

## رفتار ترمولومینسانسی $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ سنتز شده با روش‌های مختلف جهت دوزیمتری فردی

خیرالله محمدی، علیرضا پورابراهیم، علی حسینی زاده

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

author: mohammadi79@aut.ac.ir [Corresponding](mailto:mohammadi79@aut.ac.ir)

**چکیده:** اگرچه اکسید آلومینیوم ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) به دلیل خواصی مانند سختی بالا، خنثی بودن از نظر شیمیایی و شفافیت، داشتن نقطه-ی ذوب بالا، عایق الکتریسیته و هادی حرارت بودن، کاربرد بسیاری در صنایع مختلف پیدا کرده اما استفاده از آن در حوزه‌ی دوزیمتری ترمولومینسانس به دلیل حساسیت پایین، از گذشته با محدودیت‌هایی روبه‌رو بوده است. برای غلبه بر این مشکل، ایجاد ساختاری با عیوب آنیونی و همراه با ناخالصی با رشد کروندوم ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) از مذاب در دمای  $2052^\circ\text{C}$  و محیط احیاء‌کنندگی شدید و حضور گرافیت پیشنهاد شد که با دوپ کردن کربن در ساختار اکسید آلومینیوم همراه بود. اگرچه میزان حساسیت ترمولومینسانس این ماده ۶۰-۴۰ برای  $\text{LiF:Mg, Ti (TLD-100)}$  بود و باند نشری در  $410\text{--}420\text{ nm}$  داشت اما به دلیل تجهیزات مورد نیاز، انرژی مصرفی زیاد و شرایط حساس رشد و پیدا کردن روشی مناسب از نظر هزینه و مشخصه‌ی ترمولومینسانسی، بررسی رفتار ترمولومینسانسی  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  سنتز شده از روش‌های مختلف آغاز شد. در این مقاله به بررسی رفتار ترمولومینسانسی  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  در اشکال متفاوت بلوری، پودری و فیلم نازک، سنتز شده به وسیله‌ی روش‌های مختلف اعم از EFG، گرادیان دمایی، سنتز احتراقی محلول، پرس سرد و آندایزینگ پرداخته شد. نتایج نشان داد که روش سنتز احتراقی در مقایسه با روش‌های دیگر از نظر هزینه و خواص دوزیمتری مناسب تر می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** رفتار ترمولومینسانس، اکسید آلومینیوم دوپ شده با کربن، روش‌های ساخت، دوزیمتری فردی.

## ۱- مقدمه

اکسید آلومینیوم در شکل بلوری خود معروف به کروندوم بوده و در مقیاس موس بعد از الماس در رتبه‌ی دوم قرار دارد. هم‌چنین شفاف و از نظر شیمیایی خنثی بوده و نقطه‌ی ذوب بالایی، بیش از  $2002^{\circ}\text{C}$ ، دارد.  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  عایق الکتریسیته‌ی خوبی بوده و هدایت حرارتی مناسبی دارد. این ویژگی‌ها سبب استفاده‌ی گسترده از این ماده در حوزه‌های الکترونیکی، نوری و صنعتی شده است. ساختار بلوری  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ، هگزاگونال فشرده بوده که یون‌های اکسیژن ( $\text{O}^{2-}$ ) در گوشه‌ی سلول واحد قرار داشته و جاهای خالی هشت وجهی شبکه توسط یون‌های آلومینیوم ( $\text{Al}^{3+}$ ) اشغال شده‌اند. برای خنثی نگه‌داشتن بار کلی این ترکیب و با توجه به بارهای یون‌های اکسیژن (۲ بار منفی) و آلومینیوم (۳ بار مثبت)، دو سوم جاهای خالی توسط یون‌های  $\text{Al}^{3+}$  اشغال شده است [۱].

بررسی‌های اولیه درباره‌ی خواص ترمولومینسانسی  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  در سال ۱۹۵۷ توسط ریک<sup>۱</sup> و دانیلز<sup>۲</sup> [۲] صورت پذیرفت که تلاش‌های زیادی را برای درک بهتر جزئیات نشر ترمولومینسانس در بلورهای مختلف انجام می‌دادند. اگرچه بسیاری از خواص  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  برای کار در حوزه‌ی دوزیمتری ترمولومینسانس مناسب بود اما حساسیت پایین آن نسبت به تابش یونیزه کننده در مقایسه با مواد شناخته شده در آن زمان مانند LiF سبب محدودیت کاربرد  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  در این حوزه شده بود. برای رفع این مشکل، آکسلرد<sup>۳</sup> و همکارانش [۳]  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  را همراه با عیوب آنیونی به وسیله‌ی دوپ کردن کربن در ساختار با رشد  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  از مذاب در دمای  $2052^{\circ}\text{C}$  و محیط احیاء‌کنندگی شدید و حضور گرافیت انجام دادند. این روش که معروف به فرآیند استفانو<sup>۴</sup> است، سبب ایجاد ناخالصی‌هایی (مانند کربن) در بلور با خلوص بالا شد. وجود کربن به شکل یون‌های  $\text{C}^{2+}$  سبب تسریع تشکیل جاهای خالی اکسیژن شده و منجر به سنتز ماده‌ای دارای عیوب آنیونی<sup>۵</sup> شد. تولید لومینسانس در  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  نسبت به جاهای خالی اکسیژن حساس بوده و حالات مختلفی دارد که مهم‌ترین آن‌ها مراکز  $F$  و  $F^+$  هستند. اثر متقابل این مراکز سبب تولید ترمولومینسانس و لومینسانس تهییج شده با نور می‌شود. مکانیزم اصلی در دوزیمتری ترمولومینسانس و لومینسانس تهییج شده با نور با استفاده از  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ ، به صورت آزاد شدن الکترون‌های گرفتار شده طی پرتودهی به وسیله‌ی تهییج نوری و حرارتی و سپس بازترکیب الکترون‌ها در مراکز  $F^+$  جهت تولید لومینسانس بیان شده که توسط معادله‌ی (۱) تشریح می‌شود.



$F^*$  یک مرکز  $F$  تهییج شده است. در واقع حساسیت ترمولومینسانس و لومینسانس تهییج شده با نور  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  به غلظت مرکز  $F^+$  وابسته است [۱،۴].

<sup>۱</sup> Rieke

<sup>۲</sup> Daniels

<sup>۳</sup> Akselrod

<sup>۴</sup> Stepanov

<sup>۵</sup> Anion-defective

اخیرا تلاش‌های بسیار زیادی برای افزایش حساسیت اکسید آلومینیوم با استفاده از دوپانت‌های مختلف مانند  $\text{Ni}$  و  $\text{Cr}$ ،  $\text{Y}$  و  $\text{Mg}$ ،  $\text{Ti}$ ،  $\text{Si}$  صورت پذیرفته است. براساس تحقیقات انجام شده توسط آکسلرد و همکارانش [۵] در سال ۱۹۹۳، حساسیت ترمولومینسانسی  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ ، ۶۰-۴۰ برابر TLD-100 می‌باشد. مزیت‌های دیگر  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  در حوزه‌ی ترمولومینسانسی شامل حالت خطی در محدوده‌ی دوز وسیع، منحنی تابش ساده، محو کنندگی پایین، تکرارپذیری خوب، استحکام مکانیکی و عدد اتمی نسبتاً پایین آن است. مواد دوزیمتری ترمولومینسانس که هم‌اکنون در حال استفاده هستند، به شکل‌های مختلفی از جمله تک بلور، پودر و فیلم نازک و با روش‌های گوناگونی مانند رشد بلور [۶،۷]، سل-ژل [۸]، ژل پلی آکریلامید [۹]، سنتز احتراقی [۱۰،۱۱]، اکسیداسیون الکتروشیمیایی [۱۲] ساخته می‌شوند.

هدف از این پژوهش، بررسی ویژگی‌های ترمولومینسانسی اکسیدهای آلومینیوم دوپ شده با استفاده از روش-های EFG<sup>۱</sup>، گرادیان دمایی، سنتز احتراقی محلول، پرس سرد و آندایزینگ و همچنین مقایسه‌ی مواد و تجهیزات آزمایشگاهی لازم جهت تولید این مواد است.

## ۲- روش‌های ساخت

از زمانی که  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  به عنوان یک ماده‌ی ترمولومینسانس برای کار در حوزه‌ی دوزیمتری شناخته شد، روش‌های متفاوتی برای تولید آن به خصوص به شکل بلور مورد توجه قرار گرفت. روش سنتی برای تهیه‌ی  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  روش چکرالسکی<sup>۲</sup> بود که در آن رشد بلور از دمای ذوب (۲۰۵۰ °C) و تحت اتمسفر بسیار کاهنده در حضور گرافیت انجام شد. در این روش، ویژگی‌های دوزیمتری به پارامترهای رشد بسیار وابسته بود و کوچکترین تغییر در شرایط رشد، تشکیل تله‌ها و توزیع عیوب را تحت‌تاثیر قرار می‌داد. الحاق کربن به ساختار با دوپ شدن و رشد همزمان بلور در دماهای بالا انجام پذیرفت و از آنجا که کنترل الحاق کربن به درون مذاب، از جایی که بلور رشد می‌کرد، دشوار بود پس کنترل ایجاد عیوب هم بسیار سخت بود [۱۳]. علاوه بر این روش سنتی، روش‌های ساخت  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  دیگری وجود داشته که هر کدام دارای مکانیزم‌های مختلف و مواد اولیه و تجهیزات گوناگونی بوده که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد.

### ۲-۱- رشد بلور

یانگ<sup>۳</sup> و همکارانش [۶] برای ساخت بلور  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  با حساسیت بالا از روش EFG استفاده کردند که توسعه یافته‌ی روش چکرالسکی توسط لابل<sup>۴</sup> بود و برای تولید اکسیدهای آلومینیوم با اشکال متفاوت به کار می‌رفت. در این روش با طراحی مناسب یک قالب و بوت‌هی مولیبدنی و استفاده از اتمسفر بسیار کاهنده و سازه و حفاظ-

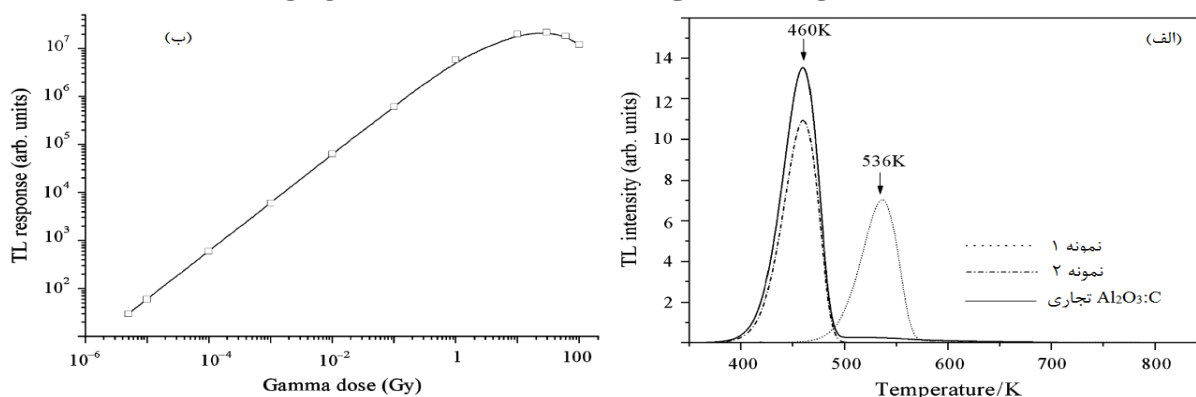
<sup>۱</sup> Edge-defined, Film-fed Growth

<sup>۲</sup> Czochralsky

<sup>۳</sup> Yang

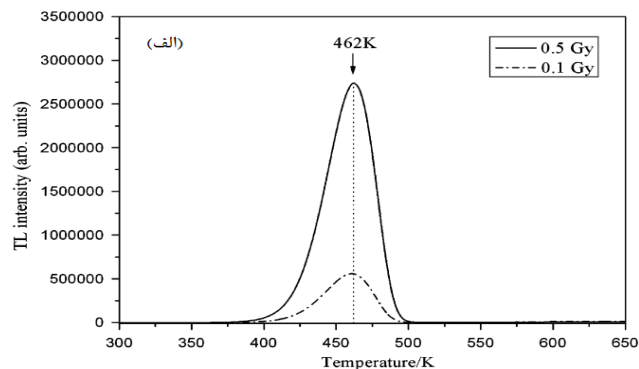
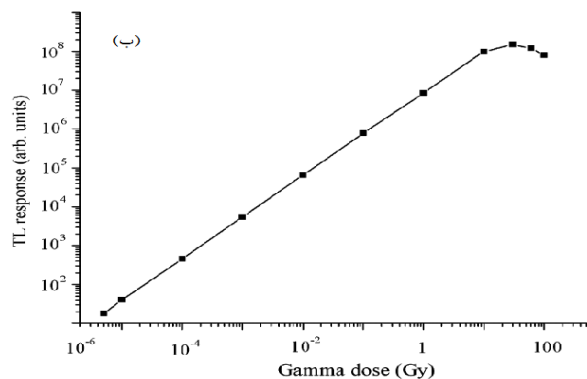
<sup>۴</sup> Labelle

های گرافیتی که به عنوان منبع تأمین کننده ی کربن در طول رشد  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  عمل می کردند، تولید بلورها انجام می پذیرفت. سپس بلورها در اتمسفرهای مختلف و زمان های گوناگون آنیل می شد. با توجه به شکل ۱ (الف) می توان بیان کرد که نمونه ی تهیه شده از EFG (نمونه ی ۱) و نمونه ی آنیل شده در اتمسفر هیدروژن و دمای  $1400^\circ\text{C}$  به مدت ۸۰ ساعت (نمونه ی ۲)، به ترتیب پیک تابشی مشخصی را در  $263^\circ\text{C}$  و  $187^\circ\text{C}$  از خود نشان داده اند. طبق پاسخ ترمولومینسانس بلور آنیل شده در اتمسفر هیدروژن نسبت به منبع Cs-137 که در شکل ۱ (ب) آورده شده است، مشخص است که در محدوده ی دوز  $0.2\text{ Gy}$  -  $10^{-6}\text{ Gy}$  پاسخ خطی خوبی وجود داشته و از  $0.2\text{ Gy}$  تا  $10\text{ Gy}$ ، پاسخ تقریباً خطی شده و در حدود  $10\text{ Gy}$  اشباع رخ داده است.



شکل ۱- (الف) منحنی ترمولومینسانس نمونه های ۱ و ۲ و بلور  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  تجاری، (ب) پاسخ ترمولومینسانس نمونه ی ۲ به دوز گاما Cs [۶].

یانگ و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۸ از روش گرادیان دمایی برای ساخت بلور  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  با حساسیت بالا استفاده کردند. روش گرادیان دمایی یک تکنیک انجماد جهت دار بوده که فصل مشترک جامد- مایع زیر سطح مذاب غوطه ور شده و توسط مذاب با دمای بالا محاصره می شود. رشد بلور تحت گرادیان های دمایی پایین انجام شده و حوزه ی دمایی در مذاب مخالف جهت میدان گرانشی بوده که سبب به حداقل رساندن اثرات همرفتی می شود. بعد از اختلاط اکسید آلومینیوم و گرافیت، پودرها در فشار  $250\text{ MPa}$  فشرده شدند. کوره ی مخصوص این فرآیند [۱۴] در دمای  $1827^\circ\text{C}$  به مدت چند ساعت حرارت دیده تا آلودگی های محیطی به حداقل رسیده و سپس فرآیند رشد در خلاء و دمای  $2077^\circ\text{C}$  انجام پذیرفت. بلور آنیل شده دارای یک پیک تابشی مشخص در  $189^\circ\text{C}$  بود که با افزایش دوز بتا، شدت ترمولومینسانسی افزایش می یافت (شکل ۲ (الف)). همانطور که در شکل ۲ (ب) مشخص است، پاسخ ترمولومینسانس بلور رشد داده شده در محدوده ی دوز  $10\text{ Gy}$  -  $5 \times 10^{-6}\text{ Gy}$ ، خطی بوده و اشباع در  $30\text{ Gy}$  اتفاق افتاده است.



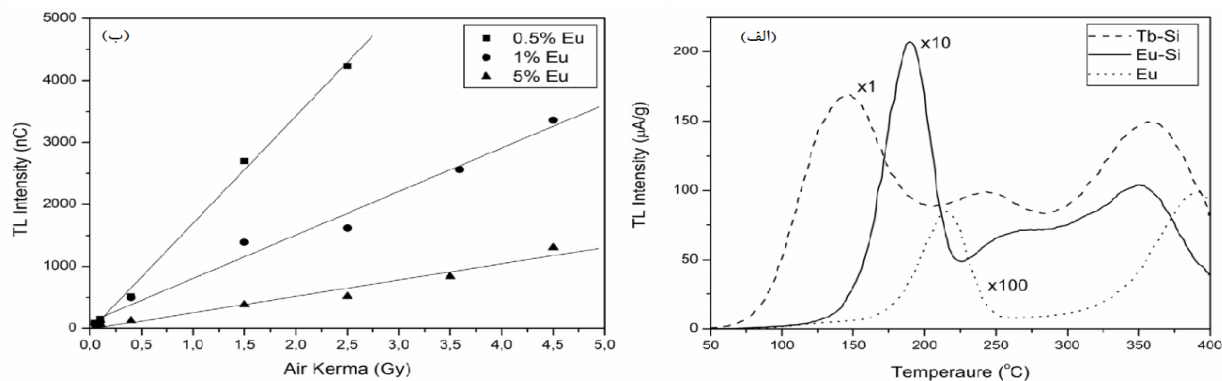
شکل ۲- (الف) منحنی‌های ترمولومینسانس بلور  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  رشد داده شده نسبت به دوز بتا، (ب) پاسخ ترمولومینسانس بلور  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  رشد داده شده نسبت به دوز گاما [۷].

## ۲-۲- سنتز پودر و قرص

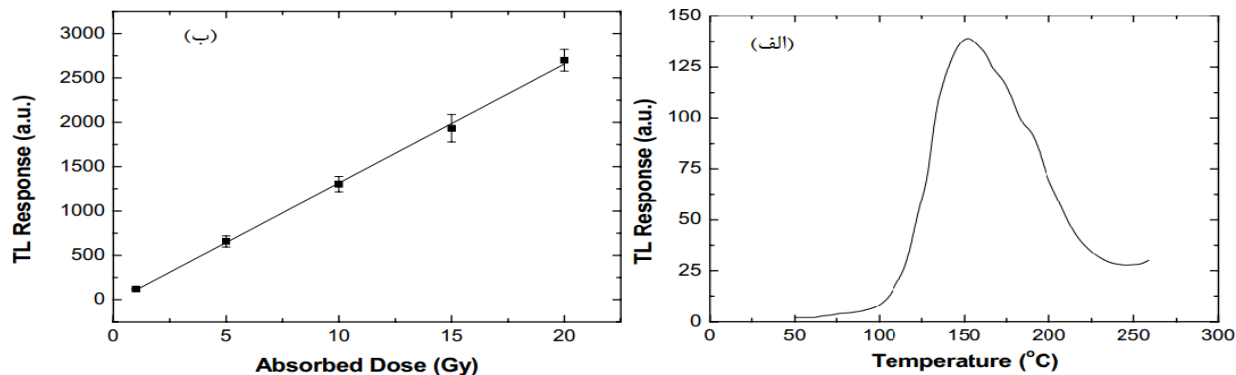
اخیراً برای دوپ کردن عناصر نادر زمین در ساختار اکسید آلومینیوم از روش سنتز احتراقی محلول استفاده شده است. در این روش از یک محلول آبی اشباع از نمک فلزی دلخواه (معمولاً نیترات‌ها به دلیل خواص اکسیدکنندگی مناسب و حلالیت زیاد در آب) و سوخت مناسب (مانند اوره) به عنوان احیاءکننده استفاده شد. مکانیزم روش سنتز احتراقی شامل یک واکنش اکسایش- کاهش بین نمک فلزی و سوخت و در نتیجه آزاد شدن حرارت ناشی از این واکنش بوده که منجر به تشکیل یک ماده‌ی اکسیدی با ساختار نانو می‌شود. از مشخصه‌های این روش، امکان دستیابی به پودرهای اکسیدی خالص و بلوری در مقیاس نانو با سطح ویژه‌ی بالا، رسیدن به فازهای دما بالا، سریع بودن فرآیند، دوستدار محیط زیست بودن و نیاز به انرژی کمتر به دلیل انجام واکنش احتراقی است [۱۰، ۱۵].

باروس<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۰] با افزودن یورویوم (Eu)، تریبوم (Tb) و سیلیسیوم به عنوان دوپانت به محلول آبی آلومینیوم نیترات ۹ آبه و اوره، رفتار ترمولومینسانسی اکسید آلومینیومی دوپ شده را بررسی کردند. طبق منحنی ترمولومینسانس نشان داده شده در شکل ۳ (الف) چنین بیان کردند که اگرچه بیشترین حساسیت مربوط به نمونه‌ی  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Tb, Si}$  و پاسخ ترمولومینسانسی آن ۵۰۰۰ برابر اکسید آلومینیوم دوپ نشده بود اما نمونه‌ی  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Eu}$  که دارای یک پیک مشخص در حدود  $200^\circ\text{C}$  بود، با وجود حساسیت کمتر برای دوزیمتری تابشی مناسب‌تر به نظر می‌رسید. با توجه به پاسخ ترمولومینسانس نمونه‌های  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Eu}$  در محدوده‌ی دوز ۵-۱۰<sup>-۳</sup> Gy که در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است، پاسخ خطی برای نمونه‌ها مشخص بوده که بیشترین حساسیت مربوط به ۰/۵ درصد Eu می‌باشد.

<sup>۱</sup> Barros



شکل ۳- (الف) منحنی‌های تابش  $Al_2O_3:Tb, Si$  (۵ درصد Tb و ۵ درصد Si)،  $Al_2O_3:Eu, Si$  (۵ درصد Eu و ۵ درصد Si) و  $Al_2O_3:Eu$  (۵ درصد Eu)، (ب) پاسخ ترمولومینسانس  $Al_2O_3:Eu$  با غلظت‌های متفاوت Eu [۱۰].  
 روچا<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۶] با اختلاط پودرهای اکسید آلومینیوم و کربن و سپس پرس سرد آن‌ها و در نهایت سینتر کردن قرص حاصل در هوا و دمای  $1650^\circ C$  به مدت ۳ ساعت، ویژگی‌های ترمولومینسانسی نمونه‌ی نهایی را بررسی کردند. با توجه به منحنی ترمولومینسانس نشان داده شده در شکل ۴ (الف)، یک پیک دوزیمتری در  $150^\circ C$  مشاهده شد و طبق شکل ۴ (ب) می‌توان گفت که پاسخ ترمولومینسانس خطی بود.

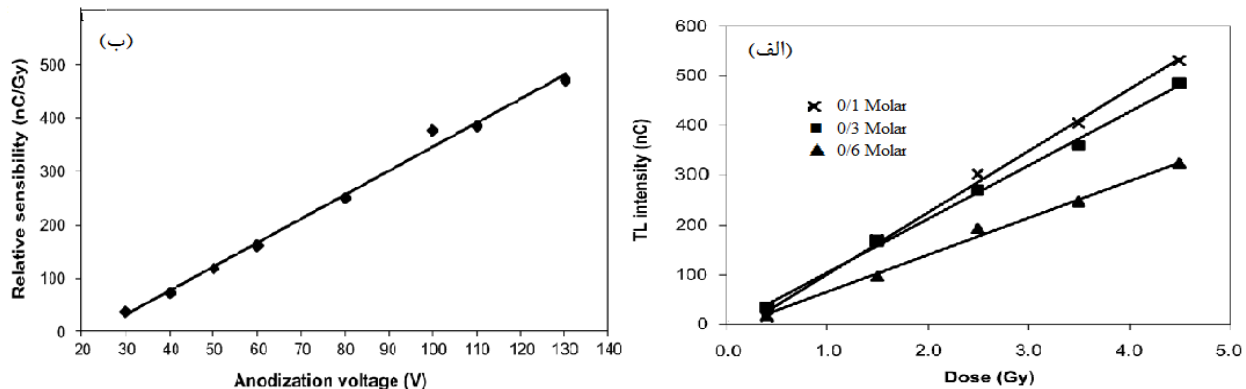


شکل ۴- (الف) منحنی ترمولومینسانس قرص اکسید آلومینیومی سینتر شده نسبت به تابش اشعه‌ی X با دوز  $10 Gy$  و (ب) پاسخ ترمولومینسانس قرص سینتر شده نسبت به اشعه‌ی X با انرژی پایین [۱۶].

### ۳-۲- فیلم نازک

با استفاده از فرآیند آندایزینگ، فیلم‌هایی نازک با تخلخل‌های یکنواخت و قطر  $50 nm$  در سطح آلومینیوم ایجاد شد. در طول فرآیند، عناصر کربوکسیل در اثر برقراری ولتاژ ثابت از محلول اسید آلی، درون تخلخل‌های اکسید آلومینیوم قرار گرفته و بعد از آنیل بخشی از این کربوکسیل‌ها تجزیه شده و به ساختار اکسید آلومینیوم نفوذ کردند. در فرآیند آندایزینگ از یک استوانه‌ی گرافیتی که در مرکز سلول قرار گرفته، به عنوان کاتد استفاده شد. طبق ویژگی‌های ترمولومینسانسی نشان داده شده در اشکال ۵ (الف) و (ب) می‌توان گفت که برای بهینه کردن پاسخ ترمولومینسانس باید از اگزالیک اسید با غلظت  $0.1/10$  مولار و ولتاژ اعمالی  $130 v$  استفاده کرد [۱۲].

<sup>۱</sup> Rocha



شکل ۵- (الف) پاسخ ترمولومینسانس نمونه‌های آندایز شده در غلظت‌های مختلف اسید و (ب) حساسیت نمونه‌های آندایز شده به ولتاژ بایاس فرآیند آندایزینگ [۱۲].

طبق مطالب گفته شده و مقایسه‌ی صورت گرفته در جدول ۱ می‌توان چنین گفت که اکسید آلومینیوم دوپ شده در اشکال متفاوتی اعم از بلور، پودر، قرص و فیلم نازک تولید شده است.

جدول ۱- مروری بر روش‌های مختلف تولید  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  به شکل تک بلور، پودر و فیلم نازک جهت استفاده در دوزیمتری ترمولومینسانس

مرجع	پاسخ	نوع تابش	شکل محصول	دستگاه‌های مورد نیاز	اتمسفر مورد نیاز جهت تولید	زمان کاری (min)	دمای کاری (°C)	مواد اولیه	روش
یانگ و همکاران [۶]	۴۰-۶۰ برابر TLD-100	Cs-۱۳۷ ( $5 \times 10^{-6}$ - ۱۰۰ Gy)	تک بلور	کوره دما بالا، قالب-هایی به منظور رشد بلور در جهت و شکل مورد نظر	اتمسفر بسیار کاهنده	-	۲۰۵۰	پودر یا شمش یا بلورهای شکسته‌ی اکسید آلومینیوم	EFG
یانگ و همکاران [۷]	۴۰-۶۰ برابر TLD-100	Cs-۱۳۷ ( $5 \times 10^{-6}$ - ۱۰ Gy)	تک بلور	آسیاب گلوله‌ای، دستگاه پرس، قالب پرس، کوره دما بالا	خلأ	چندین ساعت	۲۰۷۷	پودر اکسید آلومینیوم و گرافیت	گرادیان دمایی
باروس و همکاران [۱۰]	۵۰۰۰ برابر اکسید آلومینیوم دوپ نشده	Co-۶۰ (۰/۱- ۷۰ Gy)	پودر نانو	صفحه‌ی داغ، کوره دما پایین	هوا	۱۰	۵۰	نمک فلزی، سوخت، دوپانت نیتراتی	سنتز احتراقی محلول

وانگ و همکاران [۹]	-	-	پودر	صفحه‌ی داغ، خشک‌کن ترموستاتی، دستگاه اولتراسونیک جهت پراکنده‌سازی	هوا	۱۴۴۰	۱۲۰	نمک فلزی، عوامل کی-لیت‌ساز، عامل اتصال دهنده‌ی عرضی	ژل پلی آکرلامید
روچا و همکاران [۱۶،۱۷]	خطی	Co-۶۰ (۰/۰۱-۱۰۰ Gy)	قرص	تکاننده <sup>۱</sup> ، دستگاه پرس، قالب پرس، کوره دما بالا	هوا (نمونه‌های بدون کربن) و آرگون	۶۰-۱۸۰	۱۶۵۰	پودر اکسید آلومینیوم و کربن	پرس سرد
باروس و همکاران [۱۲]	خطی	Co-۶۰ (۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ mGy)	فیلم متخلخل	سلول آندایزینگ	هوا	۲۴۰	۲۵	ورقه‌های آلومینیوم، اسید آلی	آندایزینگ

### ۳- نتیجه‌گیری

مقایسه روش‌های مختلف تولید  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  نشان داد که اکسید آلومینیوم دوپ شده با کربن در اشکال متفاوتی اعم از بلور، پودر، قرص و فیلم نازک تولید شده که هر کدام نیاز به مواد اولیه، تجهیزات و روش‌های متفاوتی داشته و همین امر سبب تفاوت هزینه و رفتار ترمولومینسانسی نمونه‌های نهایی شده است. در فرآیندهای رشد بلور اگرچه امکان دستیابی به نمونه‌ای با حساسیت ۶۰-۴۰ برابر TLD-100 وجود دارد اما هزینه و انرژی بیشتری مورد نیاز است. برای غلبه بر این مشکل نیاز به استفاده از روش‌های دیگر با هزینه و انرژی کمتر برای تولید مواد ترمولومینسانس ضروری به نظر می‌رسد، با این شرط که این مواد حساسیت ترمولومینسانسی مطلوبی را برای کار در حوزه‌ی دوزیمتری فردی و رادیو پزشکی داشته باشند. تا کنون روش تولید صنعتی و مناسبی برای ساخت این دسته از مواد با عملکرد مطلوب جهت کار در حوزه‌ی دوزیمتری پیشنهاد نشده است اما یکی از روش‌هایی که توانایی صنعتی شدن از نظر هزینه، مواد و تجهیزات مورد نیاز را دارد، دوپ کردن مواد نادر زمین در ساختار  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  با استفاده از روش سنتز احتراقی محلول بوده که پاسخ ترمولومینسانسی خوبی (۵۰۰۰ برابر  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  دوپ نشده) را از خود نشان می‌دهند. با این حال محققین بسیاری سعی در شناسایی روشی جهت تولید اکسید آلومینیوم دوپ شده با مشخصات ترمولومینسانسی مناسب و هزینه‌ی کمتر را دارند.

### ۴- مراجع

<sup>۱</sup> Shaker



David Matthew Klein, Development and Characterization of Remote Radiation Dosimetry Systems Using Optically Stimulated Luminescence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C and KBr:Eu, Oklahoma: Stillwater, 2008.

Rieke, J. K., and F. Daniels, "Thermoluminescence studies of Aluminum Oxide," *Journal of Physical Chemistry*, vol. 51, p. 629–633, 1957.

Akselrod, M. S., V. S. Kortov, D. J. Kravetsky, and V. I. Gotlib, "Highly Sensitive Thermoluminescence Anion-defective  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C Single Crystal Detectors," *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 32, pp. 15-20, 1990.

Yang, X. B., Li, H. J., Bi, Q. U., Cheng, Y., Tang, Q., Xu, J., "Influence of Carbon on the Thermoluminescence and Optically Stimulated Luminescence of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C Crystals," *Journal of Applied Physics*, vol. 104, p. 3112, 2008.

Akselrod, M. S., V. S. Kortov, and E. A. Gorelova, "Preparation and Properties of Alpha-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C," *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 47, p. 159–164, 1993.

Xinbo Yang, Hongjun Li, Jun Xu, Yan Cheng, Liangbi Su and Qiang Tang, "Edge- Defined, Film- Fed Growth ( EFG ) Technique for the Preparation of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C Crystal with Highly Sensitive Thermoluminescence Response," *Journal of American Ceramic Society*, vol. 91, pp. 3098-3100, 2008.

Xinbo Yang, Hongjun Li, Yan Cheng, Qiang Tang, Liangbi Su, Jun Xu, "Growth of highly sensitive thermoluminescent crystal  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C by the temperature gradient technique," *Journal of Crystal Growth*, vol. 310, pp. 3800- 3803, 2008.

A. A. Kaplyanskii, A. B. Kulinkin, A. B. Kutsenko, S. P. Feofilov, R. I. Zakharchenya and T. N. Vasilevskaya, "Optical Spectra of Triply-charged Rare-earth Ions in Polycrystalline Corundum," *Physics of The Solid State*, vol. 40, pp. 1310-1316, 1998.

S. F. Wang, C. F. Zhuang, Y. G. Yuan, X. Xiang, G. Z. Sun, Q. P. Ding, Z. J. Li and X. T. Zu, "Synthesis and Photoluminescence of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and C-doped  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Powders," *Transactions- Indian Ceramic Society*, vol. 73, pp. 37-42, 2014.

Vinícius S.M. de Barros, Walter M. de Azevedo, Helen J. Khoury, Pedro Linhares Filho, "Combustion synthesis: A suitable method to prepare Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped materials for thermoluminescent dosimetry," *Radiation Measurements*, vol. 43, p. 345– 348, 2008.

Katia A Gonçalves, Alexandre Ventieri, José F S Bitencourt, Juan C R Mittani and Sonia H Tatumi, "Luminescence Dosemeter of The Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Er,Yb," in *International Nuclear Atlantic Conference*, Belo Horizonte, MG, Brazil, 2011.

V.S.M. de Barros, H.J. Khoury, W.M. Azevedo, E.F. da Silva Jr, "Characterization of nanoporous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C for thermoluminescent radiation dosimetry," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. 580, pp. 180-182, 2007.

Leong Chuey Yong, Husin Wagiran, Abd Khamim Ismail, "Thermoluminescence Performance of Carbon- doped Aluminium Oxide for Dose Measurement by Various Preparation Methods," *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, vol. 62, no. 3, pp. 109-113, 2013.

Xu Jianwei, Zhou Yongzong, Zhou Guoqing, Xu Ke, Deng Peizhen, Xu Jun, "Growth of large-sized sapphire boules by temperature gradient technique (TGT)," *Journal of Crystal Growth*, vol. 193, pp. 123-126, 1998.

Sergio L. Gonzalez- Cortes, Freddy E, Imbert, "Fundamentals, properties and applications of solid catalysts prepared by solution combustion synthesis ( SCS )," *Applied Catalysis A: General*, vol. 452, pp. 117-131, 2013.

Felicia D.G. Rocha, Mercia L. Oliveira, Linda V.E. Caldas, "Thin sintered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pellets as thermoluminescent dosimeters for the therapeutic dose range," *Applied Radiation and Isotopes* , vol. 58, pp. 719- 722, 2003.

F.D.G. Rocha, E. Okuno, L.V.E. Caldas, J.C.Bressiani, M.R.O.O. da Silva, "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Sintered Pellets for Dosimetry at Radiotherapy Level," in *International of IRPA*, São Paulo, Brazil, 2000.