REVIEW ARTICLE

Zero Valent Iron-Based Nanoparticles: Synthesis, Characterization and their Application in Biology and Medicine

Shahram Eslami[1],
Mohammad Ali Ebrahimzadeh[2],
Pourya Biparva[3],
Seyed Mohammad Abedi Rad[3]

[1] PhD Student in Pharmaceutical Sciences, Pharmaceutical Sciences Research Center, Student Research Committee, Faculty of Pharmacy, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[2] Professor, Department of Medicinal Chemistry, Pharmaceutical Sciences Research Center, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[3] Assistant Professor, Department of Basic Sciences, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

(Received June 5, 2016 ; Accepted October 2, 2016)

Abstract

Magnetic nanomaterials are making significant impact on improving the quality of human health that is tangible from a wide range of applications in various fields of medicine and biology. In recent years, nanoparticles successfully demonstrated outstanding applications due to having excellent magnetic properties of the iron oxide nanoparticles-based counterparts. Zero-valent iron nanoparticles toxicity is less than the toxicity of other nanoparticles. These nanoparticles are considerably potential for functionalization due to their highly reactive surfaces and this feature can facilitate targeted functionalization. This is very promising for various applications in different fields. Use of polymers as a protective agent is increasing sharply. Polymer magnetic field of zero-valent metal nanoparticles is still in its early stages. In this study, the syntheses of zero-valent iron nanoparticles are presented in different ways. Nanoparticles can be identified and evaluated through their size, shape, morphology, syntax, and various laboratory methods. In this context, magnetic nanoparticles can be potentially used in hyperthermia, magnetic resonance imaging (MRI), diagnosis and treatment of tumor diseases or cancer, labeling, biological separation, biotechnology, and eliminating major organic, inorganic and radioactive pollutants because of their high biocompatibility. With respect to the importance and the need to draw the attention of researchers to zero-valent iron magnetic nanoparticles, a brief description of various methods of synthesis, characterization, and their application in medicine and biology are reviewed.

Keywords: zero valent iron nanoparticles, magnetic hyperthermia, magnetic resonance imaging, magnetization, polymer, toxic pollutants

J Mazandaran Univ Med Sci 2016; 26 (142): 285-310 (Persian).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

مجلـــه دانشـــگاه عـــلـــوم پـــزشـــکـــی مـــازنـــدران
دوره بیست و ششم شماره ۱۴۲ آبان سال ۱۳۹۵ (۳۱۰-۲۸۵)

نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی: روش های سنتز، شناسایی و کاربردهای آن در پزشکی و بیولوژی

شهرام اسلامی[۱]
محمد علی ابراهیم زاده[۲]
پوریا بی پروا[۳]
سید محمد عابدی راد[۳]

چکیده

نانو مواد مغناطیسی در حال اعمال تاثیر قابل توجهی در بهبود کیفیت استانداردهای سلامت انسان هستند که از روی گستره وسیع کاربرد آن‌ها در زمینه‌های مختلف پزشکی و بیولوژی مشهود است. امروزه در میان نانوذرات فلزی مختلف برای کاربردهای مغناطیسی، پژوهش و استفاده از نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی به طور گسترده‌ای در حال افزایش است. در سال‌های اخیر، این نانو ذرات با توجه به دارا بودن خواص مغناطیسی عالی نسبت به نانو ذرات مشابه بر پایه اکسید آهن، کاربردهای برجسته‌ای را با موفقیت نشان داده است. سمیت نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی کم‌تر از سمیت مشاهده شده ناشی از سایر نانو ذرات می‌باشد. هم‌چنین این نانو ذرات به دلیل سطوح بسیار واکنش پذیرشان، پتانسیل قابل توجهی برای عامل دار شدن دارا می‌باشند، که این ویژگی می تواند عامل دار کردن هدفمند این نانو ذرات مغناطیسی را تسهیل کند و برای برنامه‌های کاربردی در زمینه‌های گوناگون بسیار امیدوارکننده باشد. استفاده از پلیمرها به عنوان یک عامل محافظت کننده کاربرد آن‌ها را افزایش می‌دهد. زمینه نانو ذرات فلزی صفر ظرفیتی مغناطیسی پلیمری هنوز در مرحله اولیه آن است. در این بررسی، سنتز نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی با روش‌های مختلف ارائه شده است. نانو ذرات تهیه شده از نظر اندازه، شکل، مورفولوژی، ترکیب و ساختار، توسط روش‌های متعدد آزمایشگاهی، می‌توانند مورد شناسایی و ارزیابی قرار گیرند. در این زمینه، نانو ذرات مغناطیسی به طور بالقوه در هایپرترمی، تصویربرداری رزونانس مغناطیسی(ام.آر.آی)، تشخیص و درمان بیماری‌های تومور یا سرطان، نشان دار کردن زیستی، جداسازی زیستی، بیوتکنولوژی و از بین بردن آلاینده‌های مهم آلی، معدنی و رادیواکتیو به دلیل خود زیست سازگاری بسیار بالا، می‌توانند استفاده شوند. بنابراین، با توجه به اهمیت و نیاز به جلب توجه محققان معاصر به سمت نانو ذرات مغناطیسی آهن صفر ظرفیتی، بدین وسیله شرح مختصری از روش‌های گوناگون سنتز، شناسایی آن‌ها و هم‌چنین کاربردهای مهم این نانو ذرات در پزشکی و بیولوژی ارائه شده است.

واژه های کلیدی: نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی، هایپرترمی مغناطیسی، تصویر برداری رزونانس مغناطیسی، مغناطش، پلیمر، آلاینده‌های سمی

مقدمه

نانو ذرات بر اساس اندازه شان دارای ویژگی‌های خاص شیمیایی، کاتالیتیکی، الکترونیکی، مغناطیسی، مکانیکی و نوری می‌باشند(۱). ویژگی‌های چند گانه نانو ذرات، به توسعه فن‌آوری‌های جدید برای کاربردهای

مولف مسئول: محمدعلی ابراهیم زاده- ساری: کیلومتر ۱۸ جاده فرح آباد، مجتمع دانشگاهی پیامبر اعظم، دانشکده داروسازی E-mail: zadeh20@yahoo.com
۱. دانشجوی دکترای علوم دارویی، مرکز تحقیقات علوم دارویی، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۲. استاد، گروه شیمی دارویی، مرکز تحقیقات علوم دارویی، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۳. استادیار، گروه علوم پایه، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
تاریخ دریافت : ۱۳۹۵/۳/۱۶ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات : ۱۳۹۵/۳/۲۳ تاریخ تصویب : ۱۳۹۵/۷/۱۱

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

متنوع در حوزه‌های مختلف منجر شده است. یکی از انواع نانو ذرات، نانو ذرات مغناطیسی می‌باشند. امروزه تاثیر نانو ذرات مغناطیسی در بهبود کیفیت استانداردهای سلامت انسان قابل توجه بوده که توسط دامنه وسیع کاربردهایشان در زمینه‌های مختلف پزشکی و بیولوژی، مانند سیستم‌های دارو رسانی مغناطیسی، بیوتکنولوژی، تصویربرداری رزونانس مغناطیسی، هایپرترمی، جداسازی زیستی، حسگرهای زیستی و حذف آلودگی‌های زیستی مشهود است(۲). در این کاربردها، بهترین عملکرد نانو مواد به دست آمده، هنگامی است که اندازه آن‌ها کم‌تر از مقدار بحرانی خاص باشد، که بستگی به مواد به کار رفته دارد. با این حال، ناپایداری ذاتی مرتبط با نانو ذرات در این محدوده از اندازه ذره‌ای، مدت زمان طولانی به عنوان یک مشکل باقی مانده است. به منظور کاهش انرژی به دست آمده ناشی از نسبت سطح به حجم بالای نانو ذرات، آن‌ها تمایل به تشکیل آگلومره (انباشتگی) دارند. علاوه بر این، نانو ذرات فلزی عریان (بدون پوشش سطحی) از نظر شیمیایی بسیار فعال بوده و به راحتی می‌توانند در هوا اکسید شوند، که به طور کلی به از دست دادن خاصیت مغناطیسی و دیسپرسیتی (پراکندگی) آن‌ها منجر می‌شود. بنابراین، از نقطه نظر کاربردی، توسعه استراتژی‌های حفاظت برای ایجاد پایداری در نانو ذرات مغناطیسی عریان در برابر تخریب در هنگام سنتز و یا پس از آن، بسیار مهم است(۴،۳). با این حال در طول دهه گذشته، ظهور نانو فناوری پلیمری و هم‌چنین فناوری سبز، روش‌های پایدار کننده جدیدی فراهم کرده است و به توسعه نانو ساختار های مغناطیسی هیبریدی آلی- غیر آلی بر اساس ترکیبی از نانو ذرات مغناطیسی و پلیمر یا عصاره گیاه، منجر شده است(۶،۵). در این روش‌ها برای بهبود پایداری نانو ذرات فلزی به نظر می‌رسد از طریق نشاندن یک لایه محافظ روی سطح نانو ذرات مغناطیسی، آن‌ها را تا حود خیلی زیادی، نسبت به اکسیژن غیر قابل نفوذ کرده، به طوری که مانع واکنش اکسیژن با سطح نانو ذرات مغناطیسی می شود. پایداری و حفاظت از ذرات، اغلب در ارتباط با یکدیگر هستند، به طوری که حفاظت نانو ذرات با عوامل مناسب، از طریق جلوگیری از آگلومره شدن (انباشتگی) آن‌ها موجب پایداری نانو ذرات می‌شود(۷). با این حال، اکسید آهن یا مواد بر پایه اکسید آهن دارای اشکالاتی خاص(۸)، از جمله یک توزیع اندازه ذره‌ای گسترده، مغناطش اشباع بسیار کم، و گزینه‌های مهندسی سطحی حداقل، با توجه به سطوح واکنشی کم آن‌ها، که نه تنها باعث یک مانع بزرگ در بروز حداکثر خواص مغناطیسی می‌شود بلکه یک مانع قابل توجهی برای طراحی نانو مواد مغناطیسی با عملکرد مشخص می‌باشد که در نتیجه مانع از گسترش و تجاری‌سازی فناوری نانو پلیمر مغناطیسی بر پایه اکسید آهن می گردد. از طرف دیگر، با وجود خواص مغناطیسی برتر ارائه شده توسط نانو ذرات فلزی یا آلیاژی آهن نسبت به نانو ذرات بر پایه اکسید آهن، پیچیدگی در مسائل مربوط به تهیه و پایداری آن‌ها به خصوص برای کاربردهای زیست پزشکی وجود دارد. نانو ذرات فلزی آهن گاهی اوقات تمایل به انباشتگی در محیط‌های آبی دارند که، در نتیجه مغناطش بالاتر آن ها است. از این رو، مدولاسیون (تلفیق) سطح این نانو ذرات با عوامل مناسب، می‌تواند مغناطش بهینه را به ارمغان بیاورد. با این حال، پیشرفت‌های به دست آمده در سال‌های اخیر در زمینه فناوری نانو پلیمر، به سنتز و بهینه سازی خواص مغناطیسی نانو ذرات فلز یا دو فلز- پلیمر، کمک های شایانی نموده است. در نتیجه، به نظر می‌رسد یک مسیر به سمت تولید نانو ذرات پلیمری فلزی صفر ظرفیتی مغناطیسی، هموار شده است، که شاهد افزایش تعداد مقالات پژوهشی منتشر شده در این زمینه به ویژه در مورد نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی پایدارتر با سمیت کم‌تر، در سال‌های آینده خواهیم بود. با وجود چند دهه تحقیقات فشرده در مورد نانو ذرات و تست کردن آن‌ها در درمان سرطان، در پزشکی مدرن هنوز هم یک چالش در این زمینه باقی مانده است. پرتو درمانی،

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

شیمی درمانی و جراحی به عنوان درمان استاندارد و موفق در درمان برخی از انواع سرطان‌ها اما نه برای تمام انواع آن استفاده می‌شوند. مشکلات عملی و عدم درک کامل از عوامل مرتبط، تا حد زیادی مانع از پیدا کردن موثرترین درمان در جهان برای این بیماری می‌شود. استفاده از هایپرترمی با دارا بودن پتانسیل در زمینه درمان سرطان، به مدت طولانی است که شناخته شده با این حال هنوز به حالت عادی نرسیده است. مگنتیت، به دلیل سابقه شناخته شده آن از نظر ایمنی و خواص مغناطیسی خوب، به عنوان ماده برگزیده در این زمینه باقی مانده است(۹). در حال حاضر، فرمولاسیون‌های مختلف از نانو ذرات اکسید آهن و نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی برای درمان هایپرترمی سرطان توسعه یافته‌اند و پیشرفت‌های چشمگیری انجام شده است(۱۲-۱۰). در حال حاضر، تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (ام.آر.آی) به عنوان یکی از قدرتمندترین ابزار تشخیصی در علوم پزشکی می‌باشد(۱۳) که به ابزار مطلوب برای تصویربرداری از مغز و سیستم عصبی مرکزی، ارزیابی عملکرد قلب، و تشخیص تومور تبدیل شده است. از آن‌جا که می‌تواند تصاویر آناتومیک با وضوح بالا از بافت نرم تهیه کند، انتظار می‌رود به یک ابزار بسیار مهم برای تصویربرداری مولکولی و سلولی توسعه یابد(۱۴). به عنوان مثال، ممکن است برای تشخیص و یافتن ضایعات اولیه مفید باشد. چون بافت‌های طبیعی و بافت‌های آسیب دیده اغلب تنها تفاوت‌های کوچک در زمان استراحت نشان می‌دهند. عوامل کنتراست (ام.آر.آی) می‌توانند به روشن شدن تصاویر و درک بهتر آن‌ها کمک کنند. بیش از ۲۰ سال گذشته، در مورد نانو ذرات مختلف معدنی به عنوان عامل کنتراست (ام.آر.آی) از طریق تلاش‌های مشترک دانشمندان در علم مواد، پزشکی، و زیست‌شناسی بررسی شده است. نانو ذرات آهن مغناطیسی به طور گسترده‌ای به عنوان عوامل کنتراست (ام.آر.آی) در طحال، کبد و مغز استخوان توسط جذب انتخابی و تجمع در سلول‌های سیستم رتیکول اندوتریال (سیستم ماکروفاژ) استفاده شده است(۱۵). بسیاری از عوامل کنتراست (ام.آر.آی) بر پایه نانو ذرات گزارش شده هنوز در فاز تست کردن در شرایط برون تنی و یا شروع مطالعات حیوانی هستند. جهت تصویربرداری مولکولی و فعال با کیفیت بهتر و تشخیص دقیق‌تر، تحقیقات مشترک بین رشته‌ای برای دستیابی به عوامل کنتراست (ام.آر.آی) نسل جدید بر پایه ی نانو ذرات، ضروری به نظر می‌رسد(۱۶). نانو ذرات مغناطیسی تغییرات موضعی از زمانهای استراحت طولی و عرضی از ناهمگونی زمینه‌ای و آبی را برای بهبود کنتراست (ام.آر.آی) فراهم می‌کند(۱۷). در زمینه افزایش کنتراست پیشرفت‌های چشمگیری انجام شده است(۲۶-۱۸). به عنوان نمونه، نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی پوشیده شده با کربوکسی متیل دکستران(۱۵)، پلی اتیلن گلیکول(۱۶)، بیس کربوکسی پلی اتیلن گلیکول(۲۷)، به طور بالقوه در هایپرترمی و (ام.آر.آی) در محدوده ۳۰-۱۰ نانومتر می‌تواند استفاده شود. علاوه بر این، در زمینه جداسازی مغناطیسی سلول و هدف قرار دادن سلول پیشرفت‌های چشمگیری انجام شده است(۲۹،۲۸). مزایای تشخیصی و درمانی نانو ذرات مغناطیسی به خواص مغناطیسی ایستایی و پویایی آن‌ها در ترکیب با توانایی انتقال قابلیت سلول‌های خاص، مربوط می‌شود(۳۰). زیست سازگاری نانو ذرات مغناطیسی، اجرای برنامه‌ها و تست‌های تحقیقاتی در حالت درون تنی در حیوانات و انسان را امکان‌پذیر نموده است(۳۲،۳۱). امروزه یکی از مسائل جوامع بشری، زباله‌های حاصل از صنایع، منازل مسکونی و فعالیت‌های کشاورزی است که، می‌تواند موجب تولید آلاینده‌های سمی متعددی در آب شود. این امر باعث تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی آب شده و یک تهدید مهم برای سیستم سلامت انسان محسوب می‌گردد. از آن‌جا که نوع و تعداد منابع آلودگی به طور قابل توجهی افزایش یافته است، جلوگیری از آسیب‌های ناشی از آن یا به حداقل رساندنش ضروری شده است(۳۳). فن‌آوری نانو، راه‌حل‌های جدیدی را برای

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

تصفیه کردن آب‌های سطحی، زیرزمینی، و پساب آلوده شده توسط یون‌های فلزی سمی، املاح معدنی، آلی و میکروارگانیسم‌ها از طریق ذرات و سیستم‌های فیلتری که می‌تواند آلاینده‌های موجود در هوا، آب و خاک را از بین ببرد و یا غیر فعال کند، ارائه می‌دهد(۳۵،۳۴). آلودگی‌های پساب یکی از مشکل‌سازترین گروه‌های آلوده هستند که به راحتی با چشم انسان شناسایی شده و معمولا غیر قابل تجزیه می باشند. این آلاینده ها شامل رنگ ها، فلزات سنگین و سایر ترکیبات آروماتیک هستند که باعث ایجاد مشکلات جدی در سلامت موجودات زنده می‌شوند(۳۳). با توجه به هزینه‌های ارزان، سازگاری زیست محیطی بالا و واکنش‌پذیری بالای آن، نانو موادی که برای تصفیه آب به طور وسیع مورد مطالعه قرار گرفته، از نوع آهن فلزی یا صفر ظرفیتی می‌باشد(۳۰). روش‌های سنتزی متنوعی برای تهیه نانوذرات آهن صفر ظرفیتی وجود دارد، در نتیجه آن‌ها دارای مورفولوژی، اندازه، و توزیع اندازه ذره‌ای مختلف می‌باشند(۳۳). به تازگی، با توجه به کاهش کیفیت آب، علاقه فزاینده‌ای، در استفاده از نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی به عنوان جاذب نسل جدید برای تصفیه آب، وجود دارد(۳۶،۳۵). بنابراین، به علت اهمیت و نیاز به جلب توجه محققان به سمت نانو ذرات مغناطیسی آهن صفر ظرفیتی، از این طریق شرح مختصری از روش‌های مختلف تولید نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی و چگونگی مشخص کردن ویژگی‌های آن‌ها با استفاده از روش‌های دستگاهی- آزمایشگاهی و هم‌چنین کاربردهای مهم گزارش شده از این نانو ذرات در پزشکی و بیولوژی ارائه شده است.

۲. *سنتز نانو ذرات بر پایه آهن صفر ظرفیتی*

برای سنتز نانو ذرات آهن از روش‌های مختلفی استفاده شده است که می‌توان به فرز (خرد کردن یا آسیاب کردن)، سایش و لیتوگرافی اشاره نمود(۳۷). در حال حاضر در روش‌های معمول‌تر تهیه این نانو ذرات از طریق هسته‌زایی از محلول‌های همگن، جداسازی فازها، یا حرارت دادن در دماهای بالا انجام می‌شود(۳۷). به جز روش‌های فیزیکی ذکر شده، روش‌های شیمیایی متنوع و حتی روش سبز برای سنتز نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی به‌کار رفته که در زیر به آن ها اشاره شده است.

۲،۱. *احیای شیمیایی پیش ماده ی آهن به وسیله سدیم بوروهیدرید (روش محلول شیمیایی)*

سنتز نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی در یک بالن ته گرد با یک همزن مکانیکی قابل تنظیم، انجام می‌شود. از طریق تیتراسیون، محلول سدیم بوروهیدرید برای احیای یون فریک (Fe^{3+}) به آهن صفر ظرفیتی (Fe^0) اضافه می شود، با توجه به واکنش زیر:

$$4Fe^{3+} + 3BH_4^- + 9H_2O \rightarrow 4Fe^0\downarrow + 3H_2BO_3^- + 12H^+ + 6H_2$$

سدیم بوروهیدرید اضافی، برای پیشرفت واکنش سنتز، استفاده می‌شود. نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی تولید شده، با صافی تحت خلاء جمع‌آوری شده بعد ابتدا با آب مقطر و در پایان با اتانول شسته می‌شود. مزیت اصلی این روش سادگی آن است که راحت در اکثر آزمایشگاه‌های شیمی با مواد شیمیایی ساده قابل انجام می‌باشد، نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی گران قیمت نداشته و هزینه‌های تولید در مقایسه با روش‌های دیگر، نسبتا پایین است(۴۱-۳۸).

۲،۲. *روش الکترو شیمیایی یا الکترولیز:*

از الکترولیز به عنوان یک روش صنعتی تثبیت شده خوب برای جداسازی فلزات از محلول های یونی، تهیه نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی استفاده شده که تنها نیاز به محلول آبی یون‌های آهن دو ظرفیتی، الکترودهای کاتد و آند، جریان مستقیم می‌باشد. این روش خیلی ساده، ارزان و سریع می‌باشد. تنها مسئله تعیین یک روش مناسب برای کندن یا پراکندن نانو ذرات تشکیل شده در کاتد است. چراکه انباشته شدن نانو ذرات در کاتد به سمت تشکیل کلاستر (خوشه) پیش می‌رود، که برای

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

رفع این مورد از امواج اولتراسونیک (۲۰ کیلو هرتز)(۴۲) و یا از سورفاکتانت های کاتیونی استفاده می شود(۴۳).

Cathode: $Fe^{3+} + 3e^{-} + \text{stabilizer} \rightarrow \text{nano } Fe^{\cdot}$

۲,۲. احیای پیش ماده ی آهن به وسیله ی گاز هیدروژن

در حال حاضر، تولید نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی در مقیاس تجاری از احیای ژئوتیت (α-FeOOH) و یا هماتیت (α-Fe_2O_3) توسط گاز هیدروژن در دماهای مشخص، انجام می‌شود. ژئوتیت طبیعی فشرده شده و به پودر با اندازه ذره‌ای ۰/۰۹۸ – ۰/۰۷۴ میلی‌متر تبدیل می‌شود. سپس در لوله کوارتز قرار داده شده تحت دماهای مختلف ۲۵۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و در معرض جریان هیدروژن پایدار (تولید شده از ژنراتور هیدروژن) با سرعت ۱۰۰ میلی لیتر بر دقیقه به مدت ۶ ساعت قرار گرفته و پس از انجام واکنش احیا، نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی به دست می‌آید(۴۵،۴۴).

۲,۳. روش سل – ژل

نانو کامپوزیت‌های فلزی- شیشه‌ای متشکل از ذرات فوق‌العاده ریز از آهن، با عملیات حرارتی یک ژل، به دست آمده از سل حاوی سیلیکون تترا اتوکسید و یک ترکیب آلی فلزی مناسب، می‌تواند تولید شود(۴۶). ذرات فلزی آهن در ماتریس شیشه‌ای سیلیکا تهیه می‌شود. این تکنیک شامل اولین روش تهیه یک سل شامل هر دو پیش ساز شیشه‌ای و فلزی با نسبت مولی ۱ به ۰/۴می باشد. پیش‌ساز شیشه‌ای از سیلیکون تترا اتوکسید به همراه ترکیب آلی فلزی کمپلکس پیریدین $[Fe\ (C_5H_5N)_4]\ (SCN)_2$ حاصل می‌گردد. با اضافه کردن ترکیب آلی فلزی و سیلیکون تترا اتوکسید، در یک ظرف حاوی حجم مشخصی از اتیل الکل، سل تهیه می‌شود. نسبت حجمی از اتیل الکل و آلکوکسید ۶ به ۱ ثابت می‌باشد. این مخلوط حدود ۳۰ دقیقه تکان داده می‌شود. سپس تا حصول نسبت ۲ به ۱ آلکوکسید، آب افزوده می‌شود و با افزودن اسید هیدروکلریک غلیظ pH محلول به یک رسانیده و سل به ژل تبدیل می‌شود. پس از خشک نمودن، بسته به گونه فلزی به مدت ۱۵ ثانیه تا ۱۵ دقیقه در رنج دمایی ۲۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود. حرارت دادن در بعضی موارد در اتمسفر هیدروژنی انجام می‌شود. ذرات فلزی در تمام نانوکامپوزیت به صورت مجزا و کروی شکل با قطرهای مختلف از ۳ تا ۱۰ نانومترهستند. فیلم‌های این نانوکامپوزیت‌ها با ضخامت چند میکرومتر، در اسلایدهای شیشه‌ای، با استفاده از تکنیک ساده شیب - کشش، تهیه شده است(۴۷).

۲,۴. روش تجزیه حرارتی

نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی، بر حسب تجزیه کامل حرارتی $Fe(CO)_5$ در حلال هیدروکربنی اتیل فلو پلی‌اولفین-۱۶۴ در دمای ۲۲۵ درجه سانتی‌گراد تحت گاز نیتروژن به مدت ۲ ساعت تولید می‌شود. در یک روش کار معمولی، $Fe(CO)_5$ به اتیل فلو پلی اولفین-۱۶۴ اضافه شده و در یک ظرف ۰/۳ لیتری با گاز نیتروژن با فشار ۲/۰۷ مگا پاسکال در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، تحت فشار قرار می‌گیرد. پس از یک ساعت، دما به ۲۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار به ۴/۲۴ مگا پاسکال، رسانده می‌شود. پس از سرد شدن ظرف به ۲۰ درجه سانتی‌گراد و سنتز ذرات ریز آهن در حلال‌های هیدروکربنی، نمونه آبکی از ذرات ریز آهن تازه تهیه شده، با هگزان شسته شده، سپس خشک می‌گردد و برای به حداقل رساندن قرارگیری در معرض هوا و برای جلوگیری از اکسیداسیون نمونه، تحت آرگون خارج می‌شود(۵۰،۴۸).

۲,۵. تجزیه ناشی از سونولیز کربونیل آهن

سونولیز، یک تکنیک سازگار برای تولید یک مرحله‌ای نانو ذرات آهن از کربونیل آهن مربوطه است. روش سونولیز در حال حاضر به عنوان یک روش برای سنتز نانو فلزات کمپلکس شده با پلی‌اتیلن گلیکول برای استفاده به عنوان نانو پوشش‌ها می‌باشد. در این روش،

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

یک محلول همگن زرد گاززدایی شـده از $Fe(CO)_5$ در هگزادکان در تاریکی در معرض امـواج فراصـوت قـرار داده می‌شود. تجزیه $Fe(CO)_5$ با مشاهده متصـاعد شـدن گاز به همراه ظاهر شدن محلـول آبکـی سـیاه در ظـرف واکـنش بـه عنـوان یـک تـابع از زمـان، انـدازه‌گیـری می‌گردد. ظرف حاوی محلول آبکی سیاه به محفظـه پـر از آرگون منتقل می‌شود. بعد محلـول آبکـی سـیاه جـدا شده و لایه بالایی حلال هگزادکان جدا می‌گردد. جامد سیاه باقی مانده در ته ظرف، با هگـزان شسـته شـده و در خلاء خشک می‌شود. نانو ذرات آهن تولید شده توسـط روش سونولیز در مقایسه با روش تجزیه حرارتی، از نظر اندازه کوچکتر هستند(۵۰،۴۸).

۲،۶. روش میکروامولسیون

این روش آسانی برای تنظیم تولید نانو ذرات آهـن با خواص فیزیکی متفاوت است. به عنوان مثال، افـزایش سورفاکتانت یا پلی الکترولیت به محلول‌های پـیش سـاز به محققان این اجازه را می‌دهد تا نانو ذرات آهن پایدار شده- سطحی یا امولسـیونی بـا کنتـرل دقیـق انـدازه، توزیـع انـدازه و مورفولـوژی هسـته—پوسـته، بسـازند(۵۲،۵۱،۴۶،۳۹). روش میکروامولسیون، شامل کره‌های آبی (که مایسل‌هـای معکوس نامیده می‌شود) پخش شده در یک فـاز پیوسـته روغنی می‌باشد(۵۳). میسل‌های معکوس، به خـاطر تنـوع واکنشگرهایی که می‌توانند وارد کره‌های آبی نـانومتری بشوند به‌طور ویژه‌ای مورد توجـه هسـتند. واکـنش‌هـایی که در میسل‌های معکوس محـدود مـی‌شـوند، بـه تولیـد موادی با اندازه و شکل کنترل شـده، منجـر مـی‌گردنـد. به‌طور ویژه برای سنتز نانو ذرات معدنی، این پتانسـیل را دارد تا با کنتـرل ترکیبـی منحصـر بـه فـردی، مـواد غیـر مجتمع را رها کند(۵۴). محلول کلریـد آهـن بـه مخلـوط سورفاکتانت (ستیل تری متیـل آمونیـوم بروماید) و فـاز روغنی (اکتان نرمال) اضافه مـی‌شـود. نسـبت وزنـی فـاز روغنی به سورفاکتانت ۳ می‌باشد. بعد از هم زدن کامـل محلول، محلول زرد روشنی تولیـد شـده و سـدیم بـورو هیدرید به ایـن محلـول اضـافه مـی‌شـود. واکـنش احیـا، موجـب کدرشـدن رنـگ محلـول همـراه بـا تولیـد گـاز گردیده و به دنبال آن یک جامد سیاه رنگ پراکنـده در محلول، تشـکیل مـی‌شـود. بعـد از متصـاعد شـدن گـاز، مخلوط هم زده شـده و سـپس بـرای جـدا کـردن ذرات سـیاه رنـگ، سـانتریفیوژ مـی گـردد. ابتـدا رسـوبات بـا مخلـوط متـانول و کلروفـرم (نسـبت حجمـی ۱ بـه ۱) و سپس با اتانول شسته شده و ذرات سیاه رنگ حاصـل بـه وسیله یک مگنت جـدا مـی‌شـوند. کلیـه مراحـل تحـت اتمسفر نیتروژن انجام می‌شود(۴۶). نانو ذرات تولید شـده بـا ایـن روش در مقایسـه بـا روش محلـول شـیمیایی، کوچک تر هستند.

۲،۷. با استفاده از پلی‌الکترولیت چندلا یه ساپورت (کمکی)

نانو ذرات آهن با اسـتفاده از پلـی الکترولیـت چنـد لایه کمکی، به عنوان نانو راکتـور، سـنتز شـده و پایـدار می‌شوند. دانه‌های شیشه‌ای در مخلوط $H_2O/H_2O_2/HCl$ با نسبت حجمی ۵:۱:۱ در دمای ۷۰درجه سانتی‌گـراد بـه مدت ۱۰ دقیقـه غوطـه ور مـی‌گـردد و بـه دنبـال آن در مخلوط $H_2O/H_2O_2/NH_4OH$ با نسبت حجمی ۵:۱:۱ در ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه. شبکه‌های کربن تحت تخلیه حرارتی در یک دستگاه تبخیر کننده با خلا بـالا قـرار داده شـده، تـا ویژگـی هیـدروفیلیک را بـه سوبسترای کربنی انتقال دهد(۵۵). پلـی الکترولیـت چنـد لایه کمکی شامل پلی آکریلیک اسید و پلی‌آلیـل آمـین هیدروکلرید روی دانه‌های شیشه‌ای یـا روی شـبکه‌هـای کربن به عنوان ساپورت (کمـک) جمـع مـی‌شـوند. pH محلـول‌هـای پلـی‌آکریلیـک اسـید و پلـی‌آلیـل آمـین هیدروکلرید با استفاده از محلول های یک مـولار اسـید کلریدریک یا سود تنظیم می‌شود. برای سوار کردن پلی الکترولیت چند لایه، سوبستراها ابتدا در محلول پلی‌آلیل آمـین هیدروکلریـد غوطـه ور شـده، بعـد بـا آب شسـته می‌شوند (۲ دقیقه غوطه‌وری در آب × ۳). مراحل غوطه وری/ شستشـو تکـرار مـی‌شـوند تـا تعـدادی از n(دو

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

لایه‌ای‌ها) به دست آید و در نتیجه پلی‌الکترولیت چند لایه تولید شده به عنوان n(پلی آلیل آمین هیدروکلرید/ پلی آکریلیک اسید) مشخص می‌شود. هر تجمع (گروه) لایه پلی آکریلیک اسید و به دنبال آن لایه پلی آلیل آمین هیدروکلرید به عنوان لایه پشت سر هم در نظر گرفته می شود، و اولین لایه ی پلی‌آکریلیک اسید به عنوان یک لایه پایه در نظر گرفته شده در سیستم نام‌گذاری ما در لایه‌های پشت سر هم در نظر گرفته نمی‌شود. لایه‌های پوشیده شده با پلی الکترولیت چند لایه، در محلول سولفات آهن برای ۳۰ دقیقه غوطه‌ور گردیده تا اجازه دهد که کاتیون‌های آهن با گروه‌های آزاد کربوکسیل روی پلی آکریلیک اسید از طریق تبادل یونی، کمپلکس شوند و به دنبال آن مراحل شستشو انجام می‌شود. سپس سوبستراها در محلول سدیم بور هیدرید غوطه ور می‌گردند. بعد از کامل شدن سنتز، محلول آبی جدا شده و نمونه‌ها تا موقع استفاده در اتانول نگهداری می‌شوند. تاثیر pH ای که در آن پلی‌الکترولیت چند لایه سوار شدند، تعداد لایه‌های پلی‌الکترولیت، و تعداد سیکل‌های (اتصال/ احیا) روی ویژگی‌ها و واکنش‌پذیری نانو ذرات تشکیل شده، متفاوت بوده است(۵۶).

۲،۸. روش سنتز سبز:

اخیرا، سنتز نانو ذرات آهن با استفاده از ترکیبات پلی‌فنولیک حاصل از عصاره‌های گیاهی مورد توجه محققین قرار گرفته است(۵۹-۵۷). پلی‌فنل‌ها واکنشگرهای سبزتر از سدیم بور هیدرید هستند، که به‌طور گسترده‌ای استفاده می شوند. علاوه بر این، گروه‌های فنلی و هیدروکسیل موجود در این ترکیبات، ویژگی‌های یک عامل پوششی خوب برای پایدارکردن سطوح فعال نانوذرات را به آن‌ها می‌دهد و هم‌چنین سمیت زیستی نانو ذرات تولید شده را کاهش می‌دهد(۶۰). نانو ذرات آهن با روش یک مرحله‌ای، سریع و کاملاً سبز با استفاده از عصاره‌های گیاهی، به عنوان هم احیا کننده و هم پوشش‌دارکننده، سنتز می‌شوند. یون‌های آهن، سریع توسط عصاره‌های گیاهی احیا شده، نانوذرات آهن بلافاصله تحت شرایط محیطی تشکیل می‌شوند(۵۸). از مزیت‌های دیگر این روش این است، که نه مواد سمی برای احیا و پوشش‌دار کردن استفاده می‌شود و نه هیچ ضایعات سمی تولید می‌گردد. در مقایسه با فرآیندهای تولیدی دیگر، در سرتاسر مراحل فرآیند تولید، انتقال و نگهداری محلول نانو ذرات آهن- عصاره گیاهی، خوردگی اکسیداتیو دیده نمی‌شود. این روش سنتزی جدید، یک رویکرد سبز بسیار ساده برای تولید مقادیر عمده نانو ذرات نسبتاً پایدار آهن با استفاده از عصاره گیاهی است. نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی با استفاده از چای سبز، به عنوان یک مثال از سنتز سبز نانو ذرات می‌باشد. که در یک مرحله با اضافه کردن محلول کلرید آهن به عصاره گیاهی با نسبت حجمی دو به یک به دست می‌آید. واکنش خود به خودی بین پلی‌فنول‌های عصاره گیاهی و یون‌های آهن طی چند دقیقه انجام می‌شود. هیچ سورفاکتانت/ پلیمر به عنوان عامل احیا کننده یا پوشش‌دار کننده به کار برده نمی‌شود. پلی فنو های گیاهی، به عنوان عامل احیا کننده و پوشش‌دارکننده عمل می‌کنند. نانو ذرات آهن حاصل، به خاطر عوامل پوشش‌دار کننده بیوپلیمری پلی‌فنولی گیاهی، دارای ویژگی‌های منحصر به فردی هستند. در این روش، عامل احیا کننده شیمیایی سمی و سورفاکتانت به کار نمیرود و امکان تولید نانوذرات در مقیاس بالا نیز وجود دارد(۶۲،۶۱،۵۷).

۲،۹. کاربرد مواد میزبان به عنوان یک ساپورت (کمک یا نگهدارنده) برای سنتز درجا (in-situ)

امروزه تحقیقات زیادی به سمت مهندسی سیستم های نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی فعال و با نیمه عمر بالا، جهت گیری شده است(۶۰). تاکنون، یکی از امیدوارکننده ترین روش‌های بیان شده در مجلات علمی در ارتباط با نانو ذرات آهن، ورود آن به مواد

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

میزبـان ماننـد پلیمرهـا(۶۴،۵۶)، جامـدات متخلخـل(۶۵)، خاک‌های رس عامـل دار شـده(۶۶) و صـفحات گـرافن می‌باشد(۶۹-۶۷). این مـواد میزبـان از راه محـدود کـردن تمایل نانو ذرات آهن به انباشتگی، عمل می‌کنند. تـا بـه نوبـه خـود، فعالیـت آن‌هـا را در مقایسـه بـا نـانو ذرات ساپورت نشده، افزایش دهند. به عنوان مثال، نـانو ذرات آهن صفر ظرفیتی پوشیده شده با کربوکسی متیل سلولز، با پایداری کلوییدی افزایش یافته، تولید شد. کربوکسی متیل سلولز به عنوان یک پایـدار کننـده کلوییـدی بهتـر عمل مـی‌کنـد. محلـول سـولفات آهـن بـا محلـول آبـی کربوکسی متیل سلولز با غلظت نهایی ۰/۵ درصد وزنی/ وزنی به وسیله همزن مکانیکی مخلوط می‌شود. به دنبـال آن، محلـول سـدیم بورهیدریـد بـه آن اضـافه مـی‌شـود. رسوب سیاه رنگ تشکیل شـده (نـانو ذرات آهـن صـفر ظرفیتی) پس از یـک شـب تحـت فریـز درایـر، خشـک می‌شود(۷۰،۶۴).

۲،۱۰. *تجزیه حرارتی لیزری*

نانو ذرات کپسول دار شده با کـربن، بـا اسـتفاده از روش تجزیه حرارتی لیزری، تولید می‌شود. برای ایجـاد پراکندگی‌های آبی کلوییدی پایدار و زیسـت سـازگار، پودرها فرآوری مـی‌شـوند. روش سـنتزی شـامل تجزیـه حرارتی لیزری آئروسل محلول فروسن در تولوئن می‌باشـد. در این فرآیند، در یک مرحله و در یـک مسـیر پیوسـته، توسط نانو ذرات کـربن آمـورف کـه در آن نـانو ذرات آهن جدا شده قرار دارند، نانو کامپوزیت آهـن تشـکیل می‌گردد. محصول بـه وسـیله اسـتخراج جامـد- مـایع بـا تولوئن توسط دستگاه سوکسله خـالص مـی‌شـود. روش سنتز، شامل گرم کردن جریانی از محلول پـیش سـاز بـه شکل آئروسل با لیزر دی اکسید کربن از ابتـدا تـا پایـان واکنش شـیمیایی مـی‌باشـد(۷۱). محلـول پیشسـاز توسـط سیستم پیروزول-۷۲۱ اسپری می‌شود و ابر تشکیل شده، توسط جریان گاز حامل (اتـیلن یـا آمونیـاک) تـا محـل واکنش کشیده مـی‌شـود(۷۲). مکـانیزم تشـکیل عبارتنـد است از: ۱-تشکیل خوشه‌های کربنی کوچک و گونه‌هـای آهن ۲-چگالش خوشـه‌هـای کربنـی کوچـک و ذرات آهن با تشکیل آلیاژ (کربن- آهن) ۳-رشد پوسـته گرافیتـی خالص نانو ذرات بر پایه آهن هنگام سرد شدن(۷۳).

۲،۱۰. *روش استفاده از اولتراسونیک*

ابتدا محلـول سـولفات آهـن در اتـانول، بـا کمـک همزن مغناطیسی کاملاً یکنواخت می شود. بعـد محلـول سـدیم بورهیدریـد تشـکیل شـده در آب دیـونیزه و گاززدایی شده با گاز نیتروژن، به ظـرف حـاوی محلـول آهن اضافه می شود. نـانو ذرات آهـن صـفر ظرفیتـی بـر اساس واکنش زیر تشکیل می گردد:

$$4Fe^{2+}(aq) + BH_4^-(aq) + 3H_2O \rightarrow 4Fe(S) + H_3BO_3(aq) + 7H^+(aq)$$

در این روش، به ظرف واکنش تزریـق مـی‌شـود تـا اکسیژن محلول را خـارج کـرده تـا از اکسیداسـیون نـانو ذرات در حال تشکیل جلوگیری گـردد. محلـول آبکـی تولید شده توسط فیلتـر غشـایی ۰/۲۲ میکرونـی، صـاف می‌شود. کیک سیاه حاصل با اتانول شسته شـده، بعـد از سانتریفیوژ، خشک می‌شود. تحت اولتراسونیک با تـوان بالا، مورفولوژی نانو ذرات تغییر پیدا می‌کند و از شـکل کروی به شکل‌های بشقابی و سوزن، تغییـر مـی‌کنـد. در مقایسه با روش‌های دیگر، ناحیه سطحی فعال نـانو ذرات حاصل، افزایش پیدا می‌کند. علاوه بـر ایـن، بـا افـزایش نسبت (پیش‌ساز/ احیا کننده) و هم‌چنین با افزایش توان اولتـرا سونیک، اندازه نانو ذرات حاصل، کاهش پیدا می‌کند(۷۴).

۳. *شناسایی ویژگی*

نانو ذرات تهیه شده بر پایه آهن صـفر ظرفیتـی، بـه وسیله روش‌های آزمایشگاهی متعددی می‌تواننـد شناسـایی شـوند، از جملـه: اسپکتروسـکوپی مـادون قرمـز (IR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسـکوپ تـونلی/ نیرویـی روبشـی (STM, SFM)، میکروسـکوپ انتقال الکترونی (TEM)، پـراش اشـعه ایکـس (XRD)،

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

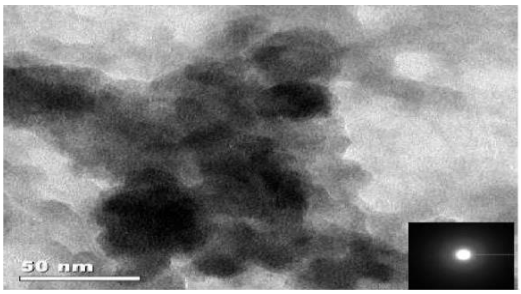
طیف‌سنجی فوتوالکترونی اشعه ایکس (XPS)، طیف‌سنجی فوتوالکترونی اشعه ایکس با وضوح بالا (HR-XPS)، میکروسکوپ انتقال الکترونی با وضوح بالا (HR-TEM)، کالریمتری روبشی افتراقی (DSC)، روش ایزوترم جذب گاز برونر- امت- تلر (BET)، آنالیز پراکندگی انرژی اشعه ایکس (EDX)، پراش الکترونی منطقه انتخاب شده (SAED)، طیف سنجی Mossbauer، پراکندگی نور پویا(DLS)، آنالیز ردیابی نانوذرات(NTA)، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشری میدانی (FESEM).

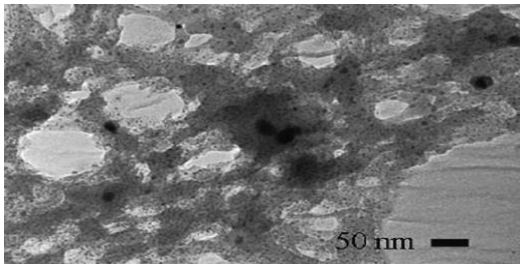
۳,۱. اندازه نانو ذرات و توزیع اندازه ای نانو ذرات

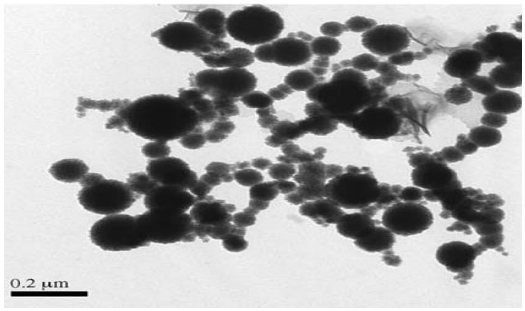
اندازه نانو ذرات آهن تهیه شده، با استفاده از تصاویر TEM و SEM تعیین می‌شود. بر این اساس، اندازه نانو ذرات آهن سنتز شده با روش‌های مختلف از ۱ تا ۳۰۰ نانومتر گزارش شده است(۳۹،۴۴،۴۸-۵۰،۵۶،۵۷، ۵۹،۶۰،۶۲،۶۴،۶۸، ۶۹، ۷۴، ۷۵، ۷۶).

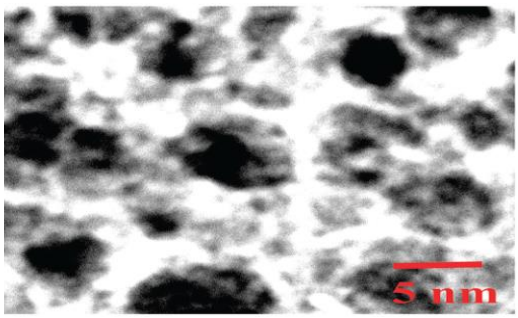
۳,۲. مورفولوژی

مورفولوژی نانو ذرات آهن، با استفاده از تصاویر TEM، SEM، FESEM وXRD مشخص می‌شود. تصاویر TEM و HR-TEM نشان داده‌اند که نانو ذرات سنتز شده در آزمایشگاه‌ها، به شکل‌های کروی(۳۹،۵۰،۵۷، ۶۰،۷۶-۷۴)، آمورف(۴۹،۵۸،۶۲)، شش وجهی(۵۷)، خوشه‌های نامنظم(۵۹)، استوانه‌ای در شکل و ابر مانند در فرم‌های تجمع یافته(۶۲)، هم‌چنین بیش‌تر نانوذرات به شکل شبیه صندلی(۳۹،۶۴،۷۶)، و شبکه(۵۶) می‌باشند. آرایش صفحات گرافن با نانو ذرات غیرمجتمع(۶۸)، به دام افتادن نانوذرات آهن توسط الیاف سلولز(۶۹)، شکل‌های بشقابی و سوزنی به وسیله امواج اولتراسونیک(۷۴) نیز مشاهده شدند. با کمک تصاویر TEM رشد نانوذرات آهن صفر ظرفیتی در بین دو لایه(۷۷)، یک ساختار هسته- پوسته نانوذرات آهن پوشش‌دار شده با فاصله بین لایه هسته‌های آهن(۷۸) همچنین محل نانوذرات آهن روی سطح و دهانه منافذ ژل سیلیکا(۷۹) را می‌توان دید. با استفاده از تصاویر FE-SEM گرفته شده از نانوذرات آهن سنتز شده، نانو ذرات جمع شده و به شکل خوشه‌های نامنظم در آمده قابل رویت می‌باشد. اندازه متوسط نانو ذرات آهن از روی میکروگراف‌های HR-TEM محاسبه می‌شود. میکروگراف‌های SAED یک حلقه منتشر را نشان می‌دهد که طبیعت آمورف نانو ذرات آهن را تائید می‌کند(۵۸). وقتی که روش‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد، نانو ذرات آهن با مورفولوژی‌های گوناگون به دست می‌آید، که در تصویر شماره ۱ (الف - ث) نشان داده شده است.

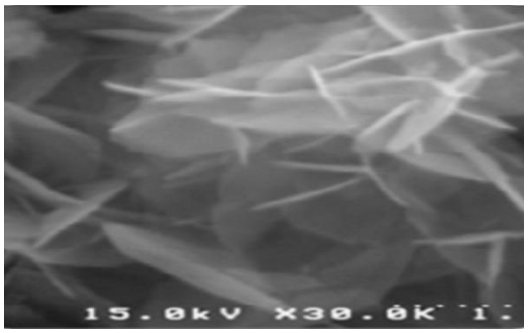








[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]



تصویر شماره ۱: ساختار ذرات مشخص شده با استفاده از تصاویر TEM: (الف) آمورف (۵۸)، (ب) شش وجهی (۵۷)، (پ) توده های زنجیر مانند (۳۹)، (ت) مشبک (۵۶) و (ث) صفحه ای (۷۴)

۳،۳. *سطح ویژه:*

بعد از فرآیند خالص سازی، با استفاده از جذب گاز در شرایط ایزوترم به روش BET، سطح ویژه نانو ذرات سنتزی اندازه‌گیری شده که دارای مقادیر ۱۲۰- ۱۲ (متر مربع/ گرم) بودند(۸۰،۷۹،۷۶،۷۲،۴۹،۴۴،۳۹).

۳،۴. *بار سطحی*

سطح هیدراته، ممکن است بار سطحی در آب را افزایش دهد. تاثیر pH محلول روی بار سطحی، معمولا با نقطه ایزو الکتریک (IEP) مشخص می‌شود. مقدار pH بحرانی که در آن، بار سطحی خالص، صفر است. پتانسیل زتا نانوذرات آهن، به عنوان تابعی از pH محلول می‌باشد. نقطه ایزو الکتریک (IEP) به دست آمده در محدوده ۸/۴ – ۷/۸ = pH گزارش شده است(۷۶،۴۴،۳۹).

۳،۵. *ویژگی‌های ساختار اتمی یا مولکولی (کریستالوگرافی)*

بر حسب نوع روش سنتزی، آهن صفر ظرفیتی و اکسید آهن، با درجه تبلور متفاوت، مشخص می‌شوند. با استفاده از طیف XRD نانو ذرات آهن، مشخصاتی چون فاز آمورف آهن، فازهای کریستالی هم آهن و هم اکسید آهن(۳۹،۷۴)، نسبت فلز و اکسید فلز(۷۶،۴۴)، میزان اکسیدشدن فلز(۸۰) و خلوص نانوذرات آهن صفر ظرفیتی را معین می‌کند(۵۰). با استفاده از تکنیک استوکیومتری، سطح نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی و ضخامت پوسته اکسید آهن، نشان داده می‌شود که از روی نسبت سیگنال‌های آهن اکسید شده و آهن فلزی، قابل محاسبه می‌باشد(۳۹). طیف Mössbauer نمونه‌ها، ترکیب پیچیده فازهای حاوی آهن در نانو کامپوزیت‌ها و بستگی آن به شرایط سنتز را نشان می‌دهد(۷۲). DSC یک انتقال حرارتی گرمازای بزرگ در دمای مربوط به تبلور آهن آمورف را نشان می‌دهد(۴۹). باکمک طیف FTIR حضور گروه‌های عاملی مختلف در موقعیت‌های گوناگون که مسئول احیا، پوشش‌دار کردن و پایدار کردن موثر نانوذرات آهن احیا شده هستند، شناسایی می‌شوند(۷۶،۵۹). بارگذاری آهن در ترکیبات عنصری نانوذرات آهن پوشیده شده روی دانه‌های شیشه‌ای سنتز شده از طریق فرایندهای پلی‌الکترولیت‌های چند لایه، به وسیله اسپکتروسکوپی جذب اتمی برای این نمونه‌ها قابل اندازه‌گیری می‌باشد(۵۶).

۴. *تغییرات و اصلاحات روی سطح نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی*

با وجود اثر بخشی این نانو ذرات در حذف آلودگی‌ها، نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی ضعف‌هایی شامل عدم پایداری، خالص‌سازی و جداسازی دشوار، غیر فعال شدن سریع و تحرک محدود آن‌ها با توجه به تشکیل آگلومره‌ها دارند(۸۲،۸۱). برای مقابله با این ضعف‌های همراه با نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی و افزایش اثر بخشی آن‌ها، وضعیت آن‌ها در حال اصلاح شدن بیش‌تر و بیش‌تر می‌باشد(۸۳). متداول‌ترین روش‌های اصلاحی نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی، شامل افزودن فلزات دیگر به آن، پوشش‌دار کردن سطح این نانوذرات و به دام اندازی نانوذرات آهن صفر ظرفیتی درون یک ماتریکس می‌باشد.

۴،۱. *مخلوط کردن نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی با فلزات دیگر*

یکی از روش‌های خوب مستند، افزودن یک یا چند فلز نجیب به نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی و تشکیل

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

آلیاژ می‌باشد(۸۴). مقدار کمی از آن فلزات، روی سطح نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی قرار گرفته و باعث افزایش فعالیت نانو ذرات حاصل شده هم‌چنین، لایه محافظ خوبی در مقابل غیر فعال شدن نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی فراهم می‌کند(۸۳).

۴،۲. پوشش‌دار کردن سطح نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی

اصلاح ویژگی‌های سطح، یکی از روش‌های اصلی با هدف افزایش پراکندگی نانوذرات آهن صفر ظرفیتی در محیط‌های آبی و افزایش تحرک در محیط‌های متخلخل می‌باشد. پوشش سطحی نانو ذرات باعث تغییر بار سطحی نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی شده که این خود مانع از جاذبه الکترواستاتیکی نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی می‌شود و در نتیجه آگلومره شدن آن‌ها را کاهش می‌دهد(۸۵). برای این منظور، پلیمرهای طبیعی و اصلاح شده، عوامل فعال سطحی آنیونی و پوشش های آلی دیگر مورد آزمایش قرار گرفتند(۸۶). استفاده از پلیمرهای زیستی با توجه به در دسترس بودن آن‌ها، هزینه کم، و ایمنی محیط‌زیست، به ویژه جالب است. در میان پلیمرهای زیستی، استفاده از نشاسته(۸۷)، کربوکسی متیل سلولز(۸۸،۹۱-۸۹) و صمغ گوار(۹۲) ثابت شده بسیار موفقیت‌آمیز بوده به‌طوری که، باعث کاهش آگلومره شدن، افزایش پایداری، افزایش فعالیت و بهبود تحرک نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی شده است.

۴،۳. نشاندن نانوذرات روی یک بستر(ساپورت) یا محصور کردن آن ها در یک ماتریکس

یکی از مشکلات ناشی از استفاده از این نانو ذرات، که مربوط به اندازه کوچک آن‌ها است، جداسازی سخت نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی از ماتریکس خالص می‌باشد. این مشکل را می‌توان از طریق به کار بردن ساپورت‌های مانند سیلیکا، زئولیت، الیاف کیتوسان و غشاهای پلیمری، برطرف نمود(۸۳،۹۳،۹۴،۹۵،۹۶). این کار از طریق فیکس شدن نانو ذرات روی سطح ساپورت یا به دام افتادن نانو ذرات در داخل خلل و فرج ساپورت‌ها انجام می‌شود. این تغییرات و اصلاحات در سطح بیرونی نانوذرات، موجب کاهش آگلومره شدن، بهبود تحرک و افزایش سطح موثر نانوذرات آهن صفر ظرفیتی می‌شود.

۵. ارزیابی سمیت نانوذرات آهن صفر ظرفیتی، محدودیت‌ها و چشم اندازهای در کاربرد آن

به غیر از مزایای ناشی از استفاده از نانوذرات آهن صفر ظرفیتی در بازسازی محیط زیست، هم‌چنین یک تهدید ناشی از سمیت این نانو ذرات به سمت موجودات زنده وجود دارد. سمیت نانوذرات می‌تواند به وسیله انواع عوامل ایجاد شود. با وجود این، تا حد زیادی می‌تواند به واکنش‌پذیری بالای آن‌ها مربوط می‌باشد. گزارشات نسبتا کمی راجع به سمیت نانوذرات آهن صفر ظرفیتی وجود دارد. اکثر مطالعات مربوط به نانوذرات برپایه اکسید آهن می‌باشد(۹۷،۹۸). مشخص کردن سمیت نانوذرات آهن صفر ظرفیتی به دلیل استفاده فزاینده از این نانوذرات در تصفیه آب و اصلاح خاک و هم‌چنین در پزشکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اثر منفی این نانوذرات روی گیاهان به مسدود شدن جذب آب و مواد غذایی توسط ریشه‌های گیاه نسبت داده شده است که در نتیجه تجمع و رسوب کردن نانوذرات بر روی سطح ریشه گیاه ایجاد می‌شود(۹۹،۱۰۰). گزارشات نسبتا کمی راجع به سمیت نانوذرات آهن صفر ظرفیتی روی سلول‌های پستانداران وجود دارد(۱۰۱،۱۰۲). سلول‌های بافت مخاط برونش بشر در حضور نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی حل شده در سرم فیزیولوژی، مردند(۱۰۱،۱۰۲). تحقیقات نشان می‌دهد که نانوذرات آهن صفر ظرفیتی می‌تواند موجب اثرات سمی روی میکروگلیای نرون‌های جانور جونده شود(۱۰۱). اصلاح نانوذرات آهن صفر ظرفیتی، به عنوان مثال به عنوان یک نتیجه از نانوذرات آهن صفر ظرفیتی پوشیده شده با پلی‌آسپاراژینات، سمیت نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی را از طریق محدود کردن تماس مستقیم نانوذرات با

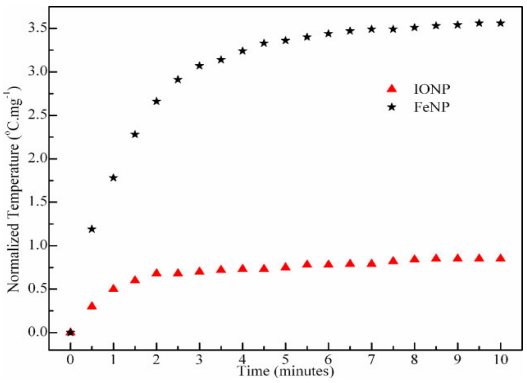
[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

سلول‌ها، کاهش می‌دهد(۱۰۱). با این حال، شایان ذکر است که استفاده از تغییرات اصلاحی مناسب، روش سنتزی مناسب، و یا دوز مناسب، می‌تواند اثرات منفی نانوذرات آهن صفر ظرفیتی بر روی محیط زیست و انسان را به حداقل برساند.

۶. کاربردها

۶,۱. هایپرترمی مغناطیسی

هایپرترمی مغناطیسی، یک روش درمانی جدید است که در آن نانو ذرات آهن به تومور تزریق شده و توسط یک میدان مغناطیسی حرارت تولید می‌شود. وقتی یک میدان مغناطیسی به کار برده می‌شود، ذرات شروع به ارتعاش می‌کنند، که به نوبه خود، سلول‌های تومور را از بین می‌برند. سلول‌های تومور به وسیله هایپرترمی مغناطیسی در دمای بالا یعنی ۷۰ – ۴۱ درجه سانتی‌گراد، می‌توانند نابود شوند. در حالی که ملاحظات ایمنی، دما را در بافت‌های نرمال، به زیر ۴۲ درجه سانتی‌گراد محدود می‌کند(۱۰۴،۱۰۳). بر اساس مغناطیس سنجی نمونه، نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی در مقایسه با نانو ذرات مشابه اکسید آهن معمول با اندازه ۱۰ نانومتر، مغناطش بسیار بیش‌تری دارند. مغناطش اشباع ۷۰ (واحد الکترومغناطیسی/گرم) نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی پوشیده شده با پلی‌اتیلن گلیکول، به خاطر اندازه نانو ذرات و پوشش پلی‌اتیلن گلیکول، تنها یک سوم مقدار توده آهن را نشان می‌دهد. هم‌چنین مغناطش و وادارندگی نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی پوشیده شده با پلی اتیلن گلیکول در مقایسه با نانو ذرات اکسید آهن پوشیده شده با پلیمر با توزیع اندازه ذره‌ای و غلظت مشابه، صد مرتبه بالاتر است که در تصویر شماره ۲ نشان داده شده است. این دو پارامتر در کاربردهای پزشکی مانند بهبود کنتراست تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (ام.آر.آی) و القای هایپرترمی محلی برای مرگ سلول‌های سرطانی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. مغناطش بیش‌تر تولید شده توسط نانوذرات آهن صفر ظرفیتی در مقایسه با نانوذرات اکسید آهن، امکان ایجاد حرارت در فرکانس‌هایی در محدوده ایمن (کمتر از ۱/۲ مگا هرتز) را به آن‌ها می‌دهد. با توجه به مطالب گفته شده، بدیهی است که هایپرترمی محلی با نانوذرات آهن صفر ظرفیتی دست یافتنی است در حالی که اگر خواسته شود این کار با نانوذرات اکسید آهن انجام شود، برای تولید همان درجه حرارت به یک دوز بیست برابر یا بیش‌تر نیاز می‌باشد(۲۷).



تصویر شماره ۲: داده های هایپرترمی برای نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی و نانو ذرات اکسید آهن با استفاده از میدان مغناطیسی متناوب ۴۰۰ مگا هرتز و ۴ اورستد (۲۷)

۶,۲. تصویر برداری رزونانس مغناطیسی (ام.آر.آی)

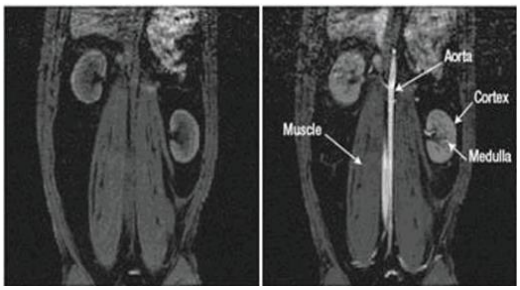
تاکنون، تکنیک تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (ام.آر.آی) با استفاده از نانو ذرات مغناطیسی به یکی از مهم‌ترین راه‌های تصویر برداری تشخیصی درون‌تنی تبدیل شده است. که ازطریق اعمال یک میدان مغناطیسی قوی به هسته اتم‌های هیدروژن در محیط آبی در بدن، برای انتشار یک میدان فرکانس رادیویی صورت می‌گیرد. سپس، اتم‌های هیدروژن از میدان‌های فرکانس رادیویی انرژی جذب می‌کنند و یک سیگنال قابل تشخیص تولید می‌کنند. بدین‌ترتیب به منظور شناسایی و درمان سرطان‌ها و تومورهای خطرناک، به خصوص تشخیص سرطان در مراحل اولیه و شروع هر چه زودتر مراحل درمانی آن، سطوح کنتراست بین بافت‌های مختلف و عوامل کنتراست در داخل بدن حیوان و انسان

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

باید بسیار قوی باشد. بنابراین، ذرات بر پایه آهن سوپر پارا مغناطیس به عنوان عوامل تصویربرداری برای تصویربرداری درون‌تنی در موارد حیوانی و انسانی می‌تواند به کار برده شود(۲۷).

نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی پوشیده شده با پلی‌اتیلن گلیکول با مغناطیس پذیری بزرگ‌تر از نانو ذرات اکسید آهن هم اندازه، از کاندیدهای خوب برای عامل موثر کنتراست T2 می‌تواند باشد(۲۷). نانو ذرات با ساختارهای مختلف مانند نانو ذرات (آهن- پلاتین- طلا) کنژوگه شده با آنتی بادی، به عنوان عوامل کنتراست ام.آر.آی T2MRI و حسگرهای زیستی مورد استفاده قرار گرفتند.

هم‌چنین با موفقیت در ام.آر.آی هدفمند سرطان به کار گرفته شد(۱۰۴). نانو ذرات فلزی–آلیاژی اثرات امیدوارکننده در کنتراست T1 به ویژه برای عوامل تصویربرداری آنژیوگرافی از خود نشان دادند. نانو ذرات آهن- کبالت بعد از عامل‌دار شدن غیر کووالانسی با لایه کربن گرافیتی که با مولکول های فسفولیپید– پلی اتیلن گلیکول پایدار شدند، قابلیت انتشار و پایداری خوبی در محیط آبی پیدا کردند. بعد از آزمایش کردن روی خرگوش، آن‌ها ام.آر.آی از نوع T1 داخل عروقی در حالت درون تنی (T1 MRI) را با موفقیت نشان دادند. که این امر توانایی بالای کنتراست مثبت گردشی طولانی یک عامل کنتراست بر پایه نانوذرات آهن را نشان می دهد (تصویر شماره ۳)(۱۰۵).

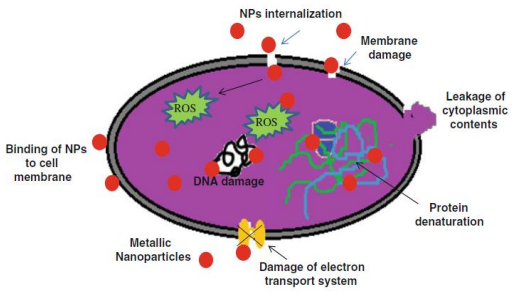


تصویر شماره ۳: تصاویر رزونانس مغناطیسی - T1 یک خرگوش قبل (چپ) و ۳۰ دقیقه بعد (راست) شروع تزریق محلول نانو ذرات آلیاژی (آهن-کبالت) پوشیده شده با کربن گرافیتی با اندازه ۴ نانومتر (۱۰۵)

بدین ترتیب، نانو ذرات بر پایه آهن صفر ظرفیتی (فلزی) به طور بالقوه به عنوان عامل کنتراست تصویربرداری و فرسایش حرارتی در ام.آر.آی (MRI)، سی‌تی اسکن (توموگرافی کامپیوتری) از طریق تزریق مستقیم به داخل تومورها وتوده سرطانی برای تصویربرداری و درمان استفاده می‌شوند(۱۰۳). اتصال پایدار مواد سطحی به هسته مغناطیسی، امکان الصاق یا اتصال مولکول‌های کوچک یا آنتی‌بادی‌ها را به سطح، بدون خطر جدا شدن پوشش سطحی اولیه، کاهش عملکرد و به هم چسبیدن یا تجمع نانو ذرات، فراهم می‌کند(۷۲).

۶،۳. خاصیت آنتی باکتریال

نانو ذرات آهن سنتز شده با استفاده از عصاره برگ گیاهان *Gardenia jasminoides* و *Lawsonia inermis* خاصیت آنتی باکتریال در مقابل باکتری‌های *Staphylococcus aureus*، *Proteus mirabilis*، *Salmonella enteric*، *Escherichia coli* از خود نشان داده‌اند(۱۰۶). با این که مکانیسم عمل کاملاً مشخص نیست ولی فرض بر این است که نانوذرات در نزدیکی غشای سلولی باکتری تجمع می‌یابد و به وسیله تخریب غشا باکتری یا از طریق تشکیل حفره در داخل آن نفوذ می‌کند. پس از ورود به داخل غشاء سلول باکتری، نانوذرات با تولید برخی از رادیکال‌های آزاد و یا با بسیاری از پروتئین موجود در داخل سلول‌های باکتریایی برخورد کرده و منجر به غیرفعال شدن آنزیمی می‌گردد. این وقایع باعث تغییر در محیط داخلی سلول‌های باکتریایی شده و به نظر می‌رسد موجب مرگ سلولی می‌شود که در تصویر شماره ۴ نشان داده شده است(۱۰۷).



تصویر شماره ۴: مکانیسم فعالیت آنتی باکتریال نانو ذرات فلزی

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

۶،۴. نشاندار کردن زیستی و جداسازی زیستی

مائدا و همکاران نانو ذرات آهن- پلی(استایرن گلیسیدیل متاکریلات)، با قطر حدود ۲۰۰-۱۰۰ نانومتر به وسیله پلیمریزاسیون دانه‌ای سنتز کردند. نانو ذرات حاصل، دارای مغناطش اشباع قوی هستند. علاوه بر این، جذب غیراختصاصی کمی در مورد مولکول‌های پروتئینی از خود نشان دادند که نشان دهنده انتخاب گزینی بالای نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی عامل دار شده می‌باشد. این ویژگی، برای رسیدن به توان عملیاتی بالاتر این نانو ذرات در زیست-غربالگری سودمند می‌باشد(۱۰۸).

مافره و همکاران، با استفاده از اسپکتروسکوپی ارتباطی فلورسانس تمرکزی- دوتایی جذب سطحی سه تا از پروتئین‌های سرمی خون انسان را به نام‌های آلبومین، آپولیپوپروتئین آ-یک و آپولیپوپروتئین‌ای-چهار را به طرف نانو ذرات پلاتین-آهن نشان‌دار شده فلورسانس، آنالیز کرده‌اند(۱۰۹). نانو ذرات آهن-پلاتین به طور خاص برای برنامه‌های کاربردی نانوپزشکی طراحی شده، در یک پوسته پلیمری پلی (متا کریلیک اسید) و نشان‌دار شده با رنگ دارای خاصیت فلورسانس، قرار داده شدند و بر حسب قرار گرفتن داخل سلولی در سلول‌های ریه بررسی شدند. علاوه بر این، پتانسیل آن‌ها در القا یک پاسخ التهابی وابسته به غلظت و زمان انکوباسیون نشان داده شده است(۱۱۰). آلیاژ (آهن-پلاتین) به‌طور قابل توجهی، دارای آنیزوتروپی مغناطیسی بزرگتر از اکسیدهای آهن می‌باشد و زمانی که اندازه ذره‌ای آن‌ها کم‌تر از ۱۰ نانومتر باشد، بهترین کاندید می‌تواند باشد. بنابراین، در این زمینه، کیتاموتو و همکاران، نانو ذرات آلیاژ (آهن-پلاتین) با حساسیت مغناطیسی بالا به جریان متناوب در دمای اتاق را برای کاربردهای زیست- پزشکی مانند دستگاه‌های سنجش مغناطیسی تشخیصی و هایپرترمی مغناطیسی برای درمان سرطان توسعه دادند(۱۱۱).

۶،۵. کاربردهای بیولوژیک

تعدادی از مطالعات آزمایشگاهی و کاربردهای محلی و میدانی در مورد نانو ذرات آهن نشان داده‌اند که این یک فن‌آوری اصلاحی موثر می‌باشد. از آن‌جایی که آهن یک عامل احیاکننده قوی است، ویژگی احیاکنندگی قوی نانوذرات آهن صفر ظرفیتی، تخریب طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های آلی و معدنی را به ارمغان می‌آورد(۱۱۲). در طول بیست سال گذشته، نانو ذرات آهن توسط محققین برای بهبود و اصلاح آب‌های آلوده، مورد آزمایش قرار گرفته و ثابت شده است که در حذف یا تخریب طیف وسیعی از آلودگی‌های شیمیایی بسیار موثر بوده است، از جمله این آلودگی‌ها شامل بتا- لاکتام، آنتی بیوتیک‌های بر پایه نیترو ایمیدازول(۱۱۴،۱۱۳)، رنگ‌های آزو(۱۱۵)، حلال‌های کلر دار(۱۱۶)، حشره‌کش‌های کلردار(۱۱۷)، ارگانو فسفات‌ها (۱۱۸)، نیترو آمین‌ها(۱۱۹)، نیترو آروماتیک‌ها(۱۲۰)، پارا- کلروفنل(۱۲۱)، دی فنیل اترهای برم‌دار(۱۲۲)، بی‌فنیل‌های کلر دار(۱۲۳)، آنیون‌های معدنی شامل نیترات(۱۲۵،۱۲۴) و پر کلرات(۱۲۶)، فلزات قلیایی خاکی شامل باریم(۱۲۷) و بریلیوم، نیکل و وانادیوم(۱۲۸)، فلزات واسطه شامل کروم و مولیبدن(۱۲۹)، کبالت(۱۳۰)، مس(۱۳۲،۱۳۱)، سرب، نقره، روی، کادمیوم(۱۳۳)، تکنتیوم(۱۳۴)، متالوییدها شامل آرسنیک(۱۳۵)، سلنیوم(۱۳۶)، اکتینیدها شامل اورانیم(۱۳۷)، پلوتونیم می‌باشند(۱۳۹،۱۳۸). با توجه به تغییرات قابل توجه در شیمی آلاینده‌ها، راه‌های متعددی برای حذف آلاینده‌ها شامل جذب، تشکیل کمپلکس، تشکیل رسوب، احیای شیمیایی در سطح مشخص شده است(۱۴۱،۱۴۰). تحقیق میدانی توسط هی و همکاران با استفاده از نانو ذرات آهن و پالادیوم پایدار شده توسط کربوکسی متیل سلولز برای حذف پر کلرو اتیلن و تری کلرو اتیلن نشان داده است که اصلاح نانو ذرات آهن باعث تخریب سریع در عرض چند هفته بعد از تزریق شده است(۱۴۲). علاوه بر این، کوئین و همکارانش که نانوذرات امولسیونی را به استخرهای زیرزمینی‌تری کلرو اتیلن تزریق کردند، نتیجه گرفتند که بخش قابل توجهی از حذف تری کلرو

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

اتیلن بر اثر تخریب میکروبی بی هوازی بود. اصلاح نانو ذرات آهن با پوشش پلیمری آلی، ناخواسته اثر جانبی سودمندی داشته است(۱۴۳). گزارش شده است که چنین فرآیندهای اکسیداسیون و احیا در ترکیب منجر به تخریب بالاتر رنگ های آزو و آلاینده های دیگر شده است(۱۴۵،۱۴۴). بر اساس بررسی‌های اخیر توسط کارن و همکاران، مواد بر پایه نانوذرات آهن در بیش از ۹۰ درصد از آب‌های زیرزمینی به صورت پایلوت و یا در مقیاس بزرگ‌تر و پروژه‌های اصلاح خاک مورد استفاده قرار گرفت(۱۴۶). کامپوزیت گرافن نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی، پتانسیل بسیار زیادی به عنوان جاذب موثر برای غیرفعال کردن سرب از آب نشان می‌دهد، این مطالعه نشان می‌دهد که کامپوزیت فوق در بهبود جذب شیمیایی سرب (II) از محلول‌های آبی موثر بوده و می‌تواند استفاده شود(۶۸). مجموعه‌ای از کامپوزیت‌های کربن فعال گرانولی نوآورانه، با نانو ذرات دو فلزی (آهن/ پالادیوم) ترکیب شدند. سیستم نانو کامپوزیتی فوق، یک دکلریناسیون موثر ۹۰ درصدی ۲ – کلرو بی فنیل در عرض ۲ روز، جذب کامل باقی‌مانده ۲ – کلرو بی فنیل، محصولات دکلریناسیون را از خود نشان داده است(۱۴۷). نتایج حاصل از این کار نشان می‌دهد که نانو ذرات دو فلزی (آهن/ پالادیوم) ممکن است به عنوان یک جایگزین برای اصلاح و بهبود اتان‌های کلردار مفید باشند(۱۴۸). نانو ذرات دو فلزی (آهن/ پالادیوم) بر پایه سیلیکا، به صورت موفقیت‌آمیزی برای دکلریناسیون تری کلرو اتیلن به کار برده شده‌اند(۷۹). تست‌های گروهی دکلریناسیون، نشان داد که نانو ذرات پایدار شده با کربوکسی متیل سلولز، تری کلرو اتیلن را ۱۷ مرتبه سریع‌تر از نانو ذرات مشابه، تخریب کردند(۵۲). سنتز درجا نانو ذرات آهن پایدار در هوا، جاسازی شده در الیاف سلولزی، منجر به تولید فیلترهای کاغذی مغناطیسی بسیار واکنش‌پذیر شده است. این مواد مهندسی شده، طیف گسترده‌ای از کاربردها را در اصلاح و بهبود کیفیت فاضلاب و آب نوشیدنی، شامل کاهش فنل، حذف کروم، زیست پالایی محیط زیست و کاتالیست، از خود نشان می‌دهند(۶۹). تحقیق اخیر بی پروا و همکاران، با استفاده از نانوذرات آهن پایدار شده با آسکوربیک اسید برای حذف کادمیم (II) از محلول آبی نشان داده است که نانو ذرات به‌طور امید بخشی می‌توانند به عنوان جاذب موثر کادمیوم استفاده بشوند(۱۴۹).

۷. نتیجه گیری و چشم انداز آینده:

بیش از بیست سال گذشته، انواع نانو ذرات معدنی به عنوان عامل کنتراست تصویربرداری رزونانس مغناطیسی ام.آر.آی (MRI) از طریق تلاش‌های مشترک دانشمندان مشغول به کار در رشته‌های پزشکی، بیولوژی و علم مواد، مورد پژوهش قرار گرفته شده است. نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی به‌طور وسیعی به عنوان عوامل کنتراست ام.آر.آی در طحال، کبد و مغز استخوان، توسط جذب انتخابی و تجمع در سلول‌های سیستم ماکروفاژی، به کار برده شده است(۱۵۰). نانو ذرات بر پایه آهن مغناطیسی با کنترل اندازه و شکل، در مشخص نمودن اطلاعات مربوط به ام.آر.آی می‌تواند به عنوان عامل تشخیصی استفاده شود. نانو ذرات بر پایه آهن فلزی برای قرار گرفتن در داخل نانو ذرات پلیمری توسط مولکول‌های آلی پوشش داده می‌شوند. بنابر این، نانوذرات بر پایه آلیاژ و اکسید مغناطیسی، می‌تواند برای ام.آر.آی در تشخیص و هم‌چنین درمان تومورها و سرطان‌ها به کار برده شود. در درمان فعلی تومورها و سرطان‌ها، تکنولوژی ام.آر.آی برای تحقیقات تصویربرداری هنوز بسیار گران‌قیمت است، که کاهش هزینه‌های بالای آن برای برنامه‌های کاربردی گسترده در زندگی ما، مورد نیاز است(۱۰۳). در حال حاضر فن‌آوری نانوذرات مغناطیسی، به دلیل خواص مغناطیسی محدود نانو ذرات اکسید آهن، چالش برانگیز است. افزایش مغناطش اشباع نانوذرات مغناطیسی، ممکن است به ذرات دارای چند گروه عاملی (عوامل چند منظوره)،

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

اجازه رشد بیش‌تر را به خصوص در توسعه و پیشرفت ام.آر.آی و درمان هدفمند سرطان در شکل هایپرترمی محلی بدهد(۲۷). بر اساس مغناطیس سنجی نمونه، نانوذرات آهن صفر ظرفیتی پوشیده شده با بیس– کربوکسیل پلی اتیلن گلیکول در مقایسه با نانو ذرات اکسید آهن مشابه با اندازه ۱۰ نانومتر، مغناطش و وادارندگی بسیار بیش‌تری دارند. زمانی که به یک میدان مغناطیسی نوسانی در یک محدوده فرکانس امن قرار داده شود، افزایش مغناطش ایجاد شده توسط نانوذرات آهن صفر ظرفیتی، امکان تولید موثرتر هیپرترمی محلی را نسبت به نانو ذرات اکسید آهن فراهم می‌کند. علاوه بر این، نانوذرات آهن صفر ظرفیتی نسبت به نانوذرات اکسید آهن، یک اثر کوتاه کننده بسیار قوی روی زمان استراحت T2 دارند. این مطلب نشان می‌دهد که نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی، ممکن است عوامل کنتراست ام.آر.آی موثرتری باشند. نانوذرات آهن صفر ظرفیتی نسل بعدی با پوشش زیست سازگار ممکن است در آینده با ترکیبات زیستی عامل‌دار شوند و عوامل تصویر برداری بعدی با سازگاری بالا در تشخیص و درمان تومورها و سرطان ها در داخل بدن حیوان و انسان خواهد بود. که موضوع قابل بحث برای دانشمندان خواهد بود. از آنجا که سد خونی– مغزی، یک مانع برای رسیدن دارو به تومورهای مغزی می‌باشد. در جهت‌گیری‌های تحقیقات بعدی، سنتز کنترل شده نانوذرات پلیمری پلی (لاکتیک–کوگلیکولیک اسید)، (PLGA)، بر پایه آهن فلزی، می‌تواند توانایی عوامل تشخیصی و یا درمانی را برای رسیدن به سلول‌های هدف در داخل مغز، بهبود بخشد(۱۵۱). افزایش مغناطش فراهم شده توسط نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی هنگامی که به یک میدان مغناطیسی متناوب در یک محدوده فرکانس امن قرار داده می‌شوند امکان القای هیپرترمی محلی موثرتر نسبت به نانو ذرات اکسید آهن را فراهم می‌کند. اثرات قوی‌تر نانوذرات آهن صفر ظرفیتی نسبت به نانو ذرات اکسید آهن در کوتاه کردن زمان استراحت T2 در ام.آر.آی نشان می‌دهد که نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی پتانسیل این را دارند که به عنوان عوامل کنتراست ام.آر.آی قوی‌تری و برتر نسبت به نانو ذرات اکسید آهن رایج، مورد استفاده قرار بگیرند. علاوه بر این، پوشش زیست سازگار پلی اتیلن گلیکول نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی ممکن است الصاق یا اتصال استوکیومتری و کووالانسی لیگاندهای فعال زیستی مانند آنتی‌بادی‌ها یا لیگاندهای رسپتوری مخصوص سلول‌های سرطانی، برای عامل‌دار کردن سطح نانوذرات و هدف قراردادن سلول‌ها را فراهم کند. هدف قرار دادن مغناطیسی بافت‌ها ممکن است به علت ویژگی‌های مغناطیسی برتر این نانوذرات باشد(۲۷). برای تصویربرداری و درمان در شکل هایپرترمی محلی، ممکن است در آینده شاهد تولید نانوذرات آهن صفر ظرفیتی عامل دار شده با پوشش زیست سازگار با الصاق پپتیدهای خاص به سلول‌های سرطانی باشیم. با توجه به توانایی ترکیب کنتراست ام.آر.آی و درمان در قالب هایپرترمی و هم‌چنین امکان عامل دار کردن نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی خاص به نشانگرهای زیستی، ممکن است در آینده شاهد پیشرفت‌های چشمگیری از کاربرد نانوذرات مغناطیسی در تحقیقات زیست پزشکی و در نهایت در کاربردهای بالینی باشیم(۱۵۲).

References

1. Jortner J, Rao CNR. Nanostructured advanced materials. Perspectives and directions. Pure Appl Chem 2002; 74(9): 1491-1506.
2. Rao JP, Gruenberg P, Geckeler KE. Magnetic zero-valent metal polymer nanoparticles: Current trends, scope, and perspectives. Prog Polym Sci 2015; 40: 138-147.
3. Dias AM, Hussain A, Marcos AS, Roque AC. A biotechnological perspective on the application of iron oxide magnetic colloids

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

modified with polysaccharides. Biotechnol Adv 2011; 29(1): 142-155.
4. Lim CW, Lee IS. Magnetically recyclable nanocatalyst systems for the organic reactions. Nano Today 2010; 5(5): 412-434.
5. Rao JP, Geckeler KE. Polymer nanoparticles: preparation techniques and size-control parameters. Prog Polym Sci 2011; 36(7): 887-913.
6. Rao JP, Geckeler KE. Cyclodextrin supramacromolecules: unexpected formation in aqueous phase under ambient conditions. Macromol Rapid Commun 2011; 32(5): 426-430.
7. Lu AH, Salabas EE, Schüth F. Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application. Angewandte Chemie International Edition 2007; 46(8): 1222-1244.
8. Schärtl W. Current directions in core–shell nanoparticle design. Nanoscale 2010; 2(6): 829-843.
9. Panácek A, Kvítek L, Prucek R, Kolář M, Večeřová R, Pizúrová N, et al. Silver colloid nanoparticles: synthesis, characterization, and their antibacterial activity. J Phys Chem B 2006; 110(33): 16248-16253.
10. Hilger I, Kießling A, Romanus E, Hiergeist R, Hergt R, Andrä W, et al. Magnetic nanoparticles for selective heating of magnetically labelled cells in culture: preliminary investigation. Nanotechnology 2004; 15(8): 1027.
11. Campbell RB. Battling tumors with magnetic nanotherapeutics and hyperthermia: turning up the heat. Nanomedicine(Lond) 2007; 2(5): 649-652.
12. Johannsen M, Gneveckow U, Eckelt L, Feussner A, Waldöfner N, Scholz R, et al. Clinical hyperthermia of prostate cancer using magnetic nanoparticles: presentation of a new interstitial technique. Int J Hyperthermia 2005; 21(7): 637-647.
13. Brown MA, Semelka RC. MRI: Basic Principles and Applications. 4th ed. New York: John Wiley & Sons; 2003.
14. Weissleder R, Mahmood U. Molecular imaging. Radiology 2001; 219(2): 316-333.
15. Cassim SM, Giustini AJ, Baker I, Hoopes PJ. Development of novel magnetic nanoparticles for hyperthermia cancer therapy. Proc SPIE int Soc Opt Eng; 2011: 7901.
16. Na HB, Song IC, Hyeon T. Inorganic Nanoparticles for MRI Contrast Agents. Adv Mater 2009; 21(1): 2133-2148.
17. Pankhurst QA, Connolly J, Jones S, Dobson J. Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine. Journal of physics D: Applied Physics 2003; 36(13): R167.
18. Huh Y-M, Jun Y-w, Song H-T, Kim S, Choi J-S, Lee J-H, et al. In vivo magnetic resonance detection of cancer by using multifunctional magnetic nanocrystals. J Am Chem Soc 2005; 127(35): 12387-12391.
19. Bomatí-Miguel O, Morales MP, Tartaj P, Ruiz-Cabello J, Bonville P, Santos M, et al. Fe-based nanoparticulate metallic alloys as contrast agents for magnetic resonance imaging. Biomaterials 2005; 26(28): 5695-5703.
20. Neuwelt E, Varallyay P, Bago A, Muldoon L, Nesbit G, Nixon R. Imaging of iron oxide nanoparticles by MR and light microscopy in patients with malignant brain tumours. Neuropathol Appl Neurobiol 2004; 30(5): 456-471.
21. Shapiro EM, Skrtic S, Sharer K, Hill JM, Dunbar CE, Koretsky AP. MRI detection of single particles for cellular imaging. Proc Nati Acad Sci U S A 2004; 101(30): 10901-10906.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

22. Slotkin JR, Cahill KS, Tharin SA, Shapiro EM. Cellular magnetic resonance imaging: nanometer and micrometer size particles for noninvasive cell localization. Neurotherapeutics 2007; 4(3): 428-433.
23. Lee J-H, Huh Y-M, Jun Y-W, Seo J-W, Jang J-T, Song H-T, et al. Artificially engineered magnetic nanoparticles for ultra-sensitive molecular imaging. Nature Medicine 2007; 13(1): 95-99.
24. McCarthy JR, Kelly KA, Sun EY, Weissleder R. Targeted delivery of multifunctional magnetic nanoparticles. Nanomedicine 2007; 2(2): 153-156.
25. Lewin M, Carlesso N, Tung C-H, Tang X-W, Cory D, Scadden DT, et al. Tat peptide-derivatized magnetic nanoparticles allow in vivo tracking and recovery of progenitor cells. Nat Biotechnol 2000; 18(4): 410-414.
26. Moore A, Marecos E, Bogdanov A Jr, Weissleder R. Tumoral Distribution of Long-circulating Dextran-coated Iron Oxide Nanoparticles in a Rodent Model 1. Radiology 2000; 14(2): 568-574.
27. Hadjipanayis CG, Bonder MJ, Balakrishnan S, Wang X, Mao H, Hadjipanayis GC. Metallic iron nanoparticles for MRI contrast enhancement and local hyperthermia. Small 2008; 4(11): 1925-1929.
28. Chertok B, David AE, Huang Y, Yang VC. Glioma selectivity of magnetically targeted nanoparticles: a role of abnormal tumor hydrodynamics. J Control Release 2007; 122(3): 315-323.
29. Alexiou C, Arnold W, Klein R, Parak F, Hulin P, Bergemann C, et al. Locoregional cancer treatment with magnetic drug targeting. Cancer Res 2000; 60(23): 6641-6648.
30. Zhang W-x. Nanoscale iron particles for environmental remediation: an overview. Journal of Nanoparticle Research 2003; 5(3-4): 323-332.
31. Jain KK. Nanotechnology-based drug delivery for cancer. Technol Cancer Res Treat 2005; 4(4): 407-416.
32. Nasongkla N, Bey E, Ren J, Ai H, Khemtong C, Guthi JS, et al. Multifunctional Polymeric Micelles as Cancer-Targeted, MRI-Ultrasensitive Drug Delivery Systems. Nano Lett 2006; 6(11): 2427-2430.
33. Saharan P, Chaudhary GR, Mehta S, Umar A. Removal of water contaminants by iron oxide nanomaterials. J Nanosci Nanotechnol 2014; 14(1): 627-643.
34. Selvin R, Hsu H-L, Arul NS, Mathew S. Comparison of photo-catalytic efficiency of various metal oxide photo-catalysts for the degradation of methyl orange. Science of Advanced Materials 2010; 2(1): 58-63.
35. Qu X, Alvarez PJ, Li Q. Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. Water Res 2013; 47(12): 3931-3946.
36. Adekunle AS, Ozoemena KI. Voltammetric and impedimetric properties of nano-scaled-Fe2O3 catalysts supported on multi-walled carbon nanotubes: catalytic detection of dopamine. Int J Electrochem Sci 2010; 5: 1726-1742.
37. Shan G, Yan S, Tyagi RD, Surampalli RY, Zhang TC. Applications of nanomaterials in environmental science and engineering: review. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management 2009; 13(2): 110-119.
38. Yan W, Lien H-L, Koel BE, Zhang W-x. Iron nanoparticles for environmental clean-up: recent developments and future outlook. Environmental Science: Processes & Impacts 2013; 15(1): 63-77.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

39. Sun Y-P, Li X-q, Cao J, Zhang W-x, Wang HP. Characterization of zero-valent iron nanoparticles. Advances in Colloid and Interface Science 2006; 120(1-3): 47-56.
40. Wang C-B, Zhang W-x. Synthesizing Nanoscale Iron Particles for Rapid and Complete Dechlorination of TCE and PCBs. Environ Sci Technol 1997; 31(7): 2154-2156.
41. Galvee GN, Klabunde KJ, Sorensen CM, Hadjipanayis GC. Chemistry of Borohydride Reduction of Iron(II) and Iron(III) Ions in Aqueous and Nonaqueous Media. Formation of Nanoscale Fe, FeB, and Fe2B Powders. J Inorg Chem 1995; 34(1): 28-35.
42. Chen SS, Hsu HD, Li CW. A new method to produce nanoscale iron for nitrate removal. Journal of Nanoparticle Research 2004; 6(6): 639-647.
43. Li S, Yan W, Zhang WX. Solvent-free production of nanoscale zero-valent iron (nZVI) with precision milling. Green Chem 2009; 11(10): 1618-1626.
44. Nurmi JT, Tratnyek PG, Sarathy V, Baer DR, Amonette JE, Pecher K, et al. Characterization and properties of metallic iron nanoparticles: spectroscopy, electrochemistry, and kinetics. Environ Science Technol 2005; 39(5): 1221-1230.
45. Liu H, Chen T, Chang D, Chen D, Liu Y, He H, et al. Nitrate reduction over nanoscale zero-valent iron prepared by hydrogen reduction of goethite. Mater Chem Phys 2012; 133(1): 205-211.
46. Li F, Vipulanandan C, Mohanty KK. Microemulsion and solution approaches to nanoparticle iron production for degradation of trichloroethylene. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2003; 223(1-3): 103-112.
47. Chatterjee A, Chakravorty D. Glass-metal nanocomposite synthesis by metal organic route. Journal of Physics D: Applied Physics 1989; 22(9): 1386.
48. Mahajan D, Vijayaraghavan P. Selective synthesis of mixed alcohols catalyzed by dissolved base-activated highly dispersed slurried iron. Fuel 1999; 78(1): 93-100.
49. Suslick KS, Choe S-B, Cichowlas AA, Grinstaff MW. Sonochemical synthesis of amorphous iron. Nature 1991; 353(6343): 414-416.
50. Mahajan D, Papish ET, Pandya K. Sonolysis induced decomposition of metal carbonyls: kinetics and product characterization. Ultrason Sonochem 2004; 11(6): 385-392.
51. Carpenter E, Calvin S, Stroud R, Harris V. Passivated iron as core-shell nanoparticles. Chem Mater 2003; 15(17): 3245-3246.
52. He F, Zhao D, Liu J, Roberts CB. Stabilization of Fe-Pd nanoparticles with sodium carboxymethyl cellulose for enhanced transport and dechlorination of trichloroethylene in soil and groundwater. Ind Eng Chem Res 2007; 46(1): 29-34.
53. Lee HS, Lee WC, Furubayashi T. A comparison of coprecipitation with microemulsion methods in the preparation of magnetite. J Appl Phys 1999; 85(8): 5231-5233.
54. Wilcoxon J, Provencio P. Use of surfactant micelles to control the structural phase of nanosize iron clusters. J Phys Chem B 1999; 103(45): 9809-9812.
55. Kern W. Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology: Science, Technology, and Applications. 2nd ed. 1993.
56. Huang Q, Shi X, Pinto RA, Petersen EJ, Weber Jr WJ. Tunable synthesis and immobilization of zero-valent iron

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

nanoparticles for environmental applications. Environ Sci Technol 2008; 42(23): 8884-8889.

57. Hoag GE, Collins JB, Holcomb JL, Hoag JR, Nadagouda MN, Varma RS. Degradation of bromothymol blue by 'greener'nano-scale zero-valent iron synthesized using tea polyphenols. J Mater Chem 2009; 19(45): 8671-8677.
58. Njagi EC, Huang H, Stafford L, Genuino H, Galindo HM, Collins JB, et al. Biosynthesis of iron and silver nanoparticles at room temperature using aqueous sorghum bran extracts. Langmuir 2010; 27(1): 264-271.
59. Shahwan T, Sirriah SA, Nairat M, Boyacı E, Eroğlu AE, Scott TB, et al. Green synthesis of iron nanoparticles and their application as a Fenton-like catalyst for the degradation of aqueous cationic and anionic dyes. Chem Eng J 2011; 172(1): 258-266.
60. Nadagouda MN, Castle AB, Murdock RC, Hussain SM, Varma RS. In vitro biocompatibility of nanoscale zerovalent iron particles (NZVI) synthesized using tea polyphenols. Green Chem 2010; 12(1): 114-122.
61. Huang L, Weng X, Chen Z, Megharaj M, Naidu R. Synthesis of iron-based nanoparticles using oolong tea extract for the degradation of malachite green. Spectrochim Acta Part A Mol Biomol Spectrosc 2014; 117: 801-804.
62. Machado S, Grosso JP, Nouws HPA, Albergaria JT, Delerue-Matos C. Utilization of food industry wastes for the production of zero-valent iron nanoparticles. Sci Total Environ 2014; 496: 233-240.
63. Fu F, Dionysiou DD, Liu H. The use of zero-valent iron for groundwater remediation and wastewater treatment: a review. J Hazard Mater 2014; 267: 194-205.
64. Fatisson J, Ghoshal S, Tufenkji N. Deposition of carboxymethylcellulose-coated zero-valent iron nanoparticles onto silica: Roles of solution chemistry and organic molecules. Langmuir 2010; 26(15): 12832-12840.
65. Petala E, Dimos K, Douvalis A, Bakas T, Tucek J, Zbořil R, et al. Nanoscale zero-valent iron supported on mesoporous silica: Characterization and reactivity for Cr (VI) removal from aqueous solution. J Hazard Mater 2013; 261: 295-306.
66. Hwang Y, Lee Y-C, Mines PD, Huh YS, Andersen HR. Nanoscale zero-valent iron (nZVI) synthesis in a Mg-aminoclay solution exhibits increased stability and reactivity for reductive decontamination. Appl Catal B: Environ 2014; 147: 748-755.
67. WooáLee J, BináKim S. Enhanced Cr (VI) removal using iron nanoparticle decorated graphene. Nanoscale 2011; 3(9): 3583-3585.
68. Jabeen H, Kemp KC, Chandra V. Synthesis of nano zerovalent iron nanoparticles–graphene composite for the treatment of lead contaminated water. J Environ Manage 2013; 130: 429-435.
69. Datta KKR, Petala E, Datta KJ, Perman JA, Tucek J, Bartak P, et al. NZVI Modified Magnetic Filter Paper with High Redox and Catalytic Activities for Advanced Water Treatment Technologies. Chem Commun 2014; 50(99): 15673-15676.
70. He F, Zhang M, Qian T, Zhao D. Transport of carboxymethyl cellulose stabilized iron nanoparticles in porous media: Column experiments and modeling. J Colloid Interface Sci 2009; 334(1): 96-102.
71. Cauchetier M, Croix O, Herlin N, Luce M. Nanocomposite Si/C/N powder production by laser–aerosol interaction. J Am Ceram Soc 1994; 77(4): 993-998.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

72. Leconte Y, Veintemillas-Verdaguer S, Morales M, Costo R, Rodríguez I, Bonville P, et al. Continuous production of water dispersible carbon–iron nanocomposites by laser pyrolysis: Application as MRI contrasts. J Colloid Interface Sci 2007; 313(2): 511-518.
73. Lu Y, Zhu Z, Liu Z. Carbon-encapsulated Fe nanoparticles from detonation-induced pyrolysis of ferrocene. Carbon 2005; 43(2): 369-374.
74. Jamei MR, Khosravi MR, Anvaripour B. A novel ultrasound assisted method in synthesis of NZVI particles. Ultrason Sonochem 2014; 21(1): 226-233.
75. Datta S, Mitra S, Chakravorty D, Ram S, Bahadur D. Preparation of glass—metal microcomposites by sol—gel route. J Mater Sci Lett 1986; 5(1): 89-90.
76. Arshadi M, Soleymanzadeh M, Salvacion J, SalimiVahid F. Nanoscale Zero-Valent Iron (NZVI) supported on sineguelas waste for Pb (II) removal from aqueous solution: Kinetics, thermodynamic and mechanism. J Colloid Interface Sci 2014; 426: 241-251.
77. Jia H, Wang C. Comparative studies on montmorillonite-supported zero-valent iron nanoparticles produced by different methods: reactivity and stability. Environ Technol 2013; 34(1): 25-33.
78. Luo N, Liu K, Liu Z, Li X, Chen S, Shen Y, et al. Controllable synthesis of carbon coated iron-based composite nanoparticles. Nanotechnology 2012; 23(47): 475603.
79. Meeks ND, Smuleac V, Stevens C, Bhattacharyya D. Iron-based nanoparticles for toxic organic degradation: Silica platform and green synthesis. Ind Eng Chem Res 2012; 51(28): 9581-9590.
80. Mao Z, Wu Q, Wang M, Yang Y, Long J, Chen X. Tunable synthesis of SiO2-encapsulated zero-valent iron nanoparticles for degradation of organic dyes. Nanoscale Res letts 2014; 9(1): 501.
81. Fu F, Dionysiou DD, Liu H. The use of zero-valent iron for groundwater remediation and wastewater treatment: a review. J Hazard Mater 2014; 267: 194-205.
82. Mueller NC, Braun J, Bruns J, Černík M, Rissing P, Rickerby D, et al. Application of nanoscale zero valent iron (NZVI) for groundwater remediation in Europe. Environ Sci Pollut Res 2012; 19(2): 550-558.
83. Yan W, Lien HL, Koel BE, Zhang WX. Iron nanoparticles for environmental clean-up: recent developments and future outlook. Environ Sci Processes Impacts 2013; 15(1): 63-77.
84. Crane RA, Scott TB. Nanoscale zero-valent iron: future prospects for an emerging water treatment technology. J Hazard Mater 2012; 211-212: 112-125.
85. Tesh SJ, Scott TB. Nano- Composites for Water Remediation: A Review. Adv Mater 2014; 26(35): 6056-6068.
86. Tosco T, Papini MP, Viggi CC, Sethi R. Nanoscale zerovalent iron particles for groundwater remediation: a review. Journal of Cleaner Production 2014; 77: 10-21.
87. Xiong Z, Zhao D, Pan G. Rapid and complete destruction of perchlorate in water and ion-exchange brine using stabilized zero-valent iron nanoparticles. Water Res 2007; 41(15): 3497-3505.
88. He F, Zhao D, Liu J, Roberts CB. Stabilization of Fe-Pd nanoparticles with sodium carboxymethyl cellulose for enhanced transport and dechlorination of trichloroethylene in soil and groundwater. Ind Eng Chem Res 2007; 46(1): 29-34.
89. Naja G, Halasz A, Thiboutot S, Ampleman G, Hawari J. Degradation of hexahydro-1, 3,

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

5-trinitro-1, 3, 5-triazine (RDX) using zerovalent iron nanoparticles. Environ Sci Technol 2008; 42(12): 4364-4370.

90. Qiu X, Fang Z, Yan X, Gu F, Jiang F. Emergency remediation of simulated chromium (VI)-polluted river by nanoscale zero-valent iron: Laboratory study and numerical simulation. Chem Eng J 2012; 193-194: 358-365.
91. Xiong Z, Zhao D, Pan G. Rapid and complete destruction of perchlorate in water and ion-exchange brine using stabilized zero-valent iron nanoparticles. Water Res 2007; 41(15): 3497-3505.
92. Tiraferri A, Chen KL, Sethi R, Elimelech M. Reduced aggregation and sedimentation of zero-valent iron nanoparticles in the presence of guar gum. J Colloid Interface Sci 2008; 324(1): 71-79.
93. Li S, Wu P, Li H, Zhu N, Li P, Wu J, et al. Synthesis and characterization of organo-montmorillonite supported iron nanoparticles. Appl Clay Sci 2010; 50(3): 330-336.
94. Zhan J, Zheng T, Piringer G, Day C, McPherson GL, Lu Y, et al. Transport characteristics of nanoscale functional zerovalent iron/silica composites for in situ remediation of trichloroethylene. Environ Sci Technol 2008; 42(23): 8871-8876.
95. Horzum N, Demir MM, Nairat M, Shahwan T. Chitosan fiber-supported zero-valent iron nanoparticles as a novel sorbent for sequestration of inorganic arsenic. RSC Adv 2013; 3(21): 7828-7837.
96. Tesh SJ, Scott TB. Nano- Composites for Water Remediation: A Review. Adv Mater 2014; 26(35): 6056-6068.
97. Møller P, Jacobsen NR, Folkmann JK, Danielsen PH, Mikkelsen L, Hemmingsen JG, et al. Role of oxidative damage in toxicity of particulates. Free Radic Res 2009; 44(1): 1-46.
98. Nel A, Xia T, Mädler L, Li N. Toxic potential of materials at the nanolevel. Science 2006; 311(5761): 622-627.
99. El- Temsah YS, Joner EJ. Impact of Fe and Ag nanoparticles on seed germination and differences in bioavailability during exposure in aqueous suspension and soil. Environ Toxicol 2012; 27(1): 42-49.
100. Ma X, Gurung A, Deng Y. Phytotoxicity and uptake of nanoscale zero-valent iron (nZVI) by two plant species. Sci Total Environ 2013; 443: 844-849.
101. Phenrat T, Long TC, Lowry GV, Veronesi B. Partial oxidation ("aging") and surface modification decrease the toxicity of nanosized zerovalent iron. Environ Sci Technol 2008; 43(1): 195-200.
102. Keenan CR, Goth-Goldstein R, Lucas D, Sedlak DL. Oxidative stress induced by zero-valent iron nanoparticles and Fe (II) in human bronchial epithelial cells. Environ Sci Technol 2009; 43(12): 4555-4560.
103. Viet Long N, Minh Thi C, Yong Y, Cao Y, Wu H, Nogami M. Synthesis and Characterization of Fe-Based Metal and Oxide Based Nanoparticles: Discoveries and Research Highlights of Potential Applications in Biology and Medicine. Recent pat Nanotechnol 2014; 8(1): 52-61.
104. Choi J-s, Jun Y-w, Yeon S-I, Kim HC, Shin J-S, Cheon J. Biocompatible heterostructured nanoparticles for multimodal biological detection. J Am Chem Soc 2006; 128(50): 15982-15983.
105. Seo WS, Lee JH, Sun X, Suzuki Y, Mann D, Liu Z, et al. FeCo/graphitic-shell nanocrystals as advanced magnetic-resonance-imaging and near-infrared agents. Nat Mater 2006; 5(12): 971-976.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

106.Naseem T, Farrukh MA. Antibacterial activity of green synthesis of iron nanoparticles using Lawsonia inermis and Gardenia jasminoides leaves extract. J Chem 2015; 2015.

107.Singla R, Guliani A, Kumari A, Yadav SK. Metallic Nanoparticles, Toxicity Issues and Applications in Medicine. InNanoscale Materials in Targeted Drug Delivery, Theragnosis and Tissue Regeneration. Singapore: Springer; 2016. p. 41-80.

108.Maeda M, Kuroda CS, Shimura T, Tada M, Abe M, Yamamuro S, et al. Magnetic carriers of iron nanoparticles coated with a functional polymer for high throughput bioscreening. J Appl Phys 2006; 99(8): 08H103-08H103-3.

109.Maffre P, Nienhaus K, Amin F, Parak WJ, Nienhaus GU. Protein Adsorption onto FePt Nanoparticles Investigated by Dual-Focus Fluorescence Correlation Spectroscopy. Biophys J 2012; 102(3): 401a.

110.Lehmann AD, Parak WJ, Zhang F, Ali Z, Röcker C, Nienhaus GU, et al. Fluorescent–Magnetic Hybrid Nanoparticles Induce a Dose- Dependent Increase in Proinflammatory Response in Lung Cells in vitro Correlated with Intracellular Localization. Small 2010; 6(6): 753-762.

111.Kitamoto Y, He JS. Chemical synthesis of FePt nanoparticles with high alternate current magnetic susceptibility for biomedical applications. Electrochimica Acta 2009; 54(25): 5969-5972.

112.Tang SC, Lo IM. Magnetic nanoparticles: essential factors for sustainable environmental applications. Water Res 2013; 47(8): 2613-2632.

113.Ghauch A, Tuqan A, Assi HA. Antibiotic removal from water: Elimination of amoxicillin and ampicillin by microscale and nanoscale iron particles. Environ Pollut 2009; 157(5): 1626-1635.

114.Fang Z, Chen J, Qiu X, Qiu X, Cheng W, Zhu L. Effective removal of antibiotic metronidazole from water by nanoscale zero-valent iron particles. Desalination 2011; 268(1-3): 60-67.

115.Fan J, Guo Y, Wang J, Fan M. Rapid decolorization of azo dye methyl orange in aqueous solution by nanoscale zerovalent iron particles. J Hazard Mater 2009; 166(2): 904-910.

116.Liu Y, Majetich SA, Tilton RD, Sholl DS, Lowry GV. TCE dechlorination rates, pathways, and efficiency of nanoscale iron particles with different properties. Environ Sci Technol 2005; 39(5): 1338-1345.

117.Elliott DW, Lien H-L, Zhang W-X. Degradation of lindane by zero-valent iron nanoparticles. J Environ Eng 2009; 135(5): 317-324.

118.Ambashta RD, Repo E, Sillanpää M. Degradation of tributyl phosphate using nanopowders of iron and iron–nickel under the influence of a static magnetic field. Ind Eng Chem Res 2011; 50(21): 11771-11777.

119.Naja G, Halasz A, Thiboutot S, Ampleman G, Hawari J. Degradation of hexahydro-1, 3, 5-trinitro-1, 3, 5-triazine (RDX) using zerovalent iron nanoparticles. Environ Sci Technol 2008; 42(12): 4364-4370.

120.Zhang X, Lin Y-m, Shan X-q, Chen Z-l. Degradation of 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT) from explosive wastewater using nanoscale zero-valent iron. Chem Eng J 2010; 158(3): 566-570.

121.Cheng R, Wang J-L, Zhang W-X. Comparison of reductive dechlorination of p-chlorophenol using Fe-0 and nanosized Fe-0. J Hazard Mater 2007; 144(1-2): 334-339.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

122.Shih YH, Tai YT. Reaction of decabrominated diphenyl ether by zerovalent iron nanoparticles. Chemosphere 2010; 78(10): 1200-1206.

123.Varanasi P, Fullana A, Sidhu S. Remediation of PCB contaminated soils using iron nano-particles. Chemosphere 2007; 66(6): 1031-1038.

124.Wang W, Jin Z-h, Li T-l, Zhang H, Gao S. Preparation of spherical iron nanoclusters in ethanol–water solution for nitrate removal. Chemosphere 2006; 65(8): 1396-1404.

125.Sohn K, Kang SW, Ahn S, Woo M, Yang S-K. Fe (0) nanoparticles for nitrate reduction: stability, reactivity, and transformation. Environ Sci Technol 2006; 40(17): 5514-5519.

126.Xiong Z, Zhao D, Pan G. Rapid and complete destruction of perchlorate in water and ion-exchange brine using stabilized zero-valent iron nanoparticles. Water Research 2007; 41(15): 3497-505.

127.Celebi O, Üzüm Ç, Shahwan T, Erten H. A radiotracer study of the adsorption behavior of aqueous Ba 2+ ions on nanoparticles of zero-valent iron. J Hazard Mater 2007; 148(3): 761-767.

128.Klimkova S, Cernik M, Lacinova L, Filip J, Jancik D, Zboril R. Zero-valent iron nanoparticles in treatment of acid mine water from in situ uranium leaching. Chemosphere 2011; 82(8): 1178-1184.

129.Scott T, Popescu I, Crane R, Noubactep C. Nano-scale metallic iron for the treatment of solutions containing multiple inorganic contaminants. J Hazard Mater 2011; 186(1): 280-287.

130.Üzüm Ç, Shahwan T, Eroğlu AE, Lieberwirth I, Scott TB, Hallam KR. Application of zero-valent iron nanoparticles for the removal of aqueous Co 2+ ions under various experimental conditions. Chem Eng J 2008; 144(2): 213-220.

131.Karabelli D, Üzüm Car, Shahwan T, Eroglu AE, Scott TB, Hallam KR, et al. Batch removal of aqueous Cu2+ ions using nanoparticles of zero-valent iron: a study of the capacity and mechanism of uptake. Ind Eng Chem Res 2008; 47(14): 4758-4764.

132.Lien H-L, Jhuo Y-S, Chen L-H. Effect of heavy metals on dechlorination of carbon tetrachloride by iron nanoparticles. Environ Eng Sci 2007; 24(1): 21-30.

133.Li X-Q, Zhang W-X. Sequestration of metal cations with zerovalent iron nanoparticles: a study with high resolution X-ray photoelectron spectroscopy (HR-XPS). J Phys Chem 2007; 111(19): 6939-6946.

134.Darab JG, Amonette AB, Burke DS, Orr RD, Ponder SM, Schrick B, et al. Removal of pertechnetate from simulated nuclear waste streams using supported zerovalent iron. Chem Mater 2007; 19(23): 5703-5713.

135.Kanel SR, Nepal D, Manning B, Choi H. Transport of surface-modified iron nanoparticle in porous media and application to arsenic (III) remediation. Journal of Nanoparticle Research 2007; 9(5): 725-735.

136.Olegario JT, Yee N, Miller M, Sczepaniak J, Manning B. Reduction of Se (VI) to Se (-II) by zerovalent iron nanoparticle suspensions. Journal of Nanoparticle Research 2010; 12(6): 2057-2068.

137.Dickinson M, Scott TB. The application of zero-valent iron nanoparticles for the remediation of a uranium-contaminated waste effluent. J Hazard Mater 2010; 178(1): 171-179.

138.Yan S, Hua B, Bao Z, Yang J, Liu C, Deng B. Uranium (VI) removal by nanoscale zerovalent iron in anoxic batch systems. Environ Sci

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]

Technol 2010; 44(20): 7783-7789.

139.Crane R, Dickinson M, Popescu I, Scott T. Magnetite and zero-valent iron nanoparticles for the remediation of uranium contaminated environmental water. Water Res 2011; 45(9): 2931-2942.

140.Miehr R, Tratnyek PG, Bandstra JZ, Scherer MM, Alowitz MJ, Bylaska EJ. Diversity of contaminant reduction reactions by zerovalent iron: Role of the reductate. Environ Sci Technol 2004; 38(1): 139-147.

141.Crane R, Scott T. Nanoscale zero-valent iron: future prospects for an emerging water treatment technology. J Hazard Mater 2012; 211-212: 112-125.

142.He F, Zhao D, Paul C. Field assessment of carboxymethyl cellulose stabilized iron nanoparticles for in situ destruction of chlorinated solvents in source zones. Water Res 2010; 44(7): 2360-2370.

143.Quinn J, Geiger C, Clausen C, Brooks K, Coon C, O'Hara S, et al. Field demonstration of DNAPL dehalogenation using emulsified zero-valent iron. Environ Sci Technol 2005; 39(5): 1309-1318.

144.Xu L, Wang J. A heterogeneous Fenton-like system with nanoparticulate zero-valent iron for removal of 4-chloro-3-methyl phenol. J Hazard Mater 2011; 186(1): 256-264.

145.Moon B-H, Park Y-B, Park K-H. Fenton oxidation of Orange II by pre-reduction using nanoscale zero-valent iron. Desalination 2011; 268(1-3): 249-252.

146.Karn B, Kuiken T, Otto M. Nanotechnology and in situ remediation: a review of the benefits and potential risks. Environ Health Perspect 2009; 117(12): 1823-1831.

147.Choi H, Al-Abed SR, Agarwal S, Dionysiou DD. Synthesis of reactive nano-Fe/Pd bimetallic system-impregnated activated carbon for the simultaneous adsorption and dechlorination of PCBs. Chem Mater 2008; 20(11): 3649-3655.

148.Lien H-L, Zhang W-X. Hydrodechlorination of Chlorinated Ethanes by Nanoscale Pd/Fe Bimetallic Particles. J Environ Eng 2005; 131(1): 4-10.

149.Savasari M, Emadi M, Bahmanyar MA, Biparva P. Optimization of Cd (II) removal from aqueous solution by ascorbic acid-stabilized zero valent iron nanoparticles using response surface methodology. J Ind Eng Chem 2014; 21: 1403-1409.

150.Semelka RC, Helmberger TK. Contrast Agents for MR Imaging of the Liver 1. Radiology 2001; 218(1): 27-38.

151.Invernici G, Cristini S, Alessandri G, E Navone S, Canzi L, Tavian D, et al. Nanotechnology advances in brain tumors: the state of the art. Recent pat Anticancer Drug Discov 2011; 6(1): 58-69.

152.Rosensweig RE. Heating magnetic fluid with alternating magnetic field. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2002; 252: 370-374.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-23]