

## ساخت نانو سیم‌های CoZn انباشت شده در آلومینای نانومتخلخل و مشخصه‌یابی آن با استفاده از روش پس پراکندگی رادرفورد

زینب سادات ایمانی<sup>۱</sup>، محمد ترکیهای اصفهانی<sup>۱\*</sup>، امید رضا کاکویی<sup>۲</sup> و مهسا معظمی قمصری<sup>۱</sup>

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان

۲. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران

پست الکترونیکی: torkiha@kashanu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۱۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۸/۸)

### چکیده

در این تحقیق نانوسیم‌های آلیاژ CoZn در قالب اکسید آلومینیوم متخلخل توسط تپ جریان متناوب (ac) انباشت شدند. قالب اکسید آلومینیوم از طریق آنودایز نرم دو مرحله‌ای ورقه آلومینیوم خالص ساخته شد و ریخت شناسی آن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص شد. به منظور مطالعه سیستماتیک نمونه ساخته شده، از روش‌های غیرمخرب تحلیل با باریکه یونی استفاده شد. از بین این روش‌ها تحلیل طیف پس پراکندگی رادرفورد با برخورد یون‌های پروتون با انرژی ۲۰۰۰ keV و ۲۵۰۰ keV و یون‌های هلیوم با انرژی ۲۵۰۰ keV با ماده انجام شد. تحلیل و بررسی طیف RBS نمونه به همراه شبیه سازی‌های انجام شده با کد SIMNRA، امکان تعیین غلظت، نمایه عمقی عناصر موجود در نمونه و تعیین استوکیومتری قالب آلومینا در عمق‌های متفاوت را فراهم کرد. بهترین نتایج به دست آمده مربوط به تحلیل با پروتون ۲۵۰۰ keV است که عمق نانوسیم‌های آلیاژ CoZn را برابر ۱۰ الی ۱۴ میکرومتر به دست آورد. همچنین برای صحت سنجی نتایج، از نمونه تصاویر FE-SEM تهیه شد که مؤید همخوانی با نتایج به دست آمده از روش RBS است.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل با باریکه یونی، طیف سنجی پس پراکندگی رادرفورد، اکسید آلومینیوم آندی، نمایه عمقی عناصر، نانوسیم CoZn.

### ۱. مقدمه

استفاده از قالب آلومینای نانومتخلخل روشی مناسب و آسان برای جوانه‌زنی و رشد مواد مغناطیسی با ساختارهای یک بعدی همچون نانوسیم‌ها، نانومیله‌ها و نانولوله‌ها است [۳ و ۴]. خواص نانوسیم‌ها مستقیماً به ویژگی‌های سطح قالب همچون چگالی، اندازه حفره‌ها و زبری سطح نانوحفره‌ها وابسته است،

در سال‌های اخیر، اکسید آلومینیوم متخلخل به دلیل خواص ویژه خود در زمینه‌های مختلفی نظیر جداسازی مولکولی، کاتالیز، ذخیره‌سازی انرژی، داروسازی و حسگرهای زیستی مورد توجه قرار گرفته است [۱ و ۲].

تصویربرداری برای مشخصه‌یابی نمونه به کار می‌روند. برای تحلیل نمونه از روش‌های طیف سنجی شامل لومینسانس ناشی از ذرات (هر دو پرتو ایکس و فوتون‌های نوری)، پراکندگی کشسان ذرات و غیرکشسان ذرات [۱۸] و برهمکنش‌های هسته‌ای [۱۹] یا ترکیبی از این موارد استفاده می‌شود. این تکنیک‌های تحلیل، غیرمخرب بوده و به کمک آن می‌توان به اطلاعاتی نظیر تعیین غلظت‌های نمونه (از طریق بهره‌تابش مشاهده شده)، تعیین نمایه عمقی (به وسیله اتلاف انرژی در عمق) و همچنین تحلیل ساختار نمونه (از طریق پهن شدگی لبه‌های طیف و وابستگی طیف‌ها به زاویه و خروج باریکه نسبت به نمونه) دست یافت.

پراکندگی ناکشسان (Non-RBS) به دلیل سازوکار منحصر به فرد برهمکنش پرتابه و هدف گزینه جذابی است. وقتی انرژی پرتابه یونی نزدیک یا بیش از سد کولنی اتم هدف (معمولا عناصر سبک) باشد، برهمکنش ناکشسان اتفاق می‌افتد. در این حالت، ترازهای هسته‌ای برانگیخته می‌شوند و واکنش هسته‌ای یا رزونانس هسته‌ای رخ می‌دهد. در نتیجه، سطح مقطع عناصر سبک یک یا دو مرتبه مقداری نسبت به سطح مقطع پراکندگی رادرفورد افزایش می‌یابد و به این ترتیب تحلیل کیفی و کمی عناصر سبک بهبود می‌یابد [۲۰].

در این کار پژوهشی از روش‌های پراکندگی ناکشسان با باریکه فرودی پروتون و پراکندگی کشسان با باریکه فرودی هلیوم برای تحلیل نمونه‌ها استفاده شده است و اطلاعات مرتبط با ساختار، نوع و ترکیب عناصر از توزیع انرژی و بهره‌یون‌های پس‌پراکنده قابل استخراج است. انرژی یون پس‌پراکنده به جرم اتم هدف و اتلاف انرژی ذره پرتابه در مسیر ورود به نمونه و پس از پس‌پراکندگی در مسیر خروج از نمونه وابسته است. عامل اول نوع عناصر ماده هدف را تعیین می‌کند، در حالی که عامل دوم مکان هدف در عمق نمونه را مشخص می‌کند. از آنجا که حفره‌ها در پراکندگی و در اتلاف انرژی نقش ندارند، به این ترتیب طیف انرژی پس‌پراکندگی رادرفورد نمونه متخلخل نظیر نمونه پکیده و نازک است. برای به دست آوردن اطلاعات در مورد ساختار تخلخل، می‌توان از پهن شدگی انرژی یون‌ها

لذا برای کنترل ویژگی‌های نانوسیم‌ها باید به پارامترهایی که در شکل‌گیری و بهینه‌سازی قطر حفره‌ها، ضخامت دیواره سلولی و لایه سدی قالب تأثیرگذار هستند، توجه کرد. این ویژگی‌ها با تغییر شرایط آنودایز همچون نوع الکترولیت، ولتاژ و زمان آنودایز قابل کنترل است [۵-۸]. نانوسیم‌های مغناطیسی همچون کبالت، نیکل، آهن و آلیاژهای آنها را می‌توان با روش الکتروانباشت و تجمع خود به خودی بر روی قالب اکسید آلومینیوم ساخت [۹-۱۱]. با توجه به کاربردهای گسترده این دسته از مواد، در این تحقیق، تحلیل آلمینای نانومتخلخل انباشت شده با نانوسیم‌های CoZn با استفاده از تکنیک تحلیل با باریکه یونی<sup>۱</sup> [۱۲ و ۱۳] مورد بررسی قرار گرفت.

تاکنون مطالعات زیادی برای تعیین شکل، اندازه و نحوه قرارگیری حفره‌ها در سطح ماده متخلخل از طریق میکروسکوپ‌های الکترونی (SEM<sup>۲</sup>، TEM<sup>۳</sup>) و نیروی اتمی (AFM<sup>۴</sup>) انجام گرفته است. چنین بررسی‌هایی فقط برای اندازه‌گیری خلل‌های منظم کاربرد دارند [۱۴]. همچنین روش BET<sup>۵</sup> [۱۵] و تخلخل سنج جیوه‌ای از جمله این روش‌ها هستند که در آن از ماده واسط برای تعیین توزیع اندازه و حجم خلل‌ها و سطح ویژه نمونه‌های متخلخل استفاده می‌شوند. روش‌های تحلیل با باریکه یونی با حذف این محدودیت‌ها و بهبود دقت در گزارش‌ها توانسته است در مشخصه‌یابی نمونه‌های متخلخل گام موثری برداشته و تفسیر بهتری از این دسته از نمونه‌ها ارائه دهد [۱۶ و ۱۷].

پرتوهای یونی با انرژی ۵-۱ MeV/u حاصل از شتاب دهنده‌های الکترواستاتیک برای مشخصه‌یابی سطح و نزدیک به سطح نمونه‌های جامد مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش که به نام روش تحلیل با باریکه یونی شناخته می‌شود، یک روش همه‌کاره، توانمند، بدون نیاز به آماده‌سازی نمونه و در واقع غیر مخرب است که با روش‌های مختلف تحلیل و

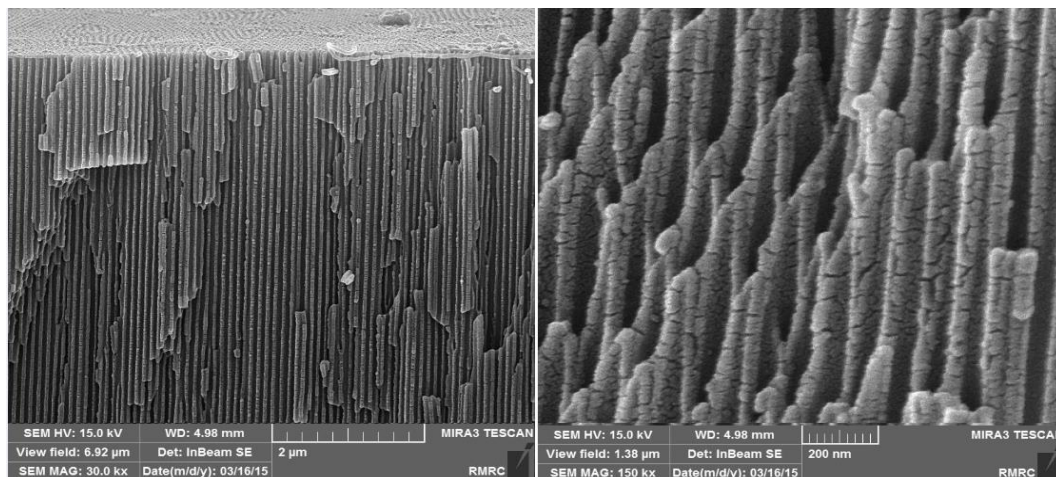
۱. Ion Beam Analysis (IBA)

۲. Scanning Electron Microscope

۳. Transmission Electron Microscope

۴. Atomic Force Microscope

۵. Braunauer, Emmet and Teller



شکل ۱. تصویر سطح مقطع قالب بعد از مرحله دوم آنودایز.

محلول تنها لایه اکسید ایجاد شده در سطح بیرونی آلومینیوم را از بین خواهد برد و به زیرلایه آلومینیوم آسیبی نمی‌رساند. همچنین دومین مرحله آنودایز برای مدت ۲ h مشابه شرایط مرحله اول انجام گرفت که منجر به تشکیل آرایه‌های بسیار منظم نانو حفره شد [۲۳]. ریخت شناسی سطح قالب آلومینای نانومتخلخل توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) بررسی شد. شکل ۱ تصاویری از مقطع نمونه بعد از فرایند آنودایز دوم نشان داده شده است که نمایشگر درجه بالای نانوحفره‌های ایجاد شده در قالب آلومینا است.

**۲.۲. فرایند عریض‌سازی حفره‌ها و کاهش لایه سطحی**  
در حین آنودایز آلومینیوم، یک لایه دی الکتریک بسیار نازک، چگال و فشرده در انتهای حفره‌ها شکل می‌گیرد که لایه سدی نام دارد [۲۴]. حضور این لایه، انباشت الکتروشیمیایی فلزات به درون حفره‌ها را تقریباً غیر ممکن می‌سازد [۲۲، ۲۴ و ۲۵]. بنابراین لازم است قبل از فرایند الکتروانباشت، قطر حفره‌ها افزایش و ضخامت لایه اکسیدی تا حد مطلوب کاهش یابد. فرایند عریض‌سازی حفره با قرار دادن نمونه آنودایز شده در محلول اسید فسفریک ۰/۳ M در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۲ min صورت گرفت. سپس فرایند نازک شدن لایه سدی با کاهش گام به گام ولتاژ آنودایز از ۴۰ به ۱۴ ولت انجام

در طیف RBS استفاده کرد [۱۸]، یا از خاصیت پراکندگی ناکشسان در راستای کانال‌زنی یونی بهره برد [۲۱]. همچنین با کمک مواد پر شده در حفره‌ها اطلاعات مربوط به حفره‌ها و نیز مواد پر شده را به دست آورد.

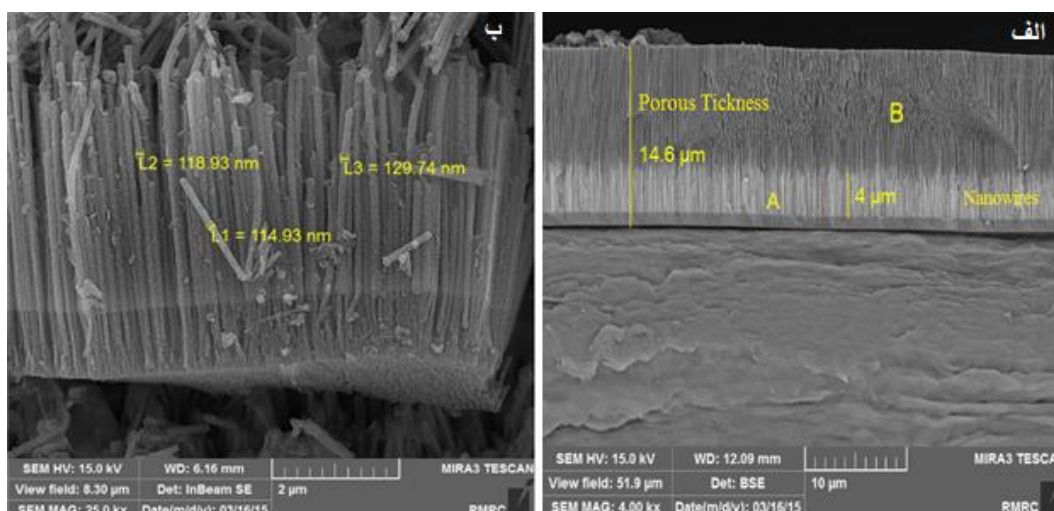
## ۲. مواد و روش کار

### ۱. ساخت آلومینیوم نانو متخلخل

قالب اکسید آلومینیوم مورد استفاده در این آزمایش، از طریق آنودایز دو مرحله‌ای [۲۲] قرص آلومینیوم با ضخامت ۰/۳ mm، قطر ۸ mm و خلوص ۹۹/۹٪ ساخته شده است. پیش از فرایند آنودایز به منظور برطرف کردن آلودگی‌های موجود در سطح آلومینیوم و تشکیل حفره‌های منظم، ابتدا ورقه آلومینیوم با استون شستشو داده شد. در ادامه با انجام فرایند الکتروپولیش در محلولی از اتانول و اسید پرکلریک (حجم ۱:۴) در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و تحت پتانسیل ۲۰V به مدت ۳/۵ دقیقه، ارتفاع ناهمواری‌های سطح کاهش یافته و نمونه کاملاً صاف و براق شد. آنودایز اولیه ورقه آلومینیوم در محلول اسید اکسالیک ۰/۳ M در دمای ۱۷ درجه سانتی‌گراد و تحت اختلاف پتانسیل ۴۰V به مدت ۵ h ساعت انجام گرفت. برای از بین بردن لایه اکسید سطحی ایجاد شده در مرحله اول آنودایز، از محلول اسید فسفریک ۰/۵ M و اسید کرومیک ۰/۲ M در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ h استفاده شد. لازم به ذکر است که این

جدول ۱. مشخصات نمونه ساخته شده.

شماره نمونه	زمان آندایز دوم (h)	زمان عریض سازی (min)	قطر حفره بعد از عریض سازی ( $\mu\text{m}$ )	درصد تخلخل نمونه
۱	۲	۳۲	۷۰	۴۴/۴



شکل ۲. (الف) نانو سیم های CoZn درون قالب، (ب) نانو سیم های خارج شده از قالب آلومینا به همراه ضخامت اندازه گیری شده (L1, L2, L3).

سینوسی با ولتاژهای اکسایش/کاهش ۱۸/۱۸ ولت و زمان اکسایش/کاهش ۵ ms در قالب اکسید آلومینیوم رشد یافتند. لازم به ذکر است زمان خاموشی بین تپها ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ و زمان انباشت موثر (کل زمان انباشت منهای کل زمان خاموشی بین تپها) ۶۰ s در نظر گرفته شده است. از میکروسکوپ FE-SEM برای بررسی ریخت شناسی آرایه نانو سیم ها در قالب آلومینای متخلخل استفاده شد. مطابق شکل ۲. الف ناحیه A محل انباشت نانو سیم های CoZn و ناحیه B ناحیه متخلخل بدون نانو سیم ها است. در شکل ۲. ب تصاویر نانو سیم ها پس از شکستن نمونه و خروج نانو سیم ها از قالب آورده شده است. همانطور که مشخص است نانو سیم ها مطابق الگوی قالب در کنار هم رشد یافته اند.

### ۳. شرایط آزمایش

در این پژوهش، برای انجام تحلیل های پس پراکندگی رادرفورد از شتاب دهنده و اندوگراف ۳ MeV پژوهشگاه علوم و فنون

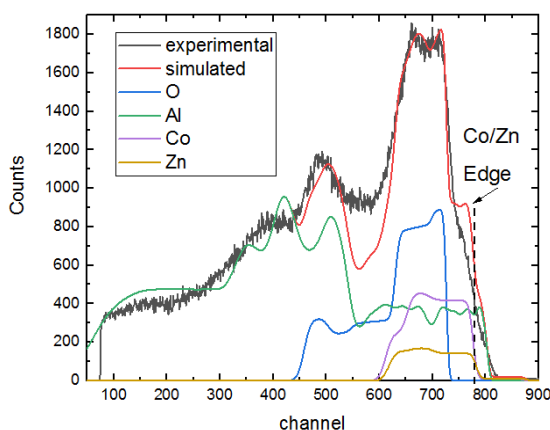
گرفت. به طور کلی در هر ۴ min عریض سازی، ۵ nm به قطر حفره ها اضافه می شود. به همین دلیل برای زمان عریض سازی ۳۲ min قطر حفره ها ۷۰ nm خواهد بود. به این ترتیب می توان درصد تخلخل نمونه را مطابق رابطه (۱) برآورد کرد [۱۷]:

$$\%P = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \left( \frac{r}{D} \right)^2 \quad (1)$$

که در آن r شعاع حفره و D فاصله بین حفره ها است. به این ترتیب درصد تخلخل نمونه برابر با ۴۴/۴٪ است. مشخصات نمونه ساخته شده در جدول ۱ آمده است.

### ۳.۲. رشد نانو سیم های CoZn

برای انباشت نانو سیم های CoZn از محلول انباشت شامل M ۰/۳ سولفات کبالت هفت آبه (CoSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O) و M ۰/۰۶ سولفات زینک هفت آبه (ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O) و ۴۵ g/l اسید بوریک (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) استفاده شد. مقدار pH محلول در ابتدا ۳/۳-۳/۵ بوده که با افزودن NaHCO<sub>3</sub>، این مقدار به ۴ افزایش یافته است. نانو سیم های CoZn به روش الکتروانباشت با اعمال موج



شکل ۳. طیف RBS و شبیه‌سازی نمونه به صورت تفکیک عناصر برای پروتون با انرژی  $2500 \text{ keV}$  به همراه لبه عناصر کبالت و روی.

طیف RBS در انرژی‌های بالا می‌تواند ناشی از ذرات موجود در سطح نمونه (که به علت افت انرژی کمتر، با انرژی بیشتری از نمونه خارج می‌شوند) و عناصر سنگین موجود در عمق نمونه (که به علت ضریب سینماتیک بزرگ‌تر، انرژی برگشتی بالاتری دارند) باشد. از این رو در شکل ۳ طیف عناصر سنگین کبالت و روی در عمق، با سیگنال عنصر سبک اکسیژن در سطح نمونه همپوشانی پیدا کرده است. لبه کبالت و روی در عمق نمونه در کانال ۸۰۰ با پهن شدگی دیده می‌شود. در نرم افزارهای موجود تمامی اثرات پهن شدگی ساختاری قابل محاسبه نیستند و تنها مواردی مانند زبری سطحی و بین لایه‌ای به صورت تقریبی قابل برآورد هستند. به دلیل زمان آنودایز پایین در ساخت نمونه، ضخامت لایه متخلخل کم است و لذا باریکه پروتون از حد فاصل بین اکسید آلومینیوم و زیر لایه آلومینیوم گذشته و مقداری از ضخامت آلومینیوم خالص توسط پروتون مورد اصابت قرار گرفته است. این اثر در دنباله طیف RBS در انرژی‌های پایین قابل مشاهده است.

با توجه به مطالب ذکر شده طیف RBS نمونه متشکل از سه بخش است. بخش اول (کانال ۸۱۵-۸۸۰)، غلظت‌های ناچیز Zn و Co موجود در سطح نمونه را نشان می‌دهد. بخش دوم (کانال ۴۲۰-۸۲۰) متشکل از لایه متخلخل  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و سیگنال‌های Zn و Co موجود در عمق نمونه است. در این ناحیه، لبه موجود در کانال ۷۸۰ مربوط به آلومینیوم بوده و

هسته‌ای استفاده شده است. باریکه‌ای از یون‌های پروتون با انرژی  $2000 \text{ keV}$  و  $2500 \text{ keV}$  و یون‌های هلیوم با انرژی  $2500 \text{ keV}$  و جریان حدود  $3-15 \text{ nA}$  به نمونه تابیده شده‌اند. جهت‌گیری نمونه تقریباً عمود بر باریکه انتخاب شد.

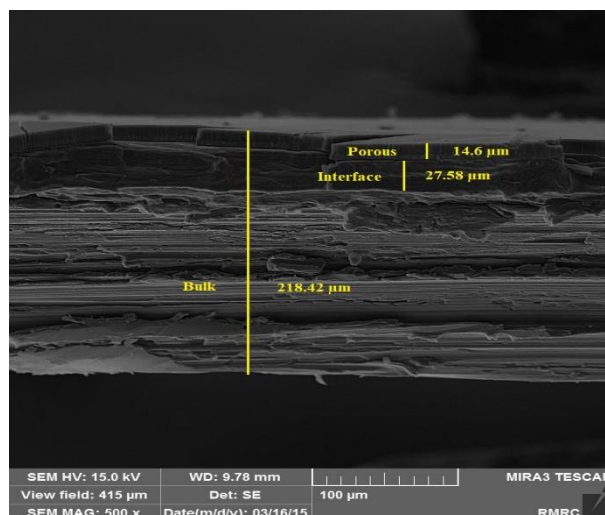
برد باریکه پروتون با انرژی  $2500 \text{ keV}$  بیش از  $20 \mu\text{m}$  است. به همین دلیل با این باریکه می‌توان محل قرارگیری عناصر انباشتی تا عمق حدود  $15 \mu\text{m}$  در نمونه را مشاهده و نمایه عمقی آنها را به دست آورد.

در روش RBS انرژی و تعداد یون‌های پس پراکنده‌شده در زاویه  $165^\circ$  درجه نسبت به امتداد باریکه فرودی، از طریق آشکارساز سد سطحی سیلیکونی اندازه‌گیری شده‌اند. قدرت تفکیک انرژی این آشکارساز  $15 \text{ keV}$  است و در تمام آزمایش‌های میزان خلأ محفظه برهمکنش به کمتر از  $2 \times 10^{-5} \text{ torr}$  رسیده است.

#### ۴. یافته‌ها و بحث

##### ۴.۱. تحلیل طیف‌های RBS با باریکه پروتون

شکل ۳ طیف تجربی و شبیه‌سازی حاصل از تابش باریکه پروتون با انرژی  $2500 \text{ keV}$  به نمونه آلومینای نانو متخلخل را به همراه نانوسیم‌های CoZn نشان می‌دهد. همچنین در این شکل، طیف پس‌پراکنده رادرفورد عناصر مختلف نمونه به صورت مجزا آورده شده است.



شکل ۴. تصویر FESEM از سطح مقطع نمونه که نشان دهنده لایه‌های مختلف نمونه است.

جدول ۲. نمای عمقی عناصر موجود در نمونه با باریکه پروتون ۲۵۰۰ keV.

CoZn (at. %)	O (at. %)	Al (at. %)	ضخامت با در نظر گرفتن تخلخل	ضخامت (μm)	ضخامت (۱۰ <sup>۱۵</sup> atom/cm <sup>۲</sup> )	لایه	نمونه
۱	۶۳	۳۶	۲/۱۶	۱/۱۵	۱۰۰۰۰	۱	آلومینای نانو
۱	۵۹	۴۰	۵/۱۳	۲/۸۷	۲۵۰۰۰	۲	متخلخل با
۲۳	۳۱	۴۶	۲/۶۱	۱/۴۶	۲۲۵۰۰	۳	نانوسیم‌های
۲۶	۲۷	۴۷	۱/۱۸	۰/۶۶	۱۰۰۰۰	۴	انباشتی
۱۵	۳۴	۵۱	۱/۴۶	۰/۸۲	۱۲۵۰۰	۵	

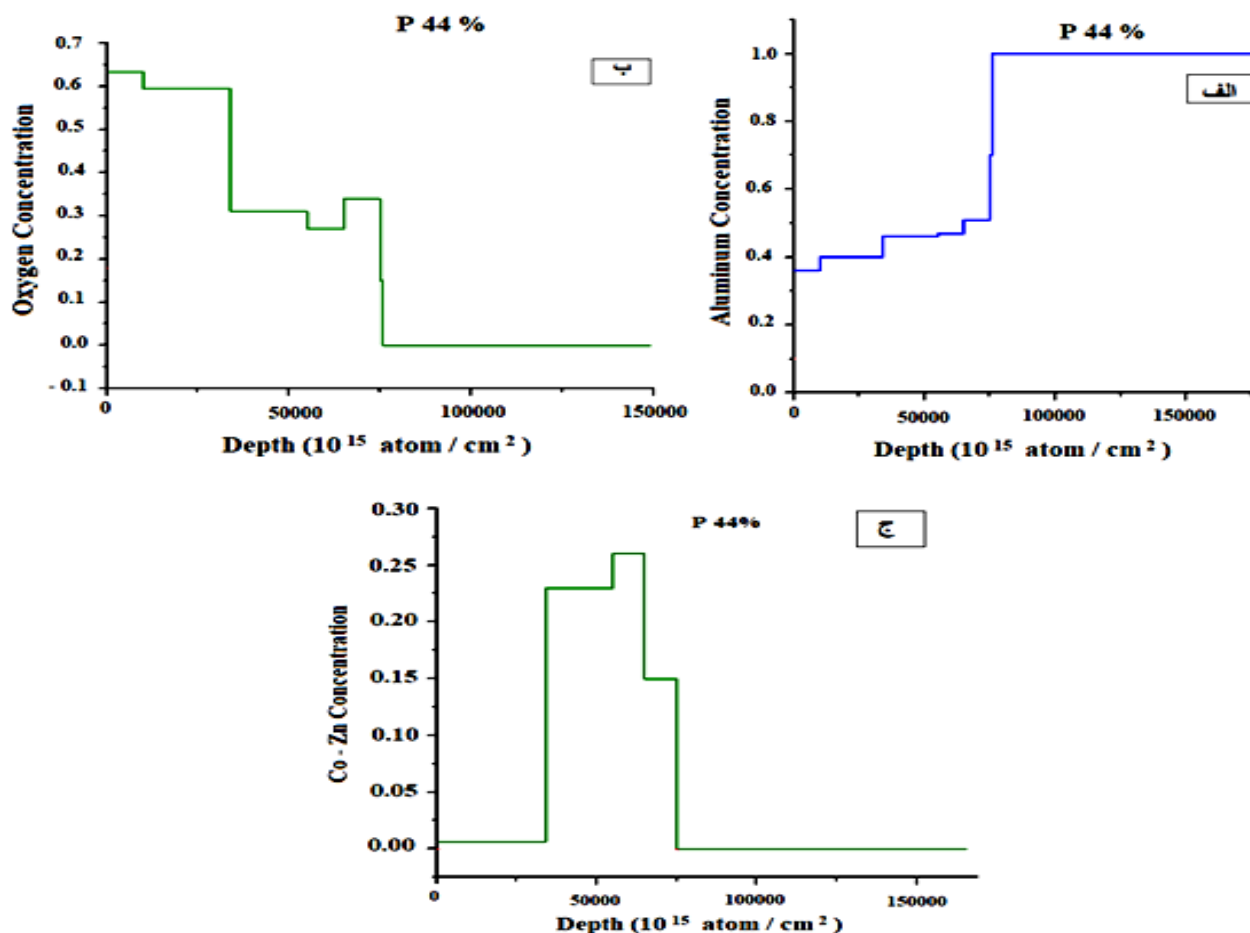
لازم بهره برد. در این کار تحقیقاتی از کد SIMNRA [۲۶] برای شبیه سازی برهمکنش باریکه پروتون با عناصر نمونه و برآورد نمای عمقی و ضخامت عناصر استفاده شده است. با برآزش طیف پس‌پراکنش رادرفورد (شکل ۳) و شبیه‌سازی‌های لازم، غلظت و نمای عمقی عناصر موجود در نمونه مطابق جدول ۲ به دست آمد. مطابق جدول ۲، ضخامت ناحیه متخلخل قبل از نانوسیم‌ها ۹ μm (ضخامت لایه ۱ و ۲) به دست آمده که با اعداد گزارش شده از تصاویر FE-SEM (شکل ۲ الف) همخوانی دارد.

همچنین در لایه ۱ و ۲ استوکیومتری آلومینا به‌طور نسبی حفظ شده و نسبت اتمی آلومینیوم به اکسیژن تقریباً ۲ به ۳ است. زیر لایه‌های ۳، ۴ و ۵ محل انباشت نانوسیم‌های CoZn است که در این ناحیه ضخامت نانوسیم‌ها، در توافق تقریبی با

سیگنال‌های Zn و Co موجود در عمق، موجب نرم شدن لبه آلومینیوم شده است. مطابق شکل ۳، لبه اکسیژن در کانال ۷۴۰ قرار گرفته و علاوه بر آن، لبه موجود در کانال ۶۶۰ ناشی از برهمکنش اکسیژن با سیگنال‌های انتهایی طیف Zn و Co است. بخش سوم (کانال ۰-۴۲۰) مربوط به آلومینیوم خالص (بستر) است. همچنین نواحی به دست آمده در طیف RBS را می‌توان در شکل ۴ مربوط به تصاویر به دست آمده از FESEM مشاهده کرد. ۱۴ میکرومتر ابتدایی ناحیه متخلخل است که به خوبی توسط باریکه پروتون تحلیل شده است.

#### ۲.۴. تعیین نمای عمقی عناصر با باریکه پروتون

در تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های IBA می‌توان از کدهای محاسباتی برای اندازه‌گیری‌های کمی و شبیه‌سازی‌های



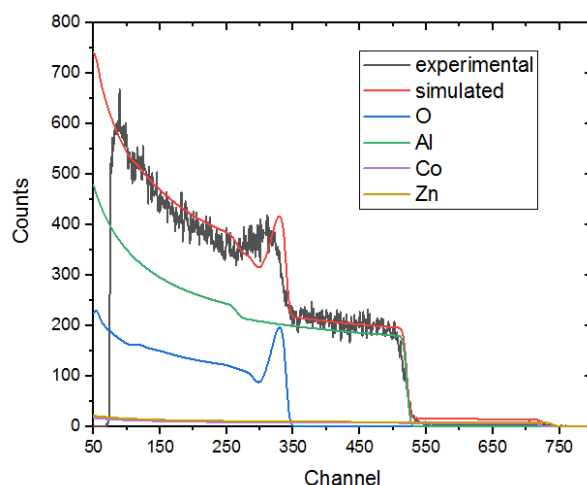
شکل ۵. نمایه غلظت بر حسب عمق عناصر (الف) آلومینیوم، (ب) اکسیژن و (ج) کبالت و روی، با باریکه پروتون در انرژی ۲۵۰۰ keV.

مجدد غلظت عناصر موجود در لایه‌های سطحی از باریکه هلیوم با انرژی ۲۵۰۰ keV استفاده شد. در شکل ۶ طیف هلیوم با استفاده از غلظت‌های جدول ۱ شبیه‌سازی شده است. با توجه به قلّه موجود در طیف، از سطح مقطع غیر رادرفوردی اکسیژن ۱۶ برای برهمکنش استفاده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطبیق خوبی با شبیه‌سازی نشان می‌دهد و برآورد جدول ۱ را تأیید می‌کند. کل لایه‌های استفاده شده در شبیه‌سازی طیف هلیوم شامل لایه یک به علاوه  $7500 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^2$  از لایه دوم جدول ۲ است. ذرات آلفا نفوذ کرده در عمق بیشتر قادر به بازگشت نیستند و آشکارسازی نمی‌شوند. این عمق در حدود ۳ میکرومتر است و در این ناحیه هیچگونه اثر قابل ملاحظه‌ای از عناصر روی و کبالت دیده نمی‌شود و نشان دهنده نفوذ کامل نانوله‌ها در عمقی بیشتر از ۳

تصاویر (شکل ۲، الف) FE-SEM، به ۵/۲۵ رسیده است. در فاصله بین لایه آلومینای متخلخل و زیر لایه آلومینیوم خالص به تدریج غلظت آلومینیوم افزایش و غلظت اکسیژن کاهش می‌یابد. در شکل ۵ نمایه عمقی آلومینیوم، اکسیژن و عناصر انباشتی موجود در نمونه با باریکه پروتون در انرژی ۲۵۰۰ keV آورده شده است. هر چه در عمق پیش می‌رویم غلظت آلومینیوم افزایش و غلظت اکسیژن کاهش می‌یابد، یعنی لایه‌های نزدیک‌تر به سطح بیشتر اکسید شده‌اند.

#### ۳.۴. تأیید نمایه عمقی عناصر با باریکه هلیوم

جرم بیشتر باریکه هلیوم نسبت به باریکه پروتون سبب عدم نفوذ آن به عمق نمونه و برهمکنش بیشتر آن با عناصر سنگین موجود در لایه‌های سطحی نمونه می‌شود. لذا برای بررسی



شکل ۶. طیف RBS و شبیه‌سازی نمونه به صورت تفکیک عناصر برای هلیوم با انرژی ۲۵۰۰ keV.

نیازی به ایجاد مقطع و نیز پوشش هادی نیست و عملاً نمونه آسیبی نمی‌بیند. علاوه بر این که روش RBS مخرب نیست، روش تحلیل سریع است و اندازه‌گیری کمی عناصر بدون نیاز به نمونه استاندارد، با این روش مقدور است. همچنین با استفاده از باریکه هلیوم در کنار پروتون، نمایه عمقی عناصر نزدیک سطح نمونه متناظر با مقادیر به دست آمده از طیف پروتون تأیید شده است.

### تشکر و قدردانی

از ریاست محترم آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای جهت فراهم کردن امکان استفاده از تجهیزات آزمایشگاه و از ریاست محترم آزمایشگاه ماده چگال دانشگاه کاشان برای در اختیار گذاشتن مواد و تجهیزات لازم برای ساخت نمونه، تشکر و قدردانی می‌شود.

میکرومتر است. جابه‌جایی کوچکی که در قله تشدید اکسیژن دیده می‌شود و همچنین پهن شدگی لبه‌های طیف در اثر پدیده شبه کانال زنی در ساختار ستونی حفره‌های موجود در سطح نمونه است [۱۳].

### ۵. نتیجه‌گیری

روش طیف سنجی پس پراکندگی رادرفورد RBS توانمندی زیادی برای بررسی نانو ساختارها و نیز مشخصه‌یابی ساختار و ترکیب مواد الکتروانباشت شده در محیط متخلخل دارد [۲۱ و ۲۶]. البته در کار پژوهشی حاضر این روش تحلیل همراه با روش میکروسکوپ روبشی الکترون SEM انجام شده است. در روش SEM لازم است تا نمونه برش داده شده و پس از اعمال پوشش رسانا، مشخصه‌یابی نمونه انجام شود ولی برای مشخصه‌یابی نانوسیم‌های الکتروانباشت شده به روش RBS.

### مراجع

1. K Ishizaki, S Komarneni, and M. Nanko, "Porous Materials: Process technology and applications" Vol. 4, Springer science & business media (2013).
2. R M Metzger, et al., *IEEE Transactions on Magnetics* **36**, 1 (2000) 30.
3. M Méndez, et al., *Crystals* **7**, 3 (2017) 66.
4. M A Kashi, A Ramazani, and Z Fallah., *Journal of alloys and compounds* **509**, 35 (2011) 8845.
5. Z Wu, C Richter, and L Menom., *Journal of the Electrochemical Society* **154**, 1 (2006) E8.
6. S Pal, et al., *Solid state communications* **151**, 24 (2011) 1994.
7. A Esmaeili, et al., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **397** (2016) 64.
8. D Crous, et al., *Applied Physics Letters* **76**. 1 (2000) 49.



9. J M Baik, M Schierhorn, and M Mosokovits., *The Journal of Physical Chemistry C* **112**, 7 (2008) 2252.
10. M A Kashi, et al., *Applied surface science* **257**, 22 (2011) 9347.
11. H Pan, et al., *The Journal of Physical Chemistry B* **109**, 8 (2005) 3094.
12. R C Bird, and J S Williams., “*Ion beams for materials analysis*”, Elsevier (1990).
13. F Pászti, and E Szilágyi., *Vacuum* **50**, 3 (1998) 451.
14. B Bhushan., “*Scanning probe microscopy in nanoscience and nanotechnology*”, Vol. 2. Springer Science & Business Media (2010).
15. J Möllmer, et al., *Microporous and Mesoporous Materials*, **129**, 3 (2010)353.
16. M Torkiha, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **266**, 8 (2008) 1507.
17. P Prieto, et al., *Surface and interface analysis* **43**, 11 (2011) 1417.
18. M Hernández-Vélez, et al., *Applied Physics A* **80**, 8 (2005) 1701.
19. H R Verma., “*Atomic and nuclear analytical methods*”, Springer (2007).
20. Z Zheng, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **118**, 1-4 (1996) 214.
21. F M Gerami, O Kakuee, and S Mohammadi., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **373** (2016) 80.
22. H Masuda, and K Fukuda., *science* **268**, 5216 (1995) 1466.
23. Z Rafati., “*The effect of pore diameter and depth on the alloy composition, crystal structure and magnetic properties of CoZn nanowires*”, University of Kashan(2013). (in persian)
24. K Nielsch, et al., *Nano letters* **2**, 7 (2002) 677.
25. G Meng, et al., *Proc Natl Acad Sci U S A* **102**, 20 (2005) 7074.
26. M Mayer., “*SIMNRA User’s Guide*”, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (2017).