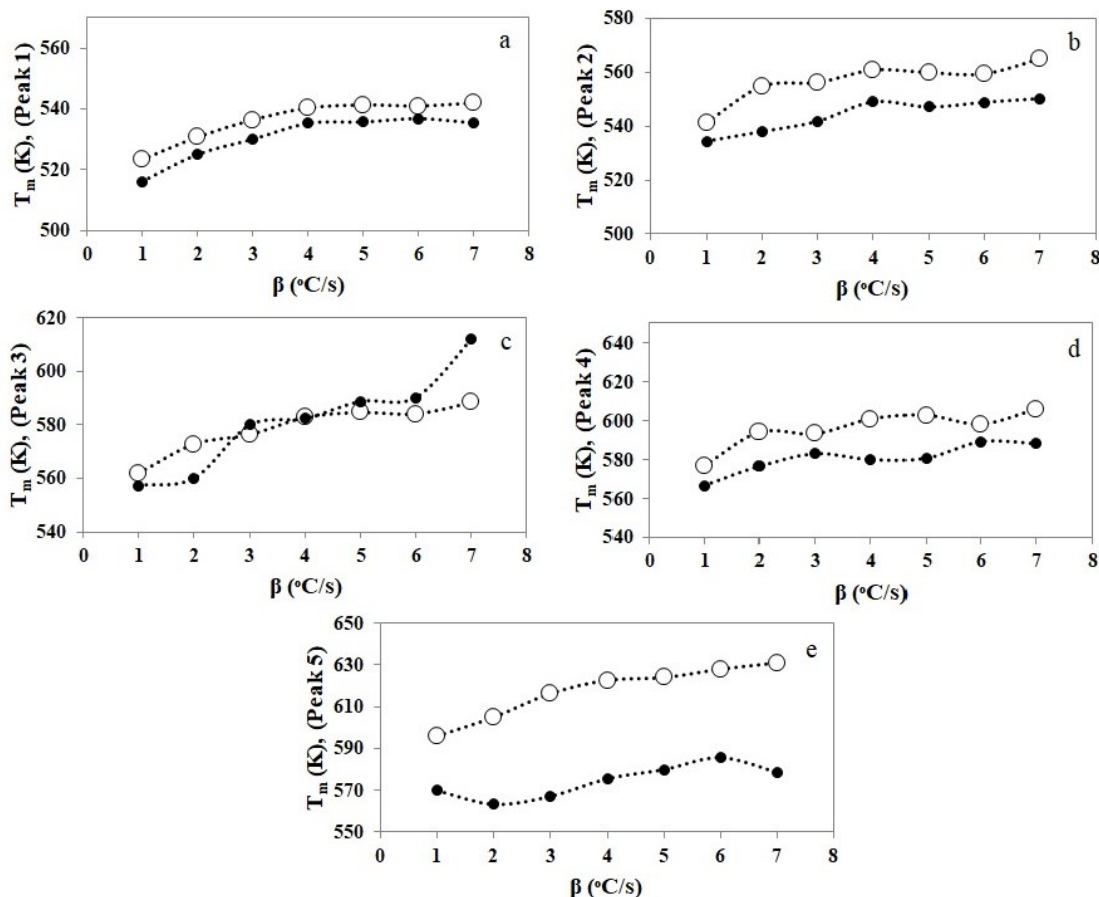
^۱ Levenberg-Marquart

نمونه‌ای از برازش منحنی تابش TL تجربی با منحنی تئوری براساس مدل سینتیک مرتبه اول بدون در نظر گرفتن اثر TQ در شکل ۲ و به‌طور مشابه برای حالتی که اثر TQ در نظر گرفته شود، در شکل ۴ نشان داده شده است.

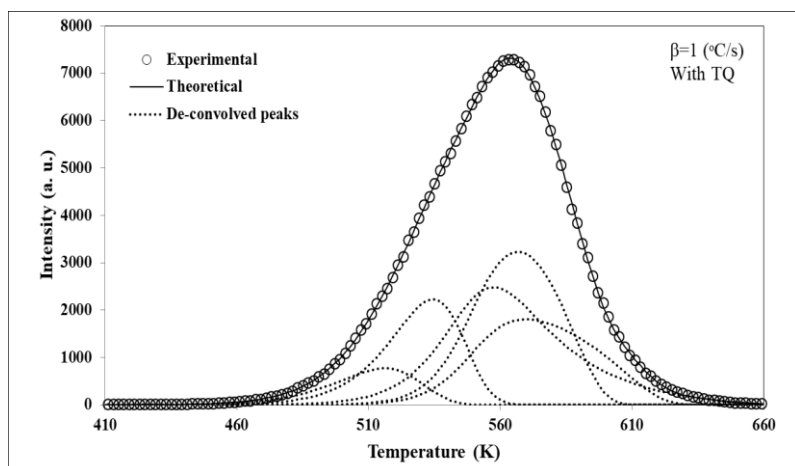
که در آن γ_i مربوط به مقادیر اصلی یا داده‌های تجربی، f_i بهترین مقداری است که از طریق این انطباق به دست می‌آید و A سطح زیر منحنی است. مقادیر FOM کمتر از ۲/۵ درصد به معنای انطباق خوب میان داده‌های تجربی با منحنی تئوری است.



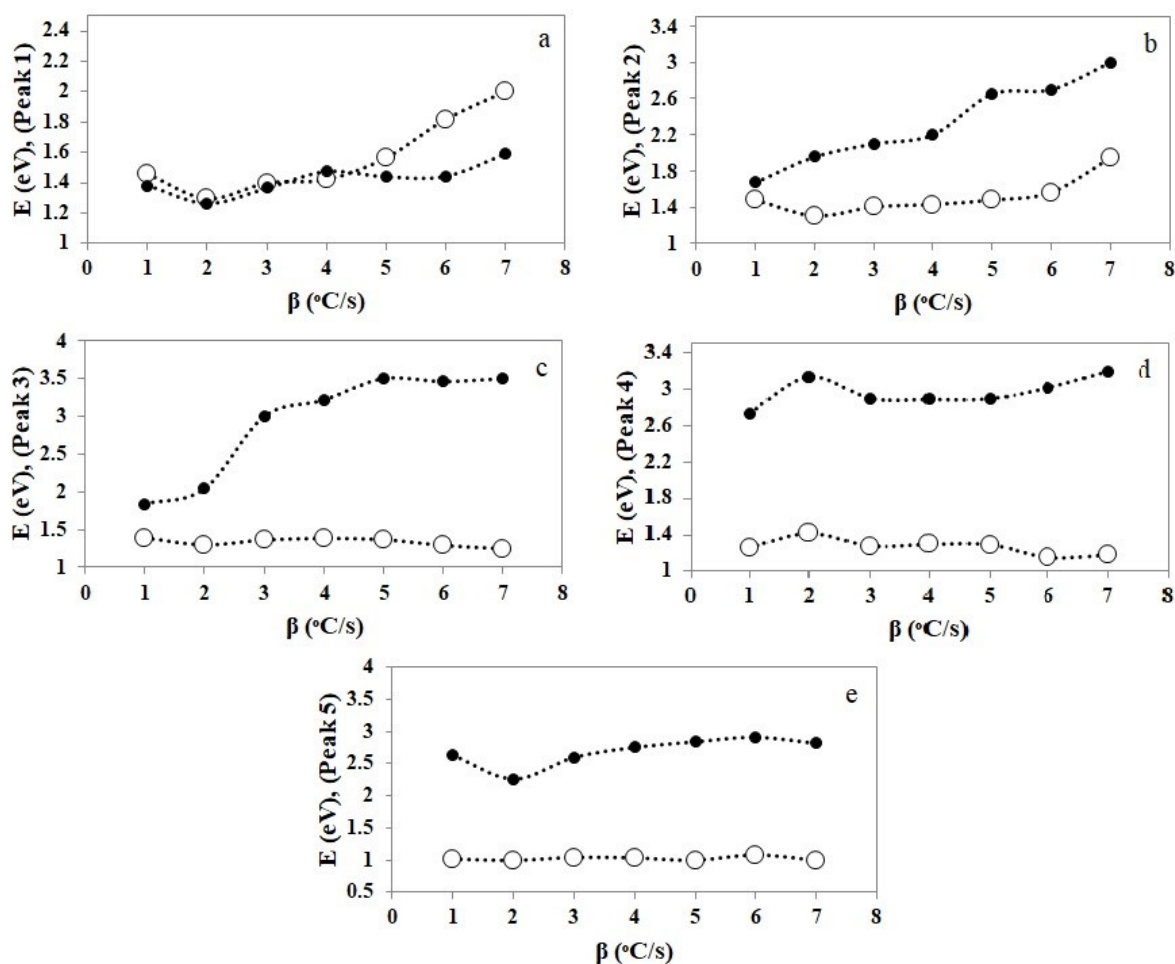
شکل (۲): منحنی تابش TL برازش شده مربوط به دزیمتر TLD-۴۰۰ به‌ازای آهنگ گرمادهی ۱ با مدل سینتیک مرتبه اول و بدون در نظر گرفتن اثر TQ طبق رابطه (۳)، نشان داده شده است.



شکل (۳): نحوه تغییرات پارامتر دمایی نقطه بیشینه به‌ازای مقادیر مختلف آهنگ گرمادهی برای قله‌های اول تا پنجم دزیمتر TLD-۴۰۰ با و بدون در نظر گرفتن اثر TQ به ترتیب با دایره توپر و دایره توخالی نشان داده شده است.



شکل (۴): منحنی تابش TL برازش شده مربوط به دزیتر ۶۰۰-TLD به ازای آهنگ گرمادهی ۱ با مدل سینتیک مرتبه اول و با در نظر گرفتن اثر TQ طبق رابطه (۴)، نشان داده شده است.



شکل (۵): نحوه تغییرات پارامتر انرژی فعال‌سازی به ازای مقادیر مختلف آهنگ گرمادهی برای قله‌های اول تا پنجم دزیتر ۶۰۰-TLD با و بدون در نظر گرفتن اثر TQ به ترتیب با دایره توپر و دایره توخالی نشان داده شده است.

باعث ایجاد تغییراتی در شکل منحنی تابش TL، خصوصاً برای قسمت‌های واقع در دماهای بالاتر می‌شود. با توجه به متفاوت بودن رابطه شدت TL با و بدون در نظر گرفتن اثر TQ، مشاهده شد که پارامترهای سینتیک حاصل از برازش منحنی‌های تابش TL تجربی با و بدون در نظر گرفتن اثر TQ یکسان نیستند. به نحوی که بیش‌ترین درصد اختلاف مربوط به قله‌های واقع در دماهای بالاتر و همچنین به‌ازای آهنگ‌های گرمادهی بیش‌تر است. چون با افزایش آهنگ گرمادهی، قله به سمت دماهای بالاتر جابه‌جا شده و اثر TQ در دماهای بالاتر نیز بیش‌تر می‌شود. ضمن این‌که درصد اختلاف بین مقادیر T_m حاصل از دو مدل نسبت به درصد اختلاف مقادیر E به‌دست آمده کمتر است. همچنین مقادیر E با در نظر گرفتن اثر TQ برای همه‌ی قله‌ها به جز قله‌ی اول نسبت به مقادیر به‌دست آمده بدون اثر TQ، بیش‌تر است. برای قله‌ی اول به‌دلیل این‌که در دمای پایین‌تری نسبت به سایر قله‌ها قرار دارد، رفتار متفاوتی دیده می‌شود. اثر TQ به‌عنوان یک واقعیت فیزیکی است و بنابراین پارامترهای سینتیک حاصل از برازش منحنی‌های تابش TL تجربی با مدل سینتیک مرتبه اول با در نظر گرفتن اثر TQ دقیق‌تر و به واقعیت نزدیک‌تر است.

نتایج حاصل از برازش منحنی‌های تابش TL مربوط به دزیمتر TLD-۶۰۰ به‌ازای مقادیر مختلف آهنگ گرمادهی طبق مدل سینتیک مرتبه اول با در نظر گرفتن اثر TQ طبق رابطه (۴) و بدون در نظر گرفتن اثر TQ طبق رابطه (۳) به‌همراه درصد اختلاف بین مقادیر پارامترهای حاصل از دو مدل در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین نمودار تغییرات دمای بیشینه و انرژی فعال سازی برای هر یک از ۵ قله منحنی، به‌ازای مقادیر مختلف آهنگ گرمادهی، به‌ترتیب در شکل‌های ۳ و ۵ نشان داده شده است. در این شکل‌ها دایره‌های توپر و توخالی، به‌ترتیب مربوط به با و بدون در نظر گرفتن اثر TQ هستند.

۳. نتیجه‌گیری

یکی از فرآیندهایی که در طی پدیده TL رخ می‌دهد، اثر TQ است. این اثر به‌دلیل وجود بازترکیب‌های غیرتابشی، باعث ایجاد تغییراتی در منحنی شدت TL می‌شود. یکی از تأثیراتی که بازترکیب غیرتابشی روی منحنی TL می‌گذارد، این است که باعث افت شدت TL و کاهش بازده لومینسانس با افزایش دما می‌شود. زیرا کسری از حفره‌ها و الکترون‌ها بدون ثبت هیچ علامتی از چرخه‌ی TL خارج می‌شوند. ضمن این‌که این اثر

۴. مراجع

1. M. Zahedifar, P. Rezaeian, S. Harooni. Thermoluminescence kinetic analysis of basaltic rocks using a generalized model for exponential distribution of activation energies. *Nucl. Instr. and meth. B* 264 (2007) 378-382.
2. 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) (2015) 798-802.
3. S. Harooni, M. Zahedifar, Z. Ahmadian. Determination of thermal quenching parameters of LiF:Mg,Ti (TLD-100) dosimeter. *Iran. J. Radiat. Safety Meas.* 5 (1) (2017) 29-34.
4. S. Taheri-Hasanabad, S. Harooni, M. Zahedifar, N. Hajiloo. Determination of thermal quenching parameters in $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ (TLD-400) thermoluminescent dosimeter. *J. Nucl. Sci. Technol.* 93 (3) (2020) 130-134.
5. M. S. Akselrod, N. A. Larsen, V. Whitley, S. W. S. McKeever. Thermal quenching of F-center luminescence in $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$. *Radiat. Prot. Dosim.* 84 (1-4) (1999) 39-42.
6. A. Halperin, A. A. Braner. Evaluation of thermal activation energies from glow curves. *Phys. Rev.* 117 (1960) 408-415.
7. J. T. Randall, M. H. F. Wilkins. Phosphorescence and electron traps: I. the study of trap

- distribution. *Proc. Roy. Soc. London A.* 184 (1945) 366-389.
8. G. F. J. Garlick, A. F. Gibson. The electron trap mechanism of luminescence in sulphide and silicate phosphors. *Proc. Phys. Soc.* 60 (1948) 574-589.
 9. 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) (1998) 2636-2641.
 10. S. W. S. McKeever. *Thermoluminescence of Solids*. Cambridge University Press, 1985.
 11. B. Subedi, E. Oniya, G. S. Polymeris, D. Afouxenidis, N. C. Tsirliganis, G. Kitis. Thermal quenching of thermoluminescence in quartz samples of various origin. *Nucl. Instr. Meth. B* 269 (6) (2011) 572-581.
 12. S. Harooni, M. Zahedifar, E. Sadeghi, Z. Ahmadian. A new thermoluminescence general order glow curve fit function considering thermal quenching effect. *Radiat. Prot. Dosim.* 187 (2) (2019) 103-107.
 13. V. E. Kafadar. Thermal quenching of thermoluminescence in TLD-200, TLD-300 and TLD-400 after β -irradiation. *Physica B.* 406 (3) (2011) 537-540.
 14. S. Harooni, S. Taheri-Hasanabad. New first order model of thermoluminescence as a function of peak temperature and intensity considering thermal quenching effect. *J. Nucl. Sci. Technol.* 44 (2) (2023) 40-46.
 15. A. N. Yazici, M. Bedir, A. S. Sokucu. The analysis of dosimetric thermoluminescence glow peak of $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ after β -irradiation. *Nucl. Instr. Meth. B* 259 (2) (2007) 955-965.
 16. M. Topaksu, V. Correcher, J. Garcia-Guinea. Luminescence emission of natural fluorite and synthetic $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ (TLD-400). *Radiat. Phys. Chem.* 119 (2016) 151-156.
 17. M. Danilkin, A. Lust, M. Kerikmäe, V. Seeman, H. Mändar, M. Must. $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ extreme dosimeter: Effects of Mn concentration on thermoluminescence mechanisms and properties. *Radiat. Meas.* 41 (6) (2006) 677-681.
 18. 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 gamma-ray spectra peaks. *Nucl. Instr. Meth.* 145 (2) (1977) 389-395.