

سنتز نانو ذرات اکسید فلزی مس – قلع به روش انفجار الکتریکی سیم و بررسی خواص ضد باکتری آن

داود یارعلی^۱، رضا احمدی^{۲*}، رامین حسینی^۳
 (تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۲۹، ش.ص ۹۷-۱۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۰۲)

چکیده

به دلیل خواص فیزیکی - شیمیایی منحصر به فرد نانو ذرات در مهار رشد باکتری، پژوهش بر روی نانو ذرات و کاربردهایشان به عنوان عامل ضد میکروبی افزایش یافته است. در این بررسی نانو ذرات مس- قلع و اکسیدهای آن به روش انفجار الکتریکی در محیط آب بین الکترودهای مس- قلع سنتز شد. این روش امکان تهیه نانو ذرات اکسیدی و فلزی با نرخ تولید بالا و فعالیت سطحی زیاد را فراهم می‌آورد. نانو ذرات اکسید مس و اکسید قلع به عنوان نانو ذرات کاربردی با فعالیت ضد باکتری موثر شناخته شده‌اند. مشخصه‌یابی نانو ذرات ساخته شده با استفاده از تکنیک پراش پرتو ایکس، طیف سنج مرئی- فرابنفش، میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز BET انجام شد. نتایج نشان داد با تغییر شدت جریان اعمالی، نانوذرات اکسید مس - قلع با اندازه میانگین حدود ۱۹ تا ۳۷/۵ نانومتر به روش انفجار الکتریکی سیم تشکیل شدند. فعالیت ضد باکتری نانوذرات در برابر باکتری اشرشیاکولی با استفاده از غلظت‌های مختلف نمونه‌های نانو ذرات اکسید مس- قلع به روش تعیین چگالی نوری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که نانو ذرات اکسید مس- قلع دارای خاصیت ضد باکتری هستند و این خاصیت با افزایش غلظت نانو ذره در محیط مایع و کاهش متوسط اندازه دانه، افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: انفجار الکتریکی سیم، نانو ذره، اکسید مس - قلع، آنتی باکتریال.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مواد و سرامیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی بیوتکنولوژی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

نویسنده مسئول: Re.ahmadi@eng.ikiu.ac.ir

بیشگفتار

عوامل ضد باکتری طی سالیان اخیر در صنایع مختلف مانند ایمپلنت‌های بیمارستان، پزشکی، بسته بندی مواد غذایی، ضد عفونی آب و ... اهمیت ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. به طور کلی استفاده از ترکیبات آلی برای ضد عفونی به دلیل معایبی از جمله سمی بودن برای بدن انسان، پایداری فیزیکی خصوصا در دما و فشار بالا و ... محدود شده است [۲۰]. بنابراین استفاده از ضد عفونی کننده معدنی مانند نانو ذرات اکسید فلزی در حال افزایش است. عناصر فلزی قادر به ایجاد پیوندهای شیمیایی با اکسیژن به شکل ترکیبات اکسیدی هستند. اکسید فلزات نقش بسیار مهمی را در بسیاری از زمینه علم و فن‌آوری‌هایی مانند فیزیک، شیمی، علم مواد، مهندسی و پزشکی ایفا می‌کنند. اخیرا اکسید فلزات به طور گسترده‌ای در ساخت سلول‌های خورشیدی، حسگرها، سلول‌های سوختی، مدارهای میکروالکترونیک و در دستگاه‌های پیزوالکتریک استفاده شده است [۳ و ۴]. نانو ذرات اکسید فلزی خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد به دلیل اندازه کوچک و نسبت سطح به حجم بالا از خود نشان می‌دهند. با توجه به این خواص منحصر به فرد، نانو ذرات اکسید فلزی در طیف گسترده-ای از برنامه‌های کاربردی مانند باتری‌های لیتیوم یون، سلول‌های سوختی، ترانزیستور اثر میدان، سلول‌های خورشیدی، دستگاه‌های ذخیره سازی مغناطیسی، سنسورهای زیستی، درمان سلول‌های سرطانی و عوامل ضد باکتری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷-۵]. از بین اکسیدهای فلزی، اکسید مس یک نیمه هادی نوع p با خواص الکتروشیمیایی، کاتالیزوری، فتوکاتالیستی و ضد باکتریایی عالی می‌باشد. مس به دلیل ارزان و غیر سمی بودن به طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها مانند ذخیره سازی مغناطیسی، سنسورها، انتقال انرژی خورشیدی و ابرخازن‌ها استفاده می‌شود [۸-۱۱]. همچنین اکسید قلع یک نوع نیمه هادی نوع n با شکاف باند گسترده می‌باشد و به دلیل قابلیت رسیدن به بالا-ترین غلظت حامل و شکاف باند گسترده گزینه بسیار عالی برای طیف گسترده‌ای از کاربردها مانند باتری لیتیوم یون، سلول‌های خورشیدی، سنسورهای گازی، کنترل آلودگی هوا، تشخیص گازهای سمی و عوامل ضد باکتری می‌باشد [۱۲-۱۷]. تاکنون روش‌های مختلفی برای سنتز

نانو ذرات استفاده شده که شامل روش فاز گازی، سل ژل، میکرو امولسیون، هیدرو ترمال، سونو شیمیایی و روش انفجار الکتریکی سیم می‌باشد. از میان روش‌های موجود روش انفجار الکتریکی فرآیندی تک مرحله‌ای با بازدهی بالا، غیر مضر برای محیط زیست، مناسب برای تولید نانو ذرات فلزی و سرامیکی با خلوص بالا می‌باشد [۱۸-۲۱]. در این روش سیم‌های بسیار نازک در محیط مایع یا گاز و تحت شدت جریان بالا به هم تماس داده می‌شوند. در اثر این تماس دمای بالایی ناشی از قوس الکتریکی ایجاد شده و سیم‌های فلزی در محل تماس تبخیر و اتم‌های تبخیر شده در محیط اطراف به سرعت خنک می‌شوند و ذرات فلزی یا سرامیکی با اندازه نانومتری تشکیل می‌شوند [۲۲]. شامیلا و همکارانش [۲۳] نانو ذرات مس را به روش کاهش شیمیایی و با متوسط اندازه ذرات ۱۴ تا ۵۵ نانومتر سنتز کردند. جان و همکارانش [۲۴] اکسید فلزات مختلفی را به روش کاهش شیمیایی سنتز کردند که اکسید روی، قلع و سریم ساختار کروی ولی اکسید مس ساختار غیر کروی دارند. همچنین خواص آنتی باکتریالی این اکسیدها مورد بررسی قرار گرفت که اکسید روی به دلیل متوسط اندازه دانه کوچک‌تر رفتار بهتری از خود نشان داد. طالبیان و همکارانش [۲۵] نانو ساختار اکسید قلع را به روش هیدروترمال تهیه کردند که تاثیر دما و زمان مورد بررسی قرار گرفت و سه مورفولوژی میله‌ای، کروی و گل مانند به دست آمد. هی یانگ و همکارانش نانو ذرات اکسید مس با مورفولوژی مختلف توسط روش انفجار الکتریکی سیم تهیه کردند که برای سنتز نانو ذرات با مورفولوژی کنترلی از هیدروکسید سدیم و هیدروکسید آمونیوم استفاده کرده‌اند. جان و همکارانش [۲۶] نانو ذرات $\text{Sn}_x\text{Cu}_{1-x}\text{O}$ را به روش هم رسوبی تهیه کردند و خواص ضد سرطانی نانو ذرات مورد بررسی قرار گرفت که نانساختار مس بدون دوپ قلع فعالیت ضد سرطانی قویتری از خود در مقایسه با نانو ساختارهای مس دوپ شده با قلع از خود نشان داد. دیواره سلولی که در اطراف غشای باکتری وجود دارد، برای بقا باکتری ضروری است. این دیواره از پپتی دوگلی‌کان که ترکیبی از پلی ساکاریدها و پپتیدها می‌باشد، ساخته شده است. به طور کلی دو نوع دیواره سلولی در باکتری وجود دارد: گرم مثبت و گرم منفی. باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی در ساختار غشای

گاز نیتروژن در دمای ۷۷ درجه کلوین بر روی سطح پودر جذب می‌شوند، موجب اندازه‌گیری سطح ویژه مواد می‌شود.

بررسی خاصیت ضد باکتری نانو ذرات اکسید مس - قلع از منحنی چگالی نوری بر حسب زمان در برابر باکتری اشرشیاکولای^۴ (ATCC:25922) و در غلظت-های ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر انجام شده است. برای تهیه محیط کشت باکتری از محیط جامد حاوی آگار استفاده شد. سپس باکتری اشرشیاکولای به این محیط تلقیح نموده و در شیکر انکوباتور با دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا غلظت باکتری معادل استاندارد 10^6 cfu/ml در طول موج ۶۰۰ نانو متر گردد. سپس نمونه‌های با غلظت‌های معلوم در حضور نانو ذرات تهیه شده و در شیکر با دور مشخص و دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده تا شرایط لازم برای رشد باکتری مهیا شود و پس از بازه زمانی دو ساعت با اندازه‌گیری چگالی نوری در ۶۰۰ نانومتر (OD-600nm) توسط دستگاه Spectro UV-VIS مدل UVD-3200 نرخ رشد باکتری هر یک از نمونه‌ها تعیین شد [۸ و ۳۰].

نتایج و بحث

الگوی پراش اشعه ایکس نانو ذرات تهیه شده در شدت جریان‌های مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص شده پیک‌های ۲۹/۵، ۳۶/۴، ۴۲/۳، ۶۱/۴ و ۷۳/۴ درجه به ترتیب با اندیس صفحات (۱۱۰)، (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۱) وجود فاز Cu_2O با ساختار مکعبی و پیک‌های ۲۶/۳، ۳۳/۱، ۳۷/۴، ۵۱/۲ و ۶۵/۷ درجه به ترتیب با اندیس صفحات (۱۱۰)، (۱۰۱)، (۲۰۰)، (۲۱۱) و (۳۰۱) حضور SnO_2 با ساختار تتراگونال را در نمونه‌های سنتز شده نشان می‌دهد. پیک‌های ۴۳/۳، ۵۰/۲ و ۷۳/۶ درجه نیز بیانگر حضور Cu با ساختار مکعبی است [۳۱ و ۳۲]. همچنین عدد اندازه دانه به دست آمده از رابطه شرر برای پیک ۳۶ درجه (پیک اصلی) به ترتیب برای نمونه‌های سنتز شده تحت جریان‌های ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ برابر است

خود تفاوت دارند که بیش‌ترین مشخصه آن ضخامت لایه پیتی‌دوگلی‌کان است [۲۷]. باکتری اشرشیاکولای یک باکتری گرم منفی با دیواره سلولی نسبتاً نازک و ساختار تشکیل دهنده پوشش سلولی پیچیده هستند که با توجه به این دیواره سلولی پیچیده مقاومت بالایی از خود در برابر دارو نشان می‌دهد، به همین علت از نانو ذرات اکسید فلزی برای از بین بردن این پوشش استفاده می‌شود [۲۸ و ۲۹].

در این بررسی، نانوذرات اکسید مس - قلع به روش انفجار الکتریکی سیم در محیط آب تولید و به روش‌های SEM، XRD و UV-Vis Spectroscopy و BET مشخصه‌یابی شدند. همچنین خاصیت آنتی-باکتریال به روش چگالی نوری برای نانو ذرات اکسید مس - قلع در شرایط مختلف سنتز و غلظت‌های متفاوت بررسی شد.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر برای تهیه نانو ذرات اکسید مس - قلع به روش انفجار الکتریکی سیم‌های مس با پوشش قلع تولید شدند. پوشش قلع از طریق فرو بردن سیم‌های مس به قطر ۰/۲ میلی‌متر در قلع مذاب ایجاد شد. سیم‌های تهیه شده تحت اختلاف ولتاژ حدود ۵۰ ولت و شدت جریان‌های ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ آمپر در محیط آب مقطر و دمای اتاق به صورت نقطه‌ای با هم تماس داده شدند. در نتیجه انفجار حاصل و سرد شدن سریع اتم‌های فلز بخار شده در محیط آب مقطر، نانو ذرات اکسیدی تشکیل شدند. جهت مشخصه‌یابی ساختاری و فازی، نوری و توزیع اندازه ذرات نانو به ترتیب از الگوی پراش پرتو X ، از دستگاه پراش سنج پرتو X با لامپ اشعه X مس ($\lambda_{Cu-K\alpha} = 1.5406 \text{ \AA}$) در دمای اتاق و گستره 2θ از ۲۰ تا ۸۰ درجه، UV-Vis Spectrometer مدل Varian Cary 100 UV-Vis و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. برای بررسی اندازه و شکل ذرات تولید شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips XL 30 استفاده شد. همچنین روش BET برای اندازه‌گیری مساحت سطح ویژه نانوذرات اکسید مس - قلع، آنالیز کننده سطح مدل BEL SORP mini II به کار گرفته شده است که در آن مولکول‌های

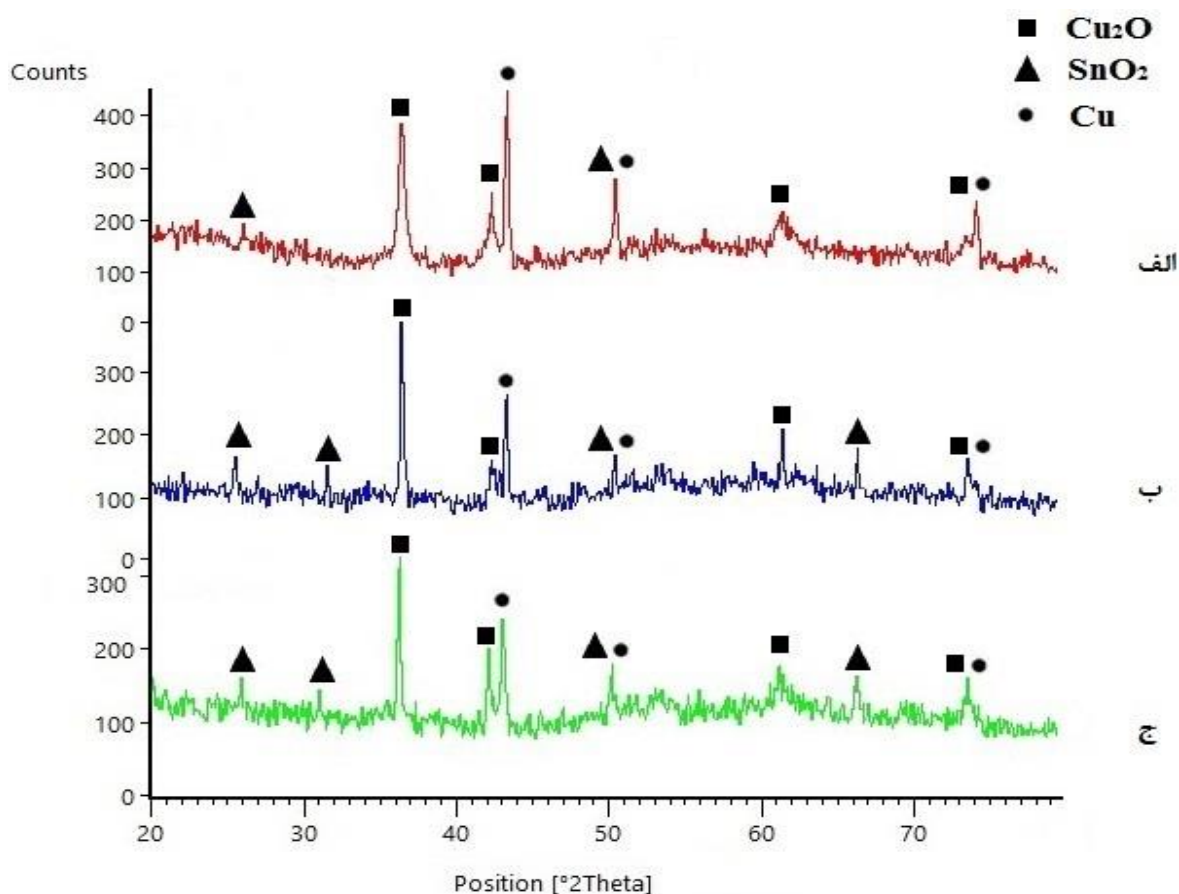
⁴ - Escherichia coli

⁵ - McFarland standard

باشد. این تصاویر تاثیر افزایش جریان الکتریکی ورودی به سیستم در اندازه ذرات سنتز شده را نشان داده است. با افزایش جریان ورودی برای انجام فرآیند انفجار سیم از ۱۰۰ به ۵۰۰ آمپر، متوسط اندازه ذرات از ۳۷/۵ نانومتر به ۱۹ نانومتر کاهش یافته که این نتیجه به دلیل تشکیل جوانه‌های ریز اولیه با نرخ سرد شدن بالاست و در نتیجه اندازه ذرات کاهش می‌یابد.

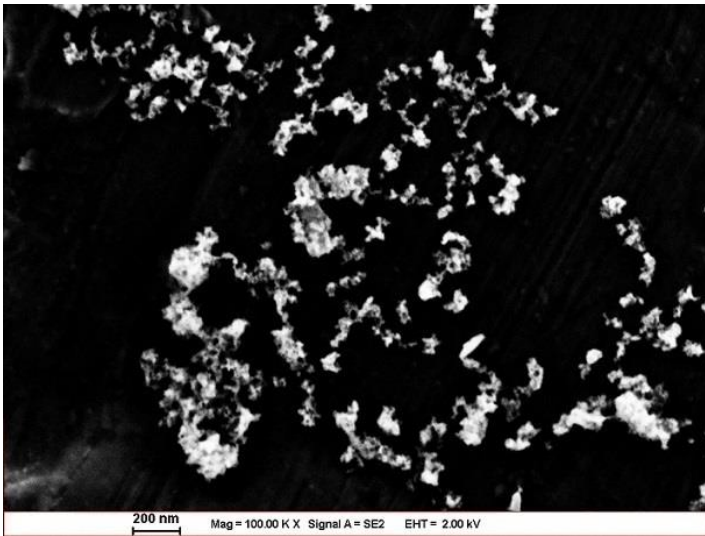
با ۴۲، ۳۱/۵ و ۲۳ نانومتر، که در نمونه سنتز شده تحت جریان ۵۰۰ آمپر به دلیل نرخ سرد شدن سریع از دمای بالاتر اندازه ذرات کوچک‌تر شده است.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو ذرات اکسید مس - قلع سنتز شده تحت جریان‌های ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ آمپر در شکل ۲- الف، ب و ج نشان داده شده که متوسط اندازه ذرات به ترتیب ۳۷/۵، ۲۵ و ۱۹ نانومتر می‌باشد؛ اما برخی از ذرات با اندازه بزرگ‌تر نیز دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از چسبیدن ذرات به هم و تشکیل آگلومره

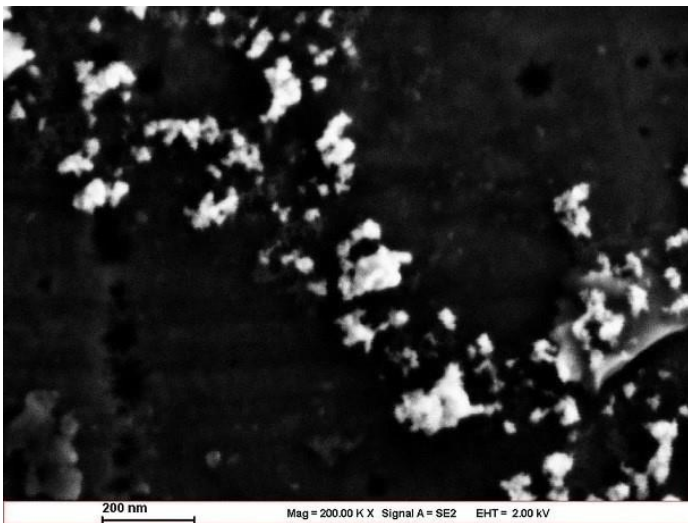
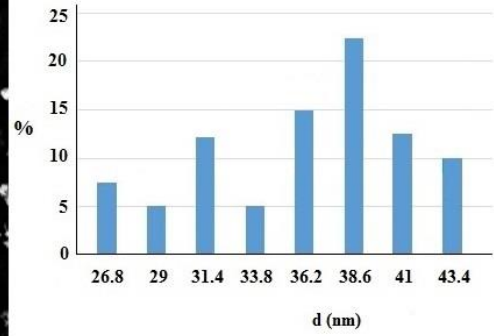


شکل ۱- طیف پراش اشعه ایکس نانو ذرات اکسید مس - قلع سنتز شده (الف) جریان ۵۰۰، (ب) جریان ۲۵۰

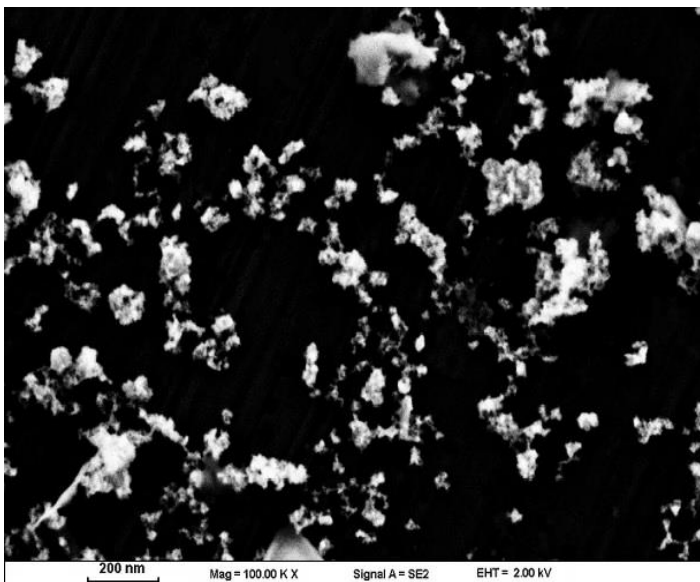
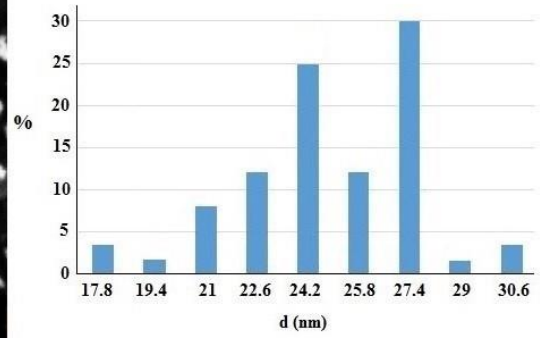
و (ج) جریان ۱۰۰ آمپر



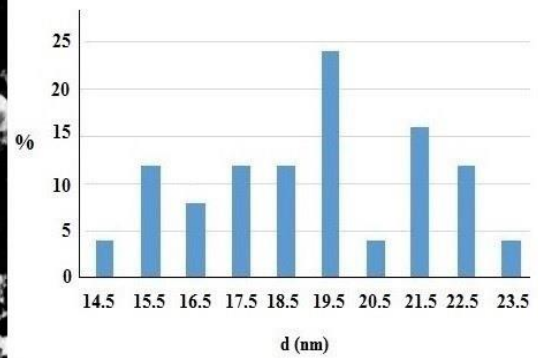
الف



ب



ج



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو ذرات اکسید مس - قلع سنتز شده الف) جریان ۱۰۰، ب) جریان ۲۵۰

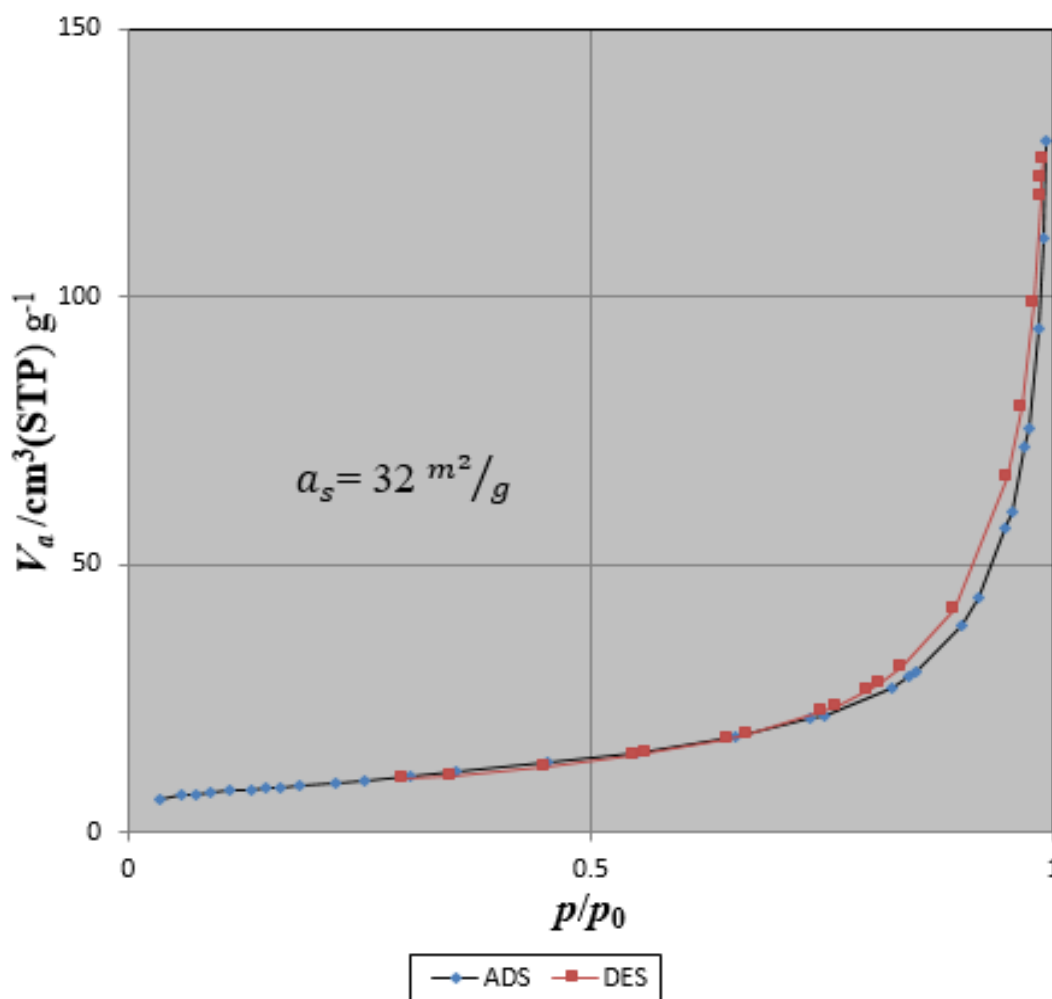
و ج) جریان ۵۰۰ آمپر

که S مساحت سطح ویژه و ρ چگالی ماده می‌باشد [۳۳]. بنابراین متوسط اندازه ۲۹ نانومتر بود که مطابقت خوبی با نتایج SEM داشت.

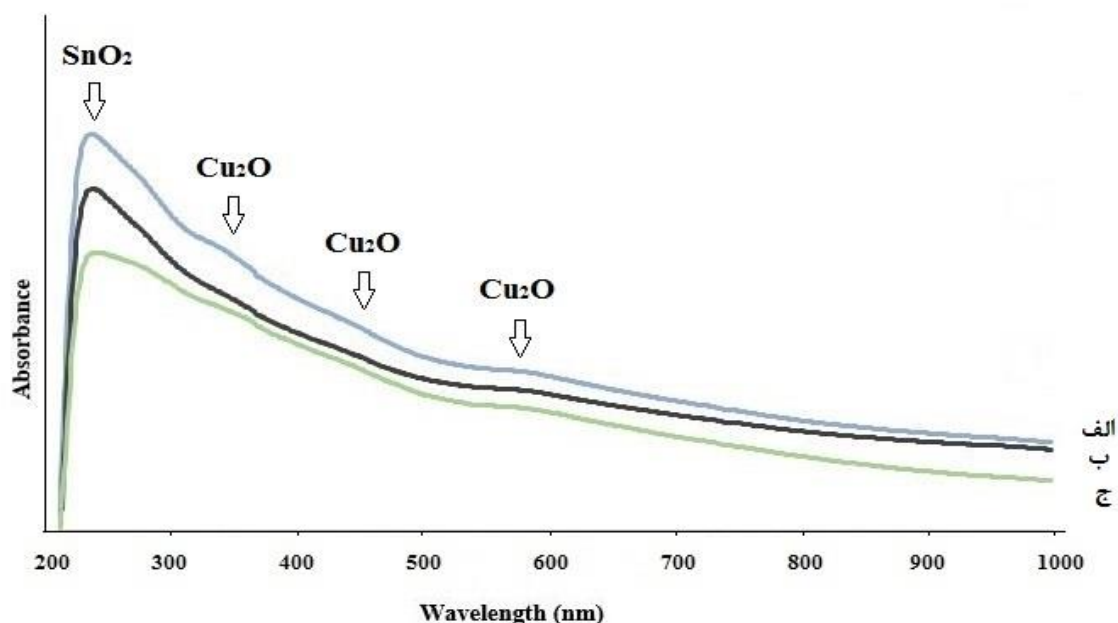
برای توصیف جذب نوری از طیف سنج مرئی-فرابنفش استفاده شده است که در شکل ۴ طیف جذبی نوری نمونه‌ها در محدوده طول موج ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل پیداست، محدوده جذب (۲۶۰ - ۲۲۰) نانومتر در هر سه نمونه مربوط به وجود نانو ذرات SnO_2 [۳۲] و همچنین محدوده طول موج‌های (۳۵۰ - ۳۰۰)، (۴۶۵ - ۴۱۰) و (۶۰۰ - ۵۵۰) نانومتر مربوط به وجود نانو ذرات Cu_2O است [۳۴ و ۳۵].

شکل ۳ مساحت سطح ویژه نمونه اکسید مس - قلع سنتز شده تحت جریان ۲۵۰ نانومتر را نشان می‌دهد. مساحت سطح ویژه متوسط ۳۸/۹ مترمربع بر گرم به دست آمد. اگر ذرات جامد شکل کروی با سطح صاف و اندازه یکسان فرض شوند، میانگین عدد اندازه دانه را می‌توان تخمین زد. میانگین اندازه ذرات از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D = \frac{6}{\rho \times S}$$



شکل ۳- توزیع BET از نانو ذرات اکسید مس - قلع تولید شده در شدت جریان ۲۵۰ آمپر



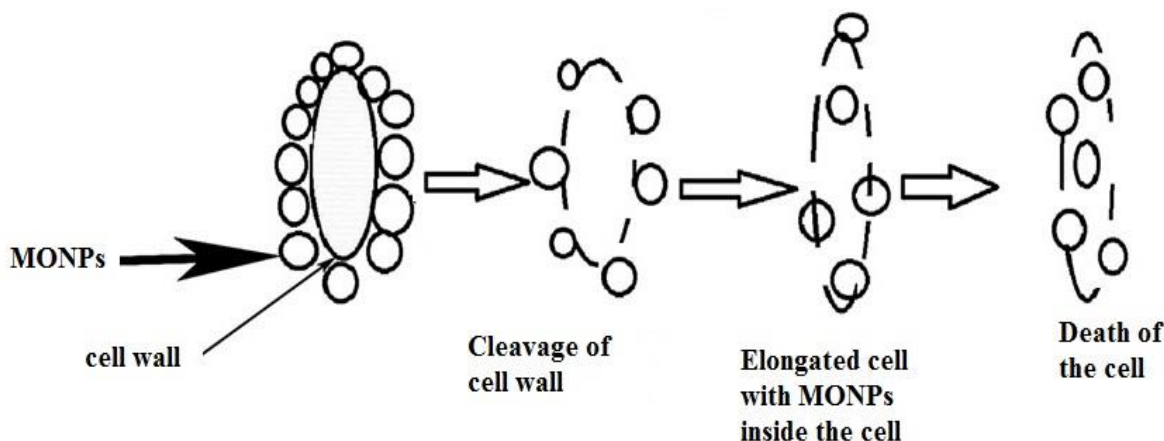
شکل ۴- طیف جذب نوری نانو ذرات اکسید مس - قلع سنتز شده (الف) جریان ۱۰۰، (ب) جریان ۲۵۰

و (ج) جریان ۵۰۰ آمپر

همانند: تجریه نانو ذرات و تشکیل گونه‌های واکنشی اکسیژن، تعامل الکترواستاتیکی نانو ذرات با دیواره سلولی باکتری و فعال‌سازی فتوکاتالیتیکی نوری نانو ذرات. یکی از دلایل ممکن برای اثر ضد باکتری می‌تواند تعامل مستقیم نانو ذرات اکسید فلزی با سطح غشای خارجی سلول باکتری باشد. نوری نانو ذرات، مکانیزم اصلی برای نانوذرات اکسید فلزی از طریق استرس اکسیداتیو تولید شده توسط گونه‌های واکنش اکسیژنه می‌باشد که شامل رادیکال‌های سوپراکسید، رادیکال‌های هیدروکسیل، پراکسید هیدروژن و اکسیژن مجزا هستند که می‌توانند بر روی سطح نانوذرات اکسید فلزی تشکیل شوند و موجب آسیب رساندن به پروتئین‌ها و آنزیم‌های موجود در باکتری‌ها و در نهایت مرگ سلول‌های باکتری شوند [۳۷].

شکل ۵ تصویر شماتیکی از تاثیر مکانیزم گونه‌های واکنشی اکسیژن به دلیل حضور نانو ذرات اکسید فلزی در برابر سلول باکتری را نشان می‌دهد [۳۸]. مس به دلیل پتانسیل الکتروشیمیایی بالا به راحتی بین حالت‌های اکسیداسیون تغییر کرده تا بتواند آزادانه با سلول‌های باکتری ارتباط برقرار کند.

اندازه سلول‌های باکتری معمولاً در محدوده میکرومتر می‌باشد، درحالی که غشاهای خارجی سلولی منافذی در محدوده نانومتر دارند که نانو ذرات به راحتی می‌توانند جذب این منافذ شوند [۳۶]. مکانیزم‌های دقیقی برای نانو ذرات فلزی گزارش نشده است؛ اما براساس مطالعات انجام شده تاثیر یون‌های فلزی بر روی پروتئین‌ها و آنزیم‌های موجود در باکتری سبب فعالیت ضد باکتری نانوذرات فلزی شده است. فعالیت ضد باکتری نانو ذرات مس توسط یون‌هایی است که از نانوذرات آزاد می‌شود و این فعالیت با کاهش اندازه دانه و افزایش مساحت سطح بیشتر می‌شود و این یون‌ها مستقیم با غشاهای میکروبی ارتباط برقرار کرده و فعالیت‌های بیوشیمیایی داخل سلول را مختل می‌کند. اکسید فلزات در مقیاس نانو به دلیل مساحت سطح بالایی که دارند، واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی بهتری را از خود نشان می‌دهند. با توجه به این ویژگی‌ها نانو ذرات اکسید فلزی به طور موثر با باکتری واکنش نشان داده و آن‌ها را غیر فعال می‌کند [۳۶]. با افزایش حجم نانو ذرات پتانسیل ضدباکتری افزایش می‌یابد، بنابراین غلظت‌های بالاتر نانو ذرات در اثر ضد باکتریایی قابل توجه است. مکانیزم‌های مختلفی برای اثر ضد باکتری نانو ذرات اکسید فلزی گزارش شده است



شکل ۵- تاثیر مکانیزم گونه‌های واکنشی اکسیژن به دلیل حضور نانو ذرات اکسید فلزی در برابر سلول باکتری [۳۷]

باکتری شده و فرآیند انهدام باکتری را تسریع بخشیده و در نتیجه خاصیت ضد باکتری افزایش می‌یابد.

نتیجه گیری

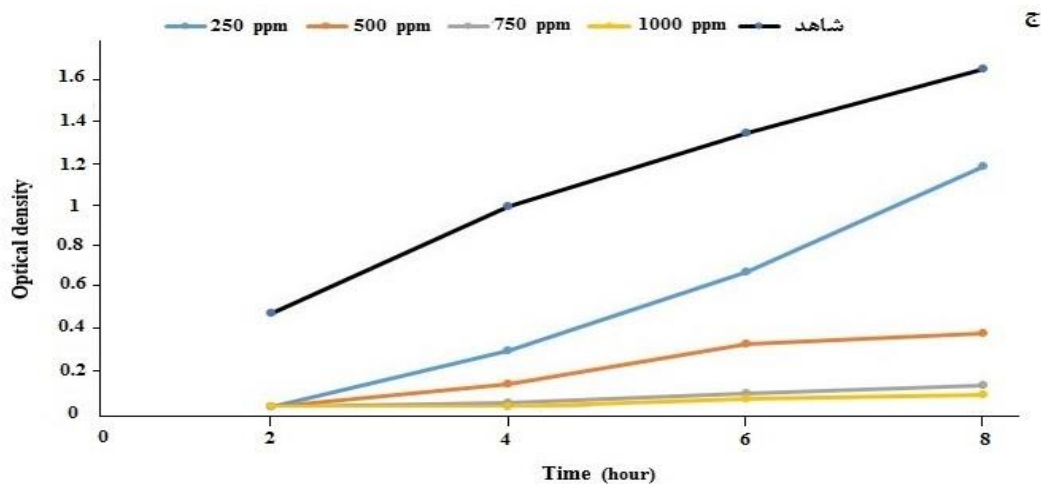
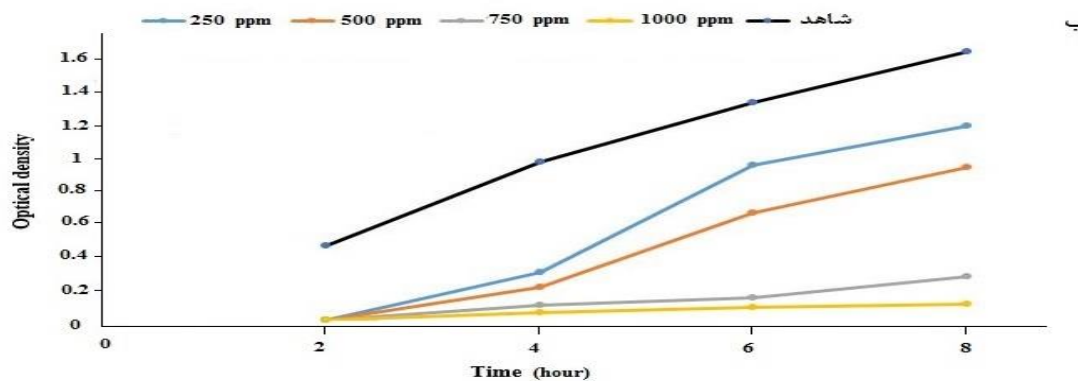
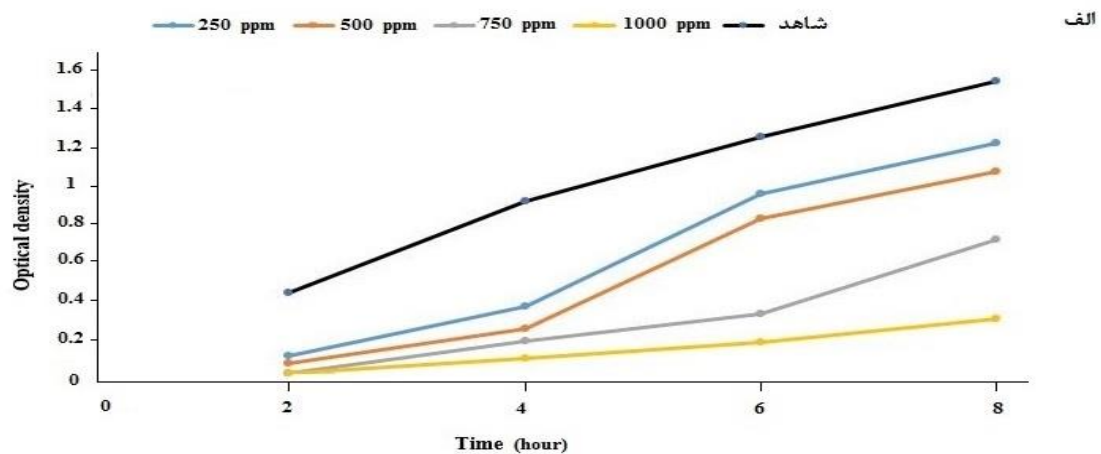
نانو ذرات اکسید مس - قلع توسط واکنش تخلیه الکتریکی در محیط آب و تحت سه جریان مختلف سنتز شد. نتایج الگوی پراش پرتو ایکس تشکیل ساختارهای Cu_2O و SnO_2 را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه‌ها نشان داد که با افزایش جریان الکتریکی ورودی دستگاه، اندازه ذرات سنتز شده کاهش یافته که کم‌ترین اندازه مربوط به جریان ۵۰۰ آمپر با متوسط اندازه ۱۹ نانومتر می‌باشد. رفتار ضد باکتریایی در مقابل باکتری اشرشیاکولای مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی با کاهش بیشتر اندازه ذرات و افزایش غلظت نانو ذره اکسید فلزی رفتار ضد باکتریایی افزایش یافته است. از این رو، نمونه سنتز شده تحت جریان ۵۰۰ آمپر و غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به عنوان نمونه بهینه انتخاب شد.

اکسیداسیون مس رادیکال‌های هیدروکسیل را در واکنش فنتون^۶ به صورت معادله (۱) تولید می‌کند. رادیکال‌های هیدروکسیل تولید شده سلول‌های باکتریایی و DNA را تجزیه می‌کنند [۲۹].



خاصیت ضد باکتری نانو ذرات مس - قلع در برابر اشرشیاکولی به روش منحنی رشد با استفاده از اندازه گیری چگالی نوری مورد بررسی قرار گرفت. چگالی نوری بیشتر در این روش نشانگر تعداد باکتری زنده بیشتر است [۸ و ۲۹]. شکل ۶ نمودار چگالی نوری در طول موج ۶۰۰ نانومتر بر حسب زمان برای غلظت‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر از نانو ذرات اکسید مس - قلع سنتز شده در شرایط مختلف و حضور باکتری را نشان می‌دهد. با توجه به منحنی‌های حاصله، در شرایط یکسان سنتز شده برای غلظت‌های مختلف، با افزایش میزان غلظت نانو ذرات اکسید مس - قلع به دلیل تماس بیشتر نانو ذرات و فعال شدن بیشتر گونه‌های واکنش اکسیژنه باکتری‌های کم‌تری احتمال زنده ماندن دارند در نتیجه خاصیت ضد باکتری نانو ذرات اکسیدی بیشتر شده است. همچنین برای غلظت معین از نمونه‌ها با شرایط مختلف سنتز نانو ذرات اکسید مس - قلع با کاهش اندازه ذرات و افزایش سطح تماس نانو ذرات اکسیدی به راحتی جذب حفره‌های موجود در سطح

⁶- Fenton's reaction



شکل ۶- منحنی رشد باکتری در حضور و عدم حضور نانو ذرات اکسید مس - قلع سنتز شده (الف) جریان ۱۰۰، (ب) جریان ۲۵۰ و (ج) جریان ۵۰۰ آمپر

References:

1- O. Yamamoto, "Influence of particle size on the antibacterial activity of zinc oxide," International Journal of Inorganic Materials, vol. 3, no. 7, pp. 643-646, 2001.

2- Q. Li, S. Mahendra, D. Y. Lyon, L. Brunet, M. V. Liga, D. Li, and P. J. Alvarez, "Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: potential applications and implications," Water research, vol. 42, no. 18, pp. 4591-4602, 2008.

- 3- L. Zhang, Y. Jiang, Y. Ding, M. Povey, and D. York, "Investigation into the antibacterial behaviour of suspensions of ZnO nanoparticles (ZnO nanofluids)," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 9, no. 3, pp. 479-489, 2007.
- 4- C. Karunakaran, S. SakthiRaadha, and P. Gomathisankar, "Photocatalytic and bactericidal activities of hydrothermally and sonochemically prepared Fe₂O₃-SnO₂ nanoparticles," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 16, no. 3, pp. 818-824, 2013.
- 5- M. Fernandez-Garcia, A. Martinez-Arias, J. Hanson, and J. Rodriguez, "Nanostructured oxides in chemistry: characterization and properties," *Chemical Reviews*, vol. 104, no. 9, pp. 4063-4104, 2004.
- 6- M. Trudeau, and J. Ying, "Nanocrystalline materials in catalysis and electrocatalysis: structure tailoring and surface reactivity," *Nanostructured Materials*, vol. 7, no. 1, pp. 245-258, 1996.
- 7- M. Bäumer, and H.-J. Freund, "Metal deposits on well-ordered oxide films," *Progress in Surface Science*, vol. 61, no. 7, pp. 127-198, 1999.
- 8- R. Katwal, H. Kaur, G. Sharma, M. Naushad, and D. Pathania, "Electrochemical synthesized copper oxide nanoparticles for enhanced photocatalytic and antimicrobial activity," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 31, pp. 173-184, 2015.
- 9- K. Niraimathi, R. Lavanya, V. Sudha, R. Narendran, and P. Brindha, "Bio-Reductive Synthesis and Characterization of Copper Oxide Nanoparticles (CuONPs) Using *Alternanthera sessilis* Linn. Leaf Extract," *Journal of Pharmacy Research* Vol, vol. 10, no. 1, pp. 29-32, 2016.
- 10- N. Mittapelly, K. Mukkanti, and B. Reguri, "Copper oxide nanoparticles-catalyzed direct N-alkylation of amines with alcohols," *Der Pharma Chemica*, vol. 3, no. 4, pp. 180-189, 2011.
- 11- H. Hsueh, T. Hsueh, S. Chang, F. Hung, T. Tsai, W. Weng, C. Hsu, and B. Dai, "CuO nanowire-based humidity sensors prepared on glass substrate," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 156, no. 2, pp. 906-911, 2011.
- 12- Y.-S. He, J. C. Campbell, R. C. Murphy, M. Arendt, and J. S. Swinnea, "Electrical and optical characterization of Sb: SnO₂," *Journal of Materials Research*, vol. 8, no. 12, pp. 3131-3134, 1993.
- 13- C. Xue, Y.-c. Shu, Y.-n. Hu, G.-p. Li, and L. Chang, "Integrated process of large-scale and size-controlled SnO₂ nanoparticles by hydrothermal method," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 23, no. 3, pp. 725-730, 2013.
- ۱۴- ر. معمارزاده، س. جوادپور و ف. پناهی، "بهینه سازی عوامل موثر بر اندازه نانو ذرات اکسید قلع به روش تاگوچی"، *مجله مواد نوین*، جلد ۳، شماره ۷، صفحه ۱۱-۲۰، بهار ۱۳۹۱.
- 15- S. Ferrere, A. Zaban, and B. A. Gregg, "Dye sensitization of nanocrystalline tin oxide by perylene derivatives," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 101, no. 23, pp. 4490-4493, 1997.
- 16- V. Vidhu, and D. Philip, "Biogenic synthesis of SnO₂ nanoparticles: Evaluation of antibacterial and antioxidant activities," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 134, pp. 372-379, 2015.
- 17- S. Singh, N. Verma, A. Singh, and B. Yadav, "Synthesis and characterization of

- CuO–SnO₂ nanocomposite and its application as liquefied petroleum gas sensor,” *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 18, pp. 88-96, 2014.
- 18- A. A. Ashkarran, “A novel method for synthesis of colloidal silver nanoparticles by arc discharge in liquid,” *Current Applied Physics*, vol. 10, no. 6, pp. 1442-1447, 2010.
- 19- M. Gazanfari, M. Karimzadeh, S. Ghorbani, M. Sadeghi, G. Azizi, H. Karimi, N. Fattahi, and Z. Karimzadeh, “Synthesis of aluminium nanoparticles by arc evaporation of an aluminium cathode surface,” *Bulletin of Materials Science*, vol. 37, no. 4, pp. 871-876, 2014.
- 20- Q. H. Tran, and A.-T. Le, “Silver nanoparticles: synthesis, properties, toxicology, applications and perspectives,” *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 4, no. 3, pp. 033001, 2013.
- 21- A. Ashkarran, “Metal and metal oxide nanostructures prepared by electrical arc discharge method in liquids,” *Journal of Cluster Science*, vol. 22, no. 2, pp. 233, 2011.
- 22- Y.A. Kotov, “Electric Explosion of Wires as a Method for Preparation of Nanopowders”, *Journal of Nanoparticle Research*, 5, 539-550, 2003.
- 23- H. Khalid, S. Shamaila, N. Zafar, and S. Shahzadi, “synthesis of copper nanoparticle by chemical reduction method,” *Science International*, vol. 27, no. 4, 2015.
- 24- T. Jan, J. Iqbal, M. Ismail, N. Badshah, Q. Mansoor, A. Arshad, and Q. M. Ahkam, “Synthesis, physical properties and antibacterial activity of metal oxides nanostructures,” *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 21, pp. 154-160, 2014.
- 25- N. Talebian, and F. Jafarinezhad, “Morphology-controlled synthesis of SnO₂ nanostructures using hydrothermal method and their photocatalytic applications,” *Ceramics International*, vol. 39, no. 7, pp. 8311-8317, 2013.
- 26- T. Jan, J. Iqbal, U. Farooq, A. Gul, R. Abbasi, I. Ahmad, and M. Malik, “Structural, Raman and optical characteristics of Sn doped CuO nanostructures: A novel anticancer agent,” *Ceramics International*, vol. 41, no. 10, pp. 13074-13079, 2015.
- 27- I. Subhankari and P. L. Nayak, “Antimicrobial activity of copper nanoparticles synthesised by ginger (*Zingiber officinale*) extract,” *World Journal of Nano Science & Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 10-13, 2013.
- 28- A. A. Ashkarran, M. Ghavami, H. Aghaverdi, P. Stroeve, and M. Mahmoudi, “Bacterial effects and protein corona evaluations: crucial ignored factors in the prediction of bio-efficacy of various forms of silver nanoparticles,” *Chemical research in toxicology*, vol. 25, no. 6, pp. 1231-1242, 2012.
- 29- M. J. Hajipour, K. M. Fromm, A. A. Ashkarran, D. J. de Aberasturi, I. R. de Larramendi, T. Rojo, V. Serpooshan, W. J. Parak, and M. Mahmoudi, “Antibacterial properties of nanoparticles,” *Trends in biotechnology*, vol. 30, no. 10, pp. 499-511, 2012.
- 30- G. Sharma, D. Pathania, and M. Naushad, “Preparation, characterization and antimicrobial activity of biopolymer based nanocomposite ion exchanger pectin zirconium (IV) selenotungstophosphate: application for removal of toxic metals,” *Journal of*

- Industrial and Engineering Chemistry, vol. 20, no. 6, pp. 4482-4490, 2014.
- 31- C. Peng, J. Wang, N. Zhou, and G. Sun, "Fabrication of nanopowders by electrical explosion of a copper wire in water," *Current Applied Physics*, vol. 16, no. 3, pp. 284-287, 2016.
- 32- X. Li, R. Deng, Y. Li, B. Yao, Z. Ding, J. Qin, and Q. Liang, "Effect of Mg doping on optical and electrical properties of SnO₂ thin films: An experiment and first-principles study," *Ceramics International*, vol. 42, no. 4, pp. 5299-5303, 2016.
- 33- M. Zhou, Z. Wei, H. Qiao, L. Zhu, H. Yang, and T. Xia, "Particle size and pore structure characterization of silver nanoparticles prepared by confined arc plasma," *Journal of Nanomaterials*, vol. 3, p. 3, 2009.
- 34- A. Kar, S. Sain, S. Kundu, A. Bhattacharyya, S. Kumar Pradhan, and A. Patra, "Influence of size and shape on the photocatalytic properties of SnO₂ nanocrystals," *ChemPhysChem*, vol. 16, no. 5, pp. 1017-1025, 2015.
- 35- C.-H. Kuo, C.-H. Chen, and M. H. Huang, "Seed-mediated synthesis of monodispersed Cu₂O nanocubes with five different size ranges from 40 to 420 nm," *Advanced Functional Materials*, vol. 17, no. 18, pp. 3773, 2007.
- 36- Y. Zhang, B. Deng, T. Zhang, D. Gao, and A.-W. Xu, "Shape effects of Cu₂O polyhedral microcrystals on photocatalytic activity," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 114, no. 11, pp. 5073-5079, 2010.
- 37- S. Jadhav, S. Gaikwad, M. Nimse, and A. Rajbhoj, "Copper oxide nanoparticles: synthesis, characterization and their antibacterial activity," *Journal of Cluster Science*, vol. 22, no. 2, pp. 121-129, 2011.
- 38- Y. K. Young, J. H. Byeon, J. H. Park, and J. Hwang, "Susceptibility constants of Escherichia coli and Bacillus subtilis to silver and copper nanoparticles," *Science of the Total Environment*, vol. 373, no. 2 pp. 572-575, 2007.
- 39- Y. N. Chang, M. Zhang, L. Xia, J. Zhang, and G. Xing, "The toxic effects and mechanisms of CuO and ZnO nanoparticles," *Materials*, vol. 5, no. 12, pp. 2850-2871, 2012.
- 40- G. Subbiahdoss, S. Sharifi, D. W. Grijpma, S. Laurent, H. C. van der Mei, M. Mahmoudi, and H. J. Busscher, "Magnetic targeting of surface-modified superparamagnetic iron oxide nanoparticles yields antibacterial efficacy against biofilms of gentamicin-resistant staphylococci," *Acta biomaterialia*, vol. 8, no. 6, pp. 2047-2055, 2012.
- 41- A. Sirelkhatim, S. Mahmud, A. Seenii, N. H. M. Kaus, L. C. Ann, S. K. M. Bakhori, H. Hasan, and D. Mohamad, "Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism," *Nano-Micro Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 219-242, 2015.
- 42- V. K. Vidhu, and D. Philip, "Phytosynthesis and applications of bioactive SnO₂ nanoparticles," *Materials Characterization*, vol. 101, pp. 97-105, 2015.