

بررسی استفاده از روش قرص زنی SPS بر پاسخ دزیمتری ترمولومینسانس نمونه‌های

سرامیکی کلسیم فسفات

INC29-1330

حورا کاوریان^۱، سید فرهاد مسعودی^۱، محمد رفیعیان^۲، حمیده دانشور^{۳*}

۱. گروه هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

۲. گروه مهندسی هسته‌ای، پرتویزشکی، دانشگاه علوم و تحقیقات

۳. گروه پژوهشی پرتوآوری و دزیمتری، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

چکیده:

دزیمتری، روشی برای تمایز بخشی و طبقه‌بندی تجهیزات، تایید پذیرش پرتوگیری و کنترل عملکرد در محصولات پرتودیده است. در محدوده 10-1000 Gy که محدوده دزیمتری محصولات کشاورزی است، انتخاب‌های زیادی که تمام محدوده را پوشش دهد وجود ندارد. نیاز به یک دزیمتر قابل اعتماد، ارزان قیمت با قابلیت ساخت آسان و سیستم قرائت راحت، جهت استفاده در دزیمتری روزانه محصولات کشاورزی، ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به معادل بودن مواد سرامیکی کلسیم فسفات با استخوان، وجود پایداری حرارتی بالا و قابلیت میزبانی ناخالصی از این مواد به عنوان مواد دزیمتری به روش ترمولومینسانس استفاده شده است. برای کاهش خطای دزیمتری و سهولت در استفاده از قرص به جای پودر استفاده می‌شود. هدف از انجام کار بررسی نتایج پاسخ دزیمتری نمونه‌های کلسیم فسفات به صورت پودر و قرص حاصل از آنها به روش SPS می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ دزیمتری قرص‌های تولید شده، با در نظر گیری کمیت‌های حساسیت و موقعیت قرارگیری قله منحنی درخشش رو به بهبودی است. هم‌چنین نتایج پاسخ دزیمتری به نوع کلسیم فسفات وابسته بوده و پاسخ دزیمتری نمونه‌های بتاتری کلسیم فسفات مناسب تر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ترمولومینسانس، کلسیم فسفات، تف جوشی پلاسما جرقه‌ای

Investigating the use of SPS method on thermoluminescence dosimetry response of calcium phosphate ceramic

Hora Kavarian¹, Seyed Farhad Masoudi¹, Hamideh Daneshvar^{2*}

1. Department of Physics, K N Toosi University of Technology

2. Radiation Application Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute

Abstract:

Dosimetry is a method for classification of equipment, confirmation of radiation acceptance and performance control in irradiated products. There are not many choices in the range of 10-1000 Gy, which is the dosimetry range of agricultural products, It is necessary to use a reliable, inexpensive dosimeter with easy construction and convenient reading system for daily dosimetry of agricultural products. Due to the equivalence of calcium phosphate ceramic materials with bone, the presence of high thermal stability and the ability to host impurities, these materials have been used as thermoluminescence dosimetry materials. To reduce dosimetry error and ease of use, tablets are used instead of powder. The aim of the work is to investigate the results of the dosimetric response of calcium phosphate samples in the form of powder and tablets obtained by the SPS method. The results show that the dosimetric response of the produced tablets is improving by considering the sensitivity quantities and the position of the peak of the glow curve. Also, the dosimetric response results depend on the type of calcium phosphate and the dosimetric response of beta-tricalcium phosphate samples is more appropriate.

Keywords: Thermoluminescence, Calcium Phosphate, SPS

۱. مقدمه

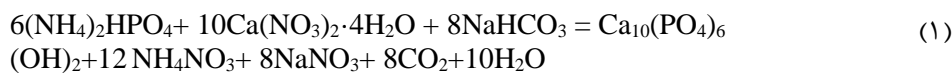
فرآیند پرتودهی در طول ۵۰ سال گذشته، به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است [1]. در کاربردهای مختلف پرتوآوری، به دزهایی در محدوده ۱۰ Gy تا ۵۰ kGy برای حصول نتیجه نیاز است. رسیدن به نتیجه دلخواه وقتی حاصل می‌شود که دز مورد نیاز به نمونه مورد نظر داده شود [2]. دزیمتری روشی مستقل و موثر، برای توسعه و کنترل بسیاری از فرایندهای صنعتی فراهم می‌کند. اندازه‌گیری دز، ابزاری رسمی جهت تأیید استفاده از آن فراهم می‌کند. از این لحاظ، دزیمتری وسیله‌ای برای تمایز بخشی و طبقه‌بندی تجهیزات، تأیید پذیرش پرتوگیری و کنترل عملکرد است [3]. در محدوده ۱۰-۱۰۰۰ Gy که محدوده دزیمتری محصولات کشاورزی است، انتخاب‌های زیادی که تمام محدوده را پوشش دهد وجود ندارد. در اکثر این موارد دستیابی به آن‌ها در داخل کشور به دلایل مختلف از جمله قیمت بالا و دسترسی بسیار مشکل بدلیل تحریم‌ها، براحتی امکان پذیر نیست. لذا نیاز به یک دزیمتر قابل اعتماد، ارزان قیمت با قابلیت ساخت آسان و سیستم قرائت راحت، جهت استفاده در دزیمتری روزانه محصولات کشاورزی، ضروری به نظر می‌رسد [4]. روش ترمولومینسانس روش مناسب و شناخته شده‌ای برای دزیمتری غیرفعال است. ترمولومینسانس (TL) نور گسیل شده از یک عایق یا یک نیم‌رساناست، زمانی که پس از تابش‌دهی در برابر پرتوهای یونساز گرم می‌شود [6] [5]. ویژگی TL در هر دمایی ممکن است اتفاق بیفتد و به صورت یک درخشش فوری ظاهر شود [7]. ترمولومینسانس دارای یک منحنی درخشش شامل یک یا چند قله است. منحنی درخشش خروجی بار الکتریکی خوانش‌گر بر حسب دماست [8]. قله دمایی در منحنی درخشش دارای بیشترین شدت بوده و معمولاً دارای پایداری بالایی است و تحت تاثیر اثرات محوشدگی قرار نمی‌گیرد. این مشخصه برای تعیین دقیق دز مفروض نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد مبنای استفاده از دزیمتری ترمولومینسانس بر این است که مقدار تابش ترمولومینسانس کلی با مقدار دز جذب شده از تابشی که ماده در معرض آن قرار گرفته متناسب است [9]. سولفات‌ها، سولفیدها و فلئوریدهای عناصر خاکی و مواد قلیایی به طور گسترده‌ای در دزیمتری TL مورد مطالعه و استفاده قرار می‌گیرند. فسفات‌ها و هالو فسفات عناصر خاکی و مواد قلیایی، برای کاربردهای لومینسانس و همچنین به عنوان مواد مناسب برای دزیمتری ترمولومینسانس TLD استفاده می‌شوند. با توجه به معادل بودن کلسیم فسفات‌ها با مواد معدنی استخوان، این مواد می‌توانند به عنوان دزیمترهای ترمولومینسانس استفاده شوند کلسیم فسفات‌ها به عنوان سرامیک‌های جایگزین استخوانی دارای کاربردهای پزشکی هستند. جنبه‌های دزیمتری استفاده از این مواد با توجه به استفاده وسیع از پرتوهای ایکس در کاربردهای تشخیصی و پزشکی است با توجه به خواص این مواد، اخیراً از آنها در دزیمتری گذشته نگر استفاده شده است [10] [11]. در این میان β -TCP دارای کاربردهای زیادی در زمینه‌های پزشکی مانند استخوان مصنوعی و حسگرهای رطوبتی با دمای بالا بوده و دارای پایداری حرارتی بسیار زیادی هستند. همچنین این ماده می‌تواند میزبان مناسبی برای جایگزینی ناخالصی‌ها بوده و برای کاربردهای فوتولومینسانس و ترمولومینسانس استفاده شود [12]. هدف اصلی کار در این روش، دستیابی به دانش فنی تبدیل به قرص نمونه‌های پودری کلسیم فسفات به روش SPS است و پس از آن انجام آزمایش‌های دزیمتری ترمولومینسانس می‌باشد. اخیراً چگالش یا متراکم کردن به روش‌های سینترینگ بدون فشار^۱، پرس گرم^۲ و فرآیندهای سینترینگ با پلاسمای جرقه‌ای^۳ توسعه زیادی پیدا کرده است [13]. تف جوشی پلاسمای جرقه‌ای (SPS) روشی جهت سینترینگ یا تف جوشی سریع مواد پودری

^۱ pressureless sintering^۲ hot pressing^۳ spark plasma sintering

(رسانا و نارسانا) است. این فرآیند با حرارت دادن مواد پودری در داخل کوره و در زیر نقطه ذوب انجام می‌شود [14]. تاکنون تئوری‌های مختلف برای SPS ارائه شده است، اما رایج ترین تئوری، بر اساس پدیده تخلیه جرقه الکتریکی است که در آن یک جریان پالسی با ولتاژ کم و انرژی بالا موجب تولید پلاسمای جرقه در دماهای بالا (چندین هزار درجه سانتیگراد) در بین ذرات می‌گردد. دمای کاری (۲۰۰ تا ۲۴۰۰ درجه سانتیگراد) معمولاً ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد پایین‌تر از روش‌های معمول سینترینگ است، از این رو SPS به عنوان یک فناوری دمای پایین شناخته می‌شود. تولید مواد به کمک SPS (شامل زمان افزایش دما و فشار و زمان نگهداری) در مدتی کوتاه، حدود ۵ تا ۲۵ دقیقه تکمیل می‌شود. دمای نسبتاً پایین به همراه سرعت بالای فرایند منجر به کنترل دقیق بر رشد دانه و ریزساختار می‌شود. [14], [15]. هدف از انجام پژوهش حاضر، تکمیل کار تحقیقاتی صورت گرفته در دنیا در خصوص امکان‌سنجی برای استفاده‌های دزیمتری از ماده کلسیم فسفات به صورت پودر و قرص‌های حاصل از آنها است.

۲. روش کار

در این پژوهش، به بررسی دزیمتری نمونه‌های قرص و پودر بتاتری کلسیم فسفات و هیدروکسی‌اپتایت به صورت پودر و قرص حاصل از آن پرداخته شده است. قرائت نمونه‌های تهیه شده با استفاده از دستگاه قرائتگر مدل هارشا ۴۵۰۰ انجام شده است. پرتودهی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کامل سل کبالت ۶۰ و محدوده پرتودهی از ۱۵۰۰-۲۰ Gy بوده است. تاکنون روش‌های متفاوتی برای سنتز کلسیم فسفات‌ها توسعه داده شده است، که از آن قبیل می‌توان به سنتز مکانیکی- شیمیایی، هیدروترمال، امولوسیون چندگانه^۴، رسوب‌سازی، هیدرولیز و سل-ژل اشاره کرد [16]. در این کار از روش حالت جامد برای سنتز استفاده شده است. در تهیه ماده هیدروکسی‌اپتایت و بتاتری کلسیم فسفات به روش حالت جامد، از مواد کلسیم نیترات ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)، دی آمونیوم فسفات ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) و سدیم بی‌کربنات (NaHCO_3) به عنوان مواد اولیه استفاده شد از رابطه استوکیومتری زیر برای انجام واکنش استفاده شد:



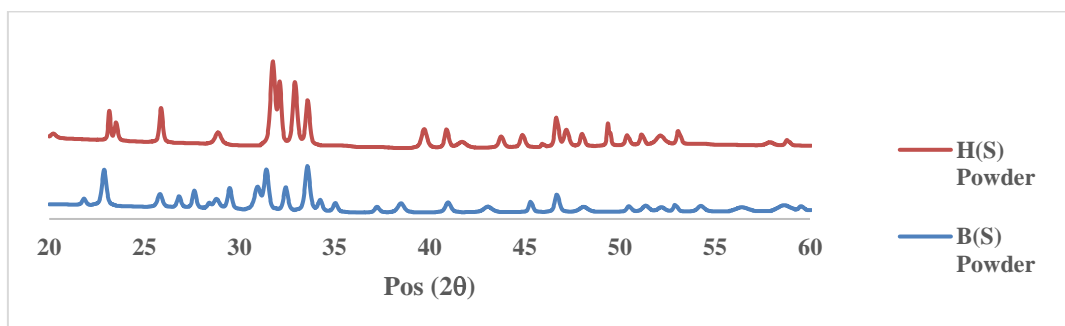
ابتدا دی آمونیوم فسفات و سدیم بی‌کربنات به مدت ۳۰ دقیقه در هاون آسیاب و مخلوط می‌شوند، سپس کلسیم نیترات به آن اضافه شده و آسیاب کردن تا زمانی که مواد کاملاً با هم ترکیب شده ادامه می‌یابد. در نهایت مایع سفید رنگ کف‌آلودی ایجاد می‌شود (شکل ۱).

^۴ Multiple emulsion



شکل ۱- مخلوط مواد اولیه در هاون و تولید مواد کف آلود.

به منظور پیرسازی^۵، مایع به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار می‌گیرد. برای حذف محصولات جانبی تولید شده، با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ با $rpm=3000$ به مدت ۱۵ min شستشو به ترتیب با استفاده از اتانول، آب دی یونیزه و آب مقطر انجام می‌شود. ماده در خشک‌کن^۶ به مدت ۶ ساعت در دمای $80^{\circ}C$ قرار می‌گیرد تا به طور کامل خشک شود. پودر حاصل در این مرحله هیدروکسی اپتایت و بتاتری کلسیم فسفات بدون عملیات حرارتی است. با توجه به نتایجی که پیش از این به دست آمده [17]، بتاتری کلسیم فسفات در دمای $900^{\circ}C$ کلسینه شده است. این کار در کوره موجود در آزمایشگاه دزیمتری و ارزیابی رادیولوژیکی و به مدت ۳ ساعت انجام شده است. نتایج آنالیز XRD حاصل از سنتز این نمونه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- آنالیز XRD نمونه‌های پودری H(S) و B(S).

نتایج حاصل از آنالیز نشان از صحت سنتز انجام شده دارد و مطابق با ICDD^۷ مواد هیدروکسی اپتایت و بتاتری کلسیم فسفات می‌باشد.

۱.۲. تهیه قرص‌های کلسیم فسفات به روش SPS

^۵ Aging

^۶ Dryer cabinet

^۷ International Centre for Diffraction Data

برای تبدیل پودر به قرص در روش SPS، از دستگاه موجود در پژوهشگاه مواد و انرژی کرج استفاده شده است. در این روش، همزمان دما و فشار به پودر اعمال می‌شود. فشار اعمال شده به پودر ۴۰۰ MPa و دما برابر با ۶۵۰°C می‌باشد. برای حذف ماده گرافیتی اطراف قرص ایجاد شده به روش SPS باید از روش سمباده‌زنی استفاده کرد. سمباده با شماره‌های مختلف به ترتیب از ضخیم‌تر به نرم‌تر در جهات مختلف به نمونه اعمال می‌شود. پس از سمباده زنی در انتهای کار از نمد استفاده می‌شود. برای برش قرص‌ها از تجهیزات موجود در آزمایشگاه مرجع زیست مواد دندانی موجود در پژوهشکده علوم دندانپزشکی دانشگاه علوم پزشکی تهران استفاده شده است.

۳. نتایج

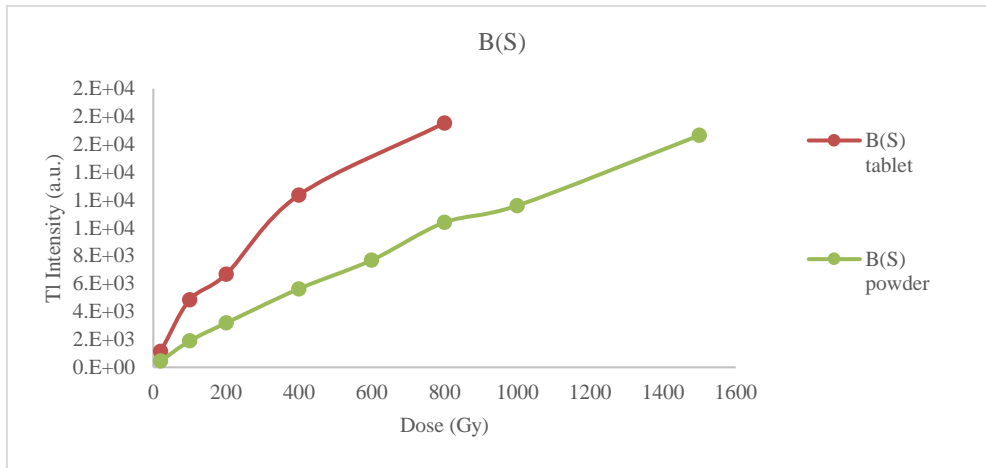
برای پرتودهی نمونه‌های قرص شده، باید بسته‌بندی صورت بگیرد. در جدول ۱ نتایج دزیمتری نمونه‌های پودری و قرص حاصل از این پودرها ارائه شده است. با توجه به مقدار پاسخ زیاد نمونه‌ها، برای عدم آسیب‌رسانی به دستگاه قرائتگر، از فیلتر با شماره ۱۰ استفاده شده است. نمونه‌ها قبل از پرتودهی نیز قرائت می‌شوند و مقدار زمینه از کل مقدار قرائت شده نمونه‌های پرتودهی شده کسر می‌شود. مقدار پاسخ نمونه‌ها بر جرم آنها تقسیم شده است. برای این پودرها و قرص‌های ساخته شده از آنها، جدول نتایج دزیمتری ارائه شده است. در این جدول به همراه مشخصات نمونه‌ها، بازه خطی دزیمتری، رابطه خطی و مقدار ضریب تعیین R^2 در این بازه، مقدار دمای متوسط شکل‌گیری قله مشخص شده است.

جدول ۱- نتایج پاسخ دزیمتری محصولات کلسیم فسفات

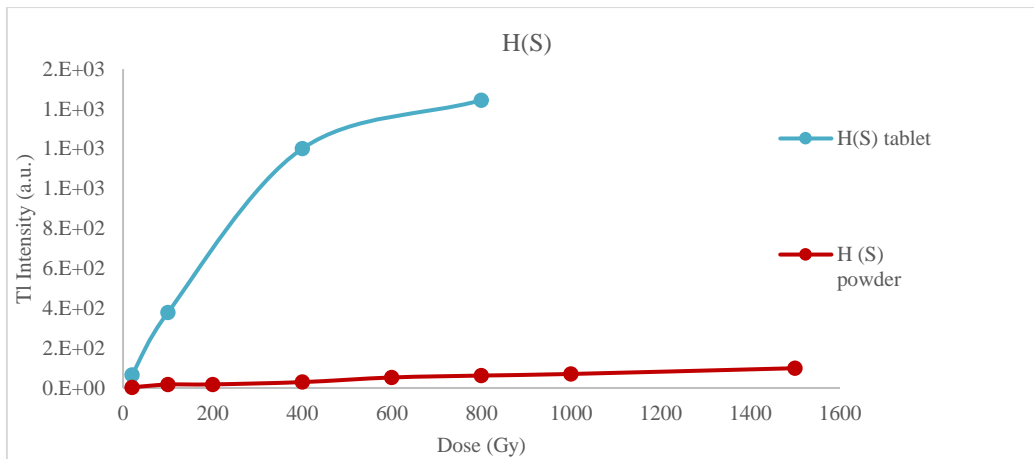
Sample name	Linearity Range	Linearity Formula	R^2 in Linearity Formula	Average Temperature
B(S) powder	20-1500	10.821x + 940.68	0.99	207
B(S) tablet	20-400	28.278x + 1168.2	0.98	232
H(S) powder	20-1500	0.0636x + 7.5136	0.98	204
H(S) tablet	20-400	2.9183x + 42.807	0.99	221

همانطور که از نتایج مربوط به برای پرتودهی نمونه‌های قرص شده، باید بسته‌بندی صورت بگیرد. در جدول ۱ نتایج دزیمتری نمونه‌های پودری و قرص حاصل از این پودرها ارائه شده است. با توجه به مقدار پاسخ زیاد نمونه‌ها، برای عدم آسیب‌رسانی به دستگاه قرائتگر، از فیلتر با شماره ۱۰ استفاده شده است. نمونه‌ها قبل از پرتودهی نیز قرائت می‌شوند و مقدار زمینه از کل مقدار قرائت شده نمونه‌های پرتودهی شده کسر می‌شود. مقدار پاسخ نمونه‌ها بر جرم آنها تقسیم شده است. برای این پودرها و قرص‌های ساخته شده از آنها، جدول نتایج دزیمتری ارائه شده است. در این جدول به همراه مشخصات نمونه‌ها، بازه خطی دزیمتری، رابطه خطی و مقدار ضریب تعیین R^2 در این بازه، مقدار دمای متوسط شکل‌گیری قله مشخص شده است.

جدول ۱ بر می‌آید منحنی دزیمتری پودرهای B(S) و H(S) در بازه دزیمتری ۲۰-۱۵۰۰ Gy دارای پاسخ خطی است، اما پس از تبدیل به قرص به روش SPS، محدوده خطی دزیمتری رو به کاهش می‌گذارد. همانطور که از نتایج این جدول برمی‌آید، محدوده خطی بودن پاسخ دزیمتری قرص و پودر حاصل از B(S) از پاسخ دزیمتری قرص و پودر حاصل از H(S) بیشتر است که با نتایجی که قبلاً از مطالعات و بررسی‌های پیشین گرفته شده مطابقت دارد [18]. در شکل ۳ و شکل ۴، منحنی دز پاسخ پودر و قرص بتاتری کلسیم فسفات و هیدروکسی‌آپتایت برای بازه دزیمتری ۲۰-۱۵۰۰ Gy نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی دز پاسخ نمونه‌های پودری B(S) و قرص حاصل از آنها.

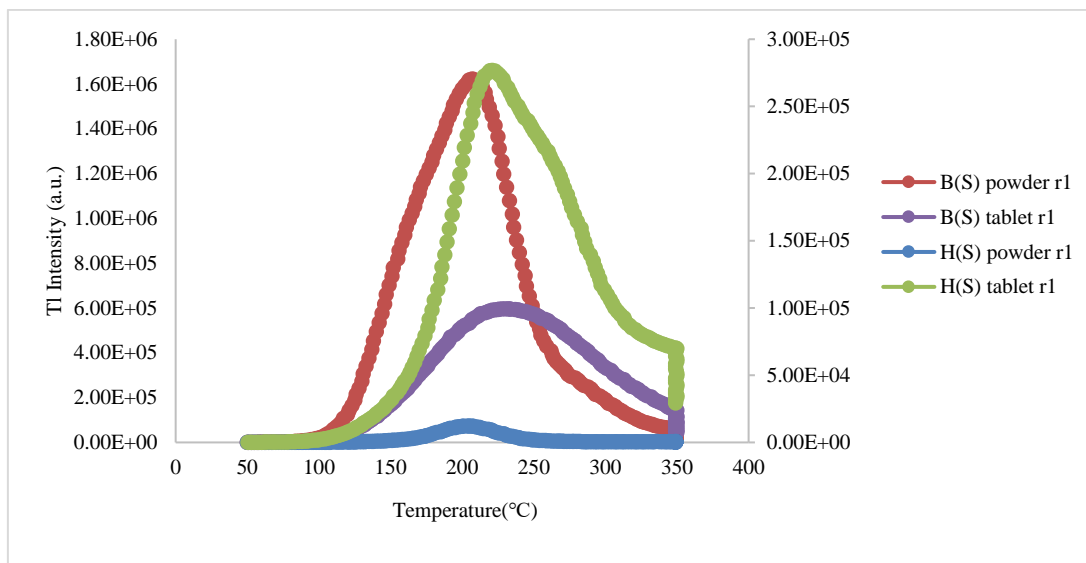


شکل ۴- منحنی دز پاسخ نمونه‌های پودری H(S) و قرص حاصل از آنها.

همانطور که از نتایج برای پرتودهی نمونه‌های قرص شده، باید بسته‌بندی صورت بگیرد. در جدول ۱ نتایج دزیمتری نمونه‌های پودری و قرص حاصل از این پودرها ارائه شده است. با توجه به مقدار پاسخ زیاد نمونه‌ها، برای عدم آسیب-رسانی به دستگاه قرائتگر، از فیلتر با شماره ۱۰ استفاده شده است. نمونه‌ها قبل از پرتودهی نیز قرائت می‌شوند و مقدار زمینه از کل مقدار قرائت شده نمونه‌های پرتودهی شده کسر می‌شود. مقدار پاسخ نمونه‌ها بر جرم آنها تقسیم شده است. برای این پودرها و قرص‌های ساخته شده از آنها، جدول نتایج دزیمتری ارائه شده است. در این جدول به همراه مشخصات نمونه‌ها، بازه خطی دزیمتری، رابطه خطی و مقدار ضریب تعیین R^2 در این بازه، مقدار دمای متوسط شکل-گیری قله مشخص شده است.

جدول ۱ و شکل ۳ و شکل ۴ مشخص است، پاسخ دزیمتری قرص‌های تولید شده به این روش در بازه دزیمتری که مقایسه در آنها صورت گرفته یعنی از ۲۰-۸۰۰ Gy دارای حساسیت بیشتری نسبت به پودر هستند.

در شکل ۵ منحنی درخشش این نمونه‌ها نشان داده شده است،



شکل ۵- منحنی درخشش نمونه‌های پودری B(S) و H(S) و قرص‌های حاصل از آنها.

از نتایج استخراج شده از برای پرتودهی نمونه‌های قرص شده، باید بسته‌بندی صورت بگیرد. در جدول ۱ نتایج دزیمتری نمونه‌های پودری و قرص حاصل از این پودرها ارائه شده است. با توجه به مقدار پاسخ زیاد نمونه‌ها، برای عدم آسیب‌رسانی به دستگاه قرائتگر، از فیلتر با شماره ۱۰ استفاده شده است. نمونه‌ها قبل از پرتودهی نیز قرائت می‌شوند و مقدار زمینه از کل مقدار قرائت شده نمونه‌های پرتودهی شده کسر می‌شود. مقدار پاسخ نمونه‌ها بر جرم آنها تقسیم شده است. برای این پودرها و قرص‌های ساخته شده از آنها، جدول نتایج دزیمتری ارائه شده است. در این جدول به همراه مشخصات نمونه‌ها، بازه خطی دزیمتری، رابطه خطی و مقدار ضریب تعیین R^2 در این بازه، مقدار دمای متوسط شکل‌گیری قله مشخص شده است.

جدول ۱ و شکل ۵ نیز مشخص است که پس از تبدیل به قرص منحنی درخشش به سمت دماهای بالاتر شیفت پیدا می‌کند.

۴. نتیجه‌گیری

محدوده خطی بودن پاسخ دزیمتری قرص و پودر حاصل از B(S) از پاسخ دزیمتری قرص و پودر حاصل از H(S) بیشتر است در تبدیل کردن پودر کلسیم فسفات به قرص به روش SPS، در صورتی که بازه خطی دزیمتری ملاک نباشد، پارامترهای دیگر پاسخ دزیمتری مانند دمای قله و حساسیت پاسخ رو به بهبودی است. بنابراین برای بازه‌های خطی دزیمتری محدود، خصوصاً برای دزهای کمتر از ۴۰۰ Gy، تبدیل پودرهای کلسیم فسفات به قرص به روش SPS می‌تواند مناسب باشد. از آنجا که این کار پژوهشی در آغاز راه است، برای رسیدن به نتایج مطلوب‌تر بهتر است شرایط مختلف فشار و دما در این روش یعنی SPS نیز مورد بررسی قرار گرفته و با دیگر روش‌های تبدیل به قرص مقایسه صورت بگیرد.

۵. مراجع

- [1] M. T. Munir a/ac M. Federighi, 'Control of foodborne biological hazards by ionizing radiations', *Foods*, rhif. 9, rhif. 7, t. 878, 2020, doi: 10.3390/foods9070878.
- [2] G. G. Eichholz, 'Dosimetry for Food Irradiation', yn *Health Physics*, rhif. 84, rhif. 5, 2003, t. 665.

- [3] T. Kojima, S. Kashiwazaki, a/ac Y. Zhang, 'Alanine-polystyrene dosimeters prepared by injection moulding', *Appl. Radiat. Isot.*, rhif. 48, rhif. 7, tt. 965–968, 1997, doi: 10.1016/S0969-8043(97)00010-9.
- [4] M. Adachi, T. Bredow, a/ac K. Jug, 'What is the origin of color on metal complex dyes? Theoretical analysis of a Ni-coordinate azo dye', *Dye. Pigment.*, rhif. 63, rhif. 3, tt. 225–230, 2004, doi: 10.1016/j.dyepig.2004.02.013.
- [5] M. Shafaei, F. Ziaie, a/ac N. Hajiloo, 'Thermoluminescence properties of micro and nano structure hydroxyapatite after gamma irradiation', *Kerntechnik*, rhif. 81, rhif. 6, tt. 651–654, 2016, doi: 10.3139/124.110579.
- [6] R. Alvarez, T. Rivera, J. Guzman, M. C. Piña-Barba, a/ac J. Azorin, 'Thermoluminescent characteristics of synthetic hydroxyapatite (SHAp)', *Appl. Radiat. Isot.*, rhif. 83, tt. 192–195, 2014, doi: 10.1016/j.apradiso.2013.04.011.
- [7] Y. Sun a/ac A. G. Chmielewski, *Applications of ionizing radiation in materials processing*. Institute of Nuclear Chemistry and Technology, 2017.
- [8] R. V. Tauxe, 'Food safety and irradiation: Protecting the public from foodborne infections', *Emerg. Infect. Dis.*, rhif. 7, rhif. 3, tt. 516–521, 2001, doi: 10.3201/eid0707.017706.
- [9] R. Chen a/ac S. W. S. McKeever, *Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena*. World Scientific, 1997.
- [10] V. S. M. Barros, W. M. Azevedo, H. J. Khoury, a/ac C. Filho, 'ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR-ABEN Rare earth doped aluminum oxide dosimeter prepared by combustion synthesis', tt. 7–10, 2007, [Arlein]. Ar gael: <https://pdfs.semanticscholar.org/60f1/ef510c6517a2642b273a81aadff6e9f8ac33.pdf>.
- [11] M. Shafaei, F. Ziaie, D. Sardari, a/ac M. M. Larijani, 'Study on carbonated hydroxyapatite as a thermoluminescence dosimeter', *Kerntechnik*, rhif. 80, rhif. 1, tt. 66–69, 2015, doi: 10.3139/124.110484.
- [12] K. Nakashima, M. Takami, M. Ohta, T. Yasue, a/ac J. Yamauchi, 'Thermoluminescence mechanism of dysprosium-doped β -tricalcium phosphate phosphor', *J. Lumin.*, rhif. 111, rhif. 1–2, tt. 113–120, 2005, doi: 10.1016/j.jlumin.2004.07.002.
- [13] C. Murru, 'Research about pressureless sintering of milled powder zrb2 based ceramic with carbon', UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA, 2012.
- [14] U. Anselmi-Tamburini, 'Spark Plasma Sintering', M. B. T.-E. of M. T. C. and G. Pomeroy, Gol. Oxford: Elsevier, 2021, tt. 294–310.
- [15] 'No Title', *J. Iran. Ceram. Soc.*, rhif. 15, rhif. 2, 2019, [Arlein]. Ar gael: <http://jicers.ir/article-1-276-fa.html>.
- [16] C. Furetta, *Handbook of Thermoluminescence*. World Scientific, 2010.
- [17] P. Taghipour, F. Zolfagharpour, H. Daneshvar, a/ac F. Ziaie, 'Thermoluminescence dose-response of synthesized and doped hydroxyapatite: effect of formed crystal phases', *Luminescence*, rhif. 37, rhif. 5, tt. 742–757, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/bio.4217>.
- [18] P. Taghipour, F. Zolfagharpour, H. Daneshvar, a/ac F. Ziaie, 'Thermoluminescence dose-response of synthesized and doped hydroxyapatite: effect of formed crystal phases', *Luminescence*, rhif. 37, rhif. 5, tt. 742–757, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/bio.4217>.