

## مقاله پژوهشی

# بررسی اثر تغییر طول بر خواص ساختاری و مغناطیسی نانوسیم‌های آهن ساخته شده به روش الکتروانباشت پالسی AC

نسرین قزکوب\*

گروه فیزیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۲/۱۰/۰۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۲/۱۲/۰۷، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

## چکیده

نانوسیم‌های آهن با درجه بلوری بالا، قطر یکسان و طول‌های متفاوت (۵/۵، ۲/۳ و ۱/۵ میکرومتر) به روش الکتروانباشت پالسی AC درون قالب اکسید آلومینیوم آندی (AAO) ساخته شدند. مشخصه‌یابی ساختاری و مغناطیسی نانوسیم‌ها توسط آنالیزهای پراش پرتوی ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی، طیف‌نگاری پراکندگی انرژی و مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی انجام شد. الگوهای پراش پرتوی ایکس تاییدکننده ساختار بلوری bcc نانوسیم‌های آهن با جهت مرجح (۱۱۰) با ثابت شبکه ۲٫۸۷ آنگستروم است. الگوی پراش پرتوی ایکس به همراه طیف‌نگاری پراکندگی انرژی نشان‌گر نبود ناخالصی در نانوسیم‌ها بودند. اندازه‌گیری‌های مغناطیسی نشان داد که با افزایش طول نانوسیم‌ها، وادارندگی مغناطیسی و نسبت مربعی ( $M_r/M_s$ ) به ترتیب از ۱۹۸۲ به ۱۸۷۰ ارستد و از ۰٫۷۷ به ۰٫۶۶ در حالت میدان اعمال شده موازی محور نانوسیم کاهش یافته و همچنین در وضعیت میدان اعمالی عمود بر نانوسیم، وادارندگی از ۵۸۰ به ۴۳۵ ارستد و نسبت مربعی از ۰٫۳۹ به ۰٫۲۳ کاهش یافته است. دلیل اول آن است که با افزایش طول نانوسیم‌ها، نسبت  $L/D$  (طول نانوسیم/قطر نانوسیم) از ۱۰ بیشتر شده که باعث غلبه اندرکنش مغناطوستاتیک بر ناهمسان‌گردی شکلی شده است. دلیل دوم آن که افزایش طول نانوسیم‌ها باعث انتقال ساختار مغناطیسی از حالت تک حوزه به حالت چند حوزه شده که موجب کاهش در خواص مغناطیسی نانوسیم‌ها می‌شود. این دلایل باعث افزایش اندرکنش مغناطوستاتیک بین نانوسیم‌ها گشته که نتیجه آن، کاهش وادارندگی مغناطیسی و نسبت مربعی است. وابستگی وادارندگی و نسبت مربعی به طول نانوسیم‌ها، نشان‌گر آن است که می‌توان با کنترل شرایط ساخت به تنظیم خواص مغناطیسی نانوسیم‌ها پرداخت.

**واژه‌های کلیدی:** نانوسیم‌های آهن، قالب اکسید آلومینیوم آندی، الکتروانباشت پالسی AC، خواص مغناطیسی.

## ۱- مقدمه

ذخیره انرژی هستند [۱،۲]. تحقیقات گسترده‌ای بر روی نانوسیم‌های مغناطیسی کبالت، نیکل و آهن و آلیاژهای آن‌ها انجام شده است. از مزایای نانوسیم‌های آهن آن است که آهن دارای مغناطش بزرگی است که برای کاربردهای

نانوسیم‌های مغناطیسی دارای کاربردهای فراوان در زمینه‌هایی مانند حافظه‌های مغناطیسی با چگالی بالا، نانوحسگرها و

\* عهده‌دار مکاتبات: نسرین قزکوب

نشانی: گروه فیزیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

تلفن: ۰۶۱-۳۳۳۴۸۴۲۰، دورنگار: ۰۶۱-۳۳۳۲۹۲۰۰، پست الکترونیکی: nghazkoob@yahoo.com

استفاده شد. در زمینه عوامل موثر بر خواص مغناطیسی نانوسیم‌های آهن ساخته شده به روش الکتروانباشت، پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. ابتدا در پژوهش‌ها به بررسی اثر اسیدیته محلول و دمای لایه سدی در فرآیند الکتروانباشت [۲۱]، دمای محلول و کسر پرشدگی قالب اکسید آلومینیوم در روش الکتروانباشت [۲۲] بر خواص مغناطیسی نانوسیم‌ها پرداخته شده است. در پژوهش دیگری نانوسیم‌های آهن به روش الکتروانباشت پالسی ساخته شده و تاثیر عواملی مانند غلظت مولی و دمای محلول، شرایط هم زدن، مدت زمان خاموشی و چگالی جریان بر درصد پرشدگی قالب اکسید آلومینیوم و خصوصیات مغناطیسی نانوسیم‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۲۴]. بررسی‌های بیشتر نشان داد که یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر رفتار مغناطیسی نانوسیم‌های با ساختار مکعبی مانند نانوسیم‌های آهن، ناهمسان‌گردی شکلی است که وابسته به مشخصات هندسی نانوسیم‌ها یعنی طول و قطر نانوسیم‌ها است [۲۰]. جهت بررسی این موضوع پژوهش‌های مختلفی انجام گردیده است. برای نانوسیم‌های آهن ساخته شده به روش الکتروانباشت dc، اثرات ناشی از شرایط الکتروود کار در الکتروانباشت dc، غلظت یون‌های فلزی و تغییر قطر و طول نانوسیم بر خواص مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است [۳] و علاوه بر آن شبیه‌سازی میکرومغناطیسی (Micromagnetic simulations) این وابستگی انجام گردیده [۲۳] و مشخص شد که با تغییر نسبت طول نانوسیم به قطر نانوسیم، رفتار مغناطیسی نانوسیم‌ها تابع عواملی مانند غیرهمگن بودن نانوسیم‌ها، نقص‌های ساختاری، حرکت دیواره‌های حوزه مغناطیسی و ناهماهنگی در زاویه بین نانوسیم‌ها است [۲۳-۳۴].

بررسی نانوسیم‌های چند لایه‌ای مانند (Fe)Co/Cu ساخته شده به روش الکتروانباشت هم نشان داد که خصوصیات مغناطیسی نانوسیم‌های چند لایه مانند نانوسیم‌های تک لایه، وابسته به مشخصات هندسی نانوسیم‌ها و خصوصاً نسبت طول به قطر نانوسیم‌ها است [۳۴].

ذخیره‌سازی بسیار مفید است و ساختار کریستالی مکعبی دارد که ناهمسان‌گردی مغناطیبلوری نسبتاً کوچکی را نشان می‌دهد. بنابراین، تنها ناهمسان‌گردی شکلی و برهمکنش‌های مغناطیساتیک عمدتاً رفتار مغناطیسی نانوسیم‌های آهن را تعیین می‌کنند که این دو هم تابع عوامل مختلفی از جمله مشخصات هندسی نانوسیم‌ها هستند [۳،۴]. لازم به ذکر است که یکی از مشکلات ساخت نانوسیم‌های آهن مربوط به اکسید شدن است که با کمک روش‌های ساخت مناسب، برطرف گردیده است [۵]. چون روش ساخت نانوسیم‌ها بر درجه بلوری، نظم و خصوصیات مغناطیسی آن‌ها تاثیر زیادی دارد، لذا در دهه‌های اخیر، استفاده از قالب برای ساخت نانوسیم‌ها [۶] و مخصوصاً نانوسیم‌های مغناطیسی [۷] مورد توجه قرار گرفته است. قالب‌های مختلف، از جمله قالب آلومینای متخلخل آندی [۸]، پلیمر [۹]، پلی کربنات [۱۰] و قالب نرم [۱۱] برای ساختن نانوساختارهای یک‌بعدی مانند نانوسیم‌ها استفاده شده است. قالب اکسید آلومینیوم آندی (AAO) به دلیل ساختار حفره‌ای یکنواخت، موازی و ابعاد حفره‌ای تنظیم‌پذیر توسط شرایط ساخت [۱۵-۱۲] گزینه مناسبی برای ساخت نانوساختارها با مناطق سطحی بزرگ و درجه نظم بالا است. مواد متنوعی با استفاده از پر کردن قالب اکسید آلومینیوم آندی به روش‌هایی مانند رسوب الکتروشیمیایی، CVD (رسوب شیمیایی بخار)، MOCVD (رسوب بخار شیمیایی فلزات آلی) و سل-ژل ساخته شده‌اند [۱۶]. پس بلور شدن نانوسیم‌ها در بسیاری از روش‌های پر کردن قالب اکسید آلومینیوم آندی موجب رویکرد به روشی موسوم به الکتروانباشت با ولتاژ پالسی AC گشته است [۱۷]. پر کردن قالب با روش الکتروانباشت پالسی AC، به دلیل توانایی در تنظیم دامنه و مدت زمان پالس ولتاژ و وجود زمان خاموشی برای تجدید غلظت یون‌ها در بین زمان‌های رسوب، منجر به رشد یکنواخت نانوسیم‌ها و تولید نانوسیم‌ها با درجه بلوری بالا می‌شود [۱۹-۱۷]. چون یکی از اهداف این پژوهش ساخت نانوسیم‌های آهن با درجه بلوری بالا می‌باشد لذا برای ساخت نانوسیم‌ها از روش الکتروانباشت پالسی AC

طبق بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که در زمینه ساخت نانوسیم‌های آهن به روش‌های الکتروانباشت مانند الکتروانباشت dc، اثر مشخصات هندسی نانوسیم‌ها بر خصوصیات مغناطیسی بررسی شده است ولی برای نانوسیم‌های آهن ساخته شده به روش الکتروانباشت پالسی AC چنین بررسی صورت نگرفته است. لذا ساخت نانوسیم‌های آهن با درجه بلوری بالا به روش الکتروانباشت پالسی AC با قطر یکسان و طول متفاوت و بررسی اثرات تغییر طول نانوسیم‌ها بر خواص مغناطیسی آن‌ها، هدف این پژوهش قرار گرفت زیرا از طریق مشخص شدن نوع وابستگی خصوصیات مغناطیسی نانوسیم‌ها به مشخصات هندسی مانند طول نانوسیم‌ها، می‌توان شرایط ساخت نانوسیم‌ها را تنظیم کرده و به خصوصیات مغناطیسی مشخصی جهت کاربردهای عملی دست یافت. در این مقاله، نانوسیم‌های آهن با قطر یکسان و طول متفاوت از طریق پرکردن قالب اکسید آلومینیوم آندی به روش الکتروانباشت پالسی AC ساخته شدند و خصوصیات ساختاری و مغناطیسی نانوسیم‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

از قالب AAO برای ساخت نانوسیم‌های آهن استفاده شد. جزئیات ساخت قالب در گزارش قبلی ما موجود است [۲۵]. ابتدا ورقه آلومینیوم با خلوص ۹۹/۹۹ درصد در مجاورت گاز آرگون تاب کاری شد. پس از آن، الکتروپولیش در محلول اتانول (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) و پرکلریک اسید (HClO<sub>4</sub>) با نسبت حجمی ۴ به یک و تحت ولتاژ ثابت ۲۰ ولت انجام شد. برای دستیابی به آرایه منظمی از حفره‌ها، فرآیند آندایز دو مرحله‌ای استفاده شد. در مرحله اول آندایز، فویل آلومینیوم در محلول ۰/۳ مولار اگزالیک اسید (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) تحت ولتاژ ثابت ۴۰ ولت و دمای ۱۷ درجه سانتی‌گراد آندایز شد، سپس لایه آلومینای تشکیل شده توسط محلول فسفریک اسید (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) و کرومیک اسید (H<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>) حذف شد. آندایز مرحله دوم

در شرایطی کاملاً یکسان با مرحله اول انجام شد. برای نازک‌سازی لایه سدی آلومینای تشکیل شده در انتهای آرایه حفره‌ها، ولتاژ آندایز به صورت پلکانی از ۴۰ ولت به ۲۰ ولت کاهش یافت. این کار باعث تشکیل انشعاباتی در قسمت انتهایی حفره‌ها شده و موجب تسهیل در فرآیند الکتروانباشت می‌شود [۲۶]. به منظور تثبیت لایه سدی، آندایز به مدت ۳ دقیقه در ولتاژ نهایی ادامه یافت.

برای الکتروانباشت نانوسیم‌های آهن درون نانوحفره‌های قالب AAO، از یک حمام الکتروشیمیایی متشکل از ۰/۳ مولار سولفات آهن ۷ آبه (FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O)، ۴۵ گرم در لیتر بوریک اسید (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) و برای کاتالیزور از ۱ گرم در لیتر آسکوربیک اسید (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>) استفاده شد [۲۷]. در این حمام از سیستم دو الکترودی یعنی قالب AAO به عنوان الکترود کاتد و الکترودی از پلاتین به عنوان آند در انباشت استفاده شد. فرآیند الکتروانباشت پالسی AC در دمای ۳۰ °C و با استفاده از موج سینوسی با ولتاژ کاهش ۱۴ ولت، ولتاژ اکسایش ۱۲ ولت، زمان کاهش و اکسایش ۵ میلی‌ثانیه، زمان خاموشی ۲۵ میلی‌ثانیه و چگالی جریان ۵۰ mAcm<sup>-2</sup> انجام شد [۲۷]. برای جلوگیری از اکسید شدن آهن، بهبود ساختار بلوری و خواص مغناطیسی نانوسیم‌ها، تاب کاری در جریان گاز آرگون و در دمای ۵۵۰ °C به مدت ۳۰ دقیقه انجام گردید [۲۷-۲۵]. برای تغییر طول نانوسیم‌ها از محلول ۰/۳ مولار فسفریک اسید (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) در دمای ۳۰ °C و در مدت زمان‌های ۴۰ و ۶۰ دقیقه استفاده شد.

برای بررسی ساختار بلوری، ریخت‌شناسی و خواص مغناطیسی نانوسیم‌ها به ترتیب از آنالیزهای پراش پرتوی ایکس (XRD) دستگاه پرتو ایکس مدل PW ۱۸۴۰ ساخت شرکت فیلیپس در گستره زاویه‌ای ۲۰ تا ۹۰ درجه با تابش K $\alpha$  لامپ آند مس به طول موج ۱/۵۴۱۸ آنگستروم، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل SIGMA VP ساخت شرکت ZEISS کشور آلمان، طیف‌نگاری پراکندگی انرژی (EDS) ساخت شرکت Oxford Instrument کشور انگلستان و دستگاه مغناطیس

محلول شامل سولفات مس ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) و کلریدریک اسید (HCl) استفاده شد. الگوهای پراش پرتوی ایکس نانوسیم‌های آهن با قطر یکسان و متوسط طول ۵/۵، ۲/۳ و ۱/۵ میکرومتر در شکل (۲) نشان داده شده است. الگوهای پراش به کمک نرم‌افزار X-pert High Score Plus بررسی شدند. الگوهای پراش با کارت JCPDS به شماره ۰۱-۰۸۹-۷۱۹۴ که مربوط به ساختار بلوری bcc آهن است، کاملاً مطابقت داشتند و در تمام الگوهای پراش فقط پیک (۱۱۰) مربوط به ساختار بلوری bcc آهن مشاهده شد. در این الگوها هیچ قله اضافی مبنی بر حضور ناخالصی مشاهده نشد.

خصوصیات ساختاری نمونه‌ها مانند ثابت شبکه (a) با معادله (۱)، حجم سلول واحد ( $V_{\text{cell}}$ ) با معادله (۲) و میانگین اندازه بلورک‌ها (R) با استفاده از رابطه شرر (معادله (۳)) به دست آمده است [۲۵].

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (1)$$

$$V_{\text{cell}} = a^3 \quad (2)$$

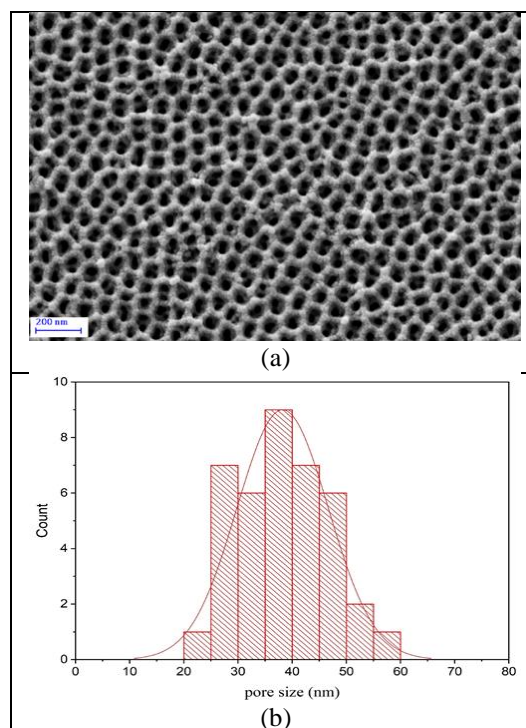
$$R = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3)$$

در روابط فوق، d فاصله صفحه‌های موازی، h، k و l اندیس‌های میلر،  $\lambda$  طول موج پرتوی ایکس با لامپ آند مس ( $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ )،  $\theta$  زاویه پراش و  $\beta$  پهنای قله در نصف ارتفاع بیشینه (FWHM) است. ثابت شبکه، حجم سلول واحد و میانگین اندازه بلورک‌ها به ترتیب برابر  $2.87 \text{ \AA}^3$ ،  $23.63 \text{ \AA}^3$  و  $1.89 \text{ nm}$  بدست آمد که با مرجع شماره [۲۸] هم‌خوانی دارد.

سنج‌نمونه ارتعاشی (VSM) ساخت شرکت مغناطیس دقیق کویر کشور ایران استفاده شد.

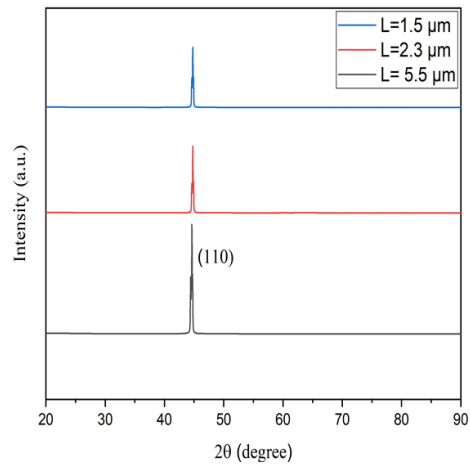
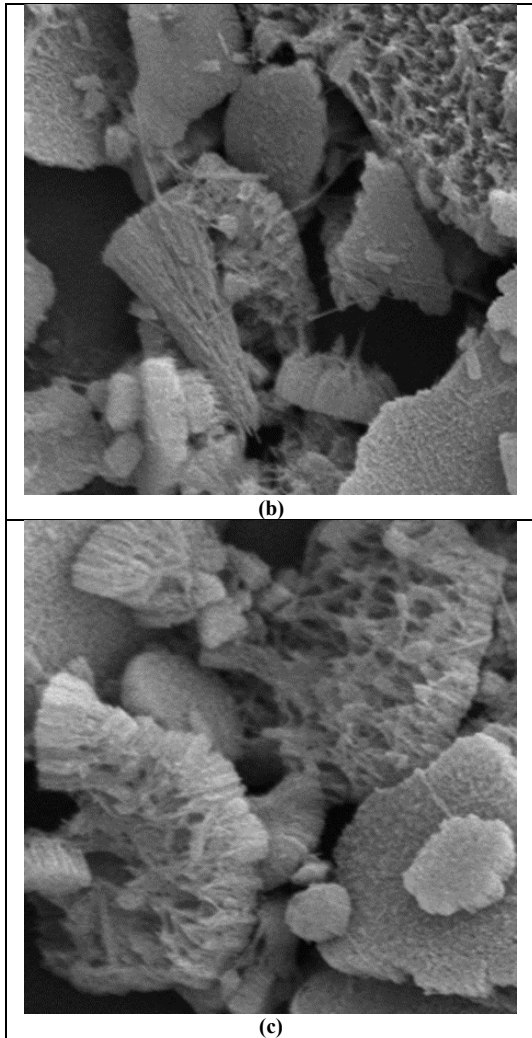
### ۳- نتایج و بحث

شکل (۱) تصویر FESEM از سطح بالای قالب AAO و نمودار توزیع اندازه قطر حفره‌ها را نشان می‌دهد. در قالب حاصل شده، متوسط قطر حفره و فاصله بین حفره‌ای به ترتیب تقریباً برابر ۳۸ و ۹۰ نانومتر است. لازم به ذکر است که خطای اندازه‌گیری قطر حفره‌ها  $\pm 2$  نانومتر است.



شکل ۱: (a) تصویر FESEM از سطح بالای قالب AAO و (b) نمودار توزیع اندازه قطر حفره‌ها.

برای آنالیز پراش پرتوی ایکس، باید آلومینیوم از پشت قالب‌ها حذف شود زیرا مقدار آلومینیوم در مقابل مقدار آهن زیاد است و حضور آلومینیوم، تحلیل الگوهای پراش را با مشکل مواجه می‌نماید. برای حذف آلومینیوم پشت قالب از

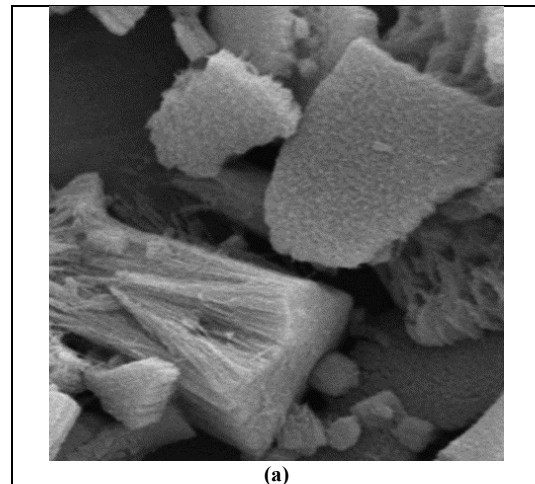


شکل ۲: الگوهای پراش پرتوی ایکس از نانوسیم‌های آهن درون قالب AAO.

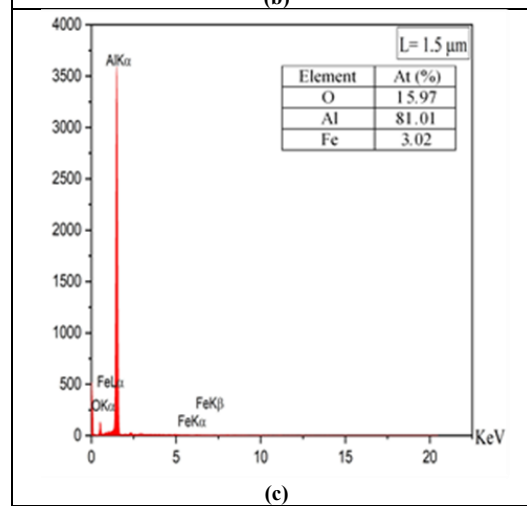
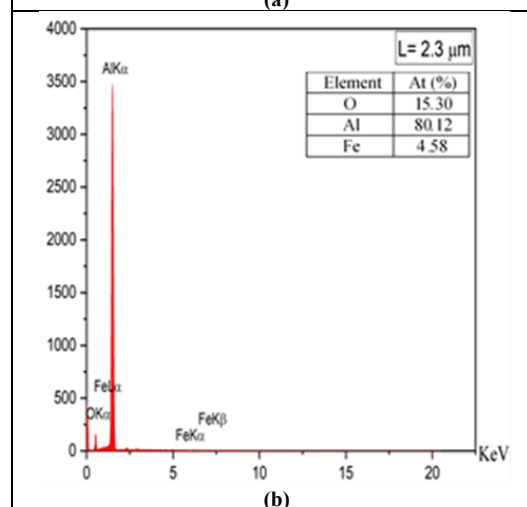
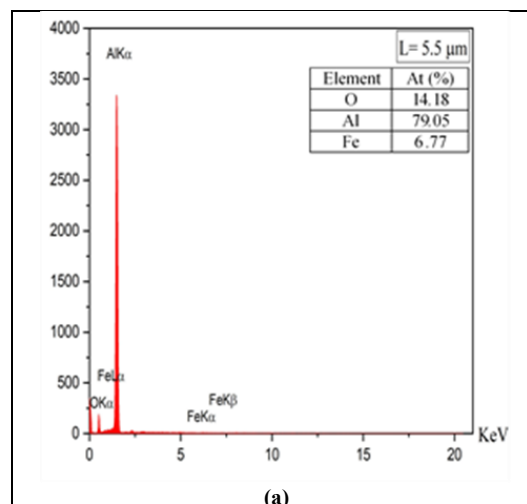
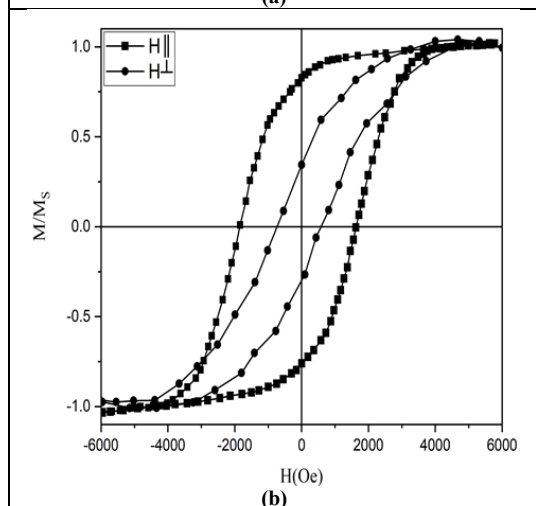
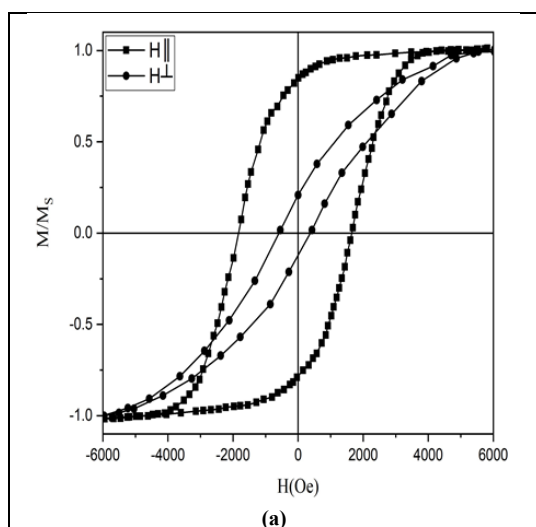
ابتدا قالب AAO در محلول ۱ مولار سدیم هیدروکسید (NaOH) قرار گرفت تا اکسید آلومینیوم حل شده و نانوسیم‌ها از قالب جدا شوند. سپس نانوسیم‌ها ۳ مرتبه با آب یون‌زدایی شده شسته شدند. شکل (۳) تصاویر FESEM نانوسیم‌های آهن با قطر یکسان و متوسط طول (a) ۵/۵، (b) ۲/۳ و (c) ۱/۵ میکرومتر را به همراه نمودار توزیع اندازه طول نانوسیم‌ها، نشان می‌دهد. خطای اندازه‌گیری طول نانوسیم‌ها برابر  $\pm 0.1$  میکرومتر است.

شکل ۳: تصاویر FESEM از نانوسیم‌های آهن جدا شده از قالب با قطر یکسان و متوسط طول: (a) ۵/۵، (b) ۲/۳ و (c) ۱/۵ میکرومتر.

شکل (۴) تصاویر EDS نانوسیم‌های آهن با قطر یکسان و متوسط طول (a) ۵/۵، (b) ۲/۳ و (c) ۱/۵ میکرومتر را در حالتی که درون قالب AAO قرار دارند، نشان می‌دهد. این آنالیز جهت بررسی عناصر موجود در نمونه انجام شد. در این طیف عنصر Fe مربوط به نانوسیم‌های آهن و عنصر Al و O مربوط به قالب اکسید آلومینیوم است. عنصر ناخالصی در تصاویر EDS مشاهده نشد.



خواص مغناطیسی نانوسیم‌های آهن در دمای اتاق و در حالتی که درون قالب AAO قرار دارند، با استفاده از مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی تا میدان اعمالی 6 kOe اندازه گرفته شد. شکل (۵) منحنی‌های پسماند را برای نانوسیم‌های با قطر یکسان و طول متفاوت، در دو حالت میدان اعمال شده موازی و عمود بر محور نانوسیم‌ها، نشان می‌دهد. مقادیر وادارندگی  $H_C$  و نسبت مربعی  $M_r/M_s$  نانوسیم‌های با قطر یکسان و طول متفاوت در جدول (۱) آورده شده است.

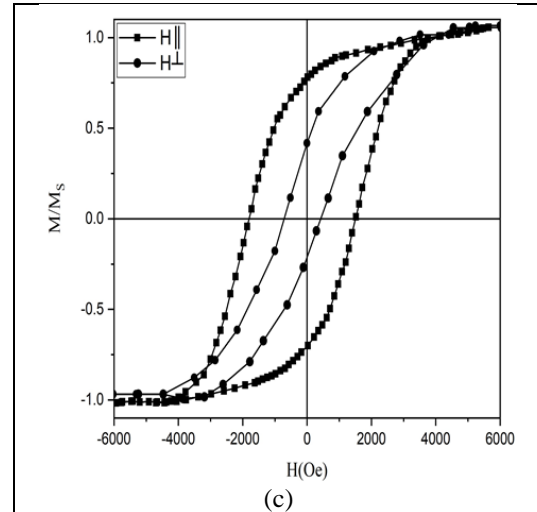


شکل ۵: آنالیز EDS نانوسیم‌های آهن درون قالب AAO.

طول نانوسیم‌ها می‌باشد که موجب کاهش در خواص مغناطیسی نانوسیم‌ها می‌شود [۱۵]. ساختار تک حوزه‌ای نانوسیم‌ها از طریق چرخش گشتاور مغناطیسی اتمی به مغناطش اشباع می‌رسند اما ساختارهای چند حوزه با حرکت حوزه مغناطیسی به اشباع می‌رسند. ولی انرژی مورد نیاز برای چرخش گشتاور مغناطیسی بیشتر از انرژی لازم برای حرکت حوزه مغناطیسی است. پس انتقال از ساختار تک حوزه به چند حوزه منجر به افزایش اندرکنش مغناطوستاتیک و کاهش خاصیت مغناطیسی شده است [۳۰، ۳۱].

علت تفاوت حلقه‌های پسماند برای یک طول مشخص در دو حالت میدان موازی و عمود بر نانوسیم‌ها به ناهمسان‌گردی شکلی و عامل وامغناطش برمی‌گردد. برای نانوسیم‌های با طول زیاد، عامل وامغناطش در راستای محور نانوسیم (محور آسان) برابر صفر و در راستای عمود بر نانوسیم (محور سخت) برابر  $\pi^2$  است. وقتی میدان در راستای محور آسان نانوسیم اعمال می‌شود، حرکت دیواره‌های حوزه‌ها اتفاق می‌افتد؛ اما در حالتی که میدان در راستای محور سخت است، چرخش مغناطش حوزه‌ها رخ می‌دهد که انرژی لازم برای چرخش مغناطش حوزه‌ها بیشتر از انرژی مورد نیاز برای حرکت دیواره‌های حوزه مغناطیسی است [۲۹].

پژوهشی که در آن نانوسیم‌های آهن که با طول متفاوت و به روش الکتروانباشت پالسی AC درون قالب AAO ساخته شده باشند، جهت مقایسه یافت نشد و در سایر پژوهش‌ها از روش‌های ساخت متفاوت استفاده شده بود. در پژوهش‌هایی از طریق بررسی خصوصیات مغناطیسی نانوسیم‌های آهن با طول و قطر متفاوت که از طریق الکتروانباشت درون قالب AAO ساخته شده بودند، مشخص شد که وادارندگی نانوسیم‌های با قطر کمتر از ۲۰ نانومتر تقریباً به‌طور خطی با افزایش نسبت  $L/D$  افزایش می‌یابد و در  $L/D \geq 10$  به حداکثر مقدار می‌رسد ولی در قطر ۳۰ نانومتر رفتار مغناطیسی شبیه رفتار حالت توده‌ای ماده می‌شود که این رفتارها می‌تواند ناشی از تاثیر حالت‌های گردشار و اندرکنش بین نانوسیم‌ها باشد [۳۲، ۳۳].



شکل ۵: منحنی‌های پسماند نانوسیم‌های آهن با قطر یکسان و متوسط طول: (a) ۵/۵، (b) ۲/۳ و (c) ۱/۵ میکرومتر.

از بررسی شکل ۵ مشخص می‌شود که منحنی‌های پسماند مربوط به میدان اعمال شده موازی محور نانوسیم‌ها، به دلیل افزایش ناهمسان‌گردی شکلی نانوسیم‌ها، فرم مستطیلی مناسب‌تری دارند. پس محور آسان مغناطیسی موازی با نانوسیم‌ها است [۲۹].

جدول (۱) نشان می‌دهد که با افزایش طول نانوسیم‌ها، در هر دو حالت میدان اعمال شده موازی و عمود بر محور نانوسیم‌ها، مقادیر وادارندگی  $H_C$  و نسبت مربعی  $M_r/M_s$  نانوسیم‌ها کاهش یافته است. کاهش مقادیر وادارندگی و نسبت مربعی نانوسیم‌ها با افزایش طول ناشی از دو دلیل می‌باشد. دلیل اول مربوط به ناهمسان‌گردی شکلی است. سهم ناهمسان‌گردی شکلی با نسبت  $L/D$  (طول نانوسیم/قطر نانوسیم) مشخص می‌شود. بررسی‌ها نشان داده که اگر نسبت  $L/D$  بیش‌تر از ۱۰ شود، افزایش اندرکنش مغناطوستاتیک بین نانوسیم‌ها موجب کاهش وادارندگی و نسبت مربعی می‌گردد [۳۰]. این نسبت برای نانوسیم‌های ساخته شده در این پژوهش، بیش‌تر از ۳۵ می‌باشد و نشان‌گر آن است که با افزایش طول نانوسیم‌ها، اندرکنش مغناطوستاتیک بر ناهمسان‌گردی شکلی غلبه یافته و موجب کاهش وادارندگی و نسبت مربعی شده است [۲۹، ۳۰]. علت دوم مربوط به انتقال ساختار مغناطیسی از حالت تک حوزه به چند حوزه با افزایش

به منظور بررسی اثرات تغییر طول نانوسیم‌ها بر خواص مغناطیسی، نانوسیم‌های مغناطیسی آهن با قطر یکسان و طول‌های متفاوت (۵/۵، ۲/۳ و ۱/۵ میکرومتر) درون قالب اکسید آلومینیوم آندی ساخته شدند. الگوهای پراش پرتوی ایکس تایید کننده ساختار بلوری bcc نانوسیم‌های آهن با جهت مرجع (۱۱۰) است. الگوی پراش پرتوی ایکس و طیف‌نگاری پراکندگی انرژی نشانگر عدم وجود ناخالصی در نانوسیم‌ها بودند. اندازه‌گیری‌های مغناطیسی نشان داد که با افزایش طول نانوسیم‌ها، نسبت  $L/D$  (طول نانوسیم/قطر نانوسیم) از ۱۰ بیشتر شده که منجر به غلبه اندرکنش مغناطوستاتیک بر ناهمسان‌گردی شکلی شده است. علاوه بر این، افزایش طول نانوسیم‌ها موجب انتقال ساختار مغناطیسی از حالت تک حوزه به حالت چند حوزه شده است. ساختار تک حوزه‌ای از طریق چرخش گشتاور مغناطیسی اتمی به مغناطش اشباع می‌رسند اما ساختارهای چند حوزه با حرکت حوزه مغناطیسی به اشباع می‌رسند. چون انرژی مورد نیاز برای چرخش گشتاور مغناطیسی بیشتر از انرژی لازم برای حرکت دیواره‌های حوزه مغناطیسی است، پس این انتقال ساختار مغناطیسی موجب کاهش در خواص مغناطیسی نانوسیم‌ها می‌شود. این دو دلیل باعث افزایش اندرکنش مغناطوستاتیک بین نانوسیم‌ها گشته که در نتیجه آن، وادارندگی مغناطیسی و نسبت مربعی  $(M_r/M_s)$  کاهش می‌یابد. وابستگی وادارندگی و نسبت مربعی به طول نانوسیم‌ها نشان می‌دهد که با کنترل شرایط ساخت نانوسیم‌ها، می‌توان به تنظیم خواص مغناطیسی نانوسیم‌ها جهت کاربردهای عملی پرداخت.

### سپاسگزاری

نویسنده این مقاله بدین وسیله مراتب قدردانی و تشکر خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز بواسطه پشتیبانی فنی از این کار اعلام می‌دارد.

در پژوهش دیگری، نانوسیم‌های آهن با قطر یکسان و طول متفاوت از ۳/۶ تا ۲۱/۲ میکرومتر به روش الکتروانباشت dc ساخته شده و بررسی خصوصیات مغناطیسی در حالتی که میدان اعمال شده موازی محور نانوسیم‌ها است، نشان داد که در نانوسیم‌های با طول کوتاه‌تر از ۷ میکرومتر، وادارندگی مغناطیسی رفتار غیریکنواختی دارد که ناشی از غیرهمگن بودن نانوسیم‌ها و نقص‌های ساختاری می‌باشد. در نانوسیم‌های بلندتر از ۷ میکرومتر، وادارندگی و نسبت مربعی با زیاد شدن طول سیم، افزایش یافته که با مدل حرکت دیواره‌های حوزه مغناطیسی، هم‌خوانی دارد. در حالتی که میدان عمود بر نانوسیم‌ها بود، تغییرات وادارندگی و نسبت مربعی رفتار غیریکنواختی نشان دادند که می‌تواند ناشی از ناهماهنگی در زاویه بین نانوسیم‌ها باشد [۳]. همچنین بررسی نانوسیم‌های آهن ساخته شده به روش الکتروانباشت dc و با نسبت  $L/D$  بزرگ (بزرگ تر از ۱۰۰۰) نشان داده که عامل اصلی در تعیین خصوصیات مغناطیسی این نانوسیم‌ها، ناهمسان‌گردی شکلی است و با افزایش نسبت  $L/D$ ، وادارندگی افزایش می‌یابد [۳۴].

جدول ۱: خصوصیات مغناطیسی نانوسیم‌های آهن با قطر یکسان و طول‌های متفاوت.

$H_c(Oe)$	$M_r/M_s$	$L(\mu m)$	
1982	0.77	1.5	H // Wires
1929	0.72	2.3	H // Wires
1870	0.66	5.5	H // Wires
580	0.39	1.5	H $\perp$ Wires
546	0.31	2.3	H $\perp$ Wires
435	0.23	5.5	H $\perp$ Wires

### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، برای ساخت نانوسیم‌های آهن با درجه بلوری بالا از روش الکتروانباشت پالسی AC استفاده شد و



## مراجع

- [17] H. Wei, Q. Xu, D. Chen, M. Chen, M. Chang, X. Ye, *Solar Energy*, **241**, 2022, 592.
- [18] M. Almasi Kashi, A. Ramazani, Z. Fallah, *Journal of Alloys and Compounds*, **509**, 2011, 8845.
- [19] Z. Haji jamali, M. Almasi kashi, A. Ramazani, *Journal of Nanostructures*, **5**, 2015, 61.
- [20] P. Yang, H. Ruan, Y. Sun, R. Li, Y. Lu, C. Xiang, *Nanotechnology*, **31**, 2020, 395708.
- [21] [۲۱] S.F. Akhtarianfar, A. Ramazani, M. Almasi-Kashi, *Applied Physics A*, **379**, 2018, 124.
- [22] M. Kac, A. Mis, B. Dubiel, K. Kowalski, A. Zarzycki, I. Dobosz, *Materials*, **14**, 2021, 4080.
- [23] C. David, W. Kappel, E.A. Patroi, E. Manta, V. Midoni, *Revue Roumaine des Sciences Techniques-Serie Electrotechnique et Energ*, **67**, 2022, 9.
- [24] J. Azevedo, C.T. Sousa, J. Ventura, A. Apolinario, A. Mendes, J.P. Araujo, *Materials Research Express*, **1**, 2014, 015028.
- [25] N. Ghazkoob, M. Zargar Shoushtari, I. Kazeminezhad, S.M. Lari Baghal, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **537**, 2021, 168113.
- [26] W. Cheng, M. Steinhart, U. Go sele, R.B. Wehrspohn, *Journal of Materials Chemistry*, **17**, 2007, 3493.
- [27] A. Ramazani, M. Almasi Kashi, V. Bayzi Isfahani, M. Ghaffari, *Applied Physics A*, **98**, 2010, 691.
- [28] S. Mirbt, B. Sanyal, C. Isheden, B. Johansson, *Physical Review B*, **67**, 2003, 155421.
- [29] L. Sun, Y. Hao, C.L. Chien, P.C. Searson, *IBM Journal of Research and Development*, **49**, 2005, 79.
- [30] D. Sellmyer, M. Zheng, R. Skomski, *Journal of Physics: Condensed Matter*, **13**, 2001, R433.
- [31] L. Bao, G. Yun, N. Bai, Y. Cao, *Applied Physics Express*, **14**, 2021, 085505.
- [32] H. Xiang, D. M. Jiang, J.C. Yao, Y.P. Zheng, W. Lu, G.Q. Li, H. Saito, S. Ishio, X.W. Tan, Y.Q. Lin, *Journal of Physics*, **266**, 2011, 012022.
- [33] I.S. Dubitskiy, A.H.A. Elmekawy, E.G. Iashina, S.V. Sotnichuk, K.S. Napolskii, D. Menzel, A.A. Mistonov, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **34**, 2021, 539.
- [34] M. Vazquez, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **543**, 2022, 168634.
- [1] J.A. Moreno, C. Bran, M. Vazquez, J. Kosel, *IEEE Transactions on Magnetics*, **57**, 2021, 800317.
- [2] U. Khan, A. Nairan, M. Irfan, S. Naz, D. Wu, J. Gao, *Journal of Alloys and Compounds*, **912**, 2022, 165133.
- [3] A.H.A. Elmekawy, E. Iashina, I. Dubitskiy, S. Sotnichuk, I. Bozhev, D. Kozlov, K. Napolskii, D. Menzel, A. Mistonov, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **532**, 2021, 167951.
- [4] A.B. Shevchenko, M.Y. Barabash, O.V. Oliinyk, O.V. Stepanov, *Results in Physics*, **44**, 2023, 106133.
- [5] A. Panahi, D. Chang, M. Schiemann, A. Fujinawa, X. Mi, J.M. Bergthorson, Y.A. Levendis, *Applications in Energy and Combustion Science*, **13**, 2023, 100097.
- [6] O.A. Fayyadh, I.N.A. Arifin, A. Khairudin, J. Hassan, S. Abubakar, Z.A. Talib, S. Paiman, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **20**, 2020, 1.
- [7] N. Mansouri, N. Benbrahim-Cherief, E. Chainet, F. Charlot, T. Encinas, S. Boudinar, B. Benfedda, L. Hamadou, A. Kadri, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **493**, 2020, 165746.
- [8] D.I. Tishkevich, A.I. Vorobjova, A.V. Trukhanov, *Solid State Phenomena*, **299**, 2020, 281.
- [9] W. Kim, E. Park, S. Jeon, *Sensors*, **20**, 2020, 437.
- [10] Y. Velazquez-Galvan, J. de la Torre Medina, L. Piraux, A. Encinas, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **497**, 2020, 165992.
- [11] C. Fradin, F. Orange, S. Amigoni, C.R. Szczepanski, F. Guittard, T. Darmanin, *Journal of Colloid and Interface Science*, **590**, 2021, 260.
- [12] A. Ruiz-Clavijo, O. Caballero-Calero, M. Martin-Gonzalez, *Nanoscale*, **13**, 2021, 2227.
- [13] C. Deng, K. Kang, Z. Yu, C. Zhou, S. Yang, *The Royal Society of Chemistry*, **11**, 2021, 34410.
- [14] D. Li, A. Wu, Q. Wan, Z. Li, *Nature- Scientific Reports*, **11**, 2021, 14929.
- [15] A. Ramazani, V. Asgari, A.H. Montazer, M. Almasi Kashi, *Current Applied Physics*, **15**, 2015, 819.
- [16] Q. Wei, Y. Fu, G. Zhang, D. Yang, G. Meng, S. Sun, *Nano Energy*, **55**, 2019, 234.