

تولید و پرتونگاری نانوذرات آلومینیوم با استفاده از دستگاه انفجار الکتریکی سیم و سیستم رادیوگرافی ایکس طراحی شده

شاهین ابراهیم پور^۱، محمدتقی احمدی^۱، هادی گودرزی^۱ و میثم رحمانی^{۲*}

^۱گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، آذربایجان غربی، ایران.

^۲گروه مهندسی برق، کامپیوتر و مهندسی پزشکی، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، بوئین زهرا، قزوین، ایران.

*قزوین، بوئین زهرا، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، گروه مهندسی برق، کامپیوتر و مهندسی پزشکی، کد پستی: ۳۴۵۱۸۶۶۳۹۱.

پست الکترونیکی: meisam.rahmani@bzte.ac.ir

چکیده

تولید نانوذرات آلومینیوم و تشخیص اندازه این نانوذرات با پرتونگاری ایمن و ارزان قیمت به وسیله طراحی و ساخت تجهیزات انفجار الکتریکی سیم و رادیوگرافی پرتو ایکس از جمله اهداف مورد نظر در این تحقیق است. با استفاده از دستگاه انفجار سیم جریان های ۲۰، ۱۱۵ و ۲۵۰ آمپر به سیم آلومینیومی اعمال شده و بر پایه نتایج به دست آمده، نانوذراتی در ابعاد ۲۰ تا ۱۰۰ نانومتر به دست آمده است. جریان و نیروی قوس الکتریکی به کار رفته بر روی مقدار نانوذرات آلومینیوم پخش شده در داخل محلول، وضوح و پهنای مسیر نور لیزر و رنگ محلول تأثیرگذار است. به ازای کمینه مقدار جریان و نیرو، غلظت نانوذرات در محلول کمتر و رنگ آن شفاف تر بوده و پهنای نور لیزر دارای کمترین مقدار خود است. همچنین به ازای بیشینه مقدار جریان و نیرو، مقدار و غلظت نانوذرات پخش شده در داخل محلول بیشتر شده و محلول دارای رنگ تیره تر است. در این حالت، مسیر نور لیزر واضح تر و پهنای آن نیز دارای بیشترین مقدار است. دستگاه پرتونگاری طراحی شده مجهز به هوزینگ تیوب مولد ایکس جهت حذف سرب کوبی اتاق اشعه ایکس و افزایش ایمنی است. از طریق پرتونگاری نانویی با استفاده از تابش اشعه ایکس به نانوذرات تولیدی و با توجه به امواج ساطع شده از نانوذرات و رنگ های مشاهده شده در پرتونگاری، ابعاد نانوذرات آلومینیوم تعیین و با نتایج به دست آمده برای نانوذرات مس مقایسه شده است.

کلیدواژگان: نانوذرات آلومینیوم، انفجار الکتریکی سیم، پرتونگاری ایکس، مشخصه یابی رنگ و اندازه.

۱. مقدمه

آن است که در این محدوده ابعاد، نخستین نشانه های اثرات سطحی و دیگر خواص و ویژگی های غیرعادی موجود در نانوذرات ظاهر می شوند. اثرات سطحی و دیگر خواص به طور مستقیم با اندازه کوچک نانوذرات در ارتباط است؛ زیرا زمانی که مواد از نانوذرات تولید می شوند تعداد قابل توجهی از اتم ها بر

امروزه نانوذرات از قبیل نانوذرات فلزی و اکسیدی به دلیل دارا بودن خواص و ویژگی های فیزیکی و شیمیایی ممتاز و منحصر به فرد در زمینه های گوناگون تحقیقات و صنعت کاربرد گسترده ای دارند [۱-۳]. اصولاً نانوذرات از ذرات بسیار ریز با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر ساخته می شوند و دلیل انتخاب این مقدار

روی سطح قرار می‌گیرند. تحقیقات و پژوهش‌های انجام گرفته نشان دهنده آن است که رفتار و عملکرد مواد زمانی که در مقیاس نانو ساخته می‌شوند به‌طور قابل توجهی تغییر می‌کند که از آن جمله می‌توان به بهبود سختی و استحکام، بالا رفتن هدایت الکتریکی و حرارتی به‌عنوان نمونه‌ای از پیشرفت‌های صورت گرفته در ترکیب نانوذرات اشاره کرد [۱-۳]. نانوپودر آلومینیوم ماده‌ای خاکستری متمایل به سیاه رنگ بوده و دارای ذرات کروی است. این محصول بسیار واکنش پذیر بوده و برای حفظ مواد در مقابل رطوبت، گرما و نور خورشید استفاده می‌شود. نانوذرات آلومینیوم دارای خصوصیات هدایت الکتریکی، اپتیکی و حرارتی برجسته بوده و به دلیل ویژگی‌های ضدباکتریایی، ضد میکروبی و ضدفارچی بالا در کاربردها و فرایندهای مرتبط با سلامت، دارو، تصویربرداری تشخیصی، طراحی کاتالیزوری، صنایع نظامی و موشکی، مصارف متالورژیکی، شیمیایی، صنایع رنگ و دانه‌های رنگی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران واقع شده است [۴،۵]. مورفولوژی نانوذرات اکسید آلومینیوم کروی است و به‌صورت پودر سفید رنگ ظاهر می‌شود. نانوذرات آلومینیوم شامل مایع و جامد به عنوان مواد بسیار قابل اشتعال و محرک درجه بندی می‌شوند که می‌تواند منجر به تحریکات جدی بینایی و تنفسی شود. نانوذرات اکسید آلومینیوم اخیراً در سطح صنعتی تولید شده است و کاربردهای آن بیشتر در زمینه‌های تصفیه آب، لوازم آرایشی، پزشکی و مهندسی است. همچنین نانوذرات اکسید آلومینیوم به دلیل کاربردهای زیادی که در تصویربرداری زیستی، حس‌گرهای شیمیایی و نانو سیالات دارند مورد توجه بسیاری از محققان و پژوهشگران واقع شده است [۴،۵]. علاوه بر این نانوذرات آلومینا در مواد نیمه هادی، فرایندهای پتروشیمی و پالایش نفت خام، کنترل تولید گازهای گلخانه‌ای، صنعت سرامیک، صنعت پلاستیک و لنزهای اپتیکی مورد استفاده قرار

می‌گیرند. نانوذرات آلومینا تا حدود زیادی می‌تواند چگالی، صافی، مقاومت به سختی حرارتی و مقاومت به خزش سرامیک‌ها را بهبود داده و مقاومت محصولات پلیمری را در برابر سایش افزایش بدهد [۴،۵]. در سال حدود دوهزار تن از پودر و دانه آلومینیوم برای مصارف متالورژیکی و شیمیایی و رنگ و دانه‌های رنگی به فروش می‌رسد. همچنین به‌عنوان یک کاربرد نهایی در ترمال اسپری، متالورژی و پودرها استفاده می‌شود به‌طوری که از این پودرها به‌عنوان عامل احیا و یا پیش برنده واکنش می‌توان بهره جست. تولید نانوپودر آلومینیوم در صنعت ایران از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است و این محصول سال هاست که در ایران با مقادیر بسیار بالا تولید و عرضه می‌گردد. تاکنون روش‌های مختلفی برای سنتز نانوذرات از جمله نانوذرات آلومینیوم از قبیل نشانیدن بخار شیمیایی در محیط پلاسما، چگالش گاز خنثی با تبخیر حرارتی و انفجار الکتریکی سیم (EEW)^۱ ارائه شده است [۸-۶]. روش انفجار الکتریکی سیم یک تکنیک بالا به پایین برای تولید نانوذرات و برخی اکسید فلزات است. این رویکرد برای نخستین بار در سال ۱۷۷۴ توسط نیرن ارائه شده است. هنگامی که یک پالس جریان با دانسیته بالا که توسط تخلیه یک خازن ایجاد می‌شود از سیم عبور می‌کند، کاهش ناگهانی در قطر سیم در نقطه انفجار باعث می‌شود که دانسیته انرژی سیم به‌طور قابل توجهی بالاتر از انرژی پیوند شود که این پدیده به دلیل نرخ بالای تزریق انرژی و تاخیر انبساطی مواد گرم اتفاق می‌دهد. در این پروسه، عبور چگالی جریان ادامه دارد تا این‌که بخار به صورت غلیظ شده و تابش از سطح منتشر گردد که در این حالت ستونی از پلاسما یونیزه ایجاد می‌شود. ذرات پلاسما به سرعت سرد شده و سپس یک موج ناگهانی در محیط پراکنده می‌گردد و یک فلاش روشن می‌زند. به بیانی دیگر، تابش الکترومغناطیسی ساطع شده و مخلوط بخار فوق اشباع و قطرات جوش حاصل

^۱ Electrical Explosion of Wire

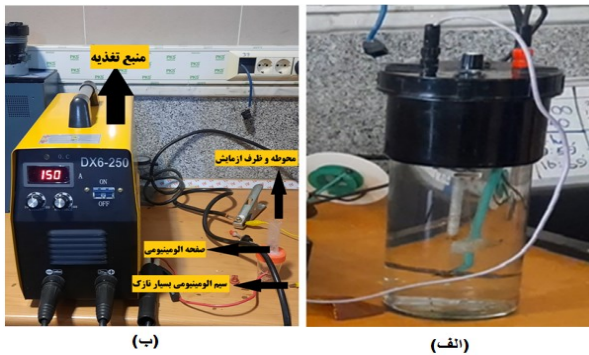
از انفجار مواد سیم تولید می‌شود. از این رو، ماده ی سیم تغییر شکل داده و متحمل هسته زایی همگن نانوذرات می‌شود [۹-۱۶]. لازم به ذکر است محیطی که در آن انفجار صورت می‌دهد مخزنی است که سیم رسانا به وسیله هد سیم به صفحه ای درون مخزن از همان نوع ماده هدایت می‌شود. در لحظه ی برخورد این دو الکتروود انفجار در یک محیط متراکم معمولاً آب یا برخی الکل‌های سنگین رخ می‌دهد و ذرات داخل محیط متراکم می‌شوند. بنابراین در اثر افزایش ولتاژ خازن و با افزایش انرژی تزریقی به فلز، میانگین اندازه نانوذرات سنتز شده کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است در روش انفجار الکتریکی سیم با استفاده از جریان و ولتاژ بالای الکتریکی، سیم فلزی اولیه در صورت ورود کنترل شده آب مقطر در محفظه انفجار به نانو پودر تبدیل می‌شود. اساس کار این سیستم به صورت است که با تغذیه سیم نازک فلزی در محفظه انفجار و با ایجاد اختلاف پتانسیل بالای الکتریکی میان دو سیم و عبور چگالی جریان بالا، سیم فلزی به نانوذرات تبدیل می‌شود. از ویژگی‌های روش انفجار الکتریکی می‌توان مقرون به صرفه تر بودن این روش در بین روش‌های فیزیکی، امکان تولید نانوذرات در مقیاس صنعتی، راندمان بالا و قابلیت تولید محدوده گسترده ای از نانوذرات را نام برد [۹-۱۶]. امروزه پرتونگاری با اشعه ایکس، رادیوگرافی صنعتی و پرتودرمانی و همچنین سامانه‌های پرتو دهی آلفا، بتا و گاما در حوزه‌های مختلفی از جمله پزشکی برای تشخیص بیماری‌ها و شکستگی‌ها، دندانپزشکی برای تصویربرداری از دندان‌ها و ساختارهای دهان، صنعت برای بازرسی‌های غیرمخرب و زیست‌شناسی مولکولی برای تحقیقات در سطح مولکولی کاربرد دارند [۲۰-۱۷]. پرتونگاری اشعه ایکس در سال ۱۸۹۵ توسط ویلهلم کنراد رونتگن استاد دانشگاه وورتسبورگ آلمان کشف شد [۱۷]. وی به این نتیجه رسید که نوع جدیدی از اشعه از لوله ساطع می‌شود. این اشعه قادر به عبور از پوشش کاغذ سنگین و تحریک مواد فسفری در اتاق

بود. وی دریافت که پرتو جدید می‌تواند از بیشتر مواد عبور کرده و سایه اجسام جامد را ایجاد کند. از یافته‌های رونتگن این بود که پرتو می‌تواند از بافت انسان عبور کند، اما نه از استخوان و فلز اشیاء. پیش از سال ۱۹۱۲، اشعه ایکس در خارج از قلمروهای پزشکی و دندانپزشکی کمتر مورد استفاده قرار می‌گرفت، اگر چه برخی از تصاویر اشعه ایکس فلزات تولید شد. در سال ۱۹۲۲ رادیوگرافی صنعتی با ظهور لوله اشعه ایکس ۲۰۰۰۰۰ ولتی که امکان تولید رادیوگرافی قطعات فولادی ضخیم را در مدت زمان معقول فراهم می‌کرد، گام دیگری به جلو برداشت. همچنین اشعه ایکس ۱۰۰۰۰۰۰ ولت توسط جنرال الکتریک در سال ۱۹۳۱ تولید شد. ژنراتورهای اشعه ایکس، ابزاری مؤثر برای رادیوگرافی صنعتی هستند. مخازن تحت فشار جوش داده شده که دری را برای پذیرش و استفاده صنعتی باز می‌کند. در ادامه، به بررسی جزئیات تحقیق صورت گرفته در زمینه تولید نانوذرات آلومینیوم با روش انفجار الکتریکی سیم و پرتونگاری نانوذرات سنتز شده به وسیله رادیوگرافی پرتو ایکس می‌پردازیم. لازم به ذکر است که طراحی و ساخت تجهیزات به کار رفته برای انجام آزمایشات مربوط به این تحقیق توسط گروه ارائه دهنده این مقاله صورت گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

تجهیزات به کار رفته در این تحقیق شامل درایور ترانسفورمر جهت انفجار الکتریکی سیم و سیستم رادیوگرافی جهت پرتونگاری با اشعه ایکس کاملاً بومی بوده و طراحی و ساخت آن در دانشگاه ارومیه و شرکت فناوری فوق‌ریز ماهان صورت گرفته است [۲۱، ۲۲]. تجهیزات آزمایش عبارت‌اند از دستگاه اینورتر، ژنراتور پالسی، ترانسفورماتور، سیم و صفحه آلومینیومی، آب مقطر، هویه، لیزر، ترازو و محلول مورد استفاده در آزمایش. ابتدا سیم‌های آلومینیومی با خط کش و ترازو

خلوص ۹۹ درصد به عنوان الکتروود منفی استفاده می‌کنیم که هر دو این الکتروودها از نوع مصرفی است. با استفاده از صفحه آلومینیومی می‌توان نرخ تولید را افزایش داد؛ زیرا در این صورت نرخ چگالی آمپر عبوری از آن نیز افزایش یافته و واکنش در هر دو الکتروود صورت می‌پذیرد. در هر بار آزمایش توسط سرنگ مندرج شده مقدار ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر داخل محفظه می‌ریزیم تا تولید نانوذرات در جریان‌های ۲۰، ۱۱۵ و ۲۵۰ آمپر در شرایط یکسان صورت گیرد. در ته محفظه صفحه آلومینیومی قرار داده شده است و صفحه با استفاده از یک سیم مسی به سیم اصلی دستگاه اینورتر وصل می‌شود. سیم آلومینیومی در بخش بالایی یعنی محل ورودی الکتروود مثبت با استفاده از گیره به سیم اصلی متصل است.



(ب)

(الف)

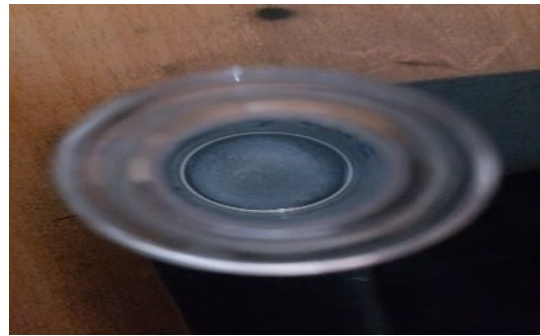
شکل (۱): (الف) محفظه شیشه ای حاوی آب مقطر و سیم

آلومینیومی، (ب) دستگاه اینورتر DX6-250 با قابلیت تنظیم جریان و نیروی قوس الکتریکی همراه با بخش‌های دیگر.

بعد از عمل انفجار برخی قطعات درشت درون ظرف باقی می‌ماند به طوری که برای جداسازی قطعات خیلی درشت از پنس استفاده می‌شود. بعد از جداسازی این قطعات، نانوذرات به حالت پودر سفید بعد از چند ثانیه در انتهای ظرف آزمایش ته‌نشین می‌گردد. به دلیل چگالی کم آب مقطر می‌توان با استفاده از سرنگ آب اضافی را به راحتی خالی کرده و بعد از خالی نمودن آب مقطر نانوذرات تولیدی باقی‌مانده را بر روی یک نوارچسب سوار کرد. با گذشت زمان، آب اندکی هم که باقیمانده تبخیر شده و نانوذرات تولیدی جهت پرتونگاری در

اندازه‌گیری می‌شود. مطابق با شکل ۱(الف)، سیم آلومینیومی در داخل محفظه شیشه استوانه‌ای پر از آب مقطر قرار می‌گیرد. با نزدیک کردن سیم به سطح پایینی محفظه طی تماس ایجاد شده جریانی از سیم آلومینیومی عبور کرده و باعث انفجار آن می‌گردد که در نتیجه این فرایند، سنتز نانوذرات آلومینیوم صورت می‌گیرد. از آنجایی که عمل انفجار الکتریکی سیم در کمترین زمان ممکن به صورت ثانیه‌ای اتفاق می‌افتد توان الکتریکی مناسبی نیز برای این منظور باید تأمین گردد. برای تولید نانوذرات خالص در روش انفجار الکتریکی سیم می‌بایست از محیط گازی یا مایع خنثی استفاده می‌شد که آب مقطر بهترین گزینه است. در خصوص محیط انجام آزمایش نیز از آب مقطر که واکنش‌پذیری نسبی با نانوذرات را ندارد و یک سردکننده و همچنین ویسکوزیته مناسب برای ایجاد نانوذرات است استفاده شده است. در حقیقت آب مقطر برای ایجاد اتمسفر ممانعت‌کننده از اکسیداسیون بدون هیچ ناخالصی دیگر به کار گرفته شده است، علت این امر عدم واکنش‌پذیری با آلومینیوم که از اکسیداسیون ذرات آلومینیوم جلوگیری به عمل آورد. به بیان دیگر، استفاده از آب مقطر به این دلیل است که نانوذرات تشکیل شده با ماده دیگری ناخالص نشوند و در عمل انفجار از اشتعال و ایجاد آتش در محفظه جلوگیری شود. لازم به ذکر است در این آزمایش، نیروی قوس الکتریکی و مقادیر مختلف مربوط به مؤلفه‌های ولتاژ و جریان با در نظر گرفتن مواردی نظیر الکتروود به کار رفته و ضخامت قطعه به وسیله دستگاه اینورتر DX6-250 (شکل ۱(ب)) برای شرایط کار در سه جریان متغیر ۲۰، ۱۱۵ و ۲۵۰ آمپر تنظیم و اعمال می‌گردد، به طوری که نتایج و محصول به دست آمده برای هر جریان مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. در این آزمایش از سیم و صفحه آلومینیومی به عنوان الکتروودها استفاده شده است. از سیمی به قطر ۰/۰۲ میلی‌متر که در کابل‌های آنتن به صورت رشته‌ای موجود است به عنوان الکتروود مثبت و از صفحه آلومینیومی با

قسمت دریچه سنسور قرار می‌گیرد. شکل ۲ نانوپودر سفید رنگ آلومینیوم آماده شده را نشان می‌دهد.



شکل (۲): نانو پودر سفید رنگ آلومینیوم آماده.

همان‌طور که مشاهده می‌شود جریان خیلی بالایی از سیم عبور می‌کند. این مقدار برای جریان‌های ۱۱۵ و ۲۵۰ آمپر دستگاه اینورتر به ترتیب برابر با ۷۱۸/۷۵ و ۱۵۶۲/۵ کیلو اهم است. همچنین با استفاده از جرم آب مقطر و جرم سیم آلومینیومی که داخل آن منفجر می‌شود و تقسیم مقدار به دست آمده به جرم مولکولی اکسید آلومینیوم می‌توان مقدار بر حسب مول از اکسید آلومینیوم درون محلول را تعیین کرد. سپس با تقسیم مول‌های حل شده در حجم محلول بر حسب لیتر می‌توان غلظت محلول مورد نظر را به دست آورد. لازم به ذکر است جرم هر تار سیم $m_A = 0.036 \text{ g}$ ، جرم سه تار سیم انفجار شده $m_A = 0.036 \times 3 = 0.108 \text{ g}$ و میزان تولیدی در هر ساعت برابر $m_A = 0.108 \times 60 = 6.48 \text{ g}$ است. با استفاده از روش‌های دیگر مانند پلاسما این عدد به ۰/۲ تا ۲ کیلوگرم در ساعت افزایش می‌یابد. روش پراکندگی نور دینامیکی یا تفرق نور پویا یکی از روش‌هایی است که با بهره‌گیری از آن می‌توان توزیع اندازه ذرات حتی در ابعاد نانو را تعیین کرد. این روشی فیزیکی برای تعیین توزیع ذرات موجود در محلول‌ها و سوسپانسیون‌ها به کار می‌رود. در این روش پس از برهمکنش نور لیزر با ذره، پراکندگی و تغییرات شدت نور بر حسب حرکات براونی ذرات، ارزیابی شده و بر اساس آن توزیع ابعاد ذرات محاسبه می‌گردد [۲۳]. شناسایی نانوذرات تولید شده با روش‌هایی از جمله برهمکنش نور لیزر با نانوذرات امکان پذیر است. چنانچه نور لیزر از داخل آب مقطر عبور داده شود مسیر نور قابل مشاهده نیست، در صورتی که اگر محلول حاوی نانوذرات آلومینیوم باشد طی برخورد لیزر با نانو ذرات موجود در داخل محلول، نور لیزر به صورت یک مسیری واضح مشاهده خواهد شد. تصویری از پرتونگاری نانوذرات آلومینیومی با نور لیزر در شکل ۳ نشان داده شده است.

طول و سطح مقطع لوله، تأثیر مستقیمی بر روی مقاومت در برابر جریان سیال دارد. لوله بلند و با سطح مقطع کم، دارای مقاومت بیشتری در برابر جریان است، به این معنا که حجم سیالی که از آن در یک واحد زمانی مشخص عبور می‌کند در مقایسه با حجم سیال عبوری از یک لوله کوتاه و با سطح مقطع بزرگ کمتر است (با فرض اختلاف فشار یکسان در دو سوی لوله‌ها). در آزمایش انجام شده، مقاومت ویژه سیم آلومینیومی $10^{-8} \times 2/8$ ، طول سیم آلومینیومی ۱۲ سانتی‌متر، قطر 0.2 میلی‌متر، سطح مقطع: $10^{-7} \times 0.314$ مترمربع. با استفاده از رابطه $R = \frac{\rho L}{A}$ مقدار مقاومت به دست می‌آید.

$$R = \frac{2/8 \times 10^{-8} \times 12 \times 10^{-2}}{0.314 \times 10^{-7}} = 1.04 \times 10^{-3} \Omega \quad (1)$$

طول سیم دستگاه اینورتر و قطر مربوط به این سیم به ترتیب برابر ۱۵۰ و ۱ سانتی‌متر است. میزان جریان تنظیم شده برای دستگاه اینورتر ۲۰ آمپر در نظر گرفته شده است ($I_1 = 20 \text{ A}$)، $L_1 = 150$ ، $L_r = 12$ ، $A_1 = 150$ و $A = \pi.r^2$ به ترتیب برابر $(0.5 \times 10^{-2})^2$ و $A_r = 3/14 \times (0.1 \times 10^{-3})^2$ است.

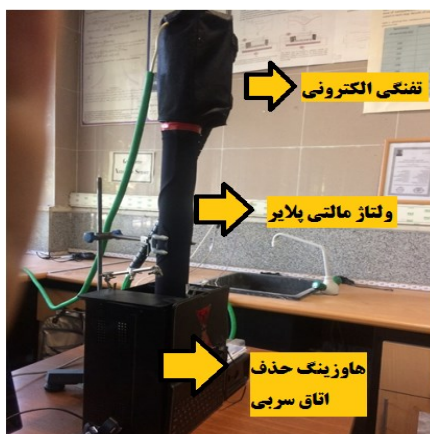
$$V_1 = V_r \rightarrow I_1 \times R_1 = I_r \times R_r$$

$$I_r = \frac{L_1}{L_r} \times \frac{A_1}{A_r} \times I_1 \rightarrow I_r = 125000 \text{ A} \quad (2)$$

توسط یک کاتد داغ شتاب داده شده تا به سرعت بالا برسند. الکترون‌های با سرعت بالا پس از برخورد به مانع فلزی که همان آند است، پرتو ایکس را ایجاد می‌کنند. با استفاده از دستگاه رادیوگرافی طراحی شده درصد فازهای موجود در جریان‌های مختلف نانوذرات بررسی شده و بر اساس مشاهدات به عمل آمده، تولید نانو پودر آلومینیوم با درصد خلوص بالا در سایزهای مختلف مورد تأیید قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، قسمت‌های مختلف دستگاه رادیوگرافی طراحی شده عبارت‌اند از:

۱- تفنگ الکترونی: برای آن‌که الکترون‌ها انرژی لازم برای تولید پرتو ایکس را داشته باشند سیستم ژنراتور الکترونی نیم موج طراحی و اجرا شد که توانایی تولید الکترون‌ها بی با انرژی ۷۰ keV را دارا است و این ژنراتور به عنوان شتاب دهنده الکترون‌های تیوب خلأ ایتالیایی C.E.L به کار برده شد.

۲- ولتاژ مالتی پلایر: در مرحله بعد برای آن‌که ترانسفورمرهای ولتاژ درایو شود درایور 15KV طراحی و ساخته شد که این درایور توانایی درایو کردن یک ترانسفورمر فلای بک تا پانزده کیلوولت را دارا است البته سیستم AC به DC نیز در این بین در نظر گرفته شده است.



شکل (۵): اجزای تشکیل دهنده دستگاه رادیوگرافی طراحی شده. ۳- هوزینگ حذف اتاق سربی: طراحی و ساخت هوزینگ تیوب مولد ایکس جهت حذف سرب کوبی اتاق اشعه ایکس



شکل (۳): پرتونگاری نانوذرات آلومینیومی با نور لیزر.

شکل ۴ پرتو نگاری نانوذرات آلومینیوم با اشعه UV را نمایش می‌دهد. پرتو UV حد فاصل نور بنفش از تابش مرئی قرار گرفته است و طول موج آن در محدوده ۱۰۰-۴۰۰ نانومتر است این طول موج باعث می‌شود تا پرتو ساطع شده از لامپ تنگستن توسط نانوذرات آلومینیوم جذب شده و بسته به سایز نانو پودرها رنگ خاصی را از خود نشان می‌دهند.



شکل (۴): پرتو نگاری نانوذرات آلومینیوم با اشعه UV.

به دلیل توان نفوذ بالای پرتوهای ایکس و کوتاه بودن طول موج‌های اشعه ایکس، این پرتوها برای تصویربرداری در زمینه‌های مختلف پزشکی و صنعتی کاربرد دارند. به دلیل این‌که فوتون‌های پرتو ایکس انرژی لازم برای یونیزه کردن اتم‌ها و شکستن پیوند اتمی را دارا هستند، پرتوهای ایکس در طبقه‌بندی پرتوهای یونیزه‌کننده قرار می‌گیرند. از طیف‌سنجی پرتو ایکس جهت تعیین خصوصیات مواد نیز استفاده می‌شود. روش‌های متفاوتی (الکترون‌ها و پروتون‌ها، یون‌های مثبت) برای تولید پرتو ایکس وجود دارد. در تولید از طریق الکترون‌ها، پرتو ایکس از تیوب پرتو ایکس تولید می‌شود که این تیوب یک لوله تحت خلأ است که در آن به الکترون‌ها

۳. نتایج

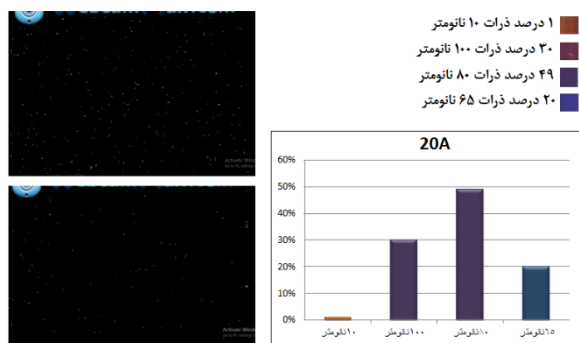
نحوه تخمین و روش اندازه‌گیری اندازه نانوذرات در این تحقیق با استفاده از آنالیز پراش اشعه پرتو ایکس (XRD)^۱ و رنگ‌بندی است به این صورت که ابتدا با قراردادن حسگر مقابل نانوذرات سنتز شده هنگام پرتونگاری با اشعه ایکس و اتصال حسگر به صفحه نمایشگر رایانه عکس‌های مربوطه گرفته شده و سپس رنگ‌های ساطع شده از نانوذرات بررسی شده است. رنگ ویژگی ذاتی یک ماده است درحالی‌که در ابعاد نانومتری رنگ نانوذرات به شکل و اندازه بستگی دارد. با کاهش مقیاس ذره در نانوذرات فلزی دامنه ارتعاشات الکترون‌های موجود در سطح نانوذره تغییر می‌کند که همین پدیده منجر به تغییر رنگ نانوذره می‌شود. همچنین در نانوذرات دیگر فاصله بین ترازهای انرژی با تغییر اندازه ذره تغییر کرده که به دنبال آن میزان جذب نور توسط نانوذره تغییر کرده و رنگ آن تغییر می‌کند. باتوجه به مشخصه‌یابی رنگ در نانوذرات، رنگ‌های مربوط به هر اندازه منحصر به فرد است. در پرتونگاری نانوذرات و بر اساس رنگ نقاط موجود در عکس‌ها می‌توان درصد نانوذرات موجود را که دارای چه اندازه‌ای هستند تعیین کرد. رنگ‌های حاصل از بازتاب اشعه ایکس توسط نانوذرات شامل بنفش، آبی پررنگ، آبی آسمانی و آبی مایل به سفید است و البته باتوجه به عکس‌های گرفته شده رنگ‌های دیگری مانند نارنجی و سبز با درصد کمی نیز مشاهده شده است. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نمودار ابعاد نانوذرات در طول موج‌های مختلف در بازه ۷ تا ۱۰۰ نانومتری و طول موج‌های نور مرئی جهت به دست آوردن ابعاد نانوذرات تولیدی با استفاده از رنگ بندی را نمایش می‌دهند. با توجه به آزمایش، بازه طول موج از ۴۲۵ تا ۵۵۰ نانومتر بوده و نانوذرات سنتز شده در حدود ۲۰ تا ۱۰۰

و افزایش ایمنی یکی دیگر از ویژگی‌های دستگاه طراحی شده است. همان‌طور که می‌دانیم اشعه ایکس از تمام مواد از قبیل گاز، مایع و جامدات عبور کرده و البته هر چه جامدات دارای عدد اتمی بالاتری باشند، کمتر اشعه را عبور می‌دهند. این اشعه آثار منفی و زیان باری بر روی موجودات زنده می‌گذارد که این تأثیرات به دو بخش قطعی (سرخ‌پوست، عقیم شدن و ...) و احتمالی (سرطان و اختلال در ژنتیک موجودات) تقسیم بندی می‌شود. به همین منظور در این تحقیق برای رفع مشکلات و عوارض احتمالی و جهت ایمنی بیشتر هنگام کار با اشعه ایکس هوزینگ مناسبی با استفاده از سرب طراحی شده است. روش ساخت هوزینگ به این صورت است که سرب‌های شمش را با استفاده از مشعل و با حرارت دهی بالا در ظرف چدنی ذوب نموده و ورق‌های به ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته‌ایم و پس از سرد کردن آن‌ها با آب لوله‌هایی با قطر ۹ سانتی‌متری تهیه شده و بر روی محفظه مورد نظر در دستگاه رادیوگرافی مورد استفاده قرار گرفت. سپس با اتصال این ورق‌ها مکعبی با دیواره‌های سربی ساخته شده است به طوری که هیچ‌گونه نشتی اشعه ایکس از این مکعب وجود نداشته باشد. این سیستم در چندین جلسه با رعایت تمام نکات ایمنی پرتوی آزمایش شد و کنتور گایگر عدم نشت پرتوهای ایکس از مجموعه ابداع شده را تأیید می‌کند.



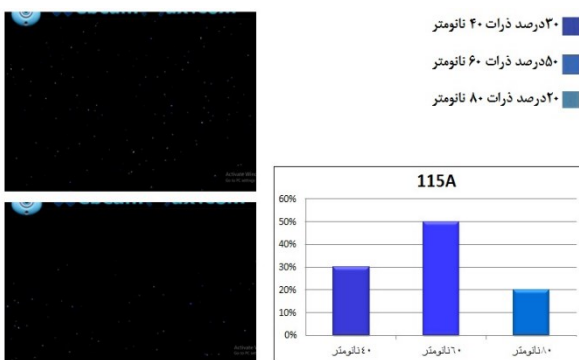
شکل (۶): مراحل ساخت هوزینگ تیوب مولد ایکس جهت حذف سرب کوبی اتاق اشعه ایکس [۲۱].

¹ X-ray powder diffraction



شکل (۹): عکس‌های گرفته شده هنگام پرتونگاری با اشعه ایکس و نمودار درصد تولیدی نانوذرات آلومینیوم در جریان ۲۰ آمپر.

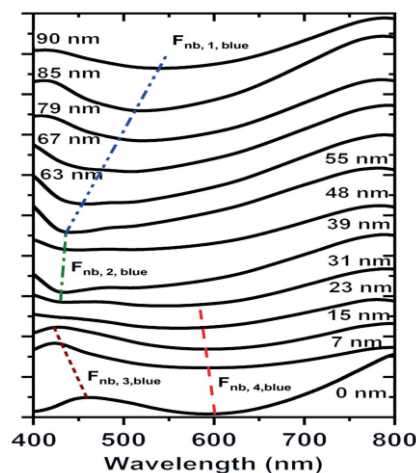
در شکل ۱۰ عکس‌های گرفته شده هنگام پرتونگاری با اشعه ایکس و نمودار درصد تولیدی نانوذرات آلومینیوم در ابعاد مختلف در جریان ۱۱۵ آمپر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ابعاد نانوذرات آلومینیوم در این جریان بین ۴۰-۸۰ نانومتر است. نمودار به دست آمده حاکی از آن است که میزان نانوذرات تولید شده در ابعاد ۶۰ نانومتر با مقدار ۵۰ درصد در مقایسه با اندازه‌های دیگر بیشتر است.



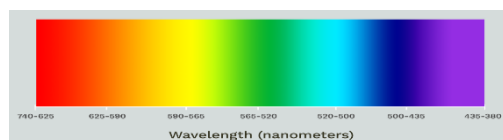
شکل (۱۰): عکس‌های گرفته شده هنگام پرتونگاری با اشعه ایکس و نمودار درصد تولیدی نانوذرات آلومینیوم در جریان ۱۱۵ آمپر.

عکس‌های گرفته شده هنگام پرتونگاری با اشعه ایکس و نمودار درصد تولیدی نانوذرات آلومینیوم در ابعاد مختلف در جریان ۲۵۰ آمپر در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. بر پایه نتایج به دست آمده، ابعاد نانوذرات آلومینیوم در این جریان بین ۴۰-۲۰ نانومتر است و نشان‌دهنده آن است که با افزایش جریان

نانومتر است. همچنین میزان دقت اندازه‌گیری در این روش ۵ نانومتر است.



شکل (۷): نمودار ابعاد نانوذرات در طول موج‌های مختلف.

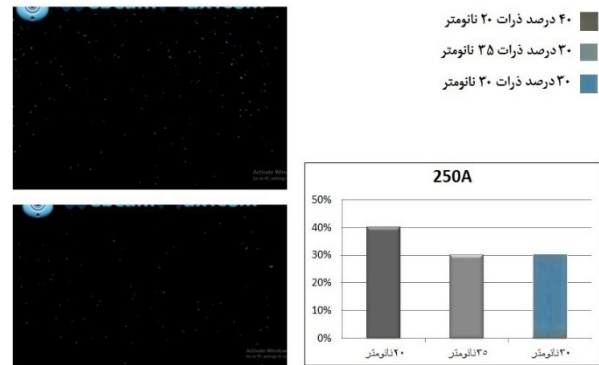


شکل (۸): طول موج‌های نور مرئی جهت به دست آوردن ابعاد نانوذرات تولیدی با استفاده از رنگ بندی [۲۴].

آزمایش‌های متعددی با جریان‌های ۲۰، ۱۱۵ و ۲۵۰ آمپر به وسیله دستگاه اینورتر انجام گرفت که با توجه به رنگ‌های حاصل از پرتونگاری با اشعه ایکس و تطابق آن‌ها با طول موج‌های منتشر شده از نانوذرات آلومینیوم مشخص شد که با افزایش جریان اندازه نانوذرات نیز کاهش می‌یابد. عکس‌های گرفته شده هنگام پرتونگاری با اشعه ایکس و نمودار درصد تولیدی نانوذرات آلومینیوم در ابعاد مختلف در جریان ۲۰ آمپر در شکل ۹ نمایش داده شده است. نتایج حاکی از آن است که ابعاد نانوذرات آلومینیوم در این جریان بین ۶۵-۱۰۰ نانومتر است. وجود رنگ‌هایی سفید نشان‌دهنده برخی ناخالصی‌ها هنگام انجام آزمایش و روی نوار چسب است. نمودار ترسیمی نشان‌دهنده آن است که میزان نانوذرات سنتز شده در مقیاس ۸۰ نانومتر با میزان ۴۹ درصد نسبت به سایر ابعاد بیشتر است.

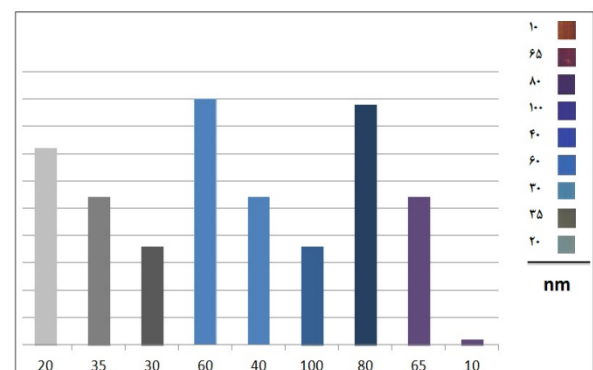
در ادامه پرتونگاری اشعه ایکس نانوذرات آلومینیوم در این تحقیق با نتایج به دست آمده از پرتونگاری ایکس نانوذرات مس مقایسه شده است [۲۵]. با توجه به نتایج به دست آمده می توان نتیجه گرفت که با افزایش جریان، نانوذرات سنتز شده در اندازه های کوچک تر تولید می شوند. به بیان دیگر بین جریان و ابعاد نانوذرات رابطه عکس وجود دارد. از کاربردهای ویژه نانوذرات مس سنتز شده به روش انفجار الکتریکی سیم می توان به کاربرد این نانوذرات در تجهیزات الکترونیکی و نمایش گر ها، سلول های فتوولتائیک و زیست پزشکی، خمیر سانا و افزودنی های پودرکننده و ایفای نقش به عنوان کاتالیزور در واکنش های شیمیایی اشاره کرد [۳۳-۲۶]. همچنین نانوذرات مس در ماشین ها و افزاره های نیمه رساناها به عنوان فلز کاتالیست و انتقال حرارتی کاربرد دارند. علاوه بر این، نانوذرات مس در بافت ها و اندام های موجودات زنده قابل انتشار بوده و باعث تغییرات ساختاری ویژه می شوند [۳۳-۲۶]. در آزمایش مربوط به انفجار سیم مسی و تولید نانوذرات مس، مقاومت ویژه سیم مسی ۸-۱۰ $\times 10^{-7}$ ، طول سیم مسی ۱۶ سانتی متر، قطر ۰/۲ میلی متر و سطح مقطع ۶-۱۰ $\times 0.314$ مترمربع گزارش شده است [۲۵]. لازم به ذکر است، بعد از انفجار سیم مسی و سنتز نانوذرات ابتدا رنگ محلول ها کاملاً سیاه بود که با گذشت زمان و با ته نشین شدن نانوذرات رنگ محلول شفاف تر شد. پس از گذشت چند روز که نانوذرات کاملاً ته نشین شدند با استفاده از سرنگ، آب بالای آن تخلیه و سپس در محیط آزمایشگاه روی چسبی برای عکس برداری با اشعه ایکس درون محفظه سربی و مقابل دوربین قرار دادیم. بر اساس اطلاعات مندرج در جدول ۱، درصد وجود نانوذرات مس با رنگ زرد در جریان ۲۰ آمپر بیشتر است. بر مبنای مشخصه یابی رنگ در این جریان، ۵۰ درصد نانوذرات مس تولیدی دارای اندازه ۷۵۰ نانومتر هستند. در جریان ۱۱۵ آمپر درصد وجود نانوذرات با رنگ بنفش و سبز کم رنگ بیشتر است. با بررسی مشخصه یابی رنگ در این جریان

ابعاد نانوذرات کاهش یافته است. نمودار ترسیمی نشان می دهد که میزان نانوذرات سنتز شده در مقیاس ۲۰ نانومتر با میزان ۴۰ درصد نسبت به بقیه بیشتر است.



شکل (۱۱): عکس های گرفته شده هنگام پرتونگاری با اشعه ایکس و نمودار درصد تولیدی نانوذرات آلومینیوم در جریان ۲۵۰ آمپر.

شکل ۱۲ نتایج به دست آمده برای ابعاد مختلف نانوذرات آلومینیوم با رنگ های مختلف به روش انفجار الکتریکی سیم را نشان می دهد که بر اساس آن کمترین مقدار ۱۰ نانومتر و بیشترین مقادیر اندازه نانوذرات آلومینیوم سنتز شده مربوط به ابعاد ۶۰ و ۸۰ نانومتر است. بر اساس نتایج به دست آمده، با افزایش میزان جریان از ۲۰ تا ۲۵۰ آمپر ابعاد نانوذرات از محدوده ۶۵-۱۰۰ نانومتر به محدوده ۲۰-۳۵ نانومتر کاهش می یابد و برای تولید نانوذرات با ابعاد کوچک تر باید از روش های پیچیده و هزینه بر استفاده شود.



شکل (۱۲): نمودار مربوط به ابعاد مختلف نانوذرات آلومینیوم سنتز شده با رنگ های مختلف در روش انفجار الکتریکی سیم.

با کمترین هزینه و از ساده ترین راه می توان به نانوذرات با ابعاد قابل قبول و مصرفی رسید.

جدول (۲): اندازه نانوذرات مس سنتز شده بر اساس مشخصه یابی رنگ و اندازه [۲۵].

رنگ	اندازه نانوذرات سنتز شده
آبی کم رنگ	۲۵۰ نانومتر
قهوه ای روشن	۱۰۰۰ نانومتر
قرمز	۱۲۵۰ نانومتر
سبز	۵۰۰ نانومتر
قهوه ای تیره	۲۲۶۰ نانومتر
زرد	۷۵۰ نانومتر

جدول (۳): ابعاد نانوذرات آلومینیوم سنتز شده در روش های مختلف.

ابعاد به دست آمده بر حسب نانومتر	روش های سنتز نانوذرات
۶۵-۱۰۰	EEW (۲۰ A)
۴۰-۸۰	EEW (۱۱۵ A)
۲۰-۴۰	EEW (۲۵۰ A)
۵۰-۱۵۰	پلازما
۱۰۰-۵۰۰۰	اتمیزاسیون

جدول ۴ نشان دهنده انواع مختلف روش های تولید نانوذرات است که با توجه به آن روش انفجار الکتریکی یکی از روش های مناسب برای تولید و سنتز نانوذرات از نظر اندازه، نرخ تولید و سطح خاص (SSA)^۱ است.

۵۰ درصد نانوذرات سنتز شده در محدوده ۲۵۰ الی ۵۰۰ نانومتر هستند. در جریان ۲۵۰ آمپر نیز درصد بیشتر متعلق به رنگ بنفش با میزان ۷۰ درصد است که اندازه نانوذرات مس در این حالت برابر با ۲۵۰ نانومتر است.

جدول (۱): درصد و ابعاد نانوذرات مس سنتز شده در جریان های مختلف بر اساس مشخصه یابی رنگ و اندازه [۲۵].

جریان	درصد نانوذرات سنتز شده	اندازه نانوذرات
۲۰ آمپر	زرد (۵۰٪)، آبی و سبز کم رنگ (۳۰٪)، نارنجی (۱۰٪)، قرمز (۵٪)	۷۵۰ نانومتر (۵۰٪)
	بنفش و سبز کم رنگ (۵۰٪)، خاکستری (۲۰٪)، قرمز (۵٪)	۲۵۰-۵۰۰ نانومتر (۵۰٪)
	بنفش (۷۰٪)، سبز کم رنگ (۴۰٪)، رنگ (۴۰٪)، خاکستری (۳۰٪)	۲۵۰ نانومتر (۷۰٪)

اطلاعات مندرج در جدول ۲ مربوط به ابعاد نانوذرات مس سنتز شده با رنگ های مختلف است که بر اساس مشخصه یابی رنگ و اندازه برای پرتونگاری ایکس گزارش شده است [۲۵]. که بر اساس آن، آبی کم رنگ ۲۵۰ نانومتر، قهوه ای روشن ۱۰۰۰ نانومتر، قرمز ۱۲۵۰ نانومتر، سبز ۵۰۰ نانومتر، قهوه ای تیره ۲۲۶۰ نانومتر و زرد ۷۵۰ نانومتر است.

جدول ۳ ابعاد نانوذرات آلومینیوم سنتز شده در روش به کارگرفته در این تحقیق و سایر روش ها را نشان می دهد. به طور کلی برای تولید نانوذرات در ابعاد کمتر باید از روش های با هزینه بالاتر استفاده کرد ولی در روش انفجار الکتریکی سیم

¹ Specific surface area

جدول (۴): مقایسه انواع مختلف روش های سنتز نانوذرات [۵].

روش	تولیدکننده	اندازه گزارش شده (nm)	نرخ تولید	سطح خاص (SSA) (m ² /g)
انفجار الکتریکی	Argonide	۵۰۰-۵۰	۱۰۰'s g/hr	۱۰-۱۵
تورچ پلاسما	Tetronics	۵۰-۱۵۰	۲ kg/hr short run	۲۵-۳۰
سنتز بخار فیزیکی	Nanophase Technologies	۱۰-۵۰	تن	۲۰-۶۰
شیمیایی	US Navy	۶۵-۵۰۰	پایین	-
کپسوله کردن	AP Materials	-	مقیاس صنعتی	-
تراکم گاز	Technology	۲۰-۲۰۰	Kg/hr/reactor	>۵۰
اتمیزه کردن گاز	Alpoco	۱۰۰-۵۰۰۰	۰/۵ kg/hr	۲

۴. نتیجه گیری

این دستگاه مجهز به هوزینگ تیوب مولد ایکس جهت حذف سرب کوبی اتاق اشعه ایکس و افزایش ایمنی است. به وسیله پرتونگاری با روش های UV و اشعه ایکس به راحتی می توان ابعاد نانوذرات را به ساده ترین شکل مشخص کرد و با توجه به ابعاد تولیدی می توان موارد مصرفی آنها را نیز به دست آورد. بر مبنای مشخصه یابی رنگ اکثریت نانوذرات آلومینیوم سنتز شده در جریان های ۲۰، ۱۱۵ و ۲۵۰ آمپر به ترتیب ۸۰ نانومتر (۴۹ درصد)، ۶۰ نانومتر (۵۰ درصد) و ۲۰ نانومتر (۴۰ درصد) است.

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از دانشگاه ارومیه بابت انجام این تحقیق و به منظور پیشبرد پژوهش حاضر تشکر و قدردانی می نمایند.

در این تحقیق تولید نانوذرات آلومینیوم و تشخیص اندازه این نانوذرات از طریق طراحی و ساخت تجهیزات انفجار الکتریکی سیم و رادیوگرافی پرتو ایکس صورت گرفته است. استفاده از محلول آب مقطر با دارا بودن خصوصیتی از قبیل ارزان بودن، قابل دسترس بودن، ایمن بودن و ویسکوزیته مناسب منجر به تولید نانوذرات آلومینیوم با خلوص بالاتر شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، با افزایش میزان جریان از ۲۰ تا ۲۵۰ آمپر ابعاد نانوذرات از محدوده ۶۵-۱۰۰ نانومتر به محدوده ۲۰-۳۵ نانومتر کاهش می یابد با کاهش سطح مقطع سیم آلومینیومی نرخ تولیدی نانو پودر آلومینیوم نیز افزایش می یابد و ابعاد ریزتری نیز تولید می شود. پرتونگاری نانوذرات آلومینیوم سنتز شده به وسیله دستگاه رادیوگرافی طراحی شده صورت گرفته است.

۶. مراجع

1. F. J. Heiligtag, M. Niederberger. The fascinating world of nanoparticle research. *Mat. Today* 16 (7-8) (2013) 262-271.
2. J. R. Hochella, F. Michael. Nanominerals, mineral nanoparticles, and earth systems. *Science* 319 (5870) (2008) 1631-1635.
3. X. Luo, A. Morrin, A. J. Killard, M. R. Smyth. Application of nanoparticles in electrochemical sensors and biosensors. *Electroanalysis* 18 (2006) 319-326.
4. Y.-S. Kwon, A. A. Gromov, A. P. Ilyin. Reactivity of superfine aluminum powders stabilized by

- aluminum diboride. *Combust. Flame*. 131 (3) (2002) 349-352.
5. M. Keams. Development and applications of ultrafine aluminum powders. *Mater. Sci. Eng. A*. 375-377 (2004) 120-126.
 6. A. V. Rane, K. Kanny, V. K. Abitha, S. Thomas. Methods for synthesis of nanoparticles and fabrication of nanocomposites. *Synthesis Inorganic Nanomat.* (2018) 121-139.
 7. L. Liu, J. Zhao, W. Yan, Q. Zhang. Influence of energy deposition on characteristics of nanopowders synthesized by electrical explosion of Aluminum wire in the Argon gas. *IEEE Trans. Nanotech.* 13 (4) (2014) 842-849.
 8. M. I. Lerner, E. A. Glazkova, A. S. Lozhkomoev, N. V. Svarovskay, O. V. Bakina, A. V. Pervikov, S. G. Psakhie. Synthesis of Al nanoparticles and Al/AlN composite nanoparticles by electrical explosion of aluminum wires in argon and nitrogen. *Powder Technol.* 295 (2016) 307-314.
 9. Y. A. Kotov. Electric explosion of wires as a method for preparation of nanopowders. *J. Nanoparticle Res.* 5 (2003) 539-550.
 10. V. A. Burtsev, A. B. Andezen, A. A. Drozdov, N. V. Kalinin. Electrical Explosion of Conductors as a Source of High Electrical Field Strength Pulses. *AIP Conf. Proc.* 650 (2002) 53-56.
 11. Y. S. Lee, B. Bora, S. L. Yap, C. S. Wong. Effect of ambient air pressure on synthesis of copper and copper oxide nanoparticles by wire explosion process. *Curr. Appl. Phys.* 12 (2012) 199-203.
 12. E. C. Cnare, F. W. Neilson. Large Exploding Wires- Correlation to Small Wires and Pause Time Versus Length Dependency. Sandia Corp., Albuquerque, N. Mex, 1959.
 13. O. Antonov, S. Efimov, D. Yanuka, M. Kozlov, V. Gurovich, Y. Krasik. Generation of converging strong shock wave formed by microsecond timescale underwater electrical explosion of spherical wire array. *Appl. Phys. Lett.* 102 (2013) 124104.
 14. V. I. Oreshkin, R. Baksht. Wire explosion in vacuum. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 48 (5) (2020) 1214-1248.
 15. P. Sen, J. Ghosh, A. Abdullah, P. Kumar, Vandana. Preparation of Cu, Ag, Fe and Al nanoparticles by the exploding wire technique. *J. Chem. Sci.* 115 (2003) 499-508.
 16. R. F. Phalen. Evaluation of an exploded-wire aerosol generator for use in inhalation studies. *J. Aerosol Sci.* 3 (1972) 395-400.
 17. B. Mohtashami, F. Turchian. *Christensen's Physics of Diagnostic Radiology*. Noor Danesh, Iran, 2004.
 18. F. Turchian. *Specialized Techniques: Radiology, CT Scan, MRI, and Nuclear Medicine*. Noor Danesh, Iran, 2004.
 19. S. Alice, G. W. Kneale. Radiation dose effects in relation to obstetric x-rays and childhood cancers. *The Lancet*. 295 (7658) (1970) 1185-1188.
 20. J. Chen, S. Loeb, J. H. Kim. LED revolution: fundamentals and prospects for UV disinfection applications. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 3 (2017) 188-202.
 21. M. Ahmadi, S. Ebrahimpour, M. T. Ahmadi, H. Goudarzi. Design and fabrication of X-ray accelerator housing to increase the safety and ignore the lead room. *J. Radiat. Safety Measurement* 11 (5) (2022) 205-208.
 22. M. Ahmadi, S. Ebrahimpour, M.T. Ahmadi, H. Goudarzi. Design and fabrication of X- ray radiography system. *J. Radiat. Safety Measurement* 11 (5) (2022) 201-204.
 23. W. B. Russel. Brownian motion of small particles suspended in liquids. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 13 (1981) 425-455.
 24. S. T. Ryoo, J. K. Chang. Representation of Dispersion Effect Using N-Way Color Based White Light. In: Park, J., Leung, V., Wang, CL., Shon, T. (eds) Future Information Technology, Application, and Service. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 179. Springer, Dordrecht. (2012) 165-175.
 25. Y. Shafiei Dizji, M. T. Ahmadi, H. Goodarzi, M. Rahmani. Radiographic study of copper nanoparticles and their production by electric wire explosion. *3rd Intl. Conf. Res. Tech. Nanoscience* (2023).
 26. N. A. Dhas, C. P. Raj, A. Gedanken. Synthesis, characterization, and properties of metallic copper nanoparticles. *Chem. Mater.* 10 (1998) 1446-1452.
 27. P. K. Khanna, S. Gaikwad, P. V. Adhyapak, N. Singh, R. Marimuthu. Synthesis and characterization of copper nanoparticles. *Mater. Lett.* 61 (2007) 4711-4714.
 28. D. Mott, J. Galkowski, L. Wang, J. Luo, C. Zhong. Synthesis of size-controlled and shaped copper nanoparticles. *Langmuir*. 23 (2007) 5740-5745.
 29. A. Umer, S. Naveed, N. Ramzan, M. S. Rafique, M. Imran. A green method for the synthesis of copper nanoparticles using L-ascorbic acid. *Matéria*. 19 (2014) 197-203.
 30. J. Ramyadevi, K. Jeyasubramanian, A. Marikani, G. Rajakumar, A. A. Rahuman. Synthesis and antimicrobial activity of copper nanoparticles. *Mater. Lett.* 71 (2012) 114-116.

31. Y. Wei, S. Chen, B. Kowalczyk, S. Huda, T. P. Gray, B. A. Grzybowski. Synthesis of stable, low-dispersity copper nanoparticles and nanorods and their antifungal and catalytic properties. *J. Phys. Chem. C*. 114 (2010) 15612-15616.
32. Z. Ibupoto, K. Khun, V. Beni, X. Liu, M. Willander. Synthesis of novel CuO nanosheets and their non-enzymatic glucose sensing applications. *Sensors* 13 (2013) 7926-7938.
33. J. M. Zen, C. T. Hsu, A. S. Kumar, H. J. Lyuu, K. Y. Lin. Amino acid analysis using disposable copper nanoparticle plated electrodes. *Analyst*. 129 (2004) 841-845.