



استفاده از هیدروکسی آپاتیت تهیه شده به روش سل-ژل برای دزیمتری پرتوهای گاما و باریکه‌ی الکترونی

ناهید حاجیلو^۱، فرهود ضیائی*^۱، مجید حسامی^۲

۱. پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۱۴۸۵-۴۹۸، کرج - ایران
۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۸۹-۸۹۱۷۵، یزد - ایران

چکیده: در این مقاله دزیمتری میدان پرتو از طریق اندازه‌گیری رادیکال‌های آزاد القاء شده در هیدروکسی آپاتیت مصنوعی با بهره‌گیری از طیف‌بینی تشدید اسپین الکترون یا تشدید پارامغناطیسی الکترون (EPR) مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا نانو پودر هیدروکسی آپاتیت مصنوعی (HAP) به روش سل-ژل تهیه و پس از آمایش حرارتی، توزین و بسته‌بندی شد. در ادامه، نمونه‌ها با پرتوهای گامای حاصل از چشمه‌ی کبالت-۶۰ و باریکه‌ی الکترونی به انرژی ۱۰ MeV با دزهای جذبی متفاوت، در محدوده‌ی دزهای بالا پرتودهی و شدت علامت تشدید پارامغناطیسی الکترون نمونه‌های پرتودیده در دمای اتاق و در مجاورت هوا اندازه‌گیری شد. سپس تغییرات شدت علامت تشدید پارامغناطیسی الکترون به صورت دامنه‌ی نقطه به نقطه‌ی علامت رسم و با نمونه‌های آلانین و پودر استخوان مقایسه گردید. نتایج به دست آمده از این بررسی نشان داد که شدت علامت تشدید پارامغناطیسی الکترون نمونه‌ی مورد بررسی در مقایسه با پودر استخوان و آلانین به مراتب بالاتر بوده و نسبت به آن‌ها در دز جذبی بالاتری به حالت اشباع می‌رسد.

کلید واژه‌ها: طیف تشدید پارامغناطیسی الکترون، هیدروکسی آپاتیت، روش سل-ژل، دزیمتری، پرتو گاما و الکترون

Use of Hydroxyapatite Prepared by Sol-Gel Method for Gamma Ray and Electron Beam Dosimetry

N. Hajiloo¹, F. Ziaie*¹, M. Hesami²

1. Agriculture Medicine and Industrial Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 31485-498, Karaj – Iran
2. Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 89175-389, Yazd – Iran

Abstract: In this research, radiation dosimetry was made through measuring free radicals induced in synthetic hydroxyapatite (HAP) using EPR spectroscopy. At the first step, the hydroxyapatite nano-powders were synthesized via sol-gel method. The produced powders were passed through a thermal treatment, weighted and packed. Then, the samples were irradiated at different dose rates using ⁶⁰Co γ -ray and 10MeV electron beam radiation at a high dose range. The EPR signal intensity of hydroxyapatite samples were measured at room temperature in the air. Subsequently, the variations of the EPR signal intensities were constructed as peak-to-peak signal amplitude and were compared with alanine and bone powder samples. The results showed that the EPR signal intensity of the HAP samples are several times higher than alanine and bone powder and are saturated at the higher dose rates in comparison with other species.

Keywords: EPR Spectroscopy, Hydroxyapatite, Sol-Gel Method, Dosimetry, Gamma Ray and Electron Beam



۱. مقدمه

طیف‌بینی تشدید اسپین الکترون یا تشدید پارامغناطیسی الکترون (ESR یا EPR)^(۱)، یک روش غیرمخرب در تجزیه‌ی رادیکال آزاد تلقی می‌شود. برتری این روش به عنوان یک ابزار کنترل پرتودیدگی مواد (به ویژه مواد غذایی) از حساسیت و دقت بالای آن ناشی می‌شود [۱]. جدا از دیگر کاربردها، از این روش در دزیمتری میدان پرتوها نیز می‌توان استفاده نمود [۲، ۳ و ۴]. ماده‌ی سرامیکی هیدروکسی آپاتیت (HAP) از مهم‌ترین ترکیبات کلسیم فسفات بوده و ۹۵ تا ۹۷ درصد مینای دندان و ۷۰ تا ۷۵ درصد استخوان دندان و ۶۰ تا ۷۰ درصد استخوان‌های بدن را تشکیل می‌دهد. این ماده در حالت آرمانی دارای ساختمان شش گوشه‌ای بوده و تشکیل‌دهنده‌ی بخش غیرآلی استخوان است و سطح پیوند^(۲) را به اجزای غیرآلی بافت پیوند می‌دهد. هیدروکسی آپاتیت یک ماده‌ی زیستی فعال است که با بافت واکنش شیمیایی می‌کند. اما این واکنش تنها در سطح انجام می‌شود [۵]. در طی روند معدنی شدن هیدروکسی آپاتیت زیست‌شناختی، یون‌های کربنات در شبکه‌ی بلوری جای‌گزین یون‌های فسفات و هیدروکسیل می‌شوند. با جذب انرژی یونش توسط بلور هیدروکسی آپاتیت، یون‌های کربنات الکترون‌های آزاد را به دام می‌اندازند و مراکز رادیکال‌های آزاد را تشکیل می‌دهند. رادیکال‌های کربنات فوق‌العاده پایدار هستند به طوری که زمان پایایی آن‌ها در دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس حدود ۱۰^۷ سال محاسبه شده است [۶]. رادیکال‌های کربنات توسط بازه‌ی وسیعی از تابش‌های یوننده مانند پرتوهای ایکس، بتا، آلفا، پروتون و یون‌های سنگین ایجاد می‌شوند [۷]. بستگی این رادیکال‌های آزاد به دز جذبی از طریق طیف‌بینی تشدید پارامغناطیسی الکترون اندازه‌گیری می‌شود [۸].

بیش از سه دهه است که مینای دندان به عنوان یک آشکارساز در داخل بدن انسان شناخته شده است. همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، اهمیت مینای دندان در دزیمتری، به دلیل مقدار زیاد هیدروکسی آپاتیت موجود در آن است [۹]. دزیمتری با استفاده از استخوان و مینای دندان از طریق طیف‌بینی تشدید پارامغناطیسی الکترون به دلیل پایداری زیاد رادیکال‌های آزاد ایجاد شده توسط پرتو، به عنوان یکی از اساسی‌ترین شیوه‌های دزیمتری گذشته نگر شناخته شده است. به دلیل وجود

مواد دیگری به جز هیدروکسی آپاتیت در بافت استخوان و دندان، حساسیت موردنیاز برای به کارگیری این ماده در دزیمتری از طریق طیف‌بینی تشدید پارامغناطیسی الکترون وجود ندارد. لذا، در این مقاله امکان استفاده از هیدروکسی آپاتیت با درجه‌ی خلوص بالا برای دزیمتری میدان پرتو گاما و الکترون در محدوده‌ی دز بالا بررسی و با نتایج مربوط به آلانین و پودر استخوان که در کارهای قبلی ارایه شده [۱۰] مقایسه گردیده است. لازم به ذکر است که هیدروکسی آپاتیت در علوم زیستی نیز دارای کاربرد فراوانی است که از آن جمله می‌توان به کاربرد آن به عنوان استخوان مصنوعی اشاره نمود. این ماده از روش‌های مختلفی تهیه می‌شود که هر کدام از آن‌ها دارای مزایا و معایب خاص خودش است. در این بررسی از نانو پودر هیدروکسی آپاتیت تهیه شده به روش سل-ژل [۱۱] استفاده شده است. پیش‌بینی می‌شود، نانو بلور هیدروکسی آپاتیت به دلیل افزایش نسبت سطح به حجم و در نتیجه افزایش جمعیت رادیکال‌های آزاد ایجاد شده در اثر دز جذبی، و نیز به دلیل درجه‌ی خلوص بالاتر آن نسبت به پودر استخوان طبیعی، از حساسیت بالایی برای دزیمتری میدان‌های پرتو گاما و الکترون برخوردار باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. روش تهیه‌ی نمونه

با انحلال مقدار معینی از فسفر پنتا اکسید P₂O₅ تهیه شده از شرکت مرک در اتانول خالص محلول ۰/۵mol/l تهیه شد. هم‌چنین مقدار معینی از کلسیم نیترات ۴ آب‌هی (Ca(NO₃)₂·۴H₂O) تهیه شده از شرکت مرک نیز در اتانول خالص (ساخت شرکت مرک آلمان) حل و محلول ۱/۶۷mol/l آن تهیه گردید. با مخلوط نمودن این دو محلول با نسبت مولی Ca/P=۱/۶۷ محلول اولیه به دست آمد. محلول حاصل به مدت ۲۴ ساعت با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه در دمای محیط هم‌زده شد تا ژل شفاف پدیدار گردید. ژل حاصل در دمای ۸۰°C به مدت ۲۴ ساعت تحت عملیات خشک کردن قرار گرفت که در نتیجه پودر آمورف کلسیم فسفات به دست آمد. پودر حاصل از ژل خشک شده در یک کوره‌ی مقاومتی در دمای ۶۰۰ درجه‌ی سلسیوس به مدت شش ساعت حرارت داده شد تا این که محصول نهایی «هیدروکسی آپاتیت» به دست آمد [۱۱].

**۲.۲ روش تجزیه‌ی نمونه**

در این مرحله پودر به دست آمده از مرحله‌ی قبل، با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) مدل B.V. Analytical X-Ray ساخت شرکت فیلیپس مشخصه‌یابی گردید. الگوهای پراش پرتو ایکس با استفاده از خط طیفی تابش تک رنگ $K\alpha$ مس در ولتاژ 40 kV در بازه‌ی $2\theta > 8^\circ$ و سرعت روبش $0.2^\circ/\text{min}$ به دست آمد. برای به دست آوردن اندازه‌ی ذرات تولید شده از طریق فرایند سل-ژل از رابطه شرر به شکل زیر استفاده شد [۱۲]

$$t = 0.89\lambda / B \cos\theta \quad (1)$$

که در آن t اندازه‌ی دانه‌ها، λ طول موج مورد استفاده (برای خط طیفی مس برابر با 0.154 نانومتر)، B پهنای نیم ارتفاع قله‌ی انتخاب شده برحسب رادیان و θ زاویه‌ی قله برحسب درجه است. بررسی‌های ریخت‌شناختی پودرها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل XL-30، و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مدل EM208S ساخت شرکت فیلیپس انجام شد. هم‌چنین از دستگاه اندازه‌گیر کربن/سولفور مدل CS-2000 ساخت شرکت آلترا به منظور اندازه‌گیری درصد کربن نانو پودر هیدروکسی آپاتیت استفاده شد.

۳.۲ پرتودهی نمونه‌ها

با توجه به اهمیت تأثیر جرم نمونه‌ها در اندازه‌ی علامت تشدید پارامغناطیسی الکترون، کلیه‌ی نمونه‌های هیدروکسی آپاتیت ابتدا به دقت توزین و بسته‌بندی شدند. سپس پرتودهی هم‌زمان کالری سنج و فانتوم پلی استایرن (محتوی نمونه‌ها) با استفاده از چشمه‌ی کبالت-۶۰ مدل PX-30 ساخت روسیه و موجود در پژوهشکده‌ی تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی با آهنگ دز $15.6\text{ Gy}/\text{min}$ و نیز با شتاب‌دهنده‌ی الکترون 10 MeV مدل Rhodotron TT200 واقع در پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها با آهنگ دز $630\text{ kGy}/\text{min}$ [۱۰] انجام شد. بر این اساس خطای دز گزارش شده معادل خطای کالری سنج پلی استایرن و کم‌تر از ۴٪ خواهد بود. نمونه‌های هیدروکسی آپاتیت در بازه‌ی دز جذبی ۵ تا 60 kGy مورد پرتودهی قرار گرفتند. لازم به ذکر است برای افزایش دقت در اندازه‌گیری‌ها، برای هر دز تعداد سه نمونه در نظر گرفته شد.

۴.۲ اندازه‌گیری تشدید مغناطیسی الکترون

اندازه‌گیری تشدید مغناطیسی الکترون با بهره‌گیری از دستگاه EMS-104 از نوع X-band (فرکانس ریزموج 9.8 GHz) ساخت شرکت بروکر آلمان انجام پذیرفت. پس از پرتودهی، نمونه‌ها در لوله‌های کوارتز (به قطر داخلی 4 mm) مخصوص سیستم اندازه‌گیری تشدید پارامغناطیسی الکترون مورد بررسی قرار گرفتند. پاسخ سیستم طیف‌بینی تشدید پارامغناطیسی الکترون شامل ارتفاع نقطه به نقطه‌ی علامت^(۳) با بیش‌ترین دامنه (مشتق اول طیف جذب) می‌باشد که به جرم نمونه‌ها بهنجار شده است. پارامترهای طیف‌بینی مورد استفاده در این مطالعه عبارت‌اند از دامنه‌ی مدوله‌سازی 0.285 mT ، بسامد مدوله‌سازی 10.0 kHz ، پهنای روبش 3.0 mT ، قدرت تفکیک 10.24 ، ثابت زمانی 164 ms ، زمان جاروب 21 s ، بهره‌ی گیرنده‌ی 50 dB و تعداد جاروب‌ها ۴.

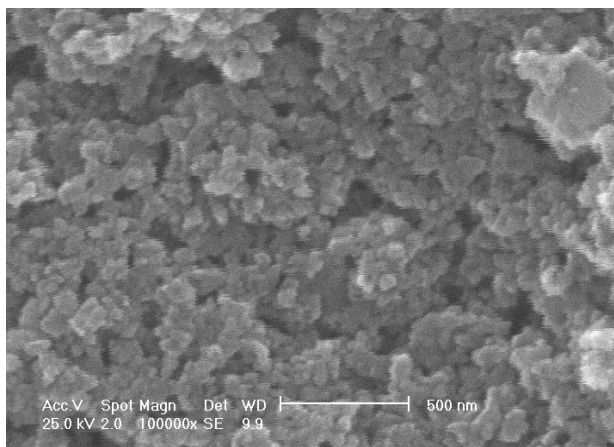
هم‌چنین به منظور اطمینان از تکرارپذیری نتایج، اندازه‌گیری کلیه‌ی نمونه‌های هیدروکسی آپاتیت، پودر استخوان و آلانین، تحت کالیبراسیون یکسان سیستم طیف‌بینی تشدید پارامغناطیسی الکترون انجام پذیرفته است. برای هر نمونه میانگین سه اندازه‌گیری محاسبه و نیز با توجه به این که در هر دز مشخص تعداد سه نمونه پرتودهی شده است، میانگین شدت علامت آن‌ها به عنوان مقدار نهایی در نظر گرفته شده است.

۳. نتایج و بحث

شکل ۱ الگوی پراش پرتو ایکس هیدروکسی آپاتیت استاندارد [۱۳] و نمونه‌ی تهیه شده به روش سل-ژل را نشان می‌دهد. تمامی قله‌های موجود در نمودار مربوط به نمونه‌ی تهیه شده از لحاظ موقعیت و شدت با نمودار الگوی پراش نمونه‌ی هیدروکسی آپاتیت استاندارد به خوبی مطابقت می‌کنند. نمودار حاصل از طیف‌سنجی تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز (FTIR) پودر هیدروکسی آپاتیت مورد بررسی و نوع پیوندهای ایجاد شده، در شکل ۲ نشان داده شده است، قله‌های موجود در 865 cm^{-1} و 1400 تا 1500 cm^{-1} به تشکیل پیوندهای کربنی و نیز جای‌گزینی PO_4 با یون کربنات در شبکه‌ی بلوری هیدروکسی آپاتیت نسبت داده شده‌اند و پیوندی که در محدوده‌ی 890 cm^{-1} قابل مشاهده است مربوط به HPO_4 است [۱۴ و ۱۵]. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به دست آمده از پودر تولید شده



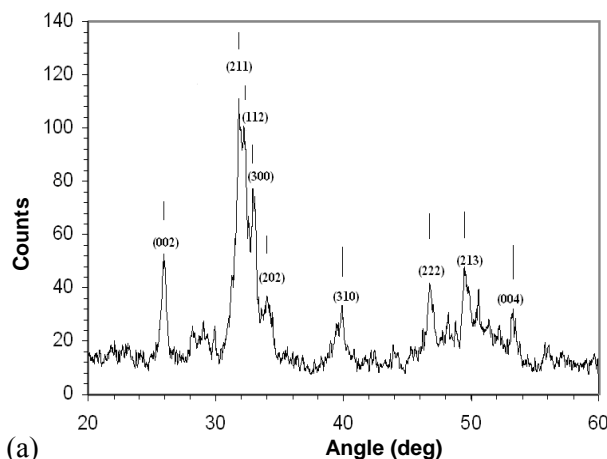
الکترونی عبوری نمونه‌ی هیدروکسی آپاتیت را نشان می‌دهد، نتیجه‌ی ارایه شده در جدول ۱ را تأیید می‌کند. هم‌چنین مشاهده می‌شود که بلورهای سنتز شده میله‌ای شکل هستند. با استفاده از دستگاه اندازه‌گیر کریبن / سولفور Eltra CS-2000 مقدار ناخالصی کریبن برابر ۰/۴۷ درصد اندازه‌گیری شد. شکل ۵ تغییرات شدت علامت تشدید پارامغناطیسی الکترون نمونه‌های هیدروکسی آپاتیت را در مقایسه با پودر استخوان و آلانین به صورت تابعی از دز جذبی در دزهای بالای پرتو گاما نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این نمودار دیده می‌شود، نمونه‌ی هیدروکسی آپاتیت مورد بررسی در این تحقیق دارای شدت علامت بالاتری بوده و در نتیجه نسبت به پودر استخوان و آلانین حساسیت بیشتری از خود نشان می‌دهد. از طرف دیگر، هیدروکسی آپاتیت تهیه شده که منحنی مربوط به آن تا دز جذبی حدود ۳۰ kGy تقریباً خطی است در دزهای بالاتر به حالت اشباع می‌رسد، در حالی که پودر استخوان در دز جذبی حدود ۲۰ kGy و آلانین در حدود ۴۰ kGy اشباع می‌شوند.



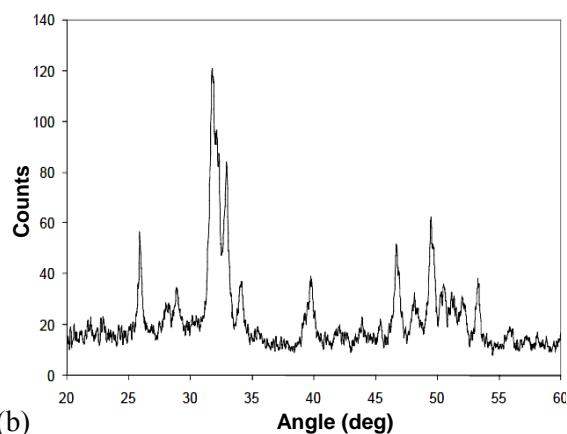
شکل ۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌ی هیدروکسی آپاتیت تهیه شده.

جدول ۱. پارامترهای به کار رفته در استفاده از رابطه‌ی (۱) و اندازه‌ی ذرات پودر هیدروکسی آپاتیت

λ (nm)	B (red)	θ (deg)	t(nm)
۰/۱۵۴	۰/۰۰۴۸۸۷	۳۱/۷۹۵	۳۲

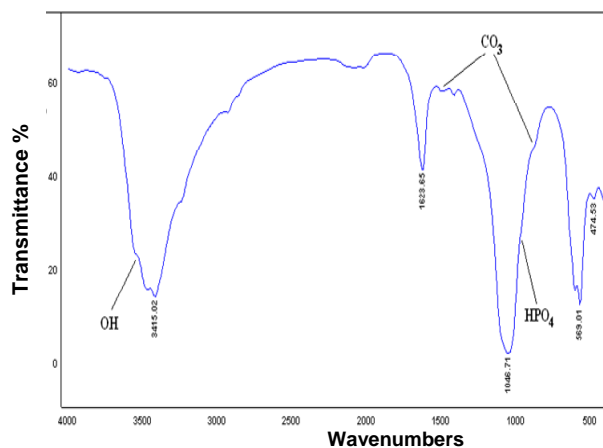


(a)



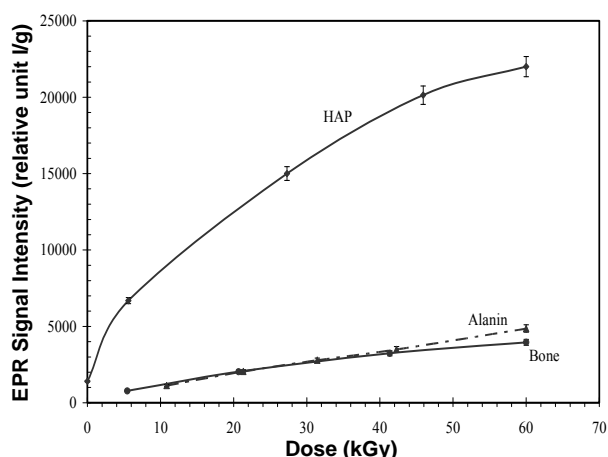
(b)

شکل ۱. الگوی پراش ایکس نمونه‌ی هیدروکسی آپاتیت. استاندارد (a)، نمونه‌ی تهیه شده (b).

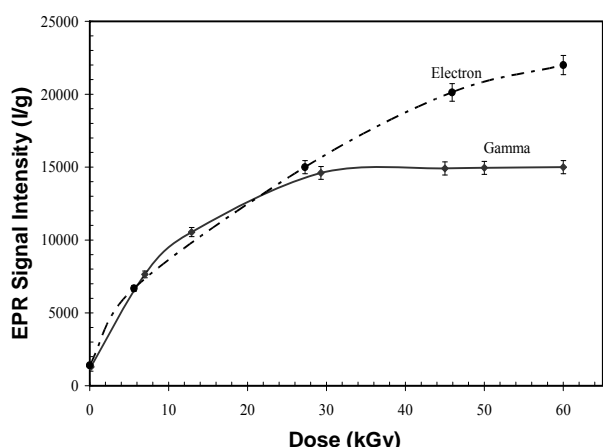


شکل ۲. نمودار FTIR نمونه‌ی هیدروکسی آپاتیت تهیه شده.

(شکل ۳)، نانو ساختار بودن نمونه را تأیید می‌کند، اما با توجه به این که تصویر SEM به صورت سطحی تهیه می‌شود، امکان تعیین دقیق ابعاد واقعی ذرات وجود ندارد. لذا بدین منظور با استفاده از رابطه‌ی (۱)، اندازه‌ی ذرات حدود ۳۰ نانومتر محاسبه شد (جدول ۱). شکل ۴ که تصویر میکروسکوپ

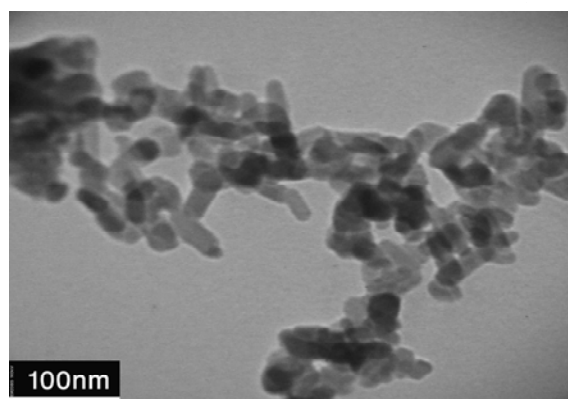


شکل ۶. تغییرات شدت علامت تشدید مغناطیسی پارامغناطیسی الکترون نمونه‌های هیدروکسی آپاتیت با دز جذبی باریکه‌ی الکترونی و مقایسه‌ی آن با نتایج مربوط به پودر استخوان و دزیمتر آلانین.

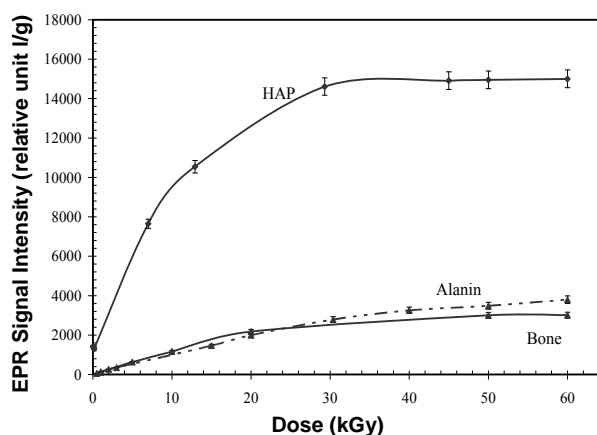


شکل ۷. مقایسه تغییرات شدت علامت تشدید پارامغناطیسی الکترون نمونه‌های هیدروکسی آپاتیت تهیه شده، به صورت تابعی از دز جذبی باریکه‌ی الکترونی و پرتوهای گاما.

همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد هیدروکسی آپاتیت مصنوعی تولید شده در این تحقیق نسبت به پودر استخوان و حتی نسبت به آلانین که سال‌ها است برای دزیمتری میدان پرتو از طریق طیف‌بینی تشدید پارامغناطیسی الکترون به کار می‌رود، از حساسیت بالاتری نسبت به دز جذبی پرتو برخوردار است. از آن جایی که استخوان طبیعی عمدتاً از هیدروکسی آپاتیت تشکیل شده است، دلیل حساسیت بالاتر هیدروکسی آپاتیت تهیه شده را می‌توان به تفاوت ساختار، درجه‌ی خلوص بالاتر آن و تفاوت در توزیع اندازه‌ی ذرات دانست زیرا با کوچک‌تر شدن اندازه‌ی ذرات و افزایش سطح مخصوص، پیوندهای کربنی بیش‌تری به وجود می‌آید که باعث افزایش جمعیت رادیکال‌های آزاد و حساسیت بیش‌تر نسبت به دز جذبی پرتو می‌شود.



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نمونه‌ی هیدروکسی آپاتیت تهیه شده.



شکل ۵. تغییرات شدت علامت تشدید پارامغناطیسی الکترون نمونه‌های هیدروکسی آپاتیت به صورت تابعی از دز جذبی پرتوهای گاما و مقایسه‌ی آن با نتایج مربوط به پودر استخوان و دزیمتر آلانین.

در شکل ۶ تغییرات شدت علامت حاصل از تشدید پارامغناطیسی الکترون نمونه‌های هیدروکسی آپاتیت، دزیمتر آلانین و پودر استخوان با دز جذبی باریکه‌ی الکترونی در دزهای بالا نشان داده شده است. با توجه به این شکل، پاسخ تشدید پارامغناطیسی الکترون نمونه‌ی هیدروکسی آپاتیت به مراتب بهتر از پودر استخوان و دزیمتر آلانین بوده و منحنی مربوطه تا بیش از ۵۰ kGy خطی است. در شکل ۷ پاسخ نمونه‌های هیدروکسی آپاتیت تهیه شده نسبت به دز جذبی باریکه‌ی الکترونی و پرتوهای گاما با یک‌دیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که در این شکل نیز قابل مشاهده است، پاسخ‌های مربوط به الکترون و پرتوهای گاما با یک‌دیگر متفاوت است. علت این امر را می‌توان اختلاف فاحش آهنگ دز پرتوهای گاما و الکترون مورد استفاده برای پرتودهی نمونه‌ها دانست [۱۰].



پی نوشت‌ها:

1. EPR/ESR: Electron Spin Resonance/Electron Paramagnetic Resonance
2. Implant Surface
3. Peak to Peak Signal Height

References:

1. W. Stachowics, K. Ostrowski, A. Dziedzic-Goclawski, A. Komender, "Sterilization and preservation of biological tissues by ionizing radiation," Panel Proc. Series IAEA, Vienna, STVPUB/247, 15 (1970).
2. K. Mahesh, D.R. Vij(eds) "Techniques of radiation dosimeter," Wily Eastern Ltd., New Delhi, India (1985).
3. K.W. Bögl, D.F. Regulla, M.J. Suess, "Health impact, identification, and dosimetry of irradiated food," Report of a WHO Working Group. Berich des Institute für Strahlenhygiene des Bundesgesundheitsarntes Neuherberg, FRG, ISH-125 (1988).
4. F. Ziaie, W. Stachowicz, G. Strzelczak, S. Al-Osaimi, "Using bone powder for dosimetric system EPR response under the action of gamma irradiation," Nukleonika, 4, 603-608 (1999).
5. P. Moens, P. De Volder, R. Hoogewijs, F. Callens, R. Verbeeck, "Maximum-likelihood common factor analysis as a powerful tool in decomposing multicomponent EPR powder spectra," J. Magn. Reson., 101, 1-15 (1993).
6. H.P. Schwarcz, "ESR study of tooth enamel," Nucl. Tracks, 10, 865-867 (1985).
7. J. Talpe, "Theory of experiments in paramagnetic resonance," Pergamon Press, New York, First Edition (1971).
8. M.F. Desrosiers, A.A. Romanyukha, "Medical and workplace application," The National Academic Press (1998).
9. IAEA, "Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment," TECDOC-1331 (2002).

۴. نتیجه گیری

پودر تهیه شده‌ی هیدروکسی آپاتیت دارای اندازه‌ی ذرات متوسط حدود ۳۰ نانومتر بوده و حاوی ۰/۴۷ درصد کربن است. در بررسی منحنی تغییرات شدت علامت تشدید پارامغناطیسی الکترون نمونه‌ی هیدروکسی آپاتیت مورد مطالعه در مقایسه با دزیمتر آلانین و پودر استخوان در دزهای بالاتر پرتو گاما و الکترون موارد زیر قابل توجه است:

- روند تغییرات منحنی شدت علامت نمونه با دز جذبی همانند پودر استخوان و آلانین است.
 - شدت علامت حاصل از تشدید پارامغناطیسی الکترون هیدروکسی آپاتیت به مراتب بالاتر از پودر استخوان و آلانین است.
 - منحنی تغییرات شدت علامت حاصل از تشدید پارامغناطیسی الکترون نمونه‌های هیدروکسی آپاتیت با دز جذبی پرتو گاما در دزهای بالاتر از حدود ۳۰kGy مستقل از دز جذبی است در حالی که این برای پودر استخوان در دز جذبی حدود ۲۰kGy و برای آلانین در حدود ۴۰kGy اتفاق می‌افتد.
 - منحنی تغییرات شدت علامت تشدید پارامغناطیسی الکترون هیدروکسی آپاتیت با دز جذبی باریکه‌ی الکترونی همانند دو ماده‌ی دیگر تا دز جذبی حدود ۵۰kGy تقریباً خطی است.
 - پاسخ دز نمونه‌های هیدروکسی آپاتیت نسبت به باریکه‌ی الکترونی و پرتو گاما با یک‌دیگر متفاوت است.
- با توجه به مقدار کربن موجود در هیدروکسی آپاتیت تهیه شده در این تحقیق (۰/۴۷ درصد)، انتظار می‌رود بتوان با افزایش درصد کربن موجود در هیدروکسی آپاتیت، حساسیت آن در مقابل دز جذبی پرتو و نیز بازه خطی بودن منحنی تغییرات شدت علامت بر حسب دز جذبی پرتو را افزایش داد.



- 10.F. Ziaie, N. Hajiloo, H. Fathollahi, S.I. Mehtieva, "Bone powder as EPR dosimetry system for electron and gamma radiation," NUKLEONIKA, 54(4) 267-270 (2009).
- 11.M.H. Fathi, A. Hanifi, "Evaluation and characterization of nanostructure hydroxyapatite powder prepared by simple sol-gel method," Materials Letters 61, 3978-3983 (2007).
- 12.S. Kim and P.N. Kumta, "Sol-gel synthesis and characterization of nanostructured hydroxyl-apatite powder," Materials Science and Engineering, B111, 232-236 (2004).
- 13.JCPDS Card, 9-432 (1994).
- 14.S. Kweh, K. Khor, P. Cheang, "An in vitro investigation of plasma sprayed hydroxyapatite(HA) coatings produced with flame-spheroidized feedstock," Biomaterials; 23, 775-785 (2002).
- 15.K. Ishikawa, S. Takagi, L. Chow, K. Suzuki, "Reaction of calcium phosphate cements with different amounts of tetracalcium phosphate and dicalcium phosphate anhydrous," J. Biomed Mater Res A; 46, 405-510 (1999).