فصلنامه سرامیک ایران

اثر افزودن روی بر ریزساختار و خواص آنتی باکتریال نانوذرات اکسید آهن تولید شده به روش تخلیه الکتریکی در محیط مایع

فرشته شهبازی[۱]، رضا احمدی[۱*]، محمد نوغانی[۱]، غلامرضا کریمی[۲]

[۱] گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) ، قزوین

[۲] گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

چکیده: اخیرا به سبب ایجاد مقاومت سویه‌های باکتری در برابر آنتی باکتریال‌های آلی، نانوذرات اکسید فلزی به عنوان عوامل ضدباکتری مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. نانوذرات اکسید آهن و اکسید روی در عین سادگی سنتز و مقرون به صرفه بودن، خاصیت ضدباکتری بالایی در برابر انواع باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی دارند. در این پژوهش نانوذرات اکسید آهن و اکسیدآهن- اکسید روی به روش تخلیه الکتریکی در مایع سنتز شدند. جهت بررسی‌های ریزساختاری از روش‌های پراش اشعه ایکس و طیف‌سنجی مرئی استفاده شد که نتایج حاکی از تشکیل فازهای Fe_3O_4 و Fe در نمونه اکسید آهن و ZnO و $ZnFe_2O_4$ در نمونه اکسید آهن-اکسید روی است و اندازه بلورک‌ها به ترتیب ۸ nm و ۱۸/۴nm به دست آمد. آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری ، وجود ساختار کروی و یکنواخت هسته-پوسته را تایید کرد. آنالیزهای ضدباکتری به دو روش حداقل غلظت مهارکنندگی و چگالی نوری انجام شد که خاصیت ضدباکتری نانوذرات در هر دو روش تایید شد. نانوذرات اکسیدآهن-اکسید روی نسبت به نانوذرات اکسید آهن به‌خاطر فعال شدن سازوکارهای بیشتر و خاصیت هم‌افزایی کاتیون‌های Fe^{2+}، Fe^{3+} و Zn^{2+} عملکرد بهتری نشان دادند.

کلمات کلیدی: نانوذره،آنتی باکتریال، باکتری گرم مثبت، باکتری گرم منفی، تخلیه الکتریکی در مایع.

نویسنده مسئول:
آقای دکتر رضا احمدی
دانشگاه بین‌المللی امام خمینی
re.ahmadi@eng.ikiu.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی
صفحه‌های: ۷۲ تا ۸۰
شاپا چاپی: ۳۳۵۱-۱۷۳۵
شاپا الکترونیکی: ۳۰۹۷-۲۷۸۳
زبان نشریه: فارسی
دسترس‌پذیر در نشانی: www.JICERS.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.6.7

۱- مقدمه

یکی از شاخه‌های مهم فناوری نانو، نانوبیوتکنولوژی است. میان فناوری نانو و پزشکی از دو جهت تعامل وجود دارد. اول اینکه ساختارهایی که با فناوری نانو ایجاد شده‌اند می توانند به عنوان دستگاه‌ها یا مواد بسیار پیشرفته در زیست‌شناسی و پزشکی مورد استفاده قرار گیرند. دوم اینکه می‌توان از مولکول‌های بیولوژیکی برای جمع‌آوری ساختارهای نانو استفاده کرد. فناوری نانو در داروسازی و دارورسانی، تشخیص و بررسی بیماری، مواد کاشتنی و سازگار با بدن، جراحی و ابزار پزشکی به کار می‌رود [۱, ۲]. عوامل ضدباکتری نقش عمده‌ای در بخش بهداشت در مبارزه با عوامل بیماری‌زای باکتریایی دارند و همچنین در صنایع غذایی، صنایع نساجی و به عنوان ضدعفونی‌کننده آب به همان اندازه مفید هستند [۳]. تاکنون، بیشتر ترکیبات آلی به عنوان ضدعفونی کننده اصلی در برابر عوامل بیماری‌زای باکتریایی استفاده می‌شدند، اما استفاده از این ترکیبات آلی به دلیل تکامل باکتری‌های مقاوم در برابر چند دارو به شدت مورد چالش قرار گرفته است [۴]. علاوه براین، این ترکیبات آلی برای سلول‌های سالم انسان سمی هستند و همچنین به تغییرات شیمیایی و فیزیکی مانند pH، درجه حرارت بالا و فشار مورد نیاز در فرآیندهای مختلف صنعتی بسیار حساس هستند [۵]. به همین سبب اخیرا نانوذرات به‌عنوان عوامل ضدمیکروبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.6.7]

از نانوذرات اکسید فلزات مختلف همانند اکسیدآهن، روی، مس، منیزیم، قلع وغیره در این مورد کاربردی است [۱]. مگنتیت، Fe_3O_4، یک اکسید آهن مغناطیسی با ساختار شبکهFCC است که ساختار اسپینل معکوس مکعبی با اکسیژن دارد، به طوریکه کاتیون‌های آهن دو و سه ظرفیتی مکان‌های چهار و هشت وجهی را اشغال می‌کنند [۶]. نانوذره اکسید روی، ZnO، یک افزودنی غذایی مورد تأیید FDA است و به طور کلی در غلظت‌های کم به عنوان ماده بی¬خطر و غیرسمی شناخته می‌شود [۷]

روش‌های مختلفی جهت سنتز نانوذرات وجود دارد، ازجمله روش سل‌ژل[۱]، هم‌رسوبی[۲]، سونوشیمی[۳]، هیدروترمال[۴]، میکروامولوسیون[۵] و روش‌هایی که مبتنی بر نیروهای مکانیکی هستند همانند آسیاکاری[۶]، روش‌های مبتنی بر تبخیر ماده اولیه و تخلیه الکتریکی[۷]. از میان این روش‌ها، روش تخلیه الکتریکی مزایایی از جمله اقتصادی بودن، سازگاری با محیط زیست و تولید نانوذرات با خلوص بسیار بالا را دارد. در صورت بهینه کردن روش، تهیه نانو ذرات به این روش قابلیت صنعتی شدن را دارد. در این پژوهش از روش تخلیه الکتریکی در مایع به سبب سادگی و مقرون به صرفه بودن برای تهیه نانوذرات اکسیدآهن و اکسید آهن- اکسید روی استفاده شده است [۸]. سپس نانوذرات سنتز شده از لحاظ مورفولوژی، ساختار و خواص آنتی‌باکتریال مورد مطالعه قرار گرفتند.

۲- مواد و روش تحقیق:

۲-۱-سنتز نانوذرات و بررسی‌های ریزساختاری:

جهت سنتز نانوذرات اکسید آهن- اکسید روی از سیم‌های آهنی کم کربن (مفتول ST37، چگالی $8745\ kg/m^3$ ، قطر اولیه ۰/۹ mm)، شمش روی (با خلوص شمش روی۹۹/۹۸٪، چگالی $7133\ kg/m^3$) و آب مقطر به عنوان مواد اولیه استفاده شد. جهت دستیابی به مفتول قطر ۰/۲ mm، مفتول ST37 با قطر ۰/۹ mm در داخل اسید HCl به مدت زمان مشخص قرار داده شد. سیم‌های با قطر ۰/۲ mm به الکترودهای آند و کاتد در سیستم تخلیه الکتریکی متصل شدند و تخلیه قوس الکتریکی در یک ظرف پلاستیکی حاوی آب مقطر با pH=۷ و شدت جریان ۵۰۰ A انجام گرفت. تعدادی از سیم‌های با قطر ۰/۲ mm در داخل مذاب روی فرو برده شدند تا پوششی از فلز روی بر روی سیم نشانده شود. این سیم‌ها با قطر نهایی ۰/۰۱ mm ± ۰/۲۲ در شدت جریان ۵۰۰A سنتز شدند.

نمونه‌ها پس از سانتریفیوژ، در خشک‌کن با دمای ۸۰°C قرار داده شدند تا پودر جامد نانوذرات حاصل شود. جهت شناسایی فازها و تعیین متوسط اندازه بلورک‌ها از پراش اشعه ایکس XRD با استفاده از دستگاه PANalytical از پرتوایکسCuKα1 با طول موج ۱/۵۴۰۶ آنگستروم و در محدوده ۲θ بین ۵ تا ۸۰ درجه استفاده شد. طیف جذبی نانوذرات سنتز شده توسط دستگاه طیف‌سنجی مطالعه شد. میزان جذب نانوذرات آهن در محدوده طول موج ۱۹۰-۱۱۰۰ nm با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل UV-1800 بررسی شد. جهت بررسی اندازه و مورفولوژی نانوذرات سنتز شده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA3TESCAN-XMU و دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مدل HITACHI- H9500 استفاده شد. همچنین از آنالایزر طیف‌سنج پراش انرژی اشعه ایکس (EDS) متصل به دستگاه FESEM برای تعیین ترکیب شیمیایی و تجزیه و تحلیل ساختاری نمونه‌های سنتز شده استفاده گردید.

۲-۲-بررسی‌های ضدباکتری:

بررسی‌های ضد باکتری مطابق با استاندارد (CLSI M07-A8) انجام شدند. باکتری‌های مورد بررسی از نوع گرم‌منفی Escherichia coli از نوع MHD5 و گرم مثبت Bacillus subtilis بودند.

[1] Sol-gel
[2] Co-precipitation
[3] Sonochemistry
[4] Hydrothermal
[5] Microemulsion
[6] Milling
[7] Electrical discharge

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.6.7]

۲-۲-۱- بررسی خواص ضدباکتری به روش حداقل غلظت بازدارندگی(MIC):

محیط کشت مایع از پودرمولر هینتون براث[8] MHB کیولب ایتالیا تهیه گردید. سپس سوسپانسیون باکتری معادل با استاندارد نیم مک فارلند[9] تهیه شد. از محیط کشت تازه تهیه شده مقدار ۱۰۰ µL در هر چاهک پلیت ۹۶ خانه ریخته شد. سپس مقدار ۱۰۰ µL از سوسپانسیون نانوذره در چاهک‌های ردیف اول ریخته شده و رقیق‌سازی در کل چاهک‌ها انجام شد. سپس مقدار ۱۰۰ µL از سوسپانسیون باکتری به هر چاهک اضافه شد. برای هر نمونه دو تکرار، کنترل مثبت و کنترل منفی قرار داده شد. پلیت‌ها با پارافیلم پوشانده و به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه انکوباتور-شیکر در دمای ۳۷°C قرار داده شدند. بعد از انکوباسیون به هریک از چاهک ها ۴۰ µL نمک تترازولیوم[10] (MTT) با غلظت ۰/۲ mg/ml اضافه و در دمای اتاق به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شد. رشد باکتری‌ها در چاهک‌ها با ظاهر شدن رنگ بنفش نمایان شد، کمترین غلظت نانوذره در چاهک که مانع از رشد باکتری‌ها بود، بدون رنگ مشخص شد که به‌عنوان مقدار MIC در نظر گرفته شد. در نهایت پلیت با دستگاه الایزا ریدر با طول موج ۶۰۰ nm مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۲-۲- بررسی خواص ضدباکتری به روش چگالی نوری:

محیط کشت مایع، از پودرال بی براث (LB[11]) تهیه شد. سپس سوسپانسیون باکتری معادل استاندارد نیم مک از هر کدام از باکتری‌ها تهیه گردید. سپس با افزودن مقادیر مساوی از سوسپانسیون باکتری و افزودن مقادیرمختلف نانوذره به محیط کشت مایع، ۴ نمونه با غلظت ۱۵۶، ۳۱۲، ۶۲۵ و ۱۲۵۰ ppm تهیه شد. مخلوط حاصل در دستگاه انکوباتر- شیکر با دمای ۳۷°C قرار داده شد و بعد از هر بازه زمانی ۲ ساعته چگالی نوری در طول موج ۶۰۰ nm به وسیله دستگاه Spectro UV- VIS مدل UVD-3200 اندازه‌گیری شد تا نرخ رشد باکتری هر کدام از نمونه‌ها تعیین شود. از هر غلظت یک نمونه، به عنوان نمونه شاهد جهت کالیبراسیون دستگاه دردمای ۰°C قرار داده شد. برای هرغلظت از نمونه‌ها ۳ تکرار در نظر گرفته شد تا تکرارپذیری آزمایش‌ها اثبات شود و میانگین اعداد حاصل گزارش شد.

۳-نتایج و بحث:

۳-۱-بررسی‌های ریزساختاری:

۳-۱-۱- آنالیز XRD:

شکل ۱ طرح پراش اشعه ایکس نمونه‌های پودری اکسید آهن و اکسیدآهن- اکسید روی را نشان می‌دهد. نمودار آبی مربوط به نانوذرات اکسید آهن است که پیک های مشخص شده مطابق با شماره کارت ۰۳۱۵-۰۸۸-۰۱ و ۰۱-۰۸۷-۰۷۲۲ به ترتیب نشانگر وجود مگنتیت (Fe_3O_4) و آهن خالص (Fe) با ساختار مکعبی است [۹, ۱۰]. نمودار قرمز در شکل ۱ مربوط به نانوذرات اکسید آهن- اکسید روی است. پیک‌های مشخص‌شده مطابق با شماره کارت ۰۲۰۵-۰۷۹-۰۱ و ۱۰۱۰-۰۸۹-۰۱ به ترتیب نشانگر وجود اکسید روی (ZnO) با ساختار هگزاگونال و اکسید آهن-روی ($ZnFe_2O_4$) با ساختار مکعبی است [۱۱، ۱۲]. متوسط اندازه بلورک‌ها با استفاده از فرمول دبای-شرر محاسبه شده و در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های سنتز شده و متوسط اندازه بلورک‌ها و اندازه ذرات.

نمونه	نام اختصاری	متوسط اندازه بلورک (XRD) (nm)	متوسط اندازه ذرات (SEM) (nm)
Fe	S1	۸	۱۰/۳
Fe-Zn	S2	۱۸/۴	۳۰/۹

[8] Mueller-Hinton Broth

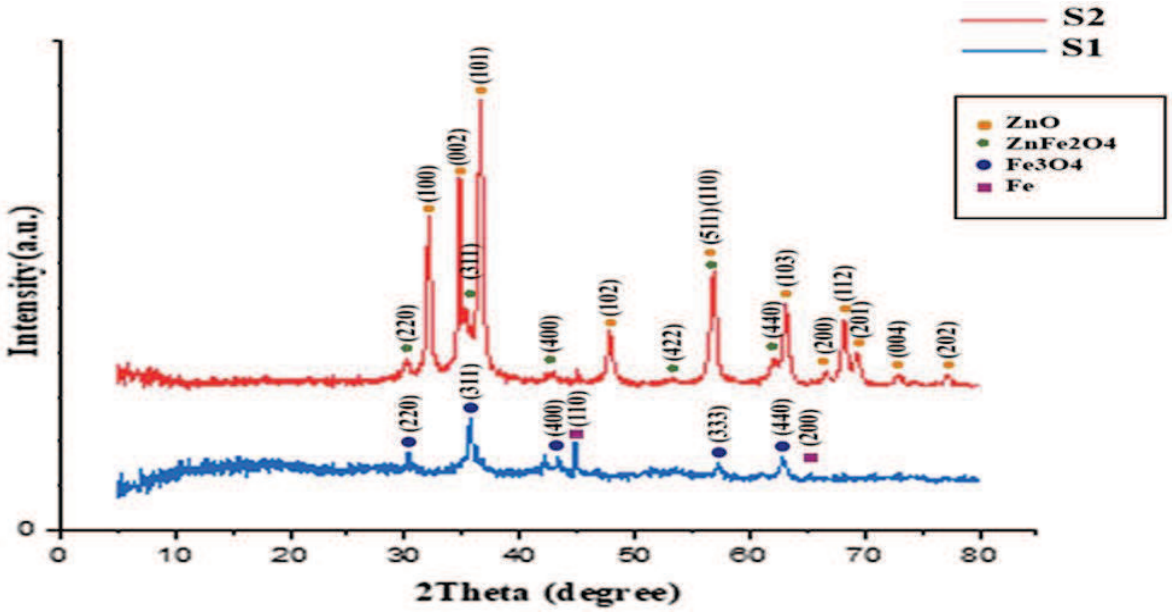
[9] غلظت باکتری معادل 10^5 cfu/ml در طول موج ۶۰۰ نانومتر

[10] Methyl thiazolyl diphenyl-tetrazolium bromide

[11] LB Broth

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]

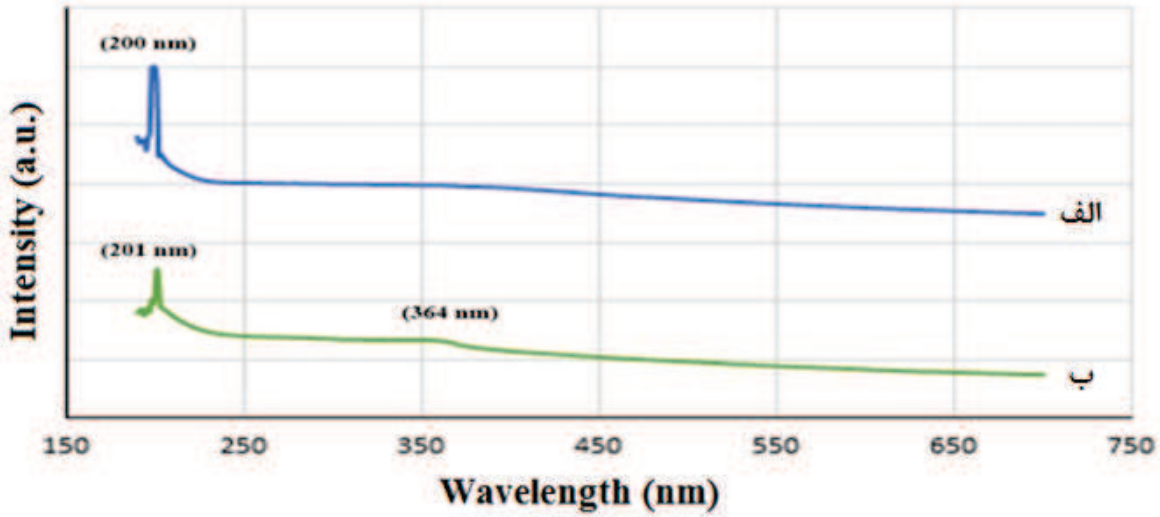
[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.6.7]



شکل ۱- نمودار XRD مربوط به نمونه‌های سنتز شده

۳-۱-۲- آنالیز UV_VISIBLE:

شکل ۲ نمودارهای طیف جذبی نانوذرات سنتز شده را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نانوذرات اکسید آهن در محدوده ۲۰۰ nm و نانوذرات اکسید روی در محدوده ۳۶۰ nm دارای پیک جذبی می‌باشند [۱۳, ۱۴].



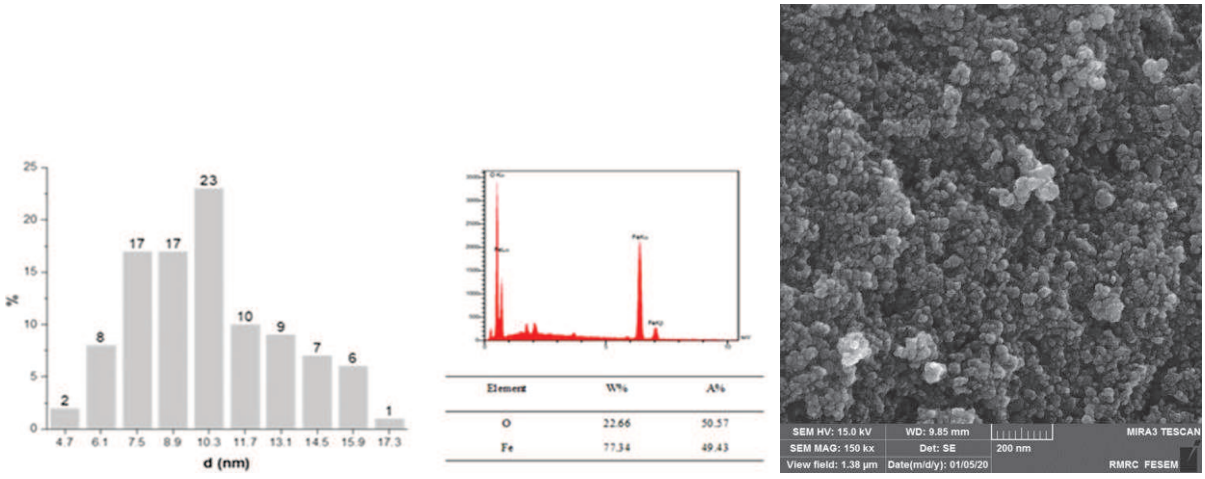
شکل ۲- .طیف جذبی نانوذرات سنتز شده الف) نمونهS1 و ب) نمونه S2.

۳-۱-۳- آنالیز FESEM:

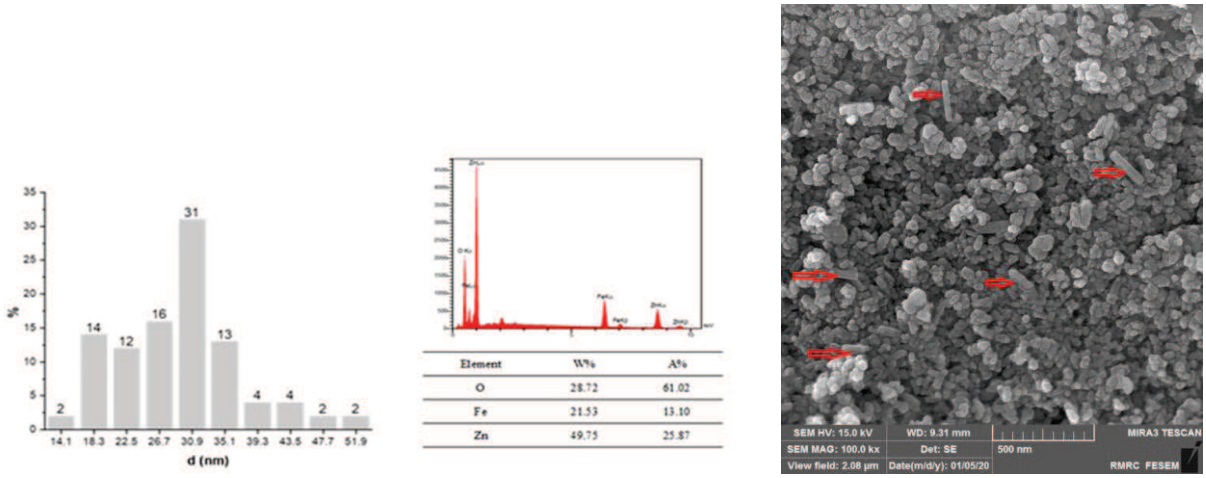
تصویر FESEM نمونه S1 و S2 به ترتیب در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. میانگین اندازه ذرات نمونه S1، ۱۰/۳ nm بوده ومورفولوژی ذرات کاملا کروی هستند زیرا سنتز نانوذرات در محیط آب مقطر نسبت به محیط گازی موجب تولید ذرات همگن و یکنواخت کروی می‌شود که در رابطه مستقیم با نرخ سرد شدن و ضریب حرارتی محیط است [۱۵]. در مورد نمونهS2، میانگین اندازه ذرات ۳۰/۹ nm است (شکل۴). علت درشت شدن ذرات نسبت به آهن خالص در شدت جریان و قطر یکسان، تشکیل ذرات اکسید روی است که به طور ذاتی نانوذرات اکسید روی دارای مورفولوژی میله‌ای بوده (فلش قرمز) و درنتیجه در اندازه ذرات

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.6.7]
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]

تاثیر بسزایی داشته است [۱۶].



شکل ۳- تصویر FESEM ونمودار توزیع فراوانی اندازه ذرات و تصویر EDS مربوط به نمونهS1.



شکل ۴- تصویر FESEM ونمودار توزیع فراوانی اندازه ذرات و تصویر EDS مربوط به نمونهS2.

۳-۱-۴- آنالیز TEM:

شکل۵ تصویر TEM از نمونه‌های سنتز شده را نشان می دهد. نمونهS1 دارای مورفولوژی کروی و یکنواخت می‌باشد. انـدازه ذرات در محدوده ۱۱/۲ nm قرار دارد. تصاویر گویای تشکیل ساختار هسته-پوسته است که هسته دارای ترکیب آهـن خـالص و پوسـته دارای ترکیب اکسید آهن است. درمورد نمونه S2 به سبب وجود اکسید روی ساختار نانوذرات بـه شـکل میلـه‌ای دیـده مـی‌شـود. متوسط اندازه ذرات در محدوده ۲۰ nm است. ساختار هسته-پوسته نیز به وضوح در تصاویر مشاهده می‌شود [۱۷, ۱۸].

۳-۱-بررسی‌های ضد باکتری:

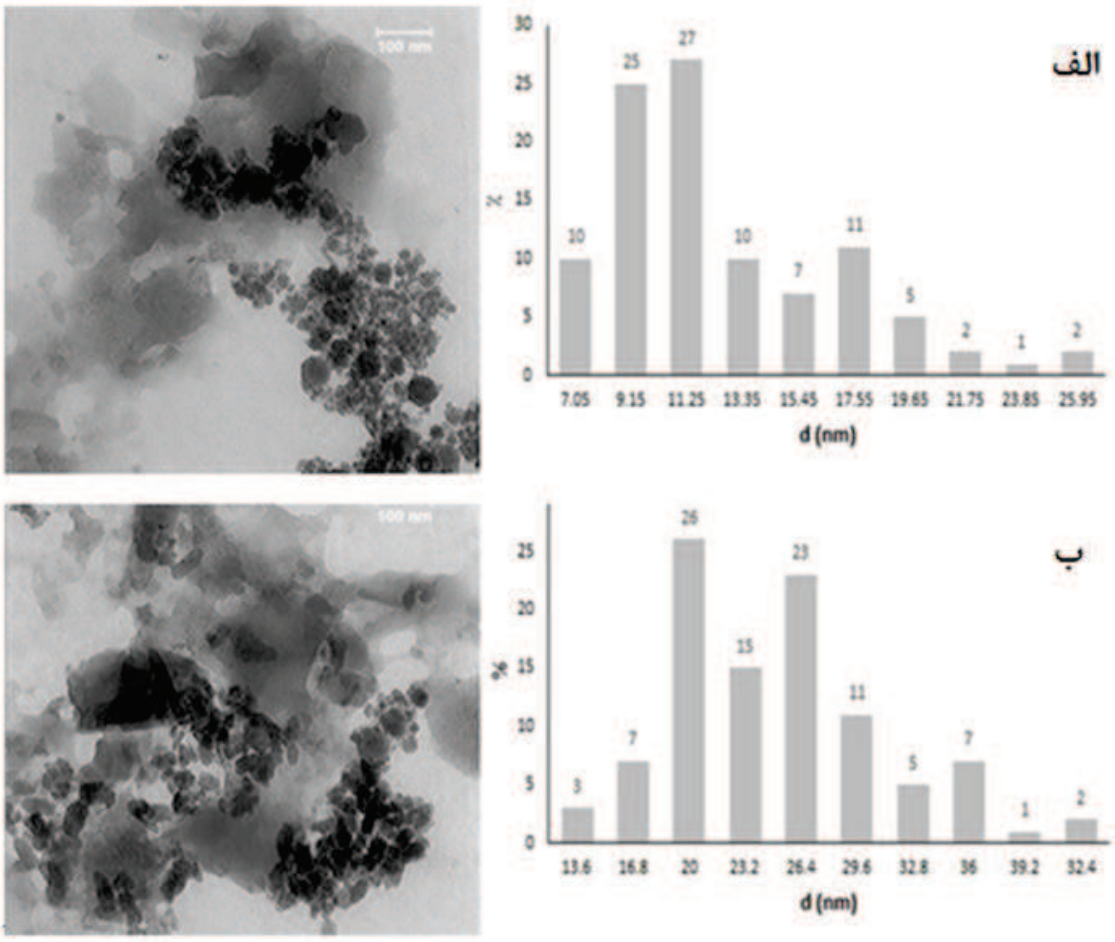
۳-۱-۱- آنالیز MIC:

شکل‌های ۶ و ۷ نمودارها و نتایج عددی مربوط به آنالیز MIC را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نمونـه S1 در برابـر باکتری گرم منفی E.coli عملکرد بهتری نشان داده است. در غلظت‌های بالاتر از ۶۲۵ µg/ml برای E.coli و ۱۲۵۰ µg/ml بـرای B.Subtilis باکتری‌ها به طور کامل مهار شده‌اند. نمونـه S2 در برابـر بـاکتری گـرم مثبـت B.Subtilis عملکـرد بهتـری را نشـان داده‌است و در غلظت‌های بالاتر از ۱۵۶/۲ µg/ml برای B.Subtilis و ۳۱۲/۵ µg/ml بـرای E.coli رشـد بـاکتری بـه طـور کامـل متوقف شده است. به طور کلی در برابر هر دو باکتری، برای نمونه S2 عملکرد بهتری بـه سـبب فعـال شـدن سـازوکارهای ضـد

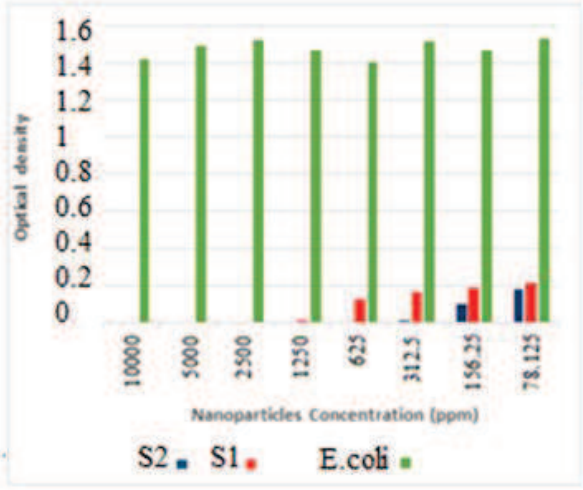
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.6.7]

باکتری هردو نانوذره به طور همزمان و ایجاد اثر هم‌افزایی قابل مشاهده است [۱۹, ۲۰].



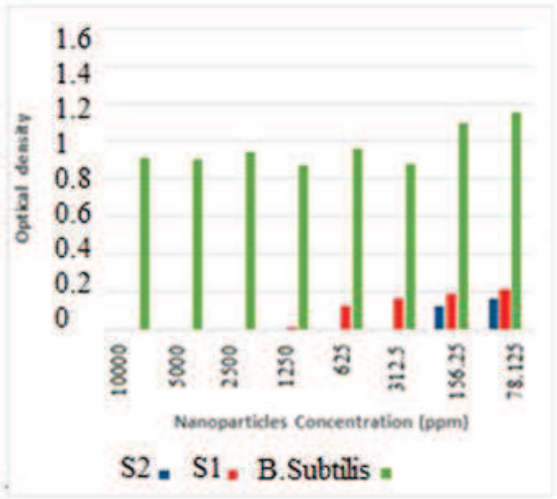
شکل ۵- الف) تصویر TEM و نمودار توزیع اندازه ذرات مربوط به نمونهS1، ب) تصویر TEM و نمودار توزیع اندازه ذرات مربوط به نمونه S2.



Concentration µg/ml	Fe	Fe-Zn	E.Coli
10000	-	-	1.42
5000	-	-	1.491
2500	-	-	1.524
1250	-	-	1.463
625	0.05	-	1.403
312.5	0.1245	0.0015	1.515
156.25	0.1685	0.102	1.468
78.125	0.223	0.175	1.526

شکل ۶- نمودار و نتایج مربوط به خاصیت ضد باکتری نانوذرات سنتز شده در برابر باکتری E.coli.

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.6.7]
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]

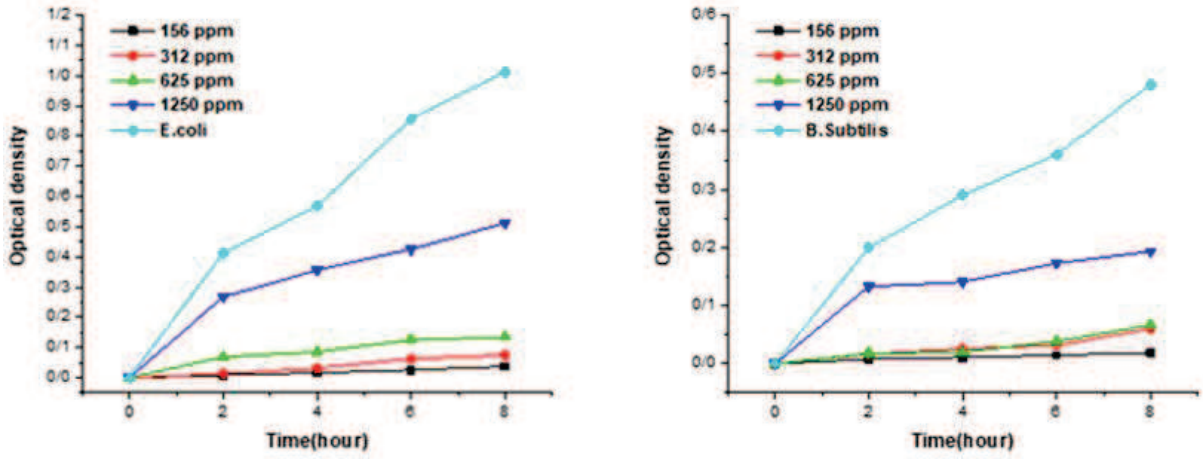


Concentration µg/ml	Fe	Fe-Zn	B.Subtilis
10000	-	-	0.91
5000	-	-	0.9
2500	-	-	0.94
1250	0.006	-	0.87
625	0.1185	-	0.96
312.5	0.1625	-	0.88
156.25	0.1825	0.1205	1.1
78.125	0.2125	0.1645	1.15

شکل ۷- نمودار و نتایج مربوط به خاصیت ضد باکتری نانوذرات سنتز شده در برابر باکتری B.Subtilis.

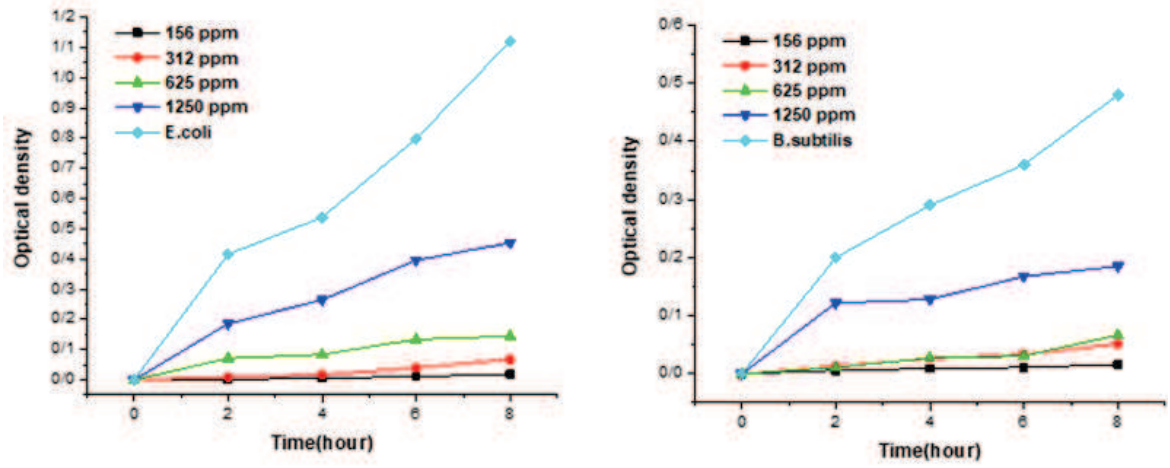
۳-۱-۲- آنالیز چگالی نوری:

شکل ۸ و ۹ نتایج نموداری آنالیز چگالی نوری را نمایش می‌دهند. همانطور که در شکل ۹ قابل مشاهده است نمونه S2 خاصیت ضدباکتری بالایی نسبت به هردو باکتری از خود نشان داده است. این نتایج به دلیل اثر هم‌افزایی حضور اکسید آهن و اکسید روی به طور همزمان و در نتیجه فعال شدن سازوکارهای ضدباکتری هردو نانوذره است. سازوکار اثر نانوذرات اکسید آهن تعامل الکترواستاتیک بین نانوذرات و باکتری و همچنین تولید گونه‌های اکسیژن واکنشی است. سازوکارهای موثر در مورد اکسید روی را می‌توان به صورت تعامل الکترواستاتیک بین نانوذرات و باکتری، تولید گونه‌های اکسیژن واکنشی و آزادسازی یون بیان کرد [۱۹].



شکل ۸- نمودارهای چگالی نوری مربوط به نمونه S1.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.6.7]



شکل ۹- نمودارهای چگالی نوری مربوط به نمونهS2.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه نانوذرات اکسید آهن و اکسیدآهن- اکسید روی به روش تخلیه الکتریکی در مایع در جریان و pH ثابت سنتز شدند. حضور روی سبب افزایش میانگین اندازه ذرات از حدود ۱۰/۳ به ۳۰/۹ نانومتر شد. آنالیزهای ساختاری XRD و UV_VISIBLE حاکی از تشکیل فازهای Fe_3O_4 و Fe در نمونه S1 و فازهای $ZnFe_2O_4$ و ZnO در نمونه S2 است که با تحقیقات پیشین همخوانی دارد. همچنین آنالیزهای FE_SEM وTEM نشان داد ساختار نانوذرات اکسید آهن کاملا کروی و به صورت هسته-پوسته است و ساختار نمونه S2 به صورت کروی-میله ای و هسته-پوسته است. آنالیزهای ضد باکتری خاصیت باکتری کشی نانوذرات سنتز شده را تایید کرد؛ نمونه S2 به سبب فعال شدن همزمان سازوکارهای مربوط به هردو نانوذره خاصیت هم افزایی داشته و عملکرد ضد باکتری بالاتری نشان دادند. طبق پژوهش‌های پیشین، سازوکار اثر نانوذرات اکسید آهن تعامل الکترواستاتیک بین نانوذرات و باکتری و همچنین تولید گونه‌های اکسیژن واکنشی است. سازوکارهای موثر در مورد اکسید روی را می‌توان به صورت تعامل الکترواستاتیک بین نانوذرات و باکتری، تولید گونه‌های اکسیژن واکنشی و آزاد سازی یون بیان کرد.

مراجع

[1] Parak, W.J., Gerion, D., Pellegrino, T., Zanchet, D., Micheel, C., Williams, S.C., Boudreau, R., Gros, M., Larabell, C. and Alivisatos, A.P., Biological applications of colloidal nanocrystals. Nanotechnology, 2003. 14(7): p. R15-R27.

[2] Emerich, D.F. and C.G. Thanos, Nanotechnology and medicine. Expert Opinion on Biological Therapy, 2003. 3(4): p. 655-663.

[3] Lewis, K., Platforms for antibiotic discovery. Nature Reviews Drug Discovery, 2013. 12(5): p. 371-387.

[4] Mikolay, A., Hugget, S. and Tikana, L., Survival of bacteria on metallic copper surfaces in a hospital trial. Appl Microbiol Biotechnol, 2010. 87(5): p. 1875-9.

[5] Zhang, L., Jiang, Y., Ding, Y., Povey, M. and York, D., Investigation into the antibacterial behaviour of suspensions of ZnO nanoparticles (ZnO nanofluids). Journal of Nanoparticle Research, 2007. 9(3): p. 479-489.

[6] Gupta, A.K. and M. Gupta, Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. Biomaterials, 2005. 26(18): p. 3995-4021.

[7] Cotton, G.C., Lagesse, N.R., Parke, L.S. and Meledandri, C.J., 3.04 - Antibacterial Nanoparticles, in Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology (Second Edition), D.L. Andrews, R.H. Lipson, and T. Nann, Editors. 2019, Academic Press: Oxford. p. 65-82.

[8] Tseng, K.-H., Chou, C.J., Liu, T.C., Huang, U.H. and Chung, M.Y., Preparation of Ag-Cu Composite Nanoparticles by the Submerged Arc Discharge Method in Aqueous Media. MATERIALS TRANSACTIONS, 2016. 57(3): p. 294-301.

[9] Wasfi, A.S., H.R. Humud, and N.K. Fadhil, Synthesis of core-shell Fe_3O_4-Au nanoparticles by electrical exploding wire technique combined with laser pulse shooting. Optics & Laser Technology, 2019. 111: p. 720-726.

[10] Zhang, W., Shi, X., Huang, J., Zhang, Y., Wu, Z. and Xian, Y., Bacitracin-conjugated superparamagnetic

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.6.7]

iron oxide nanoparticles: synthesis, characterization and antibacterial activity. Chemphyschem, 2012. 13(14): p. 3388-96.

[11] Bhushan, M., Kumar, Y., Periyasami, L. and Viswanath, A.K., Facile synthesis of Fe/Zn oxide nanocomposites and study of their structural, magnetic, thermal, antibacterial and cytotoxic properties. Materials Chemistry and Physics, 2018. 209: p. 233-248.

[12] Farbod, M., A. Movahed, and I. Kazeminezhad, An investigation of structural phase transformation of monosize γ-Fe_2O_3 nanoparticles fabricated by arc discharge method. Materials Letters, 2012. 89: p. 140-142.

[13] Sathya, K., R. Saravanathamizhan, and G. Baskar, Ultrasound assisted phytosynthesis of iron oxide nanoparticle. Ultrasonics Sonochemistry, 2017. 39: p. 446-451.

[14] Talam, S., S.R. Karumuri, and N. Gunnam, Synthesis, Characterization, and Spectroscopic Properties of ZnO Nanoparticles. ISRN Nanotechnology, 2012. 2012: p. 372505.

[15] Buazar, F., A. Cheshmehkani, and M.Z. Kassaee, Nanosteel synthesis via arc discharge: media and current effects. Journal of the Iranian Chemical Society, 2012. 9(2): p. 151-156.

[16] Mičová, J., et al., Synthesis, optical properties and crystal quality of zinc oxide nanostructures. Applied Surface Science, 2018. 461.

[17] Lari, L., S. Steinhauer, and V.K. Lazarov, In situ TEM oxidation study of Fe thin-film transformation to single-crystal magnetite nanoparticles. Journal of Materials Science, 2020. 55(27): p. 12897-12905.

[18] Predescu, A., Matei, E., Pantilimon, M.C. and Berbecaru, A., Synthesis and characterization of dextran-coated iron oxide nanoparticles. Royal Society Open Science, 2018. 5:p. 171525.

[19] Hajipour, M.J., Fromm, K.M., Ashkarran, A.A., Aberasturi, D.J., Larramendi I.R., Rojo, T., Serpooshan, V., Parak, W.J. and Mahmoudi, M., Antibacterial properties of nanoparticles. Trends in Biotechnology, 2012. 30(10): p. 499-511.

[20] Rajabi, S.K. and S. Sohrabnezhad, Fabrication and characteristic of Fe_3O_4@MOR@CuO core-shell for investigation antibacterial properties. Journal of Fluorine Chemistry, 2018. 206: p. 36-42.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.6.7]