

## مطالعه اثر ولتاژ متقارن الکتروانباشت و دمای تابکاری بر روی خواص مغناطیسی نانوسیم‌های آلیاژی آهن-قلع

زهره امجدیان، بندر آستین‌چپ و زهرا عالمی‌پور

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کردستان، سنندج، کردستان.

پست الکترونیکی: b.astinchap@uok.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴)

### چکیده

در این پژوهش، نانوسیم‌های مغناطیسی آلیاژی آهن-قلع در قالب اکسید آلومینیوم متخلخل آندی به روش الکترو انباشت متناوب ساخته شدند. اثر ولتاژهای متقارن مختلف انباشت (۱۷/۵-۳۲/۵ ولت) و دمای تابکاری بر روی خواص مغناطیسی و ساختاری نانوسیم‌های آهن-قلع بررسی شد. خواص مغناطیسی، ریخت شناسی، تعیین میزان عناصر و ساختار بلوری نانوسیم‌ها به ترتیب توسط دستگاه‌های EDX، SEM، AGFM و XRD مطالعه شد. نتایج نشان داد، میدان وادارندگی و نسبت مربعی نانوسیم‌ها با افزایش ولتاژ انباشت افزایش می‌یابد و همچنین بلورینگی نانوسیم‌ها و در نتیجه ناهمسانگردی بلوری آنها افزایش می‌یابد، اما درصد انباشت قلع نسبت به آهن کاهش می‌یابد. تابکاری باعث افزایش میدان وادارندگی و نسبت مربعی نانوسیم‌های تهیه شده در همه ولتاژها می‌شود که علت آن افزایش ساختار بلوری و ناهمسانگردی بلوری آنهاست. بیشترین تغییرات در میدان وادارندگی و نسبت مربعی برای نانوسیم‌های تهیه شده در ولتاژ ۳۰ ولت به دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** نانوسیم، الکتروانباشت، قالب اکسید آلومینیوم، نسبت مربعی، میدان وادارندگی

### ۱. مقدمه

نانوسیم‌هاست که در اثر شکست تقارن انتقالی، کاهش تعداد همسایه‌ها و شکسته شدن پیوندهای تبادلی و در نتیجه ایجاد ناکاملی‌ها و افزایش نسبت سطح به حجم، ایجاد می‌شود [۴]. از میان روش‌های متفاوت ساخت نانوسیم‌ها، روش سنتز نانوسیم‌ها با استفاده از قالب به علت قابلیت کنترل اندازه، شکل، تراکم حفره‌ها و عامل‌های مربوط به ساختار، یکی از کارآمدترین و جدیدترین روش‌هاست [۵]. در این روش، نانوسیم‌ها با شرایط متفاوت در منافذ متخلخل قالب رسوب

امروزه بررسی خواص مغناطیسی نانوساختارهای مغناطیسی مانند نانوذرات و نانوسیم‌ها و استفاده از آنها در صنعت از اهمیت بالایی برخوردار است [۱-۳]. نانوسیم‌ها ساختارهایی با قطر نانومتری و طول میکرومتری هستند، که می‌توانند به طور مجزا به صورت اجسام سوزنی شکل وجود داشته باشند و یا در زمینه یک کامپوزیت قرار بگیرند. آثار سطحی و شکل نانوساختارهای مغناطیسی از عوامل اصلی تغییر رفتار فیزیکی

## ۲.۲. روش‌ها

### ۱.۲.۲. ساخت قالب اکسید آلومینیوم آندی

ورقه آلومینیوم به صورت صفحه‌های دایره‌ای با قطر ۸mm بریده شدند سپس جهت شستشو نمونه‌ها به مدت ۶ دقیقه در داخل محلول استون قرار داده و با استفاده از دستگاه فراصوت چربی‌زدایی شدند. هنگام بریده شدن ورقه‌های آلومینیوم، در ساختار آنها تنش مکانیکی و آسیب ساختاری ایجاد می‌شود. با توجه به این که تابکاری حرارتی باعث نظم دوباره ساختار و همچنین باعث کم شدن تنش‌های مکانیکی می‌شود بنابراین نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در کوره در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد تحت عملیات تابکاری حرارتی قرار گرفتند و سپس در مجاورت اتمسفر گاز آرگون تا دمای اتاق سرد شدند.

از آنجا که آلومینیوم در مجاورت هوا خیلی سریع با اکسیژن واکنش می‌دهد و یک لایه اکسید روی آن تشکیل می‌شود، بنابراین برای حذف این لایه اکسیدی مرحله جلا دهی انجام گرفت. برای این کار نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه داخل محلول سود ۳ مولار قرار داده شدند تا لایه اکسید تشکیل شده به وسیله سود از بین برود. در ادامه به منظور جلا دهی و حذف ناهمواری‌های میکروسکوپی، مرحله جلا دهی با محلول حاوی محلول اسید پرکلریک و اتانول با نسبت حجمی (۳:۱) به مدت ۶ دقیقه در دمای اتاق و با اعمال ولتاژ ۲۰ ولت انجام گرفت که در نهایت ورقه‌هایی کاملاً صاف و صیقلی به دست آمد.

در ادامه روی نمونه‌های جلا داده شده با سطح صاف و یکنواخت، مرحله آندی کردن برای تشکیل حفره‌ها در دو مرحله انجام شد. آندی کردن مرحله اول در محلول الکترولیت ۰/۳ مولار از اسید اکسالیک در دمای ثابت ۱۵ درجه سانتی‌گراد با اعمال ولتاژ ثابت ۴۰ ولت به مدت ۱۵ ساعت انجام گرفت. ضخامت لایه سدی، قطر و فاصله بین حفره‌ای با ولتاژ اعمال شده در این مرحله متناسب است [۱۲ و ۱۳]. در پایان آندی کردن، اول نمونه‌ها با آب مقطر شسته و خشک شدند. حفره‌هایی که در این مرحله در ورقه آلومینیوم شکل می‌گیرند، نامنظم و غیر یکنواخت هستند، بنابراین در مرحله سونش سعی شد با برداشتن لایه اکسید، طرحی از حفره‌های اولیه باقی بماند

داده می‌شوند که قالب اکسید آلومینیوم متخلخل آندی (AAO)

از رایج‌ترین قالب‌های در دسترس در این روش است [۶]. تحقیقات زیادی روی نانوسیم‌های آهن و اخیراً قلع انجام گرفته است. به عنوان مثال: ساخت نانوسیم‌های آهن-گالوانیوم و بررسی اثر تابکاری حرارتی روی تغییر فاز بلوری آنها [۷]، بررسی نانوسیم‌های آهن و مشخص شدن فاز آهن-آلفا در ساختار آن با استفاده از طرح پراش نانوسیم‌ها و همچنین پی بردن به اینکه جهت محور آسان مغناطیسی نانوسیم‌های آهن عمود بر سطح (صفحه) نانوسیم است [۸]. اثر مقدار منگنز، بسامد الکترو انباشت و تابکاری بر روی نانوسیم‌های آلیاژی آهن-منگنز ساخته شده با استفاده از قالب توسط گروه دیگری از محققان مطالعه شد [۹]. همچنین در تحقیقی نانوسیم‌های کبالت-قلع با روش قالب آلومینیوم آماده شده و اثر ولتاژ انباشت بر روی اندازه دانه‌ها و جابه‌جایی زاویه‌های پراش بررسی شد [۱۰]. در پژوهشی دیگر، نانوسیم‌های ابررسانای تک بلور قلع در حفره‌های پلی کربنات ساخته شده و ساختار و خواص آنها مطالعه شد [۱۱]. اما براساس مطالعه ما هنوز گزارشی مبنی بر ساخت نانوسیم‌های آهن-قلع و مطالعه خواص مغناطیسی آنها ارائه نشده است. بنابراین در این پژوهش نانوسیم‌های آهن-قلع با روش آندی کردن دو مرحله‌ای و استفاده از قالب آلومینیوم متخلخل آندی ساخته شده‌اند و اثر ولتاژ انباشت بر خواص مغناطیسی و ساختاری آنها بررسی شد.

## ۲. بخش تجربی

### ۱.۲. مواد

مواد مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از: ورقه آلومینیوم با قطر ۸ mm و ضخامت ۰/۳ mm با خلوص ۹۹/۹۹ درصد، سولفات آهن، سولفات قلع، اسید بوریک، اسید آسکوربیک و گلی کنت سدیم، سود، اتانول و استون، که همه مواد از شرکت مرک خریداری شده‌اند.

می‌سازد، به طوریکه با اعمال ولتاژ منفی به پشت نمونه که کاتد است، الکترون از لایه آلومینیوم پشت نمونه حرکت کرده و با عبور از سد پتانسیلی کوچک لایه سدی نازک شده (با ضخامتی در حدود چند نانومتر متناسب با ولتاژ نهایی در نازک سازی یعنی ۸ ولت)، به درون حفره رسیده و باعث احیاء و نشست یون‌های فلزی درون محلول می‌شود [۱۳]. مرحله انباشت درون یک سلول الکتروشیمیایی انجام شد که قالب آلومینیوم متخلخل آندی به عنوان کاتد و گرافیت به عنوان آنود قرار گرفت. انباشت به مدت ۴ دقیقه‌ای در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد با اعمال ولتاژ ۳۰ ولت با بسامد ۲۰۰ هرتز انجام شد که در نهایت یون‌های Fe و Sn موجود در محلول الکترولیت طی واکنش‌های اکسایش-کاهش درون حفره‌های منظم آلومینیوم نشستند.

به منظور بررسی اثر ولتاژ بر خواص مغناطیسی و ساختاری نانوسیم‌ها، نانوسیم‌های آهن با ۲/۵ درصد قلع در ولتاژهای مختلف ۱۷/۵، ۲۰، ۲۲/۵، ۲۵، ۲۷/۵، ۳۰ و ۳۲/۵ در قالب AAO انباشت شدند. نانوسیم‌های تهیه شده در دماهای مختلف شامل ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و در اتمسفر گاز نیتروژن به مدت ۲۰ دقیقه تابکاری شدند.

### ۳.۲.۲. مشخصه‌یابی نانوسیم‌ها

تحلیل ساختار شیمیایی نانوسیم‌ها و تعیین درصد اجزای تشکیل دهنده آنها با استفاده از طیف سنج انرژی پرتو ایکس (EDX) انجام شد. جهت تعیین ساختار بلوری نانوسیم‌ها و همچنین بررسی اثر ولتاژ انباشت و دمای تابکاری بر روی ساختار بلوری نانوسیم‌ها از تحلیل پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. برای مطالعه ریخت‌شناسی نانوسیم‌ها و همچنین مشخص شدن قطر و طول نانوسیم‌های ساخته شده، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد استفاده قرار گرفت.

که باعث می‌شود در مرحله آندی کردن دوم حفره‌ها با نظم بیشتری روی آن طرح‌ها تشکیل شوند. در همین راستا در مرحله سونش نمونه آندی شده به مدت ۱۵ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد با استفاده از محلول اسید کرومیک ۴/۰ مولار و اسید فسفریک ۵/۰ مولار انجام شد. پس از آن نمونه‌ها شسته و خشک شدند و برای مرحله آندی کردن دوم آماده شدند. در آندی کردن مرحله دوم، قالب‌های به دست آمده از آندی کردن اول در یک سلول الکتروشیمیایی حاوی محلول اسید اکسالیک ۳/۰ مولار به مدت یک ساعت در دمای ۱۵ درجه سانتیگراد و تحت ولتاژ ثابت ۴۰ ولت قرار گرفتند.

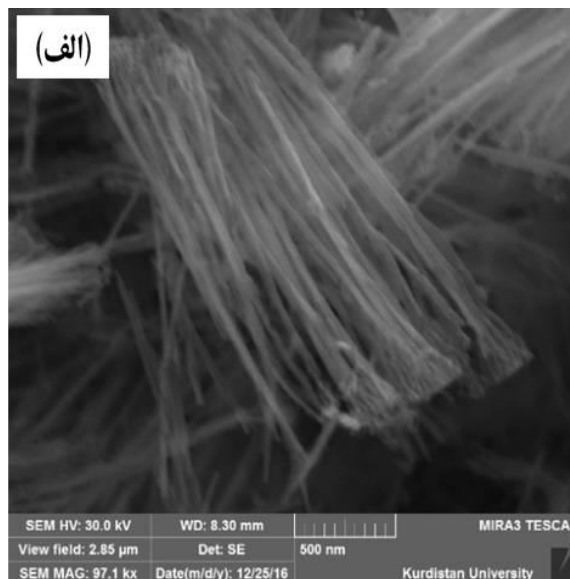
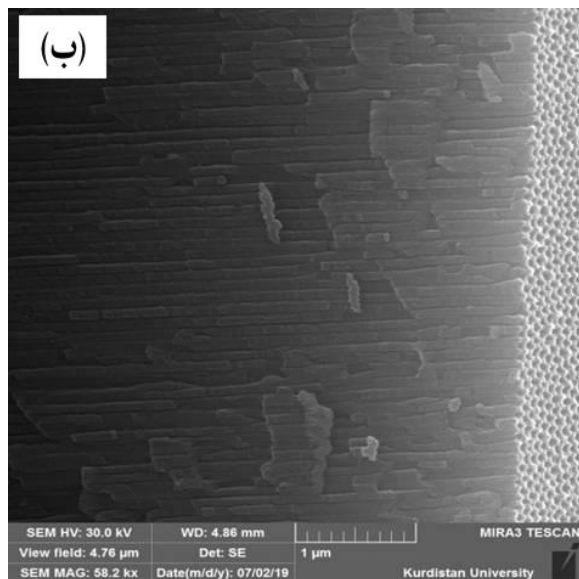
با توجه به این که در این پژوهش برای انباشت نانوسیم‌های فلزی از الکتروانباشت شیمیایی جریان متناوب استفاده می‌شود لایه سدی ایجاد شده در انتهای حفره‌ها مقاومت الکتریکی زیادی دارد و امکان انتقال الکترون از لایه سدی و بنابراین امکان انباشت با روش متناوب وجود ندارد. به همین منظور برای کاهش ضخامت و در نتیجه مقاومت لایه سدی، ولتاژ آندی کردن به صورت پله‌ای از ۴۰ تا ۸ ولت کاهش داده می‌شود. بعد از یک ساعت آندی کردن ابتدا ولتاژ از ۴۰ تا ۲۰ ولت با گام‌های ۲ ولتی، از ۲۰ ولت تا ۱۰ ولت با گام‌های یک ولتی و از ۱۰ تا ۸ با گام‌های نیم ولتی کاهش داده شد، فاصله زمانی همه گام‌ها ۳۰ ثانیه است. در نهایت نمونه‌ها (قالب‌ها) در ولتاژ ۸ ولت به مدت ۳ دقیقه در همان شرایط نگه داشته شدند. با این کاهش پله‌ای ولتاژ، ضخامت لایه سدی کاهش یافت و در نتیجه قالب‌ها جهت انباشت نانوسیم‌ها داخل حفره‌های آن آماده شدند.

### ۲.۲.۲. الکتروانباشت آهن-قلع در قالب آلومینیوم آندی

مرحله الکتروانباشت متناوب به طور سریع بعد از مرحله آندی کردن دوم انجام شد، زیرا پس از کاهش پله‌ای ولتاژ در مرحله آندی کردن دوم ضخامت لایه سدی ته حفره به آستانه‌ای که در آن پدیده‌های کوانتومی امکان وقوع دارند، رسید. در این حالت الکترون می‌تواند تونل زنی کند و امکان برقراری جریان یونی به درون حفره از طریق اتصال ولتاژ به نمونه را فراهم

۱. X-Ray Diffraction

۲. Scanning Electron Microscope



شکل ۱. تصویر SEM (الف) نانوسیم‌های آهن-قلع و (ب) قالب AAO.

### ۳. نتایج و بحث

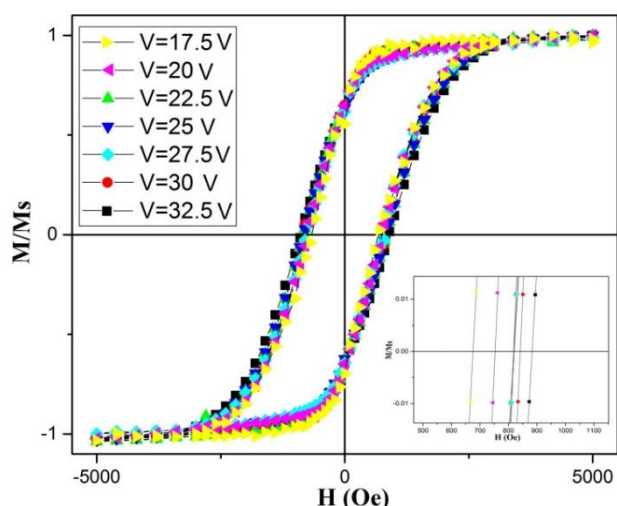
#### ۳.۱. ساختار شناسی

تصویر SEM نانوسیم‌های انباشت شده در قالب در ولتاژ ۳۰ ولت پس از جدا شدن از قالب و همچنین قالب AAO که برای ساخت همه نمونه‌ها استفاده شد در شکل ۱، نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود نانوسیم‌های ساخته شده دارای قطری در حدود ۸۴ nm و طولی در حدود ۲/۶ میکرومتر هستند. در تصویر قالب حفره‌های منظم و یکنواخت که نانوسیم‌ها در داخل آنها تشکیل می‌شوند به خوبی دیده می‌شود که نشان می‌دهد فرایند آندایز دومرحله‌ای موفقیت‌آمیز بوده است.

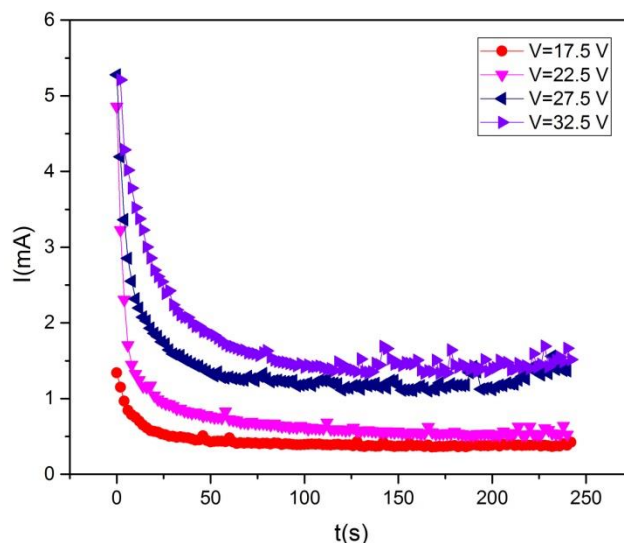
#### ۳.۲. نمودار جریان- زمان انباشت

شکل ۲، نمودار جریان برحسب زمان برای نانوسیم‌های انباشت شده در ولتاژهای مختلف انباشت را نشان می‌دهد. نمودار بیان می‌کند با افزایش ولتاژ انباشت جریان نهایی انباشت افزایش می‌یابد، بنابر قانون اهم می‌توان گفت با توجه به ثابت بودن مقاومت در انباشت‌های انجام شده، با افزایش ولتاژ، جریان نهایی انتقال یون‌ها افزایش می‌یابد. در شکل دیده می‌شود که

برای همه ولتاژها جریان با زمان کاهش می‌یابد به خصوص در مرحله نخست انباشت، که دلیل آن را می‌توان اینطور بیان کرد که در هنگام نازک سازی لایه سدی (با کاهش پله‌ای ولتاژ)، همانطور که در تصاویر SEM هم دیده می‌شود، انتهای حفره‌ها مانند ریشه‌های درخت چند شاخه شده و در نتیجه در انتهای هر حفره چندین مسیر جدید برای عبور الکترون‌ها از لایه سدی ایجاد می‌شود که در ابتدای انباشت از تمام این مسیرهای انتهای حفره‌ها، الکترون‌ها از لایه سدی گذشته و جریان زیادی را ایجاد می‌کنند. اما در با گذشت زمان انباشت، شاخه‌های انتهایی پر شده و بنابراین همه مسیرها یکی می‌شوند و همچنین الکترون‌ها پس از انتقال از لایه سدی با مقاومت داخل نانوسیم هم برای برقراری جریان روبرو می‌شوند و همین باعث کاهش سریع جریان انباشت می‌شود. علاوه بر این دلیل دیگر کاهش جریان می‌تواند فرایند هسته‌زایی باشد به طوری که جریان بالا در ابتدای فرایند انباشت می‌تواند ناشی از آهنگ زیاد هسته‌زایی در ابتدای انباشت باشد و همچنین غلظت یون‌های فلزی در ابتدا در انتهای حفره‌ها زیاد است اما بعد از چند میلی ثانیه انتهای حفره‌ها تهی از یون می‌شود و در نتیجه در الکترولیت حفره مقاومت افزایش می‌یابد که این پدیده در روش انباشت DC مشاهده شده است [۱۴].



شکل ۳. حلقه‌های پسماند نانوسیم‌های آهن-قلع تهیه شده در ولتاژهای متفاوت انباشت.



شکل ۲. جریان انباشت نانوسیم‌های ساخته شده با ولتاژهای متفاوت.

جدول ۱. نتایج EDX نانوسیم‌های ساخته شده در ولتاژهای متفاوت در دمای اتاق.

| ولتاژ انباشت (ولت) | درصد عنصر آهن | درصد عنصر قلع |
|--------------------|---------------|---------------|
| ۲۰                 | ۸۶/۲          | ۱۳/۲          |
| ۲۵                 | ۸۷/۰          | ۱۲/۱          |
| ۳۰                 | ۸۹/۱          | ۱۰/۸          |

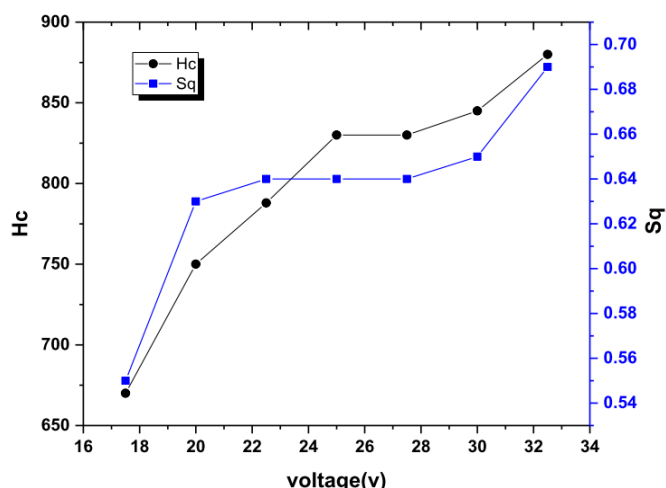
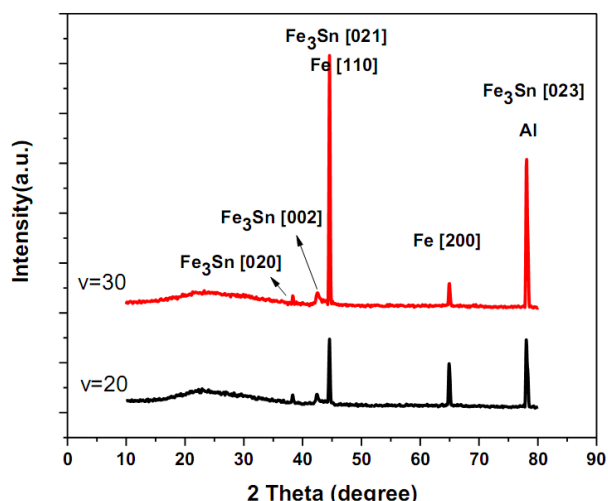
توجه به مقادیر به دست آمده در جدول، با افزایش ولتاژ انباشت، مقدار بیشتری از یون‌های آهن موجود در محلول الکترولیت در قالب انباشت می‌شود.

تغییر خواص مغناطیسی نانوسیم‌ها با تغییر ولتاژ انباشت می‌تواند به دلیل تغییر در ساختار بلوری و در نتیجه ناهمسانگردی نانوسیم‌ها باشد. بنابراین برای بررسی این احتمال نانوسیم‌های انباشت شده در دو ولتاژ مختلف توسط پراش پرتو ایکس مطالعه شدند. شکل ۵ طرح پراش پرتو ایکس نانوسیم‌های انباشت شده در دو ولتاژ متفاوت ۲۰ و ۳۰ ولت را نشان می‌دهد. قله‌های مربوط به ساختار (bcc) آهن آلفا و ساختار (hcp) آلیاژ  $Fe_3Sn$  با توجه به کارت استاندارد [۹۸-۰۰۶-۰۸۲۶] برای آهن آلفا و کارت استاندارد [۹۸-۰۰۰-۸۵۳۶] برای آلیاژ آهن-قلع و همچنین با استناد بر

### ۳.۳. بررسی اثر ولتاژ

دستگاه مغناطیس سنج گرا دیان نیروی متناوب (AGFM) ساخت شرکت کویر مگنتیس کاشان به منظور بررسی خواص مغناطیسی نانوسیم‌های ساخته شده در قالب، مورد استفاده قرار گرفت. حلقه‌های پسماند مربوط به نانوسیم‌ها با درصد بهینه قلع (۲/۵ درصد در محلول الکترولیت)، در ولتاژهای متفاوت انباشت در شکل ۳ آمده است. با استفاده از حلقه‌های پسماند، میدان وادارندگی و نسبت مربعی نانوسیم‌ها تعیین شد و به صورت نموداری در شکل ۴ آورده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ، انباشت میدان وادارندگی و نسبت مربعی نانوسیم‌ها افزایش می‌یابد. در تحقیقی مشابه که اثر ولتاژ انباشت بر روی خواص مغناطیسی نانوسیم‌های  $NiZn$  انجام شده است نتایج نشان داده است که با افزایش ولتاژ میدان وادارندگی افزایش می‌یابد [۱۵]. می‌توان افزایش میدان وادارندگی در اثر افزایش ولتاژ را ناشی از تاثیر ولتاژ انباشت بر آهنگ هسته‌زایی و رشد نانوسیم‌ها دانست که با افزایش ولتاژ انباشت سرعت هسته‌زایی زیاد می‌شود [۱۶].

به منظور بررسی اثر ولتاژ انباشت بر روی ترکیب شیمیایی نانوسیم‌های تهیه شده آهن-قلع، نمونه‌ها توسط تحلیل EDX بررسی شدند که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. با



شکل ۴. میدان وادارندگی و نسبت مربعی نانوسیم‌های تهیه شده در شکل ۵. طرح پراش پرتو ایکس نانوسیم‌های تهیه شده در دو ولتاژ متفاوت.

جدول ۲. اطلاعات به دست آمده از XRD برای نانوسیم‌های انباشت شده در دو ولتاژ ۲۰ و ۳۰ ولت.

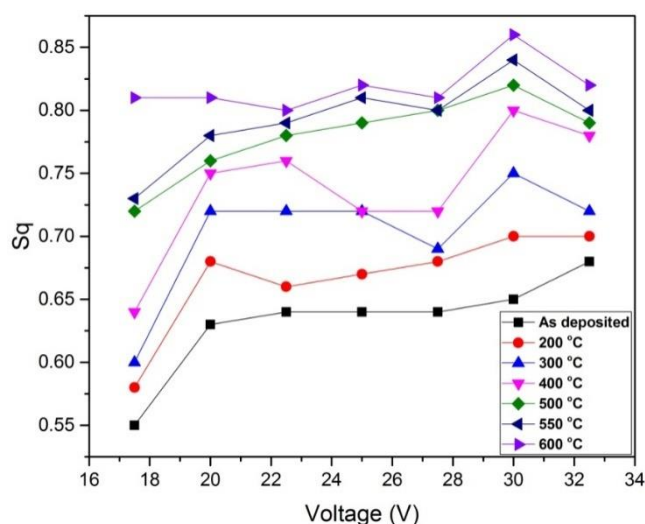
| نانوسیم انباشت شده در ولتاژ ۲۰ ولت |             |            |                | نانوسیم انباشت شده در ولتاژ ۳۰ ولت |             |            |                |
|------------------------------------|-------------|------------|----------------|------------------------------------|-------------|------------|----------------|
| فاصله                              | اندازه صفحه | شاخص میلر  | زاویه $\theta$ | فاصله                              | اندازه صفحه | شاخص میلر  | زاویه $\theta$ |
| صفحات Åd                           | D(nm)       | صفحه بلوری |                | صفحات Åd                           | D(nm)       | صفحه بلوری |                |
| ۲/۴                                | ۱۲/۸        | hcp (۰۲۰)  | ۳۸/۳۴          | ۲/۶                                | ۱۰/۰        | hcp (۰۲۰)  | ۳۸/۳۱          |
| ۱/۲                                | ۱۷/۷        | hcp (۰۰۲)  | ۴۲/۵۴          | ۱/۱                                | ۱۵/۷        | hcp (۰۰۲)  | ۴۲/۴۵          |
| ۱/۱                                | ۲۸/۷        | hcp (۰۲۱)  | ۴۴/۱۰          | ۱/۱                                | ۲۶/۸        | hcp (۰۲۱)  | ۴۴/۱۰          |
| ۰/۹                                | ۶۹/۰        | bcc (۲۰۰)  | ۶۴/۹۵          | ۰/۹                                | ۴۰/۳        | bcc (۲۰۰)  | ۶۴/۹۲          |
| ۰/۸                                | ۹۰/۱        | hcp (۰۲۳)  | ۷۸/۱۱          | ۱/۲                                | ۸۴/۵        | hcp (۰۲۳)  | ۷۸/۱۰          |

توجه به این که از نانوسیم‌ها در داخل قالب AAO الگوی پراش گرفته شده است و موقعیت همه نانوسیم‌ها نسبت به پرتو فرودی یکسان و ثابت است، بنابراین فقط صفحه‌های بلوری که جهت‌گیری خاصی دارند قله مربوط به آنها در الگوی پراش ظاهر می‌شود و این می‌تواند بیان‌کننده راستای قرارگیری این صفحه‌ها نسبت به محور نانوسیم باشد که این خود تعیین‌کننده محور آسان ناهمسانگردی بلوری است [۱۷ و ۱۸].

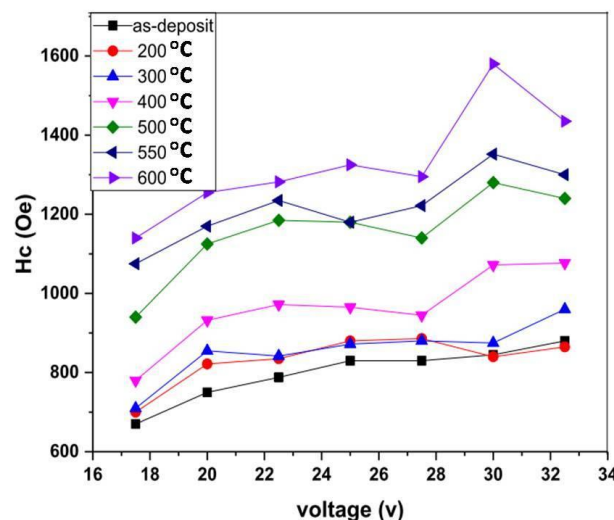
#### ۴.۳. اثر تابکاری حرارتی روی نانوسیم‌ها

برای مشخص کردن ولتاژ بهینه انباشت، عملیات تابکاری حرارتی روی نانوسیم‌ها انجام گرفت. شکل ۶ و شکل ۷ به

مقاله ترکیبیات بین فلزی آهن- قلع [۱۴] مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۵ با افزایش ولتاژ انباشت، شدت قله‌ها نیز افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند بیان‌کننده بلوری‌تر شدن ساختار نانوسیم‌ها و در نتیجه افزایش ناهمسانگردی بلوری است. جهت بررسی بهتر اندازه صفحه‌های بلوری با استفاده از معادله دبای شرر از روی پهنای قله‌ها محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. محاسبات نشان می‌دهد افزایش ولتاژ انباشت باعث افزایش اندازه تمام صفحه‌های بلوری (که قله مربوط به آنها در الگوی پراش ظاهر شده بود) شده است که افزایش ناهمسانگردی بلوری را تأیید می‌کند و توجیه خوبی برای افزایش میدان وادارندگی با افزایش ولتاژ انباشت است. با



شکل ۷. اثر تابکاری بر نسبت مربعی نانوسیمها در ولتاژهای متفاوت.



شکل ۸. اثر تابکاری بر میدان وادارندگی نانوسیمها در ولتاژهای متفاوت.

میدان وادارندگی است. به همین منظور ساختار بلوری نانوسیمها با استفاده از پراش پرتو ایکس مورد مطالعه قرار گرفت [۲۱].

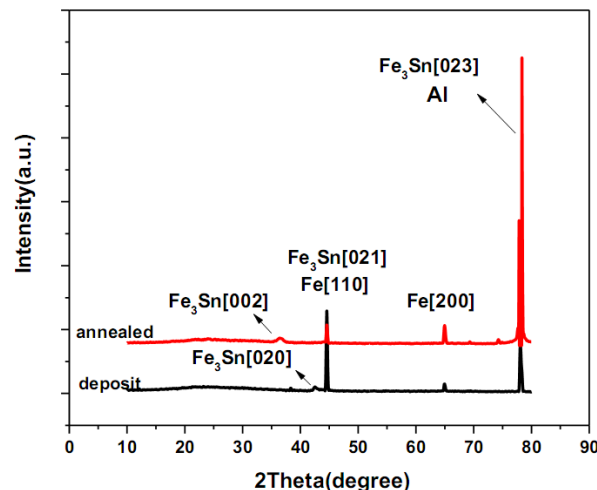
جهت بررسی اثر تابکاری بر روی ساختار نانوسیمها طرح پراش پرتو ایکس نانوسیمهای انباشت شده با ولتاژ ۳۰ ولت در pH=۳/۵ قبل از تابکاری حرارتی و بعد از تابکاری حرارتی در شکل ۸، نشان داده شده است. مشاهده می شود بعد از تابکاری، شدت قلهها افزایش چشمگیری داشته و این به معنای بلوری تر شدن و منظم تر شدن ساختار بلوری نانوسیمهاست. در این نمونهها نیز ساختار بلوری مرکز حجمی (bcc) مربوط به آهن آلفا و ساختار بلوری هگزاگونال (hcp) باهم وجود دارد.

#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق اثر ولتاژ انباشت بر روی خواص مغناطیسی و ساختاری نانوسیمهای آهن-قلع بررسی شد. نتایج به دست آمده از حلقههای پسماند نشان داد با افزایش ولتاژ انباشت، میدان وادارندگی نانوسیمها افزایش می یابد. باتوجه به طرح پراش پرتو ایکس نمونهها مشخص شد با افزایش ولتاژ انباشت، ناهمسانگردی بلوری در نانوسیمها افزایش می یابد که همین

ترتیب میدان وادارندگی نانوسیمهای تابکاری شده در دماهای مختلف با ولتاژهای انباشت متفاوت و نسبت مربعی آنها را نشان می دهند. نمودار نشان می دهد میدان وادارندگی برای تمام نمونهها با تابکاری افزایش می یابد و نانوسیم انباشت شده با ولتاژ ۳۰ ولت و تابکاری شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد دارای بیشترین تغییرات میدان وادارندگی و همچنین بیشترین نزدیک شدگی نسبت مربعی به یک است. در اثر تابکاری حرارتی با افزایش دمای تابکاری، از میزان تنش های وارده بر ساختار بلوری ناشی از انباشت سریع کاسته می شود و همچنین نواقص ساختار بلوری نیز تا حدودی رفع می شود که همین امر باعث افزایش میدان وادارندگی نانوسیمها در اثر تابکاری می شود [۱۹ و ۲۰]. علاوه بر این ضریب انبساط گرمایی آلومینا بیشتر از نانوسیمها در دمای اتاق است و چون رشد نانوسیم در امتداد عمود بر محور محدود است بنابراین نانوسیمها در امتداد سیم افزایش می یابند. این باعث بهبود ناهمسانگردی شکلی می شود [۲۰]. تغییر اندازه صفحات بلوری یکی دیگر از اثرات مهم تابکاری است که این تغییر در ناهمسانگردی بلوری را در پی خواهد داشت. ناهمسانگردی بلوری با تاثیر بر روی انرژی لازم برای چرخش حوزه های مغناطیسی و در نتیجه ایجاد محور آسان و سخت مغناطیسی عامل بسیار مهمی در تعیین

علت افزایش میدان وادارندگی در نانوسیمها است. نتایج مطالعه اثر تابکاری بر روی نانوسیمها نشان داد که میدان وادارندگی و نسبت مربعی برای همه نانوسیمهای تهیه شده با افزایش دمای تابکاری افزایش می یابد، به طوری که بیشترین افزایش مربوط به نانوسیم تهیه شده در ولتاژ ۳۰ ولت است. بررسی طرح پراش پرتوایکس مربوط به نانوسیمهای قبل و بعد از تابکاری مشخص کرد که شدت قله ها پس از تابکاری افزایش یافته که این بیانگر افزایش میزان بلورینگی در نانوسیمها و در نتیجه افزایش ناهمسانگردی بلوری و بنابراین بهبود خواص مغناطیسی (میدان وادارندگی و نسبت مربعی) آنها با تابکاری است.



شکل ۸ طرح پراش اشعه ایکس نانوسیمهای تهیه شده در ولتاژ ۳۰ ولت قبل و بعد از تابکاری.

## مراجع

1. S Aalaye, P Kameli, H Salamati, and H Arabi, *IJPR*. **12** (2013) 361.
2. B Mohammadi, A A Ashkarran, and M Mahmoudi, *IJPR*. **16** (2017) 359.
3. M Mardaani, H Rabani, and Z Baharloo, *IJPR*. **13** (2013) 197.
4. J M D Coey, "Magnetism and magnetic materials", Cambridge University Press (2010).
5. S Hosseini, M Almasi Kashi, A Ramazani, and F Eshaghi, *IJPR*. **11** (2011) 181.
6. R Golipour, A Khayyatian, A Ramazani, and M Almasi Kashi, *IJPR*. **7** (2007) 73.
7. M Irfan, U Khan, W Li, W Kong, K Javed, and X F Han, *Journal of Alloys and Compounds* **691** (2017) 1.
8. S Yang, H Zhu, D Yu, Z Jin, S Tang, and Y Du, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **222** (2000) 97.
9. M Najafi, Z Alemipour, and F Rajabi, *Journal of science and technology of composite* **4** (2017) 255.
10. A Naeem, kh Suleman, I Arman, A Muhammad, A Sh Saqlain, A Ishfaq, J Nyla, M Abdul, and I Javed, *Appl. Phys. A*. **123** (2017) 1.
11. M Tian, J Wang, J Snyder, J Kurtz, Y Liu, P Schiffer, T E Mallouk, and M H W Chan, *Appl. Phys. Lett.* **83** (2003) 1620.
12. X Gao, I E Wachs, M S Wong, and J Y Ying, *Journal of Catalysis* **203** (2001) 18.
13. G Binnig, C F Quate, C Gerber, *Phys. Rev. Lett.* **56** (1986) 930.
14. T M Whiney, J S Jiang, P C Searson, and C L Chien, *Science* **261**(1993) 1316.
15. N Ahmad, S Khan, W J Li, M Saddique, and S A Shah, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **441** (2017) 696.
16. C X Cui, B L Wang, W Yang, and J B Sun, *Journal of Crystal Growth* **324** (2011) 168.
17. H Giefers, M Nicol, *Journal of alloys and compounds* **422** (2006) 132.
18. B Astinchap, Z Alemipour, MJ Faraji, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **498** (2020) 166245.
19. D H Qin, L Cao, Q Y Sun, Y Huang, and H L Li, *Chem. Phys. Lett.* **358** (2002) 484.
20. M Koohbor, S Soltanian, M Najafi, and P Servati, *Materials Chemistry and Physics* **131** (2012) 728.
21. M Najafi, Z Alemipour, I Hasanzadeh, A Aftabi, S Soltanian, and J Supercond. Nov. Magn. **28** (2015) 95.