

مقایسه‌ی ساختاری هیدروکسی آپاتیت نانوکریستال طبیعی و سنتز شده

محمدرضا فروغی^۱، بهمن نصیری تبریزی^۱، دکتر سعید کرباسی^۲،
دکتر رضا ابراهیمی کهریزسنگی^۳

چکیده

مقدمه: هیدروکسی آپاتیت جزء معدنی و اصلی تشکیل دهنده‌ی استخوان می‌باشد که در درمان ضایعات استخوان و یا ساخت کاشتنی‌های مورد استفاده در دندانپزشکی یا ارتوپدی به علت زیست سازگاری آن کاربرد فراوان دارد. رفتار زیستی هیدروکسی آپاتیت به عوامل زیادی نظیر، ترکیب شیمیایی و فازی، ریز ساختار، اندازه و حجم تخلخل‌ها بستگی دارد. از سوی دیگر، نانوکریستال‌های هیدروکسی آپاتیت به دلیل بهبود کارایی زیستی از جمله هم‌بندی با بافت استخوانی و تشکیل استخوان جدید بر روی سطح‌شان بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

روش‌ها: در این تحقیق، پودر نانوکریستال هیدروکسی آپاتیت به روش‌های حرارتی و مکانوشیمیایی سنتز شده و مورد مقایسه‌ی ساختاری قرار گرفته است.

یافته‌ها: محصول به دست آمده از هر دو فرایند، تک فاز هیدروکسی آپاتیت می‌باشد و هیچگونه فاز پایدار اضافی مشاهده نشد. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که درجه‌ی بلوری شدن محصول تولید شده به روش‌های حرارتی و مکانوشیمیایی به ترتیب ۹۲/۸۶ و ۶/۷۲ درصد بوده است. ذرات به طور عمده مورفولوژی شبه کروی داشتند و اندازه‌ی ذرات در نمونه‌ی سنتز شده به روش حرارتی و مکانوشیمیایی به ترتیب حدود ۸۵ و ۵۸ نانومتر بود.

نتیجه‌گیری: نتایج آنالیز فازی نشان می‌دهد که محصول حاصل از هر دو فرایند تک فاز هیدروکسی آپاتیت می‌باشد. از سوی دیگر، بررسی گروه‌های عاملی بیان‌گر آن است که تمام پیک‌های مشخصه‌ی هیدروکسی آپاتیت در محصول وجود دارد و محصول از درجه‌ی خلوص بالایی برخوردار است.

واژگان کلیدی: سنتز حرارتی، مکانوشیمیایی، نانوساختار، هیدروکسی آپاتیت

مقدمه

هیدروکسی آپاتیت جزء معدنی و اصلی تشکیل دهنده‌ی استخوان می‌باشد که در درمان ضایعات استخوان و یا ساخت کاشتنی‌های مورد استفاده در دندانپزشکی یا ارتوپدی به علت زیست سازگاری آن کاربرد فراوان دارد (۱). رفتار زیستی هیدروکسی آپاتیت به عوامل زیادی نظیر، ترکیب شیمیایی و فازی، ریز ساختار، اندازه و حجم تخلخل‌ها بستگی دارد. از سوی دیگر، نانوکریستال‌های هیدروکسی آپاتیت به دلیل بهبود کارایی زیستی از جمله هم‌بندی با بافت استخوانی و تشکیل

استخوان جدید بر روی سطح‌شان بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (۲). امروزه روش‌های متعددی به منظور تولید نانوکریستال‌های هیدروکسی آپاتیت به کار گرفته می‌شوند که بسته به نوع روش، محصولاتی با مشخصات ساختاری، ظاهری و درجه‌ی بلوری متفاوت حاصل می‌شوند (۳). به طور کلی روش‌های تولید هیدروکسی آپاتیت را می‌توان به دو گروه فرایندهای خشک و تر تقسیم نمود (۴). مزیت روش‌های تر نظیر رسوب‌گذاری (۵-۶)، هیدرولیز (۷) و سنتز هیدروترمال (۸) به طور معمول تولید آب به عنوان محصول فرعی

^۱ مربی، دانشکده‌ی مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران.

^۲ استادیار، گروه فیزیک و مهندسی پزشکی دانشکده‌ی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران.

^۳ دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران.

فسفات کلسیم از استخوان ماهی پرداختند (۱۳). این فرایند مشابه روش تولید اکسید کلسیم توسط Rivera و همکاران (۱۱) می‌باشد. همچنین روش سنتز هیدروترمال هیدروکسی‌آپاتیت از استخوان گاو به وسیله‌ی Jinawath و همکاران گزارش شده است (۱۴).

در پژوهش حاضر به تولید هیدروکسی‌آپاتیت نانوکریستال از استخوان گاو به وسیله‌ی عملیات حرارتی و با استفاده از فرآیندهای مکانوشیمیایی پرداخته شد و سپس مشخصات ساختاری محصولات مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

روش‌ها

۱- سنتز حرارتی

پس از تهیه‌ی استخوان ران گاو، باید به مدت ۱ ساعت در آب جوش قرار گیرد تا چربی‌های متصل به آن جدا شوند. سپس برای خشک کردن آن، در آن در درجه‌ی حرارت ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حرارت بگیرد تا رطوبت آن خشک گردد. ماده‌ی حاصل از این فرایند خاکستر سیاه رنگ استخوان می‌باشد که برای تولید هیدروکسی‌آپاتیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. مرحله‌ی بعد قرار دادن استخوان‌ها در کوره و حرارت دادن آن‌ها تا ۸۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه می‌باشد، که ماده‌ی حاصل از این مرحله، پودر سفید رنگ هیدروکسی‌آپاتیت است.

۲- سنتز مکانوشیمیایی

به منظور تولید هیدروکسی‌آپاتیت نانوکریستالی از پتاسیوم فسفات دی فسفر (P₂O₅;Merck) و هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)₂;Merck) مطابق واکنش زیر استفاده شد:

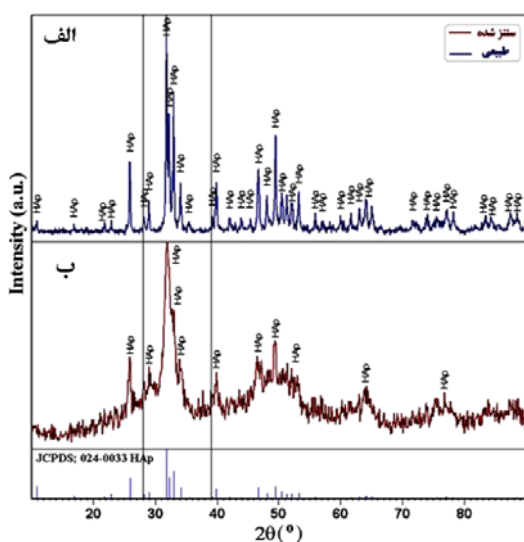
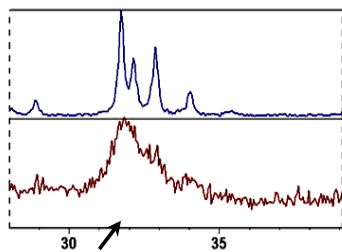
$$10\text{Ca}(\text{OH})_2 + 3\text{P}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 + 9\text{H}_2\text{O} \quad (1)$$

برای انجام فرآیند، مواد با نسبت‌های مناسب در یک آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای تغذیه شدند. به منظور انجام

واکنش است که از آلودگی محصول جلوگیری می‌کند. از سوی دیگر، تولید محصول با ترکیب مورد نظر (تابع عواملی نظیر تنظیم دقیق ترکیب، خلوص مواد اولیه‌ی مورد استفاده، pH، دمای محلول مورد استفاده و نسبت استوکیومتری Ca/P) ممکن است روزها به طول بیانجامد که تولید در مقیاس صنعتی را توجیه نمی‌کند (۴). همچنین گزارش شده است که در برخی از فرایندها ترکیباتی نظیر نیترات آمونیوم تولید و منجر به آلودگی محیط زیست می‌شود (۹). بنابراین هنگامی که تولید انبوه هیدروکسی‌آپاتیت کریستالی مد نظر باشد، با وجود برخی از آلودگی‌ها در حین فرآیند فعال‌سازی مکانیکی، این دسته از فرایندها به دلیل قابلیت تولید مجدد و ارزان بودن در مقایسه با روش‌های تر مطلوب‌تر هستند (۴). نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که یکی از روش‌های جایگزین و مناسب برای تولید هیدروکسی‌آپاتیت، استخراج آن از منابع طبیعی می‌باشد. سخت‌پوستان دریایی (۱۰)، پوست تخم‌مرغ (۱۱) و پوست تخم شترمرغ (۱۲) برای تولید هیدروکسی‌آپاتیت یا به عنوان یک جایگزین برای استخوان مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته‌اند.

ماده‌ی اصلی تشکیل دهنده‌ی پوست استخوان، کربنات کلسیم (۹۴ درصد) و فسفات کلسیم (۱ درصد) می‌باشد. Rivera و همکاران با سوزاندن پوست تخم‌مرغ در دمای ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت کربنات کلسیم موجود در پوست تخم‌مرغ را به اکسید کلسیم تبدیل کردند. اکسید کلسیم تولیدی را با محلول فسفات کلسیم مخلوط کردند و ماده‌ی حاصل را به مدت ۳ ساعت در دمای ۱۰۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به منظور تولید هیدروکسی‌آپاتیت حرارت دادند (۱۱). در همین راستا گروهی از محققین کره‌ای به تولید پودر

دست آمده از هر دو فرآیند، تک فاز هیدروکسی‌آپاتیت می‌باشد و هیچ گونه فاز پایدار اضافی مشاهده نمی‌شود. همچنین همخوانی مناسبی بین پیک‌های پراش محصول با استاندارد ارایه شده وجود دارد. نکته‌ی حایز اهمیت در شکل ۱، تفاوت در میزان پهن شدگی الگوهای پراش است که نشان دهنده‌ی تفاوت در متوسط اندازه‌ی دانه‌های کریستالی است. بنابراین، با توجه به شکل ۱، انتظار می‌رود که محصول حاصل از فرآیند مکانوشیمیایی از متوسط اندازه‌ی دانه‌ی پایین‌تری برخوردار باشد. میزان پهن شدن پیک از پارامترهایی است که کاربرد فراوانی در تعیین مشخصات ساختاری محصول از جمله درجه‌ی بلوری شدن دارد.



شکل ۱. الگوهای پراش پرتو ایکس هیدروکسی‌آپاتیت تولید شده به روش (الف) حرارتی (طبیعی) و (ب) مکانوشیمیایی (سنتز شده).

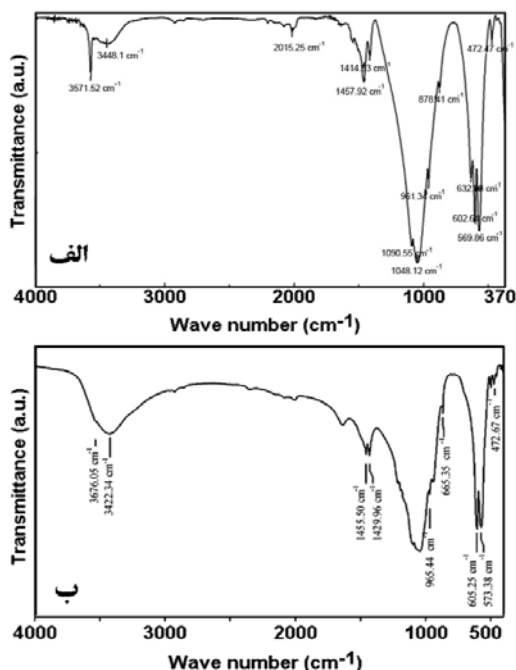
عملیات از محفظه‌ی پلیمری، فولادی و گلوله‌های زیرکونیایی استفاده شد. همچنین نسبت گلوله به پودر و سرعت چرخشی به ترتیب ۲۰ به ۱ و ۶۰۰ rpm اعمال شد. عملیات مکانوشیمیایی برای واکنش فوق به مدت ۲ ساعت در اتمسفر هوا انجام پذیرفت. به منظور جلوگیری از بالا رفتن درجه‌ی حرارت در فرآیند، دستگاه پس از هر ۴۵ دقیقه آسیاب‌کاری، به مدت ۱۵ دقیقه متوقف می‌شد.

۳- مشخصه‌یابی ساختاری

بررسی تغییرات ساختاری و مطالعه‌ی فازها با استفاده از روش پراش پرتو ایکس (X-ray diffraction) یا XRD انجام گردید. برای آنالیز از پرتو $CuK\alpha$ استفاده شد. نرخ روبش معادل ۱ درجه بر دقیقه، ولتاژ اعمالی برابر ۳۰ کیلوولت و جریان معادل ۳۰ میلی‌آمپر بود و زاویه‌ی پراش (2θ) از ۱۰ تا ۹۰ درجه انتخاب گردید. پس از حصول الگوی پراش پرتو ایکس، جهت مطالعه‌ی گروه‌های عاملی از طیف‌سنج مادون قرمز (Fourier transform infrared spectroscopy) یا FT-IR (FT-IR:6300, JASCO, Japan) استفاده شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM (Scanning electron microscope) نیز به منظور مطالعه و بررسی مشخصات ظاهری محصول مورد استفاده قرار گرفت.

یافته‌ها

در شکل ۱ الگوهای پراش پرتو ایکس هیدروکسی‌آپاتیت تولید شده به روش حرارتی (طبیعی) و مکانوشیمیایی (سنتز شده) ارایه شده است. با توجه به شکل، ملاحظه می‌شود که محصول به



شکل ۲. FT-IR (Fourier transform infrared) از هیدروکسی‌آپاتیت تولید شده به (الف) روش حرارتی (طبیعی) و (ب) مکانوشیمیایی (سنتز شده).

(FE-SEM) از محصولات تولید شده به روش‌های حرارتی و مکانوشیمیایی در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که ذرات به طور عمده مورفولوژی شبه کروی داشتند و اندازه‌ی ذرات در نمونه‌ی سنتز شده به روش حرارتی و مکانوشیمیایی به ترتیب حدود ۸۵ و ۵۸ نانومتر می‌باشد. همچنین با توجه به شکل، ملاحظه می‌شود که محصول به دست آمده از فرایند مکانوشیمیایی تمایل بیشتری به کلوخه‌ای شدن دارد، که دلیل این امر انرژی انتقال یافته به ذرات در طی فرایند آسیاب‌کاری و ریز شدن پی در پی آنهاست که منجر به افزایش تماس ذرات در سطوح آزاد می‌شود. مقایسه‌ی تصاویر ارایه شده تأیید می‌نماید که محصولات حاصل از فرایندهای حرارتی و مکانوشیمیایی از مشخصات ظاهری مناسبی برخوردارند و می‌توانند در کاربردهای

از این‌رو درجه‌ی بلوری شدن محصول با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه شده است (۱۵):

$$X_c = (K/B)^3 \quad (I)$$

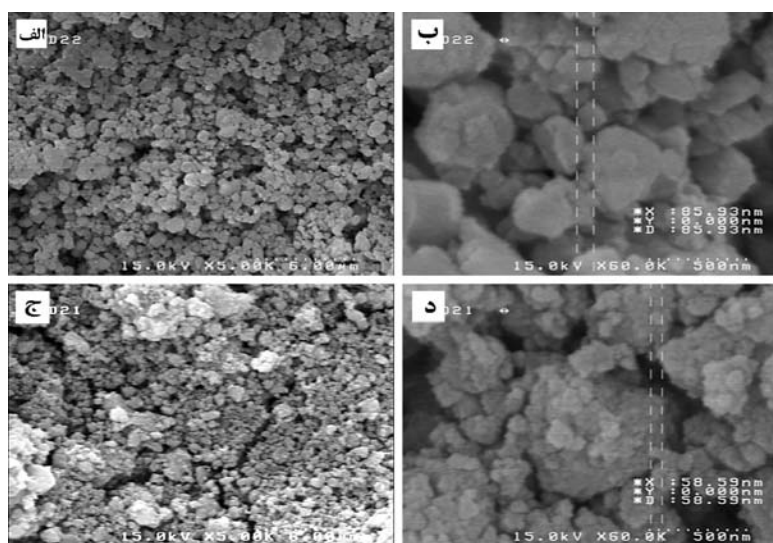
در این رابطه K عدد ثابت (برابر ۰/۲۴) و B میزان پهن شدگی پیک ($FWHM$ (°)) می‌باشد. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که درجه‌ی بلوری شدن محصول تولید شده به روش‌های حرارتی و مکانوشیمیایی به ترتیب ۹۲/۸۶ و ۶/۷۲ درصد است. از سوی دیگر، نتایج پژوهش‌ها بیان‌گر آن است که درجه‌ی بلوری تابع عواملی نظیر اندازه‌ی دانه‌های کریستالی است؛ به طوری که محصول با درجه‌ی بلوری بیشتر، حاوی دانه‌های کریستالی با متوسط اندازه‌ی بالاتر می‌باشد. بنابراین با توجه به محاسبات انجام شده، هیدروکسی‌آپاتیت سنتز شده به روش مکانوشیمیایی از متوسط اندازه‌ی دانه‌ی پایین‌تری برخوردار است.

در شکل ۲ طیف مادون قرمز FT-IR از محصولات تولید شده به روش‌های حرارتی و مکانوشیمیایی نشان داده شده است. در این طیف، پیک‌های اصلی گروه فسفات در نواحی 569cm^{-1} ، 602cm^{-1} ، 962cm^{-1} و 1048cm^{-1} ظاهر شده‌اند. پیک پهن و کشیده نیز در محدوده‌ی 3448cm^{-1} مربوط به آب ساختاری است. در این نمونه، حضور پیک در 630cm^{-1} و 605cm^{-1} نشان دهنده‌ی گروه هیدروکسیل در ساختار آپاتیت می‌باشد. همچنین حضور پیک‌های 878cm^{-1} ، 1414cm^{-1} و 1457cm^{-1} که مربوط به گروه کربنات می‌باشد، نشان می‌دهد که برخی از یون‌های کربنات جایگزین یون‌های فسفات در ساختار آپاتیت شده‌اند. با توجه به نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز، محصولات به دست آمده از خلوص مناسبی برخوردار می‌باشند.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

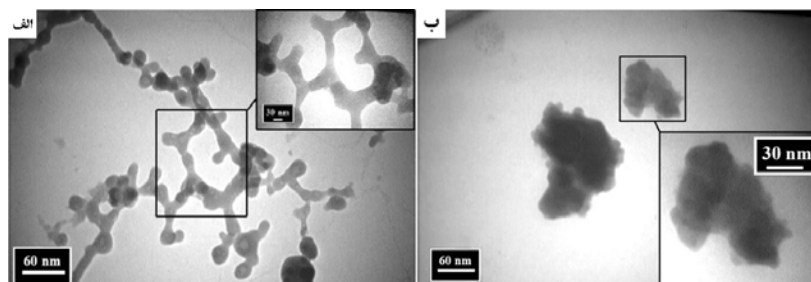
همچنین اتمسفر آسیاب‌کاری امکان تولید محصول با مشخصات ساختاری و ظاهری متفاوت وجود دارد. در شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانوذرات هیدروکسی‌آپاتیت با مورفولوژی متفاوت نشان داده شده است. تفاوت نمونه‌های ارایه شده در نوع محیط آسیاب‌کاری می‌باشد. این در حالی است که مواد اولیه‌ی مصرفی، اتمسفر آسیاب‌کاری (آرگون) و زمان آسیاب‌کاری یکسان است. بنابراین با کنترل پارامترهای مؤثر بر فرآیند می‌توان به نوساختارهایی دست یافت که بسته به مشخصات ارایه شده می‌توانند در کاربردهای دیگری نظیر کاتالیست‌ها مورد توجه باشند.

پزشکی مورد توجه باشند. از آنجایی که هیدروکسی‌آپاتیت نانوکریستالی با مورفولوژی کروی در مقایسه با مورفولوژی‌های نامنظم در فرایند استخوان‌سازی از اهمیت بیشتری برخوردار است، بنابراین، محصولات به دست آمده می‌تواند در کاربردهای مهندسی بافت استخوان مورد توجه باشد. ذکر این نکته حایز اهمیت است که در فرآیندهای مکانوشیمیایی، مواد اولیه‌ی مصرفی و شرایط فعال‌سازی از جمله عوامل مؤثر بر سنتز انواع نوساختارهای هیدروکسی‌آپاتیت می‌باشند. به عنوان مثال با تغییر مواد اولیه‌ی مصرفی، محیط آسیاب‌کاری و



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM یا Scanning electron microscope)

از هیدروکسی‌آپاتیت تولید شده به (الف و ب) روش حرارتی و (ج و د) مکانوشیمیایی.

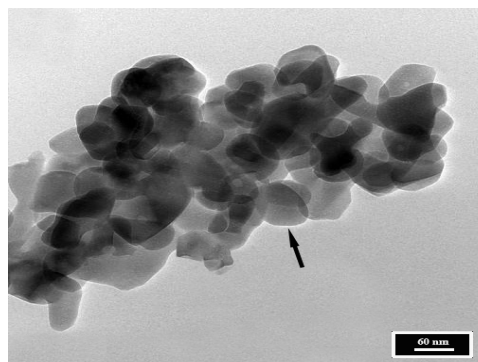


شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM یا Transmission Electron Microscopy) از هیدروکسی‌آپاتیت

تولید شده به روش مکانوشیمیایی در اتمسفر آرگون در زمان ۶۰ ساعت (الف) محفظه‌ی پلیمری، (ب) محفظه‌ی فولادی.

از هر دو فرایند تک فاز هیدروکسی‌آپاتیت می‌باشد. از سوی دیگر، بررسی گروه‌های عاملی نشان می‌دهد که تمام پیک‌های مشخصه‌ی هیدروکسی‌آپاتیت در محصول وجود داشت و محصول از درجه‌ی خلوص بالایی برخوردار بود. ارزیابی مشخصات ساختاری نیز این حقیقت را نمایان می‌کند که محصول حاصل از سنتز حرارتی، درجه‌ی بلوری بالاتری نسبت به محصول حاصل از سنتز مکانوشیمیایی دارد. مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز تولید هیدروکسی‌آپاتیت نانوکریستالی را تأیید می‌نماید و نشان می‌دهد که محصول حاصل از فرایند مکانوشیمیایی از نظر مشخصات ظاهری به نوع طبیعی آن شباهت دارد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نیز اهمیت محیط و اتمسفر آسیاب کاری را در تولید نانوساختارهای هیدروکسی‌آپاتیت ارایه داده است. با توجه به نتایج بررسی‌های مشخصات ساختاری و ظاهری، هیدروکسی‌آپاتیت نانوکریستالی تولید شده با مورفولوژی شبه کروی می‌تواند در کاربردهای پزشکی مورد توجه باشد.

شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانوذرات هیدروکسی‌آپاتیت ساخته شده به روش طبیعی می‌باشد که همان‌طور که مشخص است مورفولوژی ذرات به طور کامل کروی می‌باشد.



شکل ۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM از هیدروکسی‌آپاتیت تولید شده به روش طبیعی.

بحث

هیدروکسی‌آپاتیت نانوکریستالی به طور موفقیت‌آمیزی با استفاده از فرایندهای حرارتی و مکانوشیمیایی تولید شد. نتایج آنالیز فازی نشان می‌دهد که محصول حاصل

References

1. Fella BH, Josselin N, Chappard D, Weiss P, Layrolle P. Inflammatory reaction in rats muscle after implantation of biphasic calcium phosphate micro particles. *J Mater Sci Mater Med* 2007; 18(2): 287-94.
2. Orlovskii VP, Komlev VS, Barinov SM. Hydroxyapatite and Hydroxyapatite-Based Ceramics. *Inorganic Materials* 2002; 38(10): 973-84.
3. Dorr LD, Wan Z, Song M, Ranawat A. Bilateral total hip arthroplasty comparing hydroxyapatite coating to porous-coated fixation. *The Journal of arthroplasty* 1998; 13(7): 729-36.
4. Rhee SH. Synthesis of hydroxyapatite via mechanochemical treatment. *Biomaterials* 2002; 23(4): 1147-52.
5. Asada M, Miura Y, Osaka A, Oukami K, Nakamura S. Hydroxyapatite crystal growth on calcium hydroxyapatite ceramics. *Journal of Materials Science* 1988; 23(9): 3202-5.
6. Jarcho M, Bolen CH, Thomas MB, Bobick J, Kay JF, Doremus RH. Hydroxyapatite synthesis and characterization in dense polycrystalline form. *Journal of Materials Science* 1976; 11(11): 2027-35.
7. Liu DM, Troczynski T, Hakimi D. Effect of hydrolysis on the phase evolution of water-based sol-gel hydroxyapatite and its application to bioactive coatings. *J Mater Sci Mater Med* 2002; 13(7): 657-65.
8. Sada E, Kumazama H, Murakami Y. Hydrothermal Synthesis of Crystalline Hydroxyapatite Ultrafine Particles. *Chem Eng Comm* 1991; 103: 57-64.
9. Choi D, Marra G, Kumta N. Chemical synthesis of hydroxyapatite/poly (ε-caprolactone)

- composites. *Materials Research Bulletin* 2004; 39(3): 417-32.
10. Manjubala M, Siva Kumar TS, Sampath K. PandurangaRao, crystallization in a large volumecreatine supplement solution made from effervescent powders. *J Mater science Mater Med* 2000, 11: 705-9.
 11. Rivera EM, Araiza A, Brostow W, Castano VM, Diza-Estrada JR, Hemandez R. Synthesis of hydroxyapatite from eggshells. *Material Letters* 1999; 41: 128-34.
 12. Dupoirieux L. Powdered eggshell in the repair of cystic cavities of the jaw. *Br J Oral Maxillofac Surg* 1999; 37: 467-71.
 13. Lee SJ, Lee YC, Yoon YS. Characteristics of calcium phosphate powders synthesized from cuttlefish bone and phosphoric acid. *J Ceramic Process Res* 2007; 8(6): 427-30
 14. Jinawath S, Pongkao D, Yoshimura M. Hydrothermal synthesis of hydroxyapatite from natural source. *J Mater Sci Mater Med* 2002; 13(5): 491-4.
 15. Landi E, Tampieri A, Celotti G, Sprio. Densification behaviour and mechanisms of synthetic hydroxyapatites. *Journal of the European Ceramic Society* 2000; 20(14-15): 2377-87.

Structural Comparison of Natural and Synthetic Nanocrystalline Hydroxyapatite

Mohammad Reza Foroughi¹, Bahman Nasiri Tabrizi¹, Saeed Karbasi PhD²,
Reza Ebrahimi Kahrizsangi PhD³

Abstract

Background: Hydroxyapatite is the main mineral component of bones. Due to its high biocompatibility, it is widely used in the treatment of bone lesions or production of dental or orthopedic implants. Biological behavior of hydroxyapatite depends on many factors such as chemical composition and phase, microstructure, size, and porosity volume. On the other hand, other hydroxyapatite nanocrystals have received increased attention due to their improved bio-efficiency including connectivity and formation of new bones on their surface.

Methods: In this research, nanocrystalline hydroxyapatite powder was synthesized by thermal synthesis or mechanochemical methods. The structures of the two types were then compared.

Findings: Products obtained from both processes was single-phase hydroxyapatite. No other stable phases were detected. Degrees of crystalline of the products of thermal synthesis and mechanochemical methods were 92.86% and 6.72%, respectively. Most particles had quasi-spherical morphology. In addition, particle sizes of products of heating and mechanochemical methods were 85 and 58 nm, respectively.

Conclusion: Phase analysis showed that the product of both processes was single-phase hydroxyapatite. On the other hand, all characteristic peaks were present in the product and it had high purity.

Keywords: Thermal synthesis, Mechanochemical, Nanostructure, Hydroxyapatite

¹ Lecturer, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

² Assistant Professor, Department of Medical Physics and Biomedical Engineering, School of Medicine, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran

³ Associate Professor, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Corresponding Author: Mohammad Reza Foroughi, Email: foroughi@iaun.ac.ir