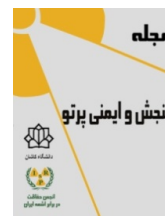




انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران

## مقاله پژوهشی



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۹، شماره ۳، تابستان ۱۴۰۰، صفحه ۳۹-۴۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۱۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸

# بررسی میزان افزایش نسبت قله‌های 5a/5 در نانوذرات TLD-100 در تابش‌های آلفا و گاما

محمود حیدری<sup>۱</sup>، خیرالله محمدی<sup>۲\*</sup> و داریوش سرداری<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی هسته‌ای، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

<sup>۲</sup>دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

\*تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، کدپستی: ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

پست الکترونیکی: mohammadi79@yahoo.com

## چکیده

در این پژوهش نانوپودر لیتیم فلوراید با ناخالصی منیزیم و تیتانیم به روش هم‌رسوبی ساخته شد. سپس پودر ساخته شده به صورت قرص‌هایی با ابعاد  $3/2 \times 3/2 \times 0/9$  mm<sup>3</sup> پرس گردید و در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه تف‌جوشی شد. قله 5 در LiF:Mg,Ti به عنوان قله اصلی محسوب می‌شود و از ۲ قله فرعی 5a و 5b که به ترتیب در دماهای کمتر و بیشتر از قله 5 بروز می‌کنند، تشکیل شده است. پیک 5a در LiF:Mg,Ti در اثر بازترکیب موضعی TC/LC حادث می‌گردد. در این حالت الکترون در اثر کسب انرژی کافی ناشی از حرارت، از دام الکترونی آزاد شده و با یک حفره که در مرکز لومینسانس مجاور در فاصله ۳/۵ نانومتر قرار گرفته، از طریق پدیده تونل‌زنی و بدون مهاجرت به نوار رسانش بازترکیب شده و سبب بروز این قله می‌گردد. در قرص‌های TLD استاندارد که از ذراتی با ابعاد میکرونی تشکیل شده‌اند، در روش خوانش استاندارد قله 5a یا بروز نمی‌کند و یا این‌که با شدت بسیار کمی ظاهر می‌گردد که به لحاظ دزیمتری فاقد اهمیت است. لذا در این تحقیق با استناد به مدل‌های توصیف‌کننده حفظ رفتار خطی نانوپودرهای ترمولومینسانس تا دزهای بالا و ارتباط آن با بازترکیب موضعی الکترون-حفره، اقدام به ساخت نانوذرات ترمولومینسانس به روش هم‌رسوبی در چندین مرحله و با ایجاد تغییراتی در غلظت مواد تشکیل‌دهنده، دمای محیط واکنش و حضور یا عدم حضور سورفکتانت و ... جهت دست‌یابی به ذراتی با ابعاد نانویی و شکل هندسی مناسب نمودیم. نانوپودرهای حاصل تحت تابش دزهای متفاوت آلفا و گاما قرار گرفته و پس از آنالیز منحنی‌های ترمولومینسانس میزان افزایش شدت قله 5a نسبت به قله 5 که عامل اصلی در نانوذیمتری است، گزارش گردید. نانوپودرهای ترمولومینسانس LiF:Mg,Ti قادر به افزایش نسبت 5a/5 بودند، لذا می‌توان از آن‌ها به عنوان ابزاری بسیار مناسب، ارزان‌قیمت و کاربردی در جهت تخمین میزان انرژی واگذار شده توسط پرتوها در ابعاد نانویی بهره برد.

کلیدواژگان: نانوذرات ترمولومینسانس، ساخت نانوپودر به روش هم‌رسوبی، روش خوانش استاندارد، نانوذیمتری، محاسبه 5a/5.

## ۱. مقدمه

عدد اتمی LiF:Mg,Ti معادل عدد اتمی بافت نرم می‌باشد و به همین دلیل در مباحث دزیمتری دارای جایگاه ویژه‌ای است [۱]. در TLD-100 قله 5 منحنی ترمولومینسانس، قله اصلی در دزیمتری محسوب شده و از سه قله که در دماهای متفاوت از یکدیگر بروز می‌کنند، تشکیل می‌شود. به نحوی که قله 5a در دمای کمتر از قله 5 و قله 5b در دمای بالاتر از قله

ترکیب شده و سبب تابش نور مرئی و بروز قله 5a می‌گردد [۱۱-۵].

مطالعات صورت گرفته توسط پاگونیس و چن در سال ۲۰۱۵ بر روی نانوپودرهای ترمولومینسانس ثابت کرد که ویژگی‌های آنها کاملاً متفاوت از نمونه‌های میکروبلوری است [۱۲]. طبق مطالعات دیگری که توسط ماندوسکی در سال ۲۰۰۶ [۱۳] و پاگونیس در سال ۲۰۱۴ [۱۴] انجام شد، مشخص گردید که این اتفاق به دلیل وجود شمار زیادی از جفت‌های مستقل الکترون-حفره است. در اثر حرارت‌دهی الکترون‌های آزاد شده از دام الکترونی که با حفره‌های موجود در همان خوشه بازترکیب می‌شوند. لذا با کوچک شدن اندازه خوشه‌ها بروز ساختارهای متفاوت تری در منحنی درخشندگی قابل انتظار است.

در مدل  $SLT^2$  که توجیه‌کننده بروز قله‌های 5a و 5b می‌باشد، ۲ نوار فرعی بین دام‌های الکترونی و نوار رسانش فرض شده است. بدین ترتیب چنانچه الکترون پس از کسب انرژی ناشی از گرمادهی از دام الکترونی آزاد شده و به نوار اول تهییج منتقل شده و در آنجا با یک حفره بازترکیب موضعی انجام دهد، سبب بروز قله 5a خواهد شد و در صورتی که به نوار دوم تهییج منتقل شده و در آنجا با یک حفره بازترکیب گردد، سبب بروز قله فرعی 5b خواهد شد [۱۵].

طبق مدل Unified Interaction Model (UNIM) افزایش بازده ترمولومینسانس و حفظ پاسخ خطی نانوپودرها در دزهای بالا ناشی از بازترکیب موضعی TC/LC می‌باشد [۱۶]. لذا در نانوپودرها انتظار می‌رود بدون ایجاد تغییر در نحوه خوانش که در مطالعات قبلی انجام شده بود، شدت قله 5a که برخاسته از بازترکیب موضعی است، به‌طور ذاتی افزایش یافته و در جهت تعیین مقادیر انرژی واگذار شده در

5 نمایان می‌شوند [۲]. قله 5a ناشی از بازترکیب موضعی TC/LC می‌باشد. به این ترتیب که در اثر حرارت‌دهی، الکترون‌ها از دام‌های الکترونی آزاد شده و با یک حفره در مرکز لومینسانس مجاور از طریق پدیده تونل‌زنی ترکیب شده و سبب ساطع شدن نور مرئی می‌گردد. در بازترکیب غیرموضعی، الکترون آزاد شده به نوار رسانش مهاجرت کرده و از آنجا یا به مرکز بازترکیب منتقل شده و سبب ساطع شدن نور مرئی می‌گردد و یا ممکن است توسط مراکز رقابتی که هیچ نقشی در ساطع نمودن نور مرئی ندارند، گیراندازی شده و باعث کاهش بازده ترمولومینسانس گردد [۳].

فولکس و همکارانش در سال ۲۰۰۹ [۳] نشان دادند که در بازترکیب موضعی، الکترون از دام الکترونی آزاد شده و با یک حفره در مرکز لومینسانس مجاور که در فاصله ۳/۵ nm قرار گرفته است از طریق پدیده تونل‌زنی بازترکیب شده و سبب بروز قله 5a می‌گردد. هوروویتز و همکارانش در سال ۲۰۱۰ [۲] با خنک‌سازی تدریجی TLD های تابش دیده (توسط جریان برنامه‌ریزی شده نیتروژن)، موفق به افزایش شدت قله 5a در مقایسه با زمانی که به‌صورت عادی مراحل خنک‌سازی طی شده بود، گردیدند. نسبت شدت 5a/5، به‌طور واضح با استفاده از روش خنک‌سازی آهسته، خطی و برنامه‌ریزی شده (با نرخ مشخص) افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که تغییرات به‌وجود آمده در نسبت 5a/5 (در اثر خنک‌سازی برنامه‌ریزی شده) برخاسته از افزایش میزان غلظت سه‌گانه خوشه‌ای Mg-Li است [۴].

طی پدیده تونل‌زنی که منجر به بازترکیب موضعی<sup>۱</sup> می‌گردد، الکترون‌ها در اثر کسب انرژی کافی ناشی از حرارت، از دام‌های الکترونی سه‌گانه Mg-Li آزاد شده و بدون مهاجرت به نوار رسانش، به مرکز لومینسانس مجاور که در فاصله ۳/۵ nm قرار دارند منتقل شده و در آنجا با یک حفره

<sup>2</sup> Semi-localized Transitions

<sup>1</sup> Geminate

سرعت بالا و در دمای محیط هم‌خوردند. محلول‌های حاصل پس از طی زمان‌های مذکور جهت ایجاد پدیده آژیتاسیون و جدا شدن ذرات به هم چسبیده شده احتمالی از یکدیگر، به ظروف پلاستیکی با دیواره‌های بسیار نازک منتقل شده و برای مدت ۱۰ دقیقه در حمام اولتراسونیک با توان ۳۵ kHz قرار داده شدند. سپس محلول‌ها به لوله‌های فالكون انتقال داده شدند و برای وقوع پدیده رسوب‌گذاری ۲۴ ساعت در وضعیت سکون باقی ماندند. در نهایت اقدام به سه مرحله سانتریفیوژ در ۳۵۰۰ rpm و هر مرتبه به مدت ۵ دقیقه نمودیم. پس از هر مرحله سانتریفیوژ، با استفاده از پیپت پلاستیکی و با دقت کافی، به نحوی که به پودر ته‌نشین شده آسیبی وارد نشود، مایع اضافی خارج شده و با افزودن حدود ۳۰ سی‌سی آب مقطر اقدام به شستشوی پودر و خارج کردن ناخالصی‌های احتمالی نمودیم. در پایان مرتبه سوم سانتریفیوژ و پس از خارج کردن مایع اضافی، پودر ته‌نشین شده را به ظروف پیرکس منتقل کرده و برای ۵ ساعت در کوره‌ای با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پودر به‌دست آمده توسط دستگاه پرس بدون اعمال دما و اضافه کردن ماده دیگری، تحت فشاری معادل  $7 \text{ ton/cm}^2$  به قرص‌هایی به ابعاد  $3.2 \times 3.2 \times 0.9 \text{ mm}^3$  تبدیل شدند (شکل ۱) و برای افزایش عملکرد و تشکیل بلور به مدت ۱۰ دقیقه در کوره تحت آرگون و در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت‌دهی شدند.



شکل (۱): نمونه‌ای از قرص‌های پرس شده.

مقیاس نانومتری و در شرایط خوانش استاندارد، مورد استفاده قرار گیرد. هدف از این تحقیق افزایش شدت قله 5a به‌عنوان فاکتور اصلی میزان واگذاری انرژی در ابعاد نانویی ( $3/5 \text{ nm}$ ) با بهره‌گیری از روش‌های خوانش استاندارد در نانوپودرهای ترمولومینسانس می‌باشد. نسبت 5a/5 به‌عنوان فاکتور نانوذرمتری و توانایی در تخمین میزان انرژی واگذار شده توسط پرتو در فاصله  $3/5 \text{ nm}$  است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. روش ساخت

جهت بررسی میزان تأثیر غلظت مواد شرکت‌کننده در واکنش بر ویژگی‌های پودرهای حاصل در سه مرحله اقدام به ساخت پودر نمودیم. با این توضیح که در مراحل دوم و سوم به ترتیب اقدام به افزایش دو و سه برابری جرم مواد نسبت به مرحله اول نمودیم و همچنین برای بررسی تأثیر زمان هم‌خوردن محلول‌ها بر مشخصات پودرهای تولید شده نیز کلیه مراحل سه‌گانه فوق در ۲ بازه زمانی ۴ و ۸ ساعته انجام گردید.

**مرحله اول:**  $\text{Li}(\text{NO}_3) = 2/482 \text{ g}$  را در ۴۰ سی‌سی آب دیونیزه و  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 = 0/07415 \text{ g}$  را در ۵ سی‌سی آب دیونیزه و  $\text{Ti} = 0/5 \text{ mg}$  را در ۵۰ cc اسید هیدروفلوریک ۵۰٪ در دمای محیط حل نمودیم. با توجه به اثر خوردگی HF بر روی شیشه و جهت جلوگیری از وارد شدن ناخالصی سیلیس به محصول نهایی، کلیه مراحل که HF حضور داشت در بشر پلاستیکی انجام شد. محلول اسید هیدروفلوریک و تیتانیوم به‌صورت قطره‌قطره به بشر پلاستیکی حاوی  $\text{Li}(\text{NO}_3)$  و  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  که با هم ترکیب شده بودند و با سرعت بالا در حال هم‌خوردن بودند، اضافه گردید. جهت جلوگیری از تبخیر و بیرون ریختن مایع در اثر سرعت بالای هم‌زن، دهانه بشر توسط ورقه‌های پارافین مسدود شد و برای ۲ بازه زمانی ۴ ساعته (نمونه A) و ۸ ساعته (نمونه B) با

لخته مشهود بود، لذا برای غلبه بر این مشکل در ۳۰ ثانیه پایانی بازه زمانی ۱۰ دقیقه‌ای آزیتاسیون، ۰/۵ g سورفکتانت PVP K-25 حل شده در ۱۰ سی سی آب را به آرامی به ظروف حاوی محلول‌ها اضافه نمودیم. در پایان عیناً مشابه مراحل قبلی فرآیندهای رسوب‌گیری و ... انجام شد.

لازم به توضیح است که جهت حفظ عملکرد سورفکتانت و جلوگیری از وارد شدن آسیب توسط امواج اولتراسونیک به ساختار پلیمری آن، سورفکتانت در ثانیه‌های پایانی اضافه گردیده است.

**مرحله پنجم:** در این مرحله جهت دستیابی به بهترین نتیجه و همچنین بررسی میزان تأثیر دمای محیط واکنش بر اندازه و شکل ذرات تولید شده، مرحله چهارم را با رعایت کامل مقادیر و روش‌های ساخت و استحصال تنها با این تفاوت که کلیه مراحل در محیط سردخانه آزمایشگاهی و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد صورت پذیرفت، تکرار نمودیم.

در مرحله پنجم حلال‌های مورد استفاده (آب و HF) برای هم‌دمایی برای ۴ ساعت در سردخانه قرار داده شدند. همزن به داخل سردخانه منتقل شد و در همان محیط با رعایت دستورالعمل‌های مرحله چهارم، کلیه محلول‌ها با هم ترکیب شدند و به مدت ۴ ساعت روی همزن در حال هم‌خوردن با سرعت زیاد باقی ماندند. قابل ذکر است در این مرحله میزان مواد شرکت‌کننده در واکنش دقیقاً مشابه مقادیر استفاده شده در مرحله چهارم و مطابق با مراحل اول و دوم تحقیق بودند، که به ترتیب منجر به استحصال نمونه‌های I و J شدند.

در اقدام پایانی این مرحله ظروف پلاستیکی با دیواره‌های نازک حاوی محلول‌ها به حمام اولتراسونیک که از آب با دمای نزدیک انجماد و قطعات یخ پر شده بود، برای مدت ۱۰ دقیقه منتقل شده و در ۳۰ ثانیه پایانی اقدام به اضافه‌نمودن سورفکتانت نمودیم.

قابل ذکر است فرآیندهای سانتریفیوژ، خشک کردن، پرس قرص‌ها و حرارت‌دهی در کوره تحت آرگون در مورد کلیه مراحل ۵ گانه این تحقیق صادق بوده و عیناً در پایان هر مرحله تکرار شده است. لذا جهت جلوگیری از طولانی شدن مباحث، از تکرار آن‌ها در ادامه متن خودداری گردید.

**مرحله دوم:** در این مرحله جرم مواد تشکیل‌دهنده به میزان ۲ برابر مرحله قبل افزایش یافتند. میزان هم‌خوردن محلول‌ها مطابق با مرحله اول و در ۲ بازه زمانی ۴ ساعته (نمونه C) و ۸ ساعته (نمونه D) صورت پذیرفت.

**مرحله سوم:** در این مرحله نیز کلیه فرآیندهای ساخت، استحصال پودر و ... مشابه مراحل قبلی بوده و تنها تفاوت موجود، افزایش ۳ برابری جرم مواد حل‌شونده نسبت به مقادیر در نظر گرفته شده در مرحله اول و به میزان:  $\text{Li}(\text{NO}_3) = 7/446 \text{ g}$  و  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 = 0/2224 \text{ g}$  و  $1/5 \text{ mg}$  Ti = بوده است. حجم حلال‌ها ثابت و مشابه مراحل قبلی در نظر گرفته شد. در این مرحله نیز پودرها مطابق با مراحل قبلی در ۲ بازه زمانی ۴ ساعته (نمونه E) و ۸ ساعته (نمونه F) ساخته شدند.

**مرحله چهارم:** این مرحله پس از بررسی تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های ساخته شده در مراحل قبلی آغاز گردید. نتایج مراحل قبلی بیانگر این واقعیت بود که پودرهایی که در بازه زمانی ۴ ساعته و در مراحل اول و دوم تولید شده بودند، نسبت به سایر نمونه‌های به دست آمده دارای ذراتی با شکل هندسی منظم‌تر و ابعاد کوچکتر هستند، لذا در مرحله چهارم جهت حصول بهترین نتایج ممکن مقادیر مواد شرکت‌کننده در واکنش معادل مقادیر مرحله اول (نمونه G) و مرحله دوم (نمونه H) و زمان هم‌خوردن محلول‌ها نیز ثابت و معادل ۴ ساعت در نظر گرفته شد. از طرفی در تمام تصاویر میکروسکوپی مراحل قبلی پدیده کلوخه‌ای شدن و ایجاد

## ۲.۲. تابش‌دهی

پرتودهی قرص‌ها با پرتو گاما به میزان ۱ و ۲ گری توسط دستگاه شتاب‌دهنده خطی<sup>۱</sup> Linac و با پرتو آلفا به میزان ۵ و ۱۰ گری توسط منبع <sup>241</sup>Am در دانشگاه صنعتی مالک اشتر انجام گردید.

منحنی ترمولومینسانس قرص‌های تابش‌دیده با استفاده از خروجی‌های دستگاه TLD-Reader مدل Harshaw 3500 و تحت شرایط خوانش:

Pre heat tem: 100<sup>o</sup>c  
Pre heat time: 11.010 sec  
Max temp: 350<sup>o</sup>c  
Aquire time: 50.790 sec  
Ramp: 10<sup>o</sup>c/sec  
Anneal tem: 300<sup>o</sup>c

توسط نرم‌افزار GlowFit و براساس مدل سینتیک مرتبه اول که توفیق بیشتری در شناسایی قله‌های منحنی‌های پیچیده و همچنین قابلیت برازش کردن داده‌های پیچیده با حداکثر تعداد ۱۰ قله را داراست، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از نمایان شدن قله 5a در برخی از قرص‌ها و در تابش‌های مشخص با شدت مناسب و البته در شرایط خوانش استاندارد می‌باشد.

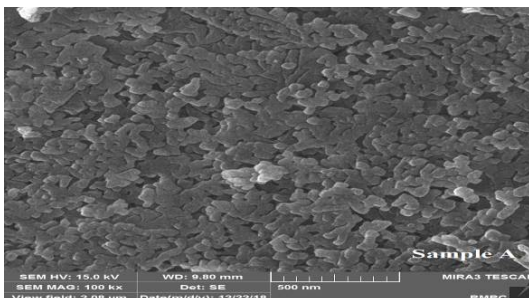
## ۳. بحث و نتایج

## ۱.۳. تعیین خصوصیات نانوپودرهای ساخته شده

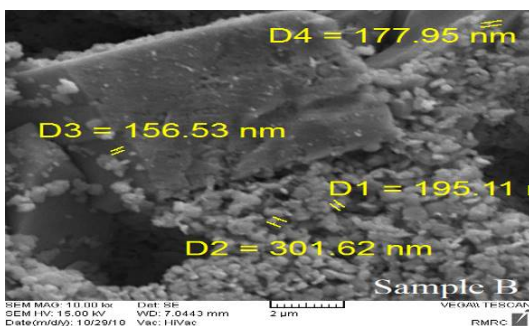
در بررسی تصاویر میکروسکوپی به دست آمده از پودرهای ساخته شده مشخص گردید که تغییر فاکتورهای غلظت مواد حل‌شونده، زمان هم‌زدن محلول‌ها، دمای محیط واکنش و استفاده از سورفکتانت تأثیر بسزایی در اندازه و شکل ذرات تشکیل شده دارند.

۱.۱.۳. آنالیز پودرها با میکروسکوپ الکترونی تابش میدانی<sup>۲</sup>

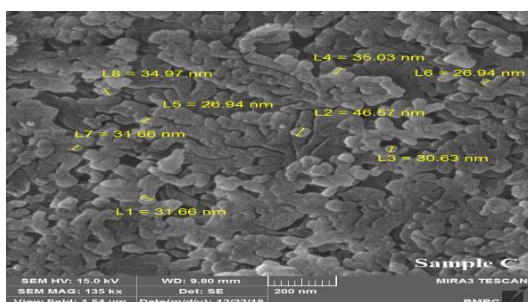
مراحل اول تا سوم: در بررسی و تحلیل تصاویر FESEM حاصل از پودرهای ساخته شده در این مراحل (نمونه‌های A, B, C, D, E, F) که کلیه شرایط آزمایش به غیر از غلظت مواد تشکیل‌دهنده و زمان واکنش در آن‌ها ثابت فرض شده بود، نتایج زیر حاصل شد:



شکل (۲): آنالیز FESEM پودر تولید شده در مرحله اول نمونه A.



شکل (۳): آنالیز FESEM پودر تولید شده در مرحله اول نمونه B.



شکل (۴): آنالیز FESEM پودر تولید شده در مرحله دوم نمونه C.

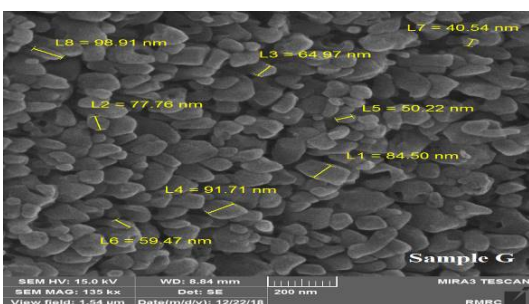
<sup>2</sup> FESEM

<sup>1</sup> Linear Accelerator

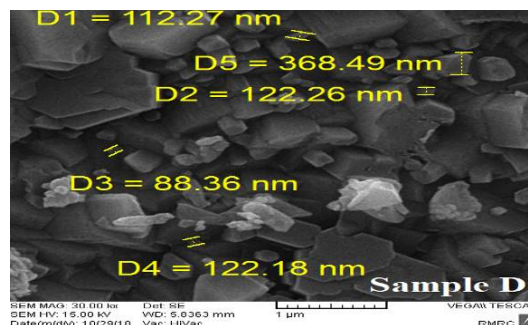
تشکیل ذرات کوچک‌تر در مراحل اول تا سوم، مطابق با مقادیری که قبلاً ذکر شد، اقدام به تغییر جرم مواد حل شده نمودیم.

در بررسی تصاویر میکروسکوپیک مشخص گردید که لزوماً با افزایش غلظت و زمان هم‌خوردن محلول‌ها نتایج بهتری از نظر کوچک‌تر شدن اندازه ذرات و مورفولوژی مناسب‌تر حاصل نشده است. بلکه بهترین نتیجه از این حیث مربوط به نمونه C بوده که در بازه زمانی هم‌خوردن ۴ ساعته و مقدار میانگین از نظر غلظت مواد تشکیل‌دهنده در مراحل سه‌گانه حاصل شده است. لذا می‌توان این‌طور استنباط کرد که این میزان از غلظت مواد و زمان هم‌خوردن ۴ ساعته محلول‌ها، در جهت دستیابی به اهداف این تحقیق مقادیر بهینه بوده است.

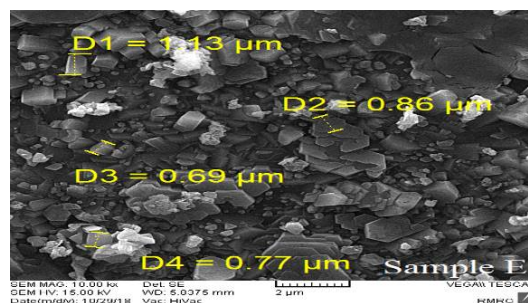
مرحله چهارم: در تصاویر میکروسکوپیک حاصل از مراحل قبلی به دلیل کوچک شدن اندازه ذرات و در نتیجه افزایش کشش سطحی به وجود آمده بروز پدیده کلوخه شدن کاملاً مشهود بود. لذا برای غلبه بر این مشکل و کاهش کشش سطحی ذرات تشکیل‌شده از سورفکتانت PVP K-25 استفاده شد. بررسی نتایج میکروسکوپیک حاصل مبین این واقعیت بود که پس از اضافه شدن سورفکتانت تغییرات مثبت گسترده‌ای در اندازه و شکل ذرات تشکیل‌شده به وجود آمد و ذراتی با اندازه کوچک‌تر و شکل هندسی منظم‌تر حاصل شدند.



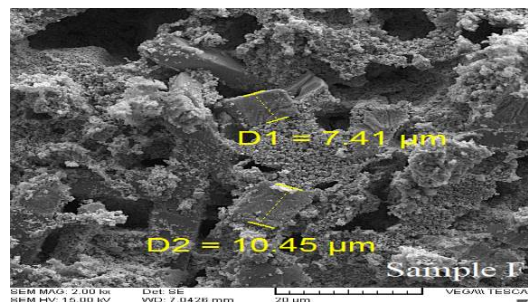
شکل (۸): آنالیز FESEM پودر تولید شده در مرحله چهارم نمونه G.



شکل (۵): آنالیز FESEM پودر تولید شده در مرحله دوم نمونه D.



شکل (۶): آنالیز FESEM پودر تولید شده در مرحله سوم نمونه E.

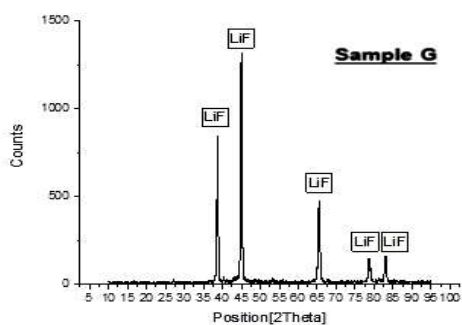


شکل (۷): آنالیز FESEM پودر تولید شده در مرحله سوم نمونه F.

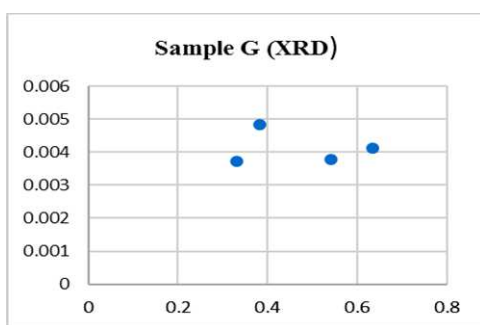
در مراحل فوق انتظار می‌رفت افزایش زمان هم‌خوردن محلول‌ها و هم‌چنین شیب منفی غلظت مواد حل‌شده، فرصت رشد محدودتری در اختیار جوانه‌های تشکیل‌شده قرار داده و در نهایت سبب ایجاد شرایط بهینه به لحاظ تشکیل نانوذرات با توزیع ابعاد باریک‌تری گردد. بالطبع نیل به این هدف با افزایش زمان هم‌خوردن محلول‌ها دست‌یافتنی‌تر بود. از طرفی برای بررسی تأثیر غلظت مواد حل‌شده بر اندازه و شکل ذرات تشکیل‌شده و هم‌چنین تعیین غلظت بهینه مواد حل‌شده در

### ۲.۱.۳. آنالیز XRD

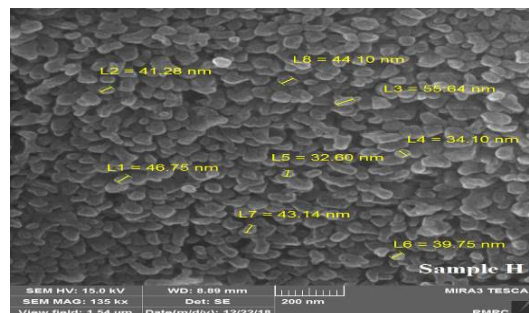
با توجه به این‌که نمونه‌های G، H، I، J (که در بخش قبلی توضیح داده شدند)، در محدوده ابعاد نانو بوده و به لحاظ مورفولوژی دارای شکل هندسی مناسبی بوده‌اند و اهداف این تحقیق را از منظر ساخت نانوپودر برآورده کرده‌اند، لذا به جهت بررسی بیش‌تر از لحاظ فاز و بلورهای تشکیل‌شده توسط دستگاه XRD مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده توسط نرم‌افزار Xpert High Score تحلیل شده و با استفاده از روش ویلیامسون - هال اقدام به رسم نمودار و محاسبه اندازه ذرات نمودیم.



شکل (۱۲): الگوی پراش پرتوهای ایکس نمونه G.

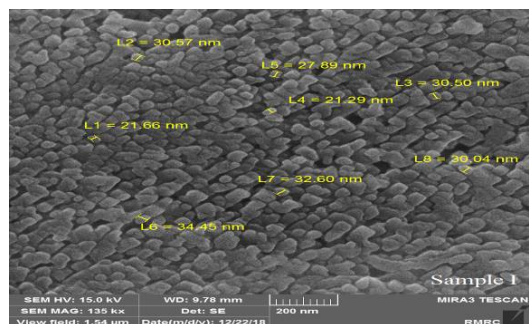


طبق روش ویلیامسون - هال و با استفاده از عرض از مبدأ منحنی‌های به‌دست آمده، اندازه ذرات تشکیل‌دهنده پودرها که طبق خروجی‌های نرم‌افزار تراگونال بوده، محاسبه شده و در جدول شماره ۱ آورده شده‌اند.

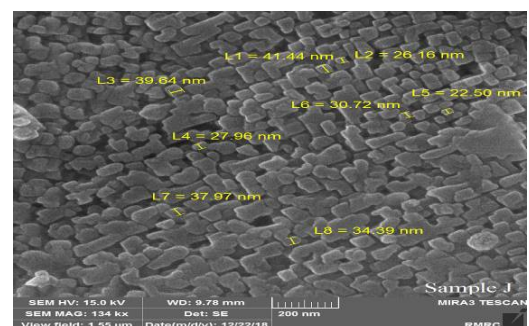


شکل (۹): آنالیز FESEM پودر تولید شده در مرحله چهارم نمونه H.

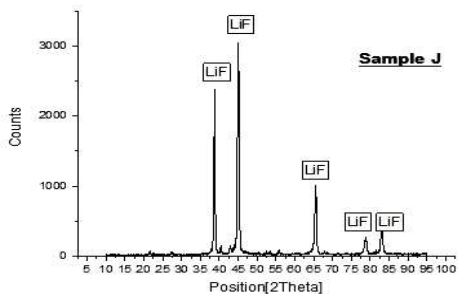
مرحله پنجم: در این مرحله به علت دمای پایین محیط واکنش و کاهش قابلیت تحرک یون‌ها در محلول، هر جوانه میزان محدود و مشخصی یون برای رشد در اختیار داشته و امکان مهاجرت یون‌ها از نقطه‌ای به نقطه دیگر وجود ندارد. در نتیجه ذرات کوچک‌تر با شکل هندسی منظم‌تر و با توزیع اندازه باریک‌تری حاصل شده است.



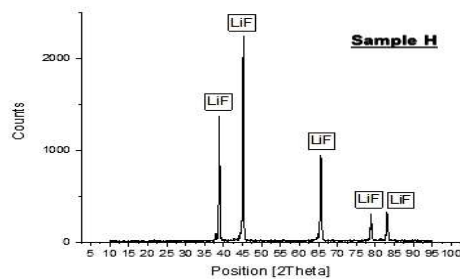
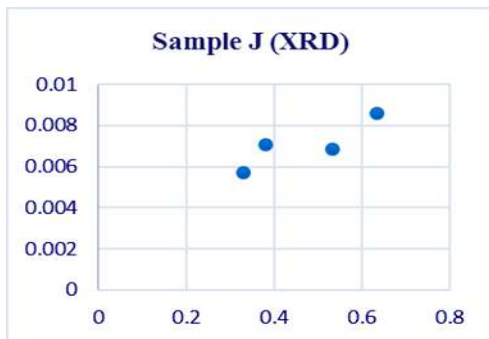
شکل (۱۰): آنالیز FESEM پودر تولید شده در مرحله پنجم نمونه I.



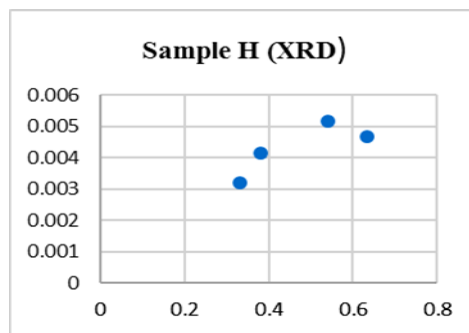
شکل (۱۱): آنالیز FESEM پودر تولید شده در مرحله پنجم نمونه J.



شکل (۱۵): الگوی پراش پرتوهای ایکس نمونه J.



شکل (۱۳): الگوی پراش پرتوهای ایکس نمونه H.



قله‌های حاضر در منحنی‌های XRD کاملاً منطبق بر کارت LiF بوده و خلوص پودرهای ساخته شده تأیید شد.

جدول (۱): محاسبه اندازه ذرات به روش ویلیامسون - هال.

Sample	G	H	I	J
Size (nm)	۳۸	۳۰	۳۰	۲۵

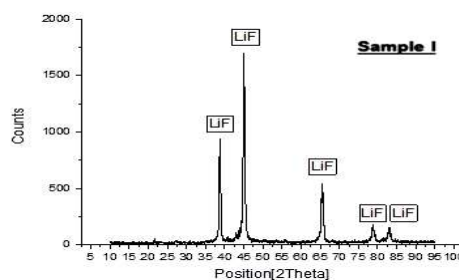
اگر عرض از مبدأ را در نمونه H،  $0.004$  در نظر بگیریم، طبق فرمول  $L = K\lambda/C$  (ویلیامسون - هال)، اندازه ذرات حدود  $30 \text{ nm}$  خواهد بود. به همین ترتیب اندازه ذرات در جدول شماره ۱ ذکر شده‌اند.

### ۲.۳. تابش‌دهی نانوپودرها

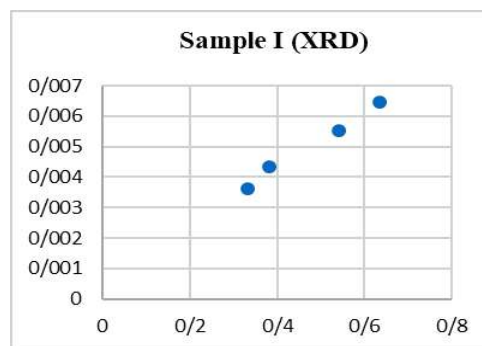
نمونه‌های G، H، I و J که به لحاظ ساختاری از ذراتی با ابعاد نانویی و شکل هندسی مناسب تشکیل شده بودند، توسط دستگاه شتاب‌دهنده خطی Linac به میزان ۱ و ۲ گری تحت تابش گاما و هم‌چنین با استفاده از منبع  $^{241}\text{Am}$  به میزان ۵ و ۱۰ گری در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تحت تابش آلفا قرار گرفتند.

### ۳.۳. ارزیابی عملکرد نانوپودرهای ساخته شده

با استفاده از دستگاه TLD-Reader مدل Harshaw 3500 و به روش استاندارد اقدام به خوانش قرص‌های تابش‌دیده نمودیم. خروجی‌های حاصل توسط نرم‌افزار GlowFit و طبق مدل سینتیک مرتبه اول که نسبت به مرتبه عام توفیق بیش‌تری

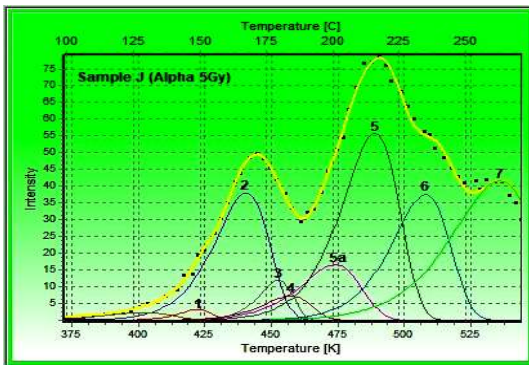


شکل (۱۴): الگوی پراش پرتوهای ایکس نمونه I.

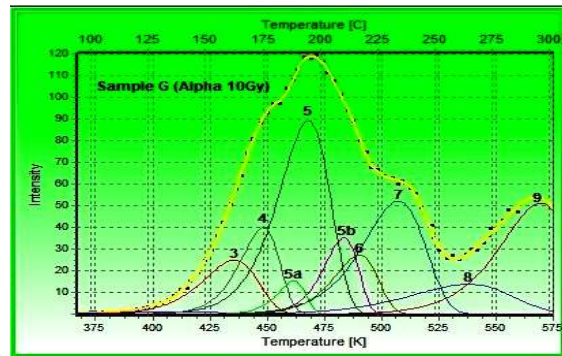




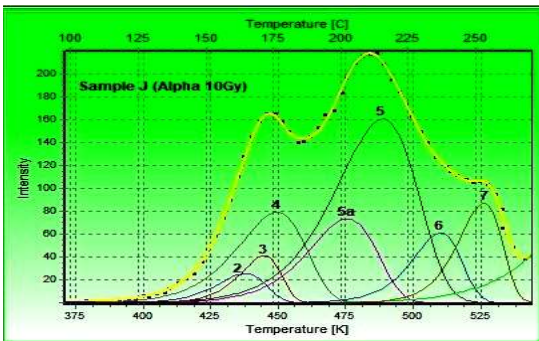
در نمایان‌سازی قله‌های منحنی‌های پیچیده داشت، آنالیز شده و منحنی‌ها و داده‌های مرتبط با آنها به شرح ذیل حاصل گردید.



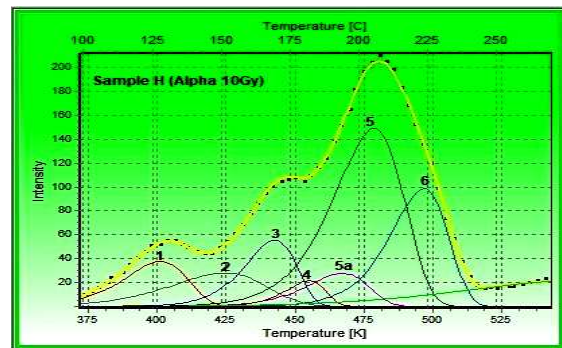
شکل (۲۰): منحنی ترمولومینسانس نمونه J در تابش ۵ Gy آلفا.



شکل (۱۶): منحنی ترمولومینسانس نمونه G در تابش ۱۰ Gy آلفا.



شکل (۲۱): منحنی ترمولومینسانس نمونه J در تابش ۱۰ Gy آلفا.

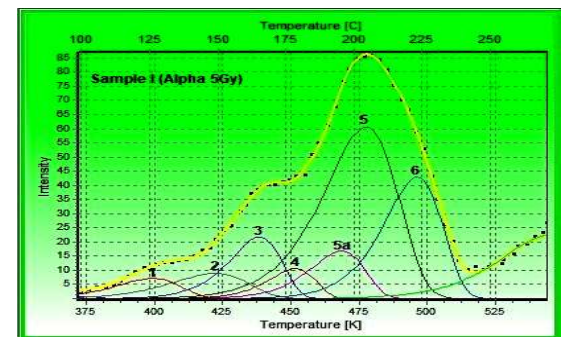


شکل (۱۷): منحنی ترمولومینسانس نمونه H در تابش ۱۰ Gy آلفا.

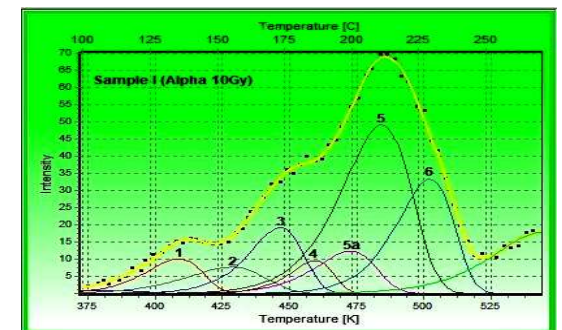
طبق منحنی‌های موجود تنها برخی از نانوپودرهایی که تحت تابش آلفا قرار گرفته بودند (طبق جدول شماره ۲) موفق به نمایش قله 5a شدند. در مواردی که قرص‌ها تحت تابش پرتو گاما قرار گرفته بودند، نتوانستند قله 5a را بروز دهند. به‌منظور پیشگیری از طولانی شدن مباحث از آوردن منحنی‌های مربوط به گاما صرفه‌نظر شد. نکته قابل ذکر این‌که با کاهش اندازه نانوپودرها و با افزایش میزان دز و LET پرتوها، نسبت 5a/5 افزایش بیشتری نشان داده است. در نهایت می‌توان این‌طور استنباط نمود که هرچه پودرهای تولید شده دارای ابعاد کوچک‌تر و شکل هندسی منظم‌تری باشند، زمانی‌که با پرتوهای آلفا تابش‌دهی می‌شوند، باعث افزایش قابل قبولی در نسبت قله‌های 5a/5 شدند (مطابق مقادیر جدول ۲).

جدول (۲): نسبت قله‌های 5a/5 در نمونه‌های مختلف ساخته شده در اثر تابش‌های آلفا به میزان ۵ و ۱۰ گری.

نمونه‌ها	تابش آلفا ۵ گری	تابش آلفا ۱۰ گری
G	-----	۰/۰۹
H	-----	۰/۱۶
I	۰/۲۰	۰/۲۱
J	۰/۳۱	۰/۳۸



شکل (۱۸): منحنی ترمولومینسانس نمونه I در تابش ۵ Gy آلفا.



شکل (۱۹): منحنی ترمولومینسانس نمونه I در تابش ۱۰ Gy آلفا.

## ۴. نتیجه گیری

خواهد بود. در نهایت در مقایسه با مطالعات قبلی که تنها با ایجاد تغییراتی در روش خوانش قرص‌های TLD استاندارد موفق به نمایان‌سازی قله 5a شده بودند، در این تحقیق به روش خوانش استاندارد و بدون این‌که تغییری در روش خوانش قرص‌ها ایجاد گردد، میزان افزایش 5a/5 به شکل محسوسی نسبت به مطالعات قبلی افزایش یافته است. لذا می‌توان از این قرص‌ها به‌عنوان ابزاری بسیار ارزان، در دسترس و با روش استفاده آسان در مقاصد نانودزیمتری استفاده نمود.

## ۵. قدردانی

با تشکر از تمام کسانی که با صبوری، محبت و راهنمایی خود در به‌نتیجه رساندن این مهم، یار من بودند.

براساس نتایج حاصل مشخص گردید که هرچه نانوذرات ترمولومینسانس دارای ابعاد کوچک‌تر و شکل هندسی منظم‌تری باشند، به‌ویژه زمانی که توسط پرتوهای با LET بالا (پرتوهای آلفا) تحت تابش قرار گرفتند، در مقایسه با زمانی که توسط پرتوهای گاما (LET پایین) پرتودهی شده بودند، توفیق بیشتری در افزایش نسبت 5a/5 خواهند داشت و بر این اساس میزان افزایش 5a/5 در نمونه J و تحت تابش پرتو آلفا به میزان 10 Gy بیش‌ترین افزایش را نشان داده است. نکته بسیار مهم این است که در قرص‌های TLD-100 استاندارد که از ذراتی با ابعاد میکرونی تشکیل شده‌اند، در شرایط خوانش استاندارد یا قله 5a بروز نمی‌کند و یا با شدت بسیار کمی بروز می‌کند که به‌لحاظ دزیمتری فاقد اهمیت

## ۶. مراجع

- [1] J. Azorín, C. Furetta, and A. Scacco. Preparation and properties of thermoluminescent materials, *Phys. status solidi*, 138(1) (1993) 9–46.
- [2] Y. Horowitz, E. Fuks, H. Datz, L. Oster, J. Livingstone, and A. Rosenfeld. Mysteries of LiF TLD response following high ionization density irradiation: Glow curve shapes, dose response, the unified interaction model and modified track structure theory, *Radiat. Meas*, 46(12) (2011) 1342–1348.
- [3] E. Fuks et al. Thermoluminescence solid-state nanodosimetry—the peak 5A/5 dosimeter, *Radiat. Prot. Dosimetry*, 143(2–4) (2011) 416–426.
- [4] A. J. J. Bos, R. N. M. Vijverberg, T. M. Pijters, and S. W. S. McKeeve. Effects of cooling and heating rate on trapping parameters in LiF:Mg, Ti crystals, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 25(8) (1992) 1249–1257.
- [5] A. Pandey, R. G. Sonkawade, and P. D. Sahare. Thermoluminescence and photoluminescence characteristics of nanocrystalline K<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>: Eu, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 35(21) (2002) 2744–2747.
- [6] A. Pandey et al. Thermoluminescence properties of nanocrystalline K<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>: Eu irradiated with gamma rays and proton beam, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. With Mater. Atoms*, 269(3) (2011) 216–222.
- [7] K. Raheja, A. Pandey, S. Bahl, P. Kumar, S. P. Lochab, and B. Singh. Optimization and thermoluminescence study of the nanophosphor BaSO<sub>4</sub>: Eu, *AIP Conf. Proc.*, 1832(1) (2017) 50044.
- [8] N. Salah, P. D. Sahare, S. P. Lochab, and P. Kumar. TL and PL studies on CaSO<sub>4</sub>: Dy nanoparticles, *Radiat. Meas*, 41(1) (2006) 40–47.
- [9] N. Salah, P. D. Sahare, and A. A. Rupasov. Thermoluminescence of nanocrystalline LiF:Mg, Cu, P, *J. Lumin.*, 124(2) (2007) 357–364.
- [10] S. P. Lochab, P. D. Sahare, R. S. Chauhan, N. Salah, R. Ranjan, and A. Pandey. Thermoluminescence and photoluminescence study of nanocrystalline Ba<sub>0.97</sub>Ca<sub>0.03</sub>SO<sub>4</sub>: Eu, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 40(5) (2007) 1343–1350.
- [11] S. P. Lochab et al. Nanocrystalline Ba<sub>0.97</sub>Ca<sub>0.03</sub>SO<sub>4</sub>: Eu for ion beams dosimetry, *J. Appl. Phys.*, 104(3) (2008) 33520.
- [12] V. Pagonis and R. Chen. Monte Carlo simulations of TL and OSL in nanodosimetric materials and feldspars, *Radiat. Meas*, 81 (2015) 262–269.
- [13] A. Mandowski. Topology-dependent thermoluminescence kinetics, *Radiat. Prot. Dosimetry*, 119(1–4) (2006) 23–28.
- [14] V. Pagonis, E. Gochnour, M. Hennessey, and C. Knowler. Monte Carlo simulations of luminescence processes under quasi-equilibrium (QE) conditions, *Radiat. Meas*, 67 (2014) 67–76.
- [15] L. Sadri, K. Mohammadi, S. Setayeshi, and M. H. Khorasani. Synthesis, simulation of semi-localized transitions (SLT) model of LiF:Mg,Ti phosphors and investigation of displacement peak in glow curves, *Radiat. Meas*, 125 (2019) 89–95.
- [16] J. L. Lawless, R. Chen, D. Lo, and V. Pagonis. A model for non-monotonic dose dependence of thermoluminescence (TL), *J. Phys. Condens. Matter*, 17(4) (2005) 737–753.