

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و شش، شماره یازده، بهمن ماه ۱۴۰۳ (۱۳۹-۱۴۰)

بیوسنتز سبز نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از عصاره برگ درخت انبه و بررسی

مشخصات آن

سهیل ایزدپناه^۱

زهرا قاسمی^{۲*}

zghasemi446@yahoo.com

مازیار شریف زاده بانی^۳

مجتبی معصومی^۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۳۱

چکیده

زمینه و هدف: امروزه سنتز زیستی نانوذرات با بهره‌گیری از عصاره گیاهی به علت سازگاری با محیط زیست و جلوگیری از ایجاد اثرات نامطلوب روش‌های شیمیایی به عنوان یک فرآیند قابل اعتماد برای سنتز نانوذرات اکسید فلزی، در حال توسعه است. گیاهان به دلیل در دسترس بودن و عدم نیاز به شرایط و مواد غذایی خاص برای رشد، نسبت به سایر منابع زیستی گزینه‌ای مناسب برای تولید نانوذرات به روش زیستی محسوب می‌شوند. هدف از انجام تحقیق حاضر، سنتز سبز نانوذرات پرکاربرد Fe_3O_4 با استفاده از عصاره برگ درخت انبه به منظور کاهش هزینه‌های مرتبط با روش‌های سنتز شیمیایی می‌باشد.

روش بررسی: در این مطالعه سنتز زیستی نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) با استفاده از عصاره برگ درخت انبه به عنوان کاهنده و پایدار کننده در سنتز Fe_3O_4 مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور ابتدا عصاره آبی از برگ‌های درخت انبه (*Mangifera indica*) در بهار ۱۴۰۳ تهیه شد و سپس از آن برای سنتز نانوذرات Fe_3O_4 استفاده گردید. محلول ۰/۱ مولار کلرید آهن با $FeCl_2$ و $FeCl_3$ در آب دیونیزه تهیه شد و سپس با عصاره برگ انبه احیا شد. همچنین اثر مقدار عصاره بر سنتز نانوذرات و خصوصیات آنها بررسی شد. مشخصات محصولات به وسیله تکنیک‌های طیف سنج پراش اشعه ایکس، میکروسکوب الکترونی روبشی، مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی، میکروسکوب الکترونی عبوری، طیف سنج مادون قرمز تبدیل فوری و جذب و واجذب نیتروژن بررسی شد.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد ایت الله آملی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی.

۲- دانشیار، دانشگاه هرمزگان، دانشکده علوم و فنون دریایی، گروه شیلات. * (مسوول مکاتبات)

۳- دانشیار، دانشگاه آزاد ایت الله آملی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی.

۴- استادیار، دانشگاه آزاد ایت الله آملی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی.

یافته‌ها: آنالیز طیف سنجی پراش اشعه ایکس تشکیل فاز کریستالی نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 را تایید کرد. استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری برای بررسی خصوصیات مورفولوژیکی ذرات نشان داد که نانوذرات سنتز شده، کروی شکل و با قطر حدود ۲۰ نانومتر می باشند. مقدار اشباع مغناطیسی و مساحت سطح ویژه Fe_3O_4 سنتزی به ترتیب $42/1 \text{ emu.g}^{-1}$ و $227/46 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ بود.

بحث و نتیجه‌گیری: به نظر می‌رسد که روش زیستی با استفاده از عصاره آبی برگ درخت انبه، به عنوان روشی سازگار با محیط‌زیست و ارزان، می‌تواند جایگزین روش‌های شیمیایی مرسوم برای سنتز نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 با کاربردهای گسترده باشد.

واژه های کلیدی : سنتز سبز، نانوذرات مگنتیک، عصاره آبی، *Mangifera indica*.

Green biosynthesis of Fe₃O₄ nanoparticles using mango tree leaf extract and its characterization

Soheil Izad Panah¹

Zahra Ghasemi^{2*}

zghasemi446@yahoo.com

Mazyar Sharifzadeh³

Mojtaba Masoumi⁴

Date of Acceptance: January 22, 2025

Date of Submission: May 20, 2024

Abstract

Background and Objective: Nowadays, researchers are focusing on the biosynthesis of nanoparticles using plant extracts as a more environmentally friendly alternative to chemical methods. This method is considered reliable for producing metal oxide nanoparticles while minimizing adverse effects on the environment. Plants are deemed as a viable choice for the biological production of nanoparticles compared to other biological sources due to their accessibility and minimal requirements for specific conditions and nutrients for growth. The aim of the present research is to achieve the green synthesis of widely used Fe₃O₄ nanoparticles using mango leaf extract in order to reduce costs associated with chemical synthesis methods.

Material and Methodology: The utilization of mango tree leaf extract as both a reducing agent and stabilizer was employed in the synthesis of iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄) in this study. Initially, an aqueous extract was derived from the leaves of the mango tree (*Mangifera indica*) in the spring 2024 with the intention of utilizing it in the production of Fe₃O₄ nanoparticles. The 0.1 molar iron chloride solution was prepared with FeCl₂ and FeCl₃ in deionized water and then reduced with mango leaf extract. Additionally, the effect of extract amount on nanoparticle synthesis and their properties was investigated. In order to analyze the properties of the products, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, vibrating sample magnetometry, Fourier-transform infrared spectroscopy, Nitrogen adsorption and desorption techniques were used.

Findings: Analysis using X-ray diffraction spectroscopy verified the presence of the crystalline phase of the Fe₃O₄ magnetic nanoparticles. Analysis of the morphological features of the produced particles through the utilization of scanning and transmission electron microscope imagery revealed the creation

1- Ph.D student, Department of Chemical Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

2- Associate professor, Department of Fisheries, Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran. **(Corresponding Author)*

3- Associate professor, Department of Chemical Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

4- Assistant professor, Department of Chemical Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

of spherical nanoparticles with an approximate diameter of 20 nm. The magnetic saturation value and specific surface area of synthetic Fe_3O_4 were 42.1 emu.g^{-1} and $227.46 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$, respectively.

Discussion and conclusion: Hence, it appears that utilizing the biological approach involving the aqueous extract of mango tree leaves, as a cost-effective and eco-friendly alternative, has the potential to substitute traditional chemical techniques in the production of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles that have diverse uses.

Keywords: Green synthesis, magnetite nanoparticles, aqueous extract, *Mangifera indica*.

مقدمه

جهت کاهش ابعاد و همچنین برای داشتن ویژگی های منحصر به فرد، ساخت، دستکاری و استفاده از نانوذرات فلزی دارای اهمیت زیادی می باشد. امروزه، روش های مختلفی برای تولید نانوذرات وجود دارد، اما این روش ها مشکلات و نگرانی هایی را در حوزه آلاینده های زیست محیطی و پساتولیدات شیمیایی فرعی و خطرناک حاصل از فرآیندهای ساخت مواد شیمیایی موجب می شوند. اگرچه روش های فیزیکی و شیمیایی تولید نانوذرات موجب تولید خالص آن ها می شوند، اما به طور کلی گران قیمت و زمان بر هستند و برای محیط زیست خطرناک می باشند (۱، ۲). از معایب این روش ها می توان به تولید کم نانوذرات، آلودگی های شیمیایی محیط زیست و اتلاف انرژی زیاد اشاره نمود.

هدف نانو زیست فناوری که از ترکیب زیست فناوری و فناوری نانو به وجود آمده است، تولید مواد و ذرات از طریق روش های زیستی سازگار با محیط زیست در مقیاس نانومتر است که در حال توسعه و رشد می باشد (۲-۵). یکی از روش های مورد استفاده در تولید نانوذرات، روش تولید زیستی است و تمایل به این روش برای ساخت نانوذرات رو به افزایش می باشد. تولید زیستی با توجه به مزایایی مانند مصرف کم انرژی و سازگاری با محیط زیست مورد توجه می باشد. سنتز زیستی حوزه ای از نانوفناوری است که از نقطه نظر زیست سازگاری، فرآیندی دوستدار محیط زیست در تولید ترکیبات شیمیایی است و در سال های اخیر بسیار محبوبیت یافته است. فناوری تولید نانوذرات با استفاده از ترکیبات طبیعی می تواند مشتمل بر واکنشگرهایی چون ویتامین ها، قندها، عصاره های گیاهی، پلیمرهای زیست تجزیه پذیر و میکروارگانیسم ها به عنوان عوامل

احیاگر، پوششی و تثبیت کننده، بدون بهره گیری از هیچ نوع افزودنی شیمیایی دیگر نظیر حلال ها و یا ترکیبات واکنشگر شیمیایی باشد که می تواند در علم نانوفناوری بسیار جذاب باشد. این رویکرد سنتزی سبز منجر به تولید شمار محدودی از نانوذرات غیرآلی (عمدتاً نانوذرات فلزی و اکسیدهای فلزی و نمک ها) شده است. مراجع متنوع زیستی مانند گیاهان، محصولات قارچ ها، مخمرها، گیاهان، جلبک ها، باکتری ها و ویروس ها در تولید زیستی نانوذرات فلزی به کار می روند (۲-۵). در این میان به نظر می رسد مواد گیاهی بهترین نامزد بوده و برای سنتز زیستی نانوذرات در سطوح کلان مناسب باشند. گیاهان به علت سازگاری با محیط و فراوانی می توانند به طور گسترده و وسیع مورد استفاده قرار گیرند بدون این که آسیب های زیست محیطی همراه داشته باشد. همچنین به علت گستردگی و عدم نیاز به شرایط و مواد غذایی خاص برای رشد، گیاهان گزینه ای مناسب برای تولید نانوذرات به روش زیستی محسوب می شوند (۱، ۲، ۶، ۷). پژوهش ها بیانگر آن است که گیاهان به عنوان مرجعی مناسب و غنی از ترکیبات ضد میکروبی، در برگیرنده مقادیر قابل توجهی از انواع ترکیبات فنولی از قبیل اسیدهای فنولیک، فلاونوئیدها، تانن ها و دی-ترپن های فنولی می باشند. تاکنون مطالعات زیادی در مورد سنتز نانوذرات با استفاده از بخش های مختلف گیاهی مانند برگ، ریشه، دانه و ساقه گیاهان انجام شده است (۱، ۲، ۶-۸). اخیراً، سنتز نانوذرات با استفاده از ترکیبات پلی فنولیک حاصل از عصاره های گیاهی مورد توجه محققان قرار گرفته است. گروه های فنلی و هیدروکسیل موجود در این ترکیبات، ویژگی های یک عامل پوششی خوب برای پایدار کردن سطوح فعال

شده است. همچنین اثر غلظت‌های مختلف عصاره در محلول اولیه سنتز بر خصوصیات محصولات بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

جمع آوری برگ درخت انبه و آماده سازی عصاره آبی

در این مطالعه به منظور تهیه عصاره آبی، از برگ‌های درخت انبه (*M. indica*) که از استان هرمزگان، شهر بندرعباس در فصل بهار ۱۴۰۳ تهیه شده بود استفاده گردید. برگ‌های جمع آوری شده با آب معمولی شسته شده و در دمای اتاق و در سایه به مدت یک هفته خشک گردید. سپس با استفاده از دستگاه آسیاب پودر شدند. برای تهیه عصاره آبی برگ درخت انبه، ابتدا ۱۰۰ گرم پودر برگ درخت انبه با ۷۰۰ میلی لیتر آب مقطر مخلوط و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای جوش روی هیتر نگه داشته شد و بعد از سرد شدن از کاغذ واتمن شماره ۱ عبور داده شد. عصاره آبی حاصل درون آون با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد خشک گردید و عصاره خشک تهیه شد. عصاره برای آزمایش‌های بعدی در دمای چهار درجه سانتی گراد در یخچال نگه داری شد (۲).

تولید زیستی نانوذرات Fe_3O_4

به منظور تولید نانوذرات Fe_3O_4 از روش Padhi و همکاران با اندکی اصلاحات استفاده شد (۹). در ابتدا محلول ۰/۱ مولار کلرید آهن فرو فروس با حل نمودن ۱/۰۶ گرم از $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ به همراه ۲/۲۲ گرم از $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ در ۲۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه با قرار گیری بر روی یک هم زن مغناطیسی تهیه شد. سپس احیای این محلول توسط ۳۰ میلی لیتر از عصاره آبی برگ درخت انبه و محلول سود یک مولار که به صورت قطره قطره تا رسیدن به pH ۱۱ اضافه می شد، صورت پذیرفت. برای بررسی اثر مقدار عصاره بر سنتز نانوذرات، مقدار عصاره در محلول متغیر بود و مقادیر مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. مقادیر عصاره برای سنتز نانوذره با توجه به آزمایش‌ها و مطالعات قبلی انتخاب شدند (۱، ۲، ۶، ۸). تشخیص و شناسایی صحت سنتز و شکل گیری نانوذرات مبتنی بر تغییر رنگ محلول از نارنجی متمایل به قهوه ایی به

نانوذرات آهن با روش یک مرحله ای، سریع و کاملاً سبز با استفاده از عصاره های گیاهی، به عنوان هم احیا کننده و هم پوشش دار کننده را بازی می کنند. یون های فلزی سریع توسط عصاره های گیاهی احیا شده و نانوذرات بلافاصله تحت شرایط محیطی تشکیل می شوند. از مزیت های دیگر این روش این است که نه مواد سمی برای احیا و پوشش دار کردن استفاده می شود و نه هیچ ضایعات سمی تولید می گردد. این روش سنتزی جدید یک رویکرد سبز بسیار ساده برای تولید مقادیر عمده نانوذرات نسبتاً پایدار با استفاده از عصاره گیاهی است (۱)، ۲، ۶-۸. در مطالعه ای که توسط Abdi و همکاران (۶) انجام گرفت، سنتز نانوذرات نقره با استفاده از عصاره برگ، ساقه و ریشه گیاه حرا *Avicennia marina* بررسی گردید و نتایج نشان داد که عصاره هر سه قسمت از این گیاه قادر به سنتز نانوذرات نقره هستند. با وجود این، عصاره برگ حرا *A. marina* بیشترین مقدار نانوذره را نسبت به ریشه و ساقه تولید کرد. سنتز زیستی فوتوکاتالیست پلاسمونیک $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{TiO}_2$ با فعالیت نوری بالا تحت نور خورشید و اندازه ذرات ~ 35 نانومتر با استفاده از عصاره آبی برگ درخت حرا به عنوان یک عامل کاهش دهنده و تثبیت کننده توسط Ghasemi و همکاران (۲) گزارش شد. در مطالعه حاضر برگ درخت انبه *Mangifera indica* که در سواحل خلیج فارس روییده شده برای تولید نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) استفاده شد. انبه یکی از میوه های گرمسیری بسیار رایج و مورد توجه در اکثر نقاط جهان است که به خصوص در کشورهای آسیای شمالی به وفور کشت می شود که این خود حاکی از دسترسی آسان به این گیاه می باشد. درخت انبه متعلق به جنس مانگیفرا از خانواده آناکاردیاسه می باشد. با توجه به در دسترس بودن این گونه درختی در استان هرمزگان و اهمیت سنتز نانوذرات پرکاربرد با استفاده از منابع زیستی برای توسعه روش های دوستدار محیط زیست و همچنین کاهش هزینه های مرتبط با روش های سنتز شیمیایی سنتی، در این تحقیق به تولید نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از عصاره برگ درخت انبه پرداخته

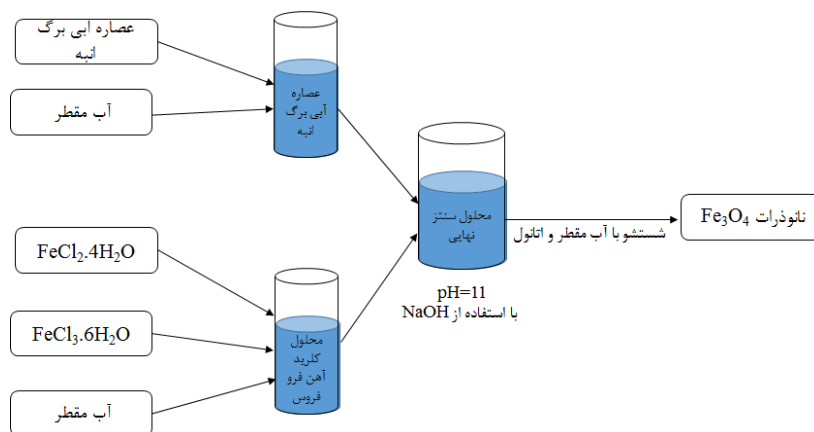
سمت رنگ سیاه و سوسپانسیونیزه شدن محلول و شکل گیری ذرات سیاه رنگ آهن و تمایل آنها به هم تجمعی وسیع و نشست آرام در کف ظرف با توجه به وزن مخصوص فلز آهن بود. این محلول به مدت ۱ ساعت بر روی همزن مغناطیسی قرار گرفت و در ادامه محلول در یک مکان به حالت سکون به مدت یک ساعت قرار داده شده تا فرآیند ترسیب صورت پذیرفته و محلول به دو فاز کاملاً مجزای رسوب آهن و فاز آبی رویی تفکیک گردد. سپس فاز مایع رویی دور ریخته شده و رسوب نانوذرات Fe_3O_4 چندین بار با آب مقطر شستشو

گردید. سپس رسوب آهن به وسیله اعمال میدان مغناطیسی خارجی جداسازی شد و سه بار نیز با اتانول شستشو داده شد. در نهایت این رسوب سیاه رنگ محتوی نانوذرات Fe_3O_4 پس از فرآیندهای متعدد خالص سازی در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد به مدت یک شبانه روز خشک گردید. شکل ۱ فلوچارت تولید زیستی نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از عصاره برگ درخت انبه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقدار عصاره در محلول اولیه سنتز

Table 1. The amount of extract in the initial synthesis solution

نمونه	مقدار عصاره (گرم)
Z1	۰/۰۶
Z2	۰/۱۲۵
Z3	۰/۵

شکل ۱- فلوچارت تولید زیستی نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از عصاره برگ درخت انبهFigure 2. Flowchart of biological production of Fe_3O_4 nanoparticles using mango tree leaf extract

بررسی خصوصیات

به منظور شناسایی، آنالیز، تعیین فاز و تعیین مشخصات کریستال نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از عصاره گیاهی از پراش اشعه ایکس (XRD^1) مدل Pert pro X' شرکت

panalytical با تابش Cu Ka به عنوان منبع اشعه X، جریان ۴۰ میلی آمپر، ولتاژ ۴۰ کیلو ولت استفاده شد. اندازه گام ۰/۰۲ درجه و محدوده روبش در بازه $2\theta = 10^\circ - 80^\circ$ انتخاب گردید. برای تعیین ساختار، مورفولوژی و بررسی توزیع نانوذرات و همچنین تعیین اندازه ذرات از میکروسکوپ

1- X-Ray Diffraction

(۴۴۰) که به ترتیب در زاویه 2θ برابر با $30/32$ ، $35/66$ ، $43/26$ ، $53/70$ ، $57/21$ و $62/84$ درجه قرار گرفته‌اند مربوط به فاز اسپینل مکعبی Fe_3O_4 می‌باشند و هیچ فاز ناخالصی از دیگر ترکیبات مشاهده نشد (۹).

همان طور که در شکل‌های a و b مشاهده می‌شود وقتی که مقدار عصاره برگ درخت انبه از $0/5$ گرم به $0/125$ و $0/06$ گرم کاهش می‌یابد، الگوهای XRD برای این نمونه‌ها به-خصوص نمونه با کمترین مقدار از عصاره درخت انبه، قله‌های پراش متمایز و مشخصی از خود نشان نمی‌دهند. این امر را می‌توان این‌گونه توصیف کرد که احتمالاً ماهیت این مواد آمورف است. اندازه بلورک‌های نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از رابطه دبای شرر (معادله ۱) به صورت زیر محاسبه شد.

$$D = k\lambda / \beta \cos\theta \quad (1)$$

که در آن D اندازه بلورک‌ها، β پهنای قله در نیمه شدت بیشینه ارتفاع بر حسب رادیان (FWHM)، θ زاویه براگ مربوط به قله ناشی از پراش، λ طول موج پرتو ایکس مربوط به $\text{KUK}\alpha$ ($0/154056 \text{ nm}$) و ضریب k یک مقدار ثابت است که برای ذرات کروی $0/9$ در نظر گرفته می‌شود. میانگین اندازه‌ی بلورک‌های نمونه Fe_3O_4 با $0/5$ گرم عصاره برگ درخت انبه برای قله ۳۱۱ با بالاترین شدت با استفاده از فرمول دبای شرر، $13/25$ نانومتر به دست آمد.

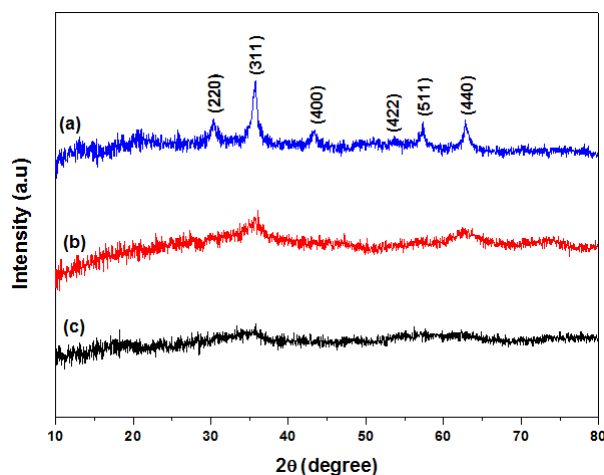
الکترونی روبشی (FE-SEM^1) مدل MIRA3 شرکت TE-SCAN و همچنین میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM^2) مدل KV Zeiss-EM10C-100 کشور آلمان استفاده شد. از طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR^3) در محدوده $450-4000 \text{ cm}^{-1}$ برای شناسایی نوع پیوندهای موجود در محصولات استفاده شد. هر نوع گروه پیوندی خاص، طول موج خاصی از موج IR را جذب می‌کند و تکنیک FT-IR با متمرکز کردن پرتو مادون قرمز روی دیسک نازکی از KBr که شامل مقدار اندکی از نمونه است انجام می‌شود. پیک‌های جذبی که به طول موج خاص تعلق دارند نشان دهنده پیوندهای حاضر در نمونه مورد نظر است. از تکنیک جذب و واجذب نیتروژن (ASAP 2020 ، ایالات متحده آمریکا) در دمای 77 کلوین برای تعیین خواص بافتی محصولات استفاده شد. به منظور ارزیابی توزیع اندازه منافذ، روش MP-plot اجرا شد. خواص مغناطیسی نانوذرات در دمای اتاق با استفاده از مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی (VSM^4) مدل LBKFB، شرکت مغناطیس دقیق کویر، ایران، اندازه‌گیری شد.

نتایج

بررسی نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از XRD

الگوهای پراش اشعه ایکس نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده با مقادیر وزنی مختلف از عصاره برگ درخت انبه در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشهود است، وجود قله‌های پراش برای نمونه سنتزی با مقدار $0/5$ گرم عصاره برگ درخت انبه بیانگر این مطلب است که فازهای بلوری در این نمونه شکل گرفته است. الگوهای XRD برای نانوذرات Fe_3O_4 با $0/5$ گرم عصاره برگ درخت انبه تشکیل ساختار اسپینل مکعبی را برای این نمونه تایید کردند. این الگوها منطبق با الگوی استاندارد Fe_3O_4 با شماره کارت مرجع ۹۸-۰۱۱-۱۲۸۴ می‌باشند. در شکل ۲a تمامی قله‌های مربوط به صفحات بازتاب (220 ، 311 ، 400 ، 422 ، 511 و

- 1- Field Emission Scanning Electron Microscopes
- 2- transmission Electron Microscopy
- 3- Fourier-transform infrared spectroscopy
- 4- vibrating-sample magnetometer



شکل ۲- الگوهای XRD نانوذرات Fe_3O_4 با غلظت‌های (a) ۰/۵، (b) ۰/۱۲۵ و (c) ۰/۰۶ گرم عصاره برگ درخت انبه

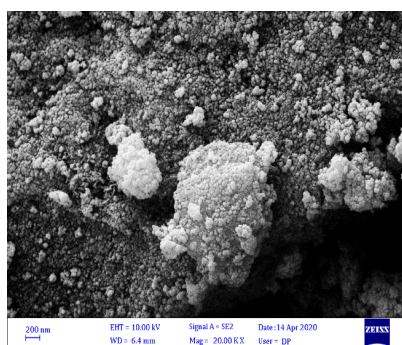
Figure 3. XRD patterns of Fe_3O_4 nanoparticles with concentrations of (a) 0.5, (b) 0.125 and (c) 0.06 g mango tree leaf extract

بوده و در برخی نقاط تجمع ذرات در کنار یکدیگر صورت گرفته و به صورت آگلومره می باشد.

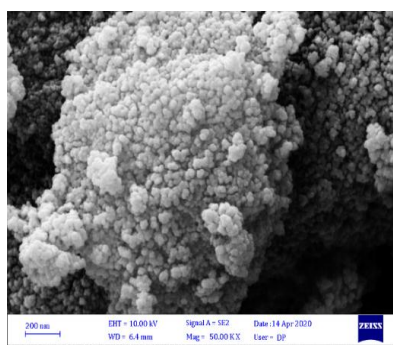
شکل ۳ (ج) تصاویر TEM نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده نمونه Z3 را نشان می‌دهد. تصویر TEM از Fe_2O_3 نیز ذرات نانومتری را در اندازه تقریبی ۲۰ نانومتر با اشکال یکنواخت نشان داد. تجزیه و تحلیل TEM همچنین محدوده باریک شکل و اندازه ذرات را نشان می دهد.

بررسی خصوصیات ریخت‌شناسی نانوذرات Fe_3O_4 بیوسنتزی

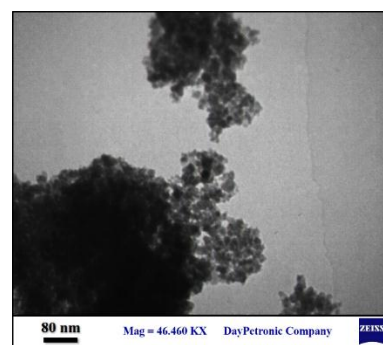
تصاویر SEM نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده نمونه Z3 در شکل ۳ (الف) و (ب) نمایش داده شده است. با توجه به تصاویر SEM نانوذرات دارای شکل کروی بودند و اندازه نانوذرات بین ۲۰ تا ۶۰ نانومتر است که در محدوده اندازه نانوذرات می باشند. در تصویر تهیه شده مورفولوژی ذرات به صورت کروی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳- (الف) و (ب) تصویر FE-SEM و (ج) تصویر TEM نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده

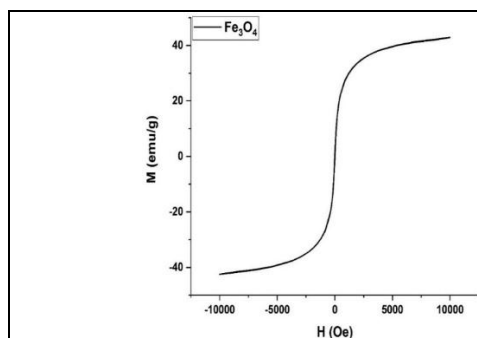
Figure 4. (a) and (b) FE-SEM image and (c) TEM image of synthesized Fe_3O_4 nanoparticles

بررسی خصوصیات مغناطیسی نانوذرات Fe_3O_4 بیوسنتزی

اشباع مغناطیسی Fe_3O_4 سنتزی $42/1 \text{ emu.g}^{-1}$ بود. با قرار دادن یک آهنربا در نزدیکی بشر حاوی نمونه Fe_3O_4 ، نانوذرات

شکل ۴ الف نشان‌دهنده حلقه هیستریزس نمونه Fe_3O_4 در دمای اتاق بوده که رفتاری کاملاً پارامغناطیس می باشد. مقدار

توان احیا محلول کلرید فرو/فروس را داشته و نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 را با موفقیت تولید نموده است. نشانه تشکیل Fe_3O_4 نیز، ظهور یک رسوب غلیظ سیاه رنگ در محلول سنتز در زمان واکنش بوده که قدرت مغناطیسی آن با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی در نزدیک ظرف پدیدار گردید (شکل ۴ ب).



(الف)



(ب)

شکل ۴- (الف) نمودار vsm مربوط به نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده توسط عصاره برگ درخت انبه و (ب) نانوذرات Fe_3O_4

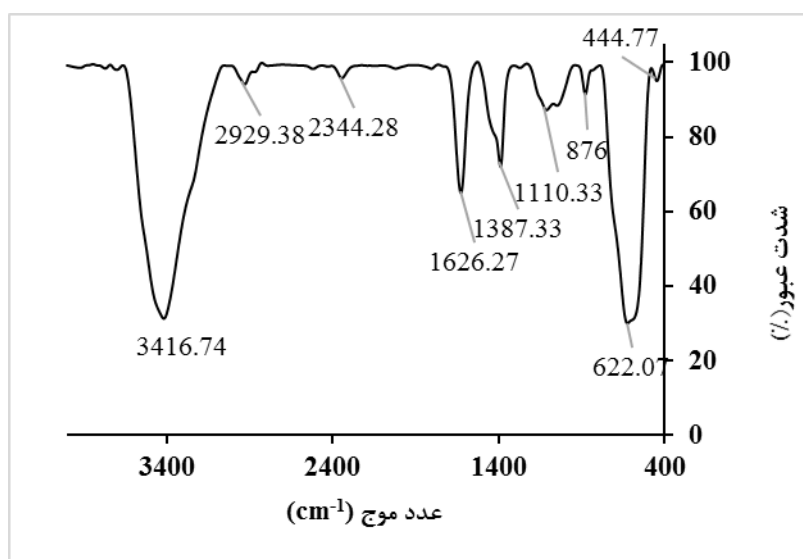
پس از جداسازی مغناطیسی با میدان مغناطیسی خارجی

Figure 5. (a) vsm diagram related to Fe_3O_4 nanoparticles synthesized by mango tree leaf extract and (b) Fe_3O_4 nanoparticles after magnetic separation with external magnetic field

فنول و باند 1387 cm^{-1} مربوط به گروه‌های OH موجود در ترکیبات فنولی می باشد (۲، ۱۰). باندهای جذب قوی در cm^{-1} 587 و 876 به ارتعاش گروه عاملی Fe-O نسبت داده می-شود. باند شناسایی شده در 444 cm^{-1} با ارتعاش کششی متقارن پیوند Fe-O-Fe در ساختار چهار وجهی FeO_4 مرتبط بود.

بررسی نانوذرات Fe_3O_4 بیوسنتزی به وسیله FTIR

طیف سنجی FTIR بر اساس جذب تابش و برای بررسی جهش‌های ارتعاشی مولکول‌ها و یون‌های چند اتمی صورت می گیرد. این روش به عنوان روشی معتبر و توسعه یافته برای تعیین ساختار و شناسایی گونه‌های شیمیایی است. شکل ۵ نشان‌دهنده طیف FTIR مربوط به نانوذرات Fe_3O_4 می باشد. جذبه‌های مشاهده شده در ناحیه 2929 ، 3416 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی گروه OH می باشند. باند 2344 ، مربوط به ارتعاشات کششی گروه C-C در حلقه آروماتیک پلی



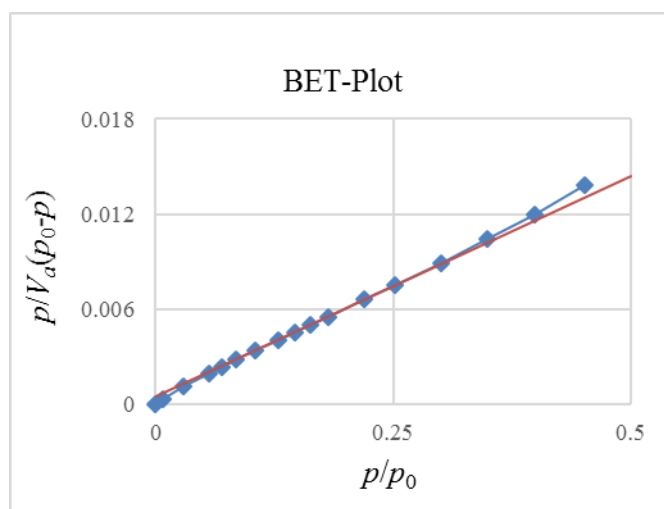
شکل ۵- نمودار آنالیز FTIR نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده

Figure 6. FTIR analysis diagram of synthesized Fe_3O_4 nanoparticles

نمونه نانوذرات Fe_3O_4 سنتزی را نشان می دهد. آنالیز جذب و واجذب نیتروژن، ماهیت مزوپور نانوذرات تولید شده را طبق طبقه بندی IUPAC نشان داد و این استنتاج با منحنی MP تایید شد. متوسط اندازه منافذ و مساحت سطح ویژه Fe_2O_3 به ترتیب $1/4$ نانومتر و $227/46 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ تعیین شد.

بررسی نانوذرات Fe_3O_4 بیوسنتزی با تکنیک جذب و واجذب نیتروژن

روش BET از متداول ترین روش های تعیین ویژگی های فضای متخلخل جامدات است که اطلاعات جامعی در مورد سطح و حجم ویژه نمونه، رفتار و منحنی جذب سطحی آن ها و اندازه متوسط حفرات به دست می دهد. شکل ۶ نمودار BET



شکل ۶- نمودار آنالیز BET نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده

Figure 7. BET analysis diagram of synthesized Fe_3O_4 nanoparticles

بحث و نتیجه گیری

امولسیون، روش های مایکروویو، فراصوت و رشد بخار- جامد است. با این حال، روش های فوق بسیار هزینه بر هستند و به

روش های شیمیایی متداول برای سنتز نانوذرات شامل تجزیه حرارتی، سل-ژل، هیدروترمال، رسوب همزمان، احتراق، میکرو

عصاره، به عنوان یک منبع طبیعی برای عوامل تثبیت کننده و کاهش دهنده عمل می کنند (۱۶).

آنالیز XRD نانوذرات Fe_3O_4

نتایج XRD ساختار کریستالی و تولید فاز خالص Fe_3O_4 را برای پودرهای مغناطیسی سیاه رنگ تولید شده تایید کرد. دامنه پیک مشاهده شده مربوط به اندازه ذرات کوچک ۵۶ است. الگوهای XRD نمونه های سنتزی در نمونه با مقدار ۰/۰۶ گرم عصاره برگ درخت انبه، با وجود ایجاد رسوب، قله های پراش متمایز و مشخصی از خود نشان ندادند که بیانگر فاز آمورف مواد تولیدی بود. نتایج XRD به وضوح نشان داد که عصاره برگ درخت انبه همچون یک عامل کاهش دهنده و پایدار کننده نقش مهمی در نانوذرات Fe_3O_4 ایفا می کند. ظهور قله های پراش فاز Fe_3O_4 با افزایش مقدار عصاره برگ درخت انبه مشخص تر شد و شدت آنها تا رسیدن به مقدار ۰/۵ گرم ادامه یافت. به دلیل این که با استفاده از مقدار عصاره ۰/۵ گرم، خصوصیات مناسبی از نانوذرات به وسیله تکنیک های مختلف XRD، SEM، TEM، VSM، FTIR و آنالیز جذب و واجذب نیتروژن به دست آمد، دیگر نیازی به استفاده از غلظت بالاتر از عصاره احساس نشد. افزایش غلظت عصاره می تواند منجر به افزایش هزینه ها شود و با توجه به این که نتایج به دست آمده رضایت بخش بودند، استفاده از غلظت های بالاتر توجیهی نداشت. نتایج به دست آمده با نتایج مطالعات قبلی همخوانی داشت. Ghasemi و همکاران (۲) بیان کردند که با افزایش مقدار عصاره برگ درخت حرا، قله های پراش نانوذرات نقره کلرید به تدریج مشخص تر شده و شدت آنها نیز با افزایش مقدار عصاره افزایش یافت. نتایج آنها نشان داد که عصاره برگ درخت حرا، به عنوان یک عامل کاهش دهنده و پایدار کننده، برای سنتز نانوذرات نقره کلرید ضروری است.

آنالیز خصوصیات ریخت شناسی نانوذرات Fe_3O_4

بیوسنتزی

تصاویر SEM نشان داد که نانوذرات Fe_3O_4 دارای ذرات منفرد و تقریباً کروی بوده و تجمع کوچکی از ذرات اولیه

مواد شیمیایی خطرناک، تجهیزات تخصصی و شرایط عملیاتی با مصرف انرژی بالا نیاز دارند. همچنین، محصولات جانبی مضر تولید شده توسط فرآیندهای شیمیایی، محیط زیست را آلوده می کند (۱۱، ۱۲). نانوتکنولوژی سبز روشی آسان و بی خطر برای محیط زیست است که از مواد شیمیایی خطرناک استفاده نمی کند یا آزاد نمی کند. سنتز سبز به دلیل ویژگی های متمایز آن، مانند استفاده از مواد بیولوژیکی یا گیاهی، هزینه کم، پروتکل های ساده، نانوذرات تقویت شده و پایدار، در حال حاضر محبوبیت پیدا کرده و به عنوان جایگزینی برای روش های شیمیایی فوق الذکر می تواند باشد. علاوه بر این، انواع فیتوکمیکال های موجود در عصاره های گیاهی در طول تولید نانوذرات به عنوان عوامل پوشاننده و کاهنده عمل می کنند. همانطور که با افزایش مقالات تحقیقاتی در سال های اخیر مشاهده می شود، سنتز سبز نانوذرات با واسطه گیاهی رو به افزایش است (۱۱) و با استفاده از این رویکرد دوستدار محیط زیست، انواع متعددی از نانوذرات از جمله نقره (۶، ۸، ۱۳)، طلا (۱۳)، دی اکسید منگنز (۱۴) و اکسید روی (۱۵) تولید شده است.

نانوذرات اکسید آهن کاربرد گسترده ای در صنایع مختلف و پزشکی دارد. روش معمول تولید نانوذرات اکسید آهن فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی هستند که در آنها از حلال های سمی استفاده می شود و محصولات جانبی خطرناکی هم برای محیط زیست و هم برای سلامت انسان تولید می شود (۱۲). سنتز سبز روشی از پایین به بالا است که هزینه و آلودگی شیمیایی کمتری دارد (۲). در این تحقیق عصاره آبی برگ درخت انبه به عنوان کاهنده و تثبیت کننده گیاهی برای ساخت و تولید سبز، ساده، غیر سمی و دوست دار محیط زیست نانوذرات Fe_3O_4 مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه مشخص شد که گیاه برگ درخت انبه قدرت سنتز نانوذرات Fe_3O_4 را دارد. هنگامی که عصاره گیاهی با یون های آهن در محلول سنتز اولیه برای تولید نانوذرات Fe_3O_4 ترکیب می شوند، عصاره های گیاهی، به ویژه پلی فنل های موجود در

هستند. محدوده قطر ذرات (۲۰-۶۰ نانومتر) توزیع اندازه متوسطی را نشان داد که در محدوده اندازه نانوذرات می باشند. تصاویر TEM نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده نیز ذرات نانومتری منفرد را در اندازه تقریبی ۲۰ نانومتر با اشکال یکنواخت و توزیع اندازه ذرات متوسط نشان داد. این اعداد با پیش‌بینی‌های اندازه کریستالی که با استفاده از نتایج XRD و رابطه شرر انجام شده است، مطابقت داشت.

آنالیز خصوصیات مغناطیسی نانوذرات Fe_3O_4

بیوسنتزی

مقدار اشباع مغناطیسی Fe_3O_4 سنتزی 42.1 emu.g^{-1} بود و با ایجاد یک میدان مغناطیسی خارجی در کنار بشر حاوی نمونه Fe_3O_4 ، نانوذرات به سرعت و در کمتر از ۳ ثانیه در حاشیه کناری بشر تجمع یافتند. زیست ساخت نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از عصاره این گونه برگ درخت انبه سبز در مقایسه با نمونه شیمیوسنتز شده تجاری مگنتیت که کاملاً سیاه رنگ است یک اختلاف رنگ اندکی در طیف قهوه ای بسیار تیره متمایل به سیاه رنگ را نشان داد. بنابر پژوهش‌های انجام شده تخمین احتمالی این است که این تفاوت رنگ مشاهده شده در سنتز با استفاده از عصاره برگ درخت انبه نانوذرات Fe_3O_4 می‌تواند برآمده از برانگیختگی و تشدید رزونانس پلاسمون سطحی (SPR^1) در نانوذرات فلزی بوده که متاثر از وضعیت نوسان آزاد الکترون ها تحت القای جاذبه میدان الکترومغناطیسی است. از این رو واکنش احیایی بسته به نوع عصاره برگ درخت انبه منجر به تغییر رنگی متناسب با رزونانس پلاسمونی نسبت به نمک آهن می گردد (۱۷).

آنالیز FTIR نانوذرات Fe_3O_4 بیوسنتزی

آنالیز FTIR جهت بررسی و شناسایی گروه های عاملی و پیوندهای شیمیایی است که باعث تغییر انرژی ارتعاشی پیوندها در مولکول ها ماده می شود و با به کارگیری این آزمون می‌توان وجود یا فقدان و یا تغییر میزان یک پیوند را در ماده مورد بررسی مشخص نمود. این روش بیشتر در شناسایی ترکیبات

آلی به کار می رود. در برخی از سیستم های نانو کاتالیستی گروه های عاملی مشخصی وجود دارد که می توان به کمک این روش شناسایی کرد (۱). نتایج FTIR نمونه کاتالیست در این تحقیق نشان از ارتعاشات کششی گروه OH و گروه های C-C را داده است که به ترتیب مربوط به گروه‌های OH موجود در ترکیبات فنولی و پیوند C-C در حلقه آروماتیک پلی فنول است (۲، ۱۰). همچنین باندهای جذبی مربوط به ارتعاش گروه عاملی Fe-O و باند مربوط به ارتعاش کششی متقارن پیوند Fe-O-Fe در ساختار چهار وجهی FeO_4 نیز در نمونه نانوذرات سنتزی مشاهده شد. نتایج به دست آمده با مطالعات Ghasemi و همکاران (۱۸) مطابقت داشت و آنها هم ارتعاشات کششی پیوندهای Fe-O و O-Fe-O را در ناحیه پایین‌تر از 810 cm^{-1} مشاهده نمودند (۲، ۱۰). بنابراین، تجزیه و تحلیل FT-IR با نشان دادن ایجاد پیوندهایی مانند Fe-O و O-Fe-O در محصول نهایی نتایج آنالیزهای قبلی مبنی بر سنتز موفقیت‌آمیز زیستی نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از عصاره برگ درخت انبه را تایید کرد.

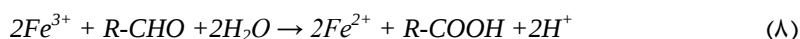
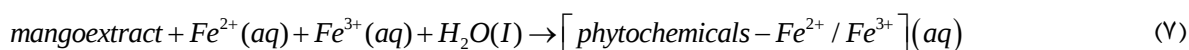
مکانیسم بیوسنتز نانوذرات Fe_3O_4 مغناطیسی

به صورت کلی می توان فرمولاسیون واکنش های احتمالی تشکیل نانوذرات Fe_3O_4 را به صورت معادله‌های ۲ تا ۶ بیان کرد. در روش هم‌رسوبی متغیرهای مختلفی در بیوسنتز ذرات آهن همچون pH اولیه محلول، دمای واکنش و نسبت مولی Fe^{2+}/Fe^{3+} بر روی اندازه ذرات اثرگذار هستند (۱۹، ۲۰).

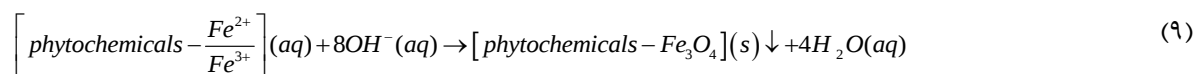


مطابق پژوهش های انجام شده برگ خشک گیاهان ظرفیت آنتی اکسیدانی بالاتری نسبت به برگ های غیرخشک دارند. با توجه به نتایج حاصل از سنجش ظرفیت آنتی اکسیدانی گیاهان دارای پتانسیل بالا جهت احیا و الکتروندهی به یون آهن می- باشند در نهایت احیای جزئی یون های آهن Fe^{3+}/Fe^{2+} توسط عصاره برگ درخت انبه به دلیل آنتی اکسیدان بالا رخ می دهد (۱۹).

در چنین شرایطی که پلی ساکاریدهای سولفات و کربوهیدرات های موجود در عصاره برگ درخت انبه دارای گروه های عاملی سولفات، هیدروکسیل و آلدهید هستند عصاره برگ انبه به عنوان عوامل احیاگر عمل نموده و واکنش احیایی فرضی آن به صورت معادله ۷ و ۸ است (۲، ۱۹، ۲۰).



اکسیده شدن گروه های عاملی آلدهیدی به اسید منجر به تشکیل نانوذرات پودری Fe_3O_4 می گردد (معادله ۹).



کاهش انرژی سطحی ذرات است. این پدیده تا کمی ناشی از افزایش نسبت سطح به حجم در نانوذرات Fe_3O_4 بوده و نیز دیگر پدیده هایی که به کاهش بار سطحی ذره منتهی شده اند (۱۹، ۲۰).

به طور کلی در این مطالعه امکان سنتز نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از عصاره برگ درخت انبه به عنوان یک عامل کاهش دهنده و تثبیت کننده مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه در چندین مرحله از جمله استخراج عصاره آبی، سنتز نانوذرات

در این ایده به کار رفته برای تولید زیستی در تحقیق حاضر، مکانیسم احتمالی شکل گیری Fe_3O_4 را مشتمل بر دو مرحله مجزا می توان بیان نمود. در مرحله نخست، واکنش افزودن محلول کلرید فروفروس به عصاره برگ درخت انبه بر روی یک هم زن مغناطیسی با دور ملایم است که منجر به هیدرولیز شدن یون های آهن (III) و (II) شده که بواسطه عملکرد شل و سست گروه های کربوکسیلیک ($C=O$) عصاره که به دام می افتند و حاصل آن ایجاد یک اتصال بین یون های آهن Fe^{3+}/Fe^{2+} و COO^- بفرم هیدروکسید فروفروس و آزاد سازی یون های H^+ با فراهم کردن شرایط $pH < 8$ موجود در محیط واکنش اتفاق می افتد و بنابراین با گرمادهی واکنش یون های OH^- نیز از $NaOH$ به درون واکنش رها شده است.

در مرحله بعدی این واکنش نیز همانند یک ترسیب شیمیایی است که یون های آهن Fe^{3+}/Fe^{2+} توسط هیدرواکسید سدیم به عنوان عامل قلیایی کننده محیط می شود که به واسطه

به واسطه عمل سست گروه های کربوکسیلی و تشکیل پیوند $COO^- \dots Fe^{3+}$ و $COO^- \dots Fe^{2+}$ زنجیره ای از ترکیبات فیتوشیمیایی برگ درخت انبه می توانند به صورت پوشش سطحی بر سطح ساختار کریستاله نانوذرات Fe_3O_4 نشست نموده و منجر به تثبیت آن گردند. به علاوه شکل گیری رسوب سیاه رنگ Fe_3O_4 در این واکنش عمدتاً مبتنی بر گرایش بالای نانوذرات Fe_3O_4 به یک هم تجمعی گسترده و تشکیل توده های انباشته و غلیظ نانوذرات Fe_3O_4 به منظور

3. Saravanakumar K, Chelliah R, Shanmugam S, Varukattu NB, Oh D-H, Kathiresan K, et al. Green synthesis and characterization of biologically active nanosilver from seed extract of *Gardenia jasminoides* Ellis. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2018;185:126-35.
4. Subhapiya S, Gomathipriya P. Green synthesis of titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles by *Trigonella foenum-graecum* extract and its antimicrobial properties. *Microbial Pathogenesis*. 2018;116:215-20.
5. Taghavi Fardood S, Ebadzadeh B, Ramazani A. Green Synthesis and Characterization of Ni-Cu-Mg Ferrite Nanoparticles in the Presence of *Tragacanth* Gum and Study of Their Catalytic Activity in the Synthesis of Hexanitrohexaazaisowurtzitane. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*. 2019;38(6):21-9.
6. Abdi V, Sourinejad I, Yousefzadi M, Ghasemi Z. Mangrove-mediated synthesis of silver nanoparticles using native *Avicennia marina* plant extract from southern Iran. *Chemical Engineering Communications*. 2018;205(8):1069-76.
7. Shahin Lefteh M, Sourinejad I, Ghasemi Z. *Avicennia marina* mediated synthesis of TiO₂ nanoparticles: its antibacterial potential against some aquatic pathogens. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*. 2021;51(12):1775-85.
8. Abdi V, Sourinejad I, Yousefzadi M, Ghasemi Z. JIJoS, Technology TAS. Biosynthesis of Silver Nanoparticles from the Mangrove *Rhizophora mucronata*: Its Characterization and Antibacterial Potential. 2019;43:2163 - 71.
9. Padhi DK, Panigrahi TK, Parida K, Singh SK, Mishra PM. Green Synthesis of

Fe₃O₄. شناسایی نانوذرات، بهینه سازی و بررسی اثر مقدار عصاره در محلول اولیه سنتز بر تولید نانوذرات Fe₃O₄ انجام شد. روشی زیستی و دوستدار محیط زیست برای تهیه عصاره و سنتز نانوذرات Fe₃O₄ ارائه شد که به لحاظ مصرف کمتر مواد شیمیایی مورد نیاز در این فرآیند، دارای اهمیت است. مشخصات نانوذرات Fe₃O₄ سنتز شده با استفاده از تکنیک‌های مختلف از جمله XRD, SEM, TEM, VSM, FTIR و روش جذب و واجذب نیتروژن بررسی شد. نتایج نشان داد که روش سنتز نانوذرات Fe₃O₄ با استفاده از عصاره آبی برگ درخت انبه یک رویکرد شیمی سبز را ارائه می‌دهد که مقرون به صرفه، زیست سازگار و سازگار با محیط زیست است و به طور موفقیت آمیزی نانوذراتی کروی شکل با قطر حدود ۲۰ نانومتر، مقدار اشباع مغناطیسی ۴۲/۱ emu.g⁻¹ و مساحت سطح ویژه ۲۲۷/۴۶ m².g⁻¹ تولید نمود. این مطالعه با ارائه یک روش پایدار و سازگار با محیط زیست برای سنتز نانوذرات Fe₃O₄ با استفاده از عصاره برگ درخت انبه کمک ارزشمندی به حوزه نانوتکنولوژی ارائه کرده است.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی و دانشگاه هرمزگان انجام شد. نویسندگان این مقاله از واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی و دانشگاه هرمزگان برای فراهم کردن امکانات برای انجام آزمایش ها در آزمایشگاه تشکر می کنند.

References

1. Ghasemi Z, Abdi V, Sourinejad I. Single-step biosynthesis of Ag/AgCl@TiO₂ plasmonic nanocomposite with enhanced visible light photoactivity through aqueous leaf extract of a mangrove tree. *Applied Nanoscience*. 2019.
2. Ghasemi Z, Abdi V, Sourinejad I. Green fabrication of Ag/AgCl@TiO₂ superior plasmonic nanocomposite: Biosynthesis, characterization and photocatalytic activity under sunlight. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;841:155593.

16. Tan HL, Lim YC, Ng LY, Lim YP. Plant-mediated synthesis of iron nanoparticles for environmental application: Mini review. *Materials Today: Proceedings*. 2023;87:64-9.
17. Fatimah I, Yanti I, Wijayanti HK, Ramanda GD, Sagadevan S, Tamyiz M, et al. One-pot synthesis of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{NiFe}_2\text{O}_4$ nanocomposite from iron rust waste as reusable catalyst for methyl violet oxidation. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023;8:100369.
18. Ghasemi Z, Younesi H, Zinatizadeh AA. Preparation, characterization and photocatalytic application of $\text{TiO}_2/\text{Fe-ZSM-5}$ nanocomposite for the treatment of petroleum refinery wastewater: Optimization of process parameters by response surface methodology. *Chemosphere*. 2016;159:552-64.
19. Torkaman P, Karimzadeh R, Jafari A. Synthesis of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-Mn}_2\text{O}_3$ and Fe_3O_4 -graphene oxide hybrid nanocatalyst and their effects on the electromagnetic properties and their performance on heavy hydrocarbons upgrading. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2024;179:106467.
20. Karami N, Mohammadpour A, Samaei MR, Amani AM, Dehghani M, Varma RS, et al. Green synthesis of sustainable magnetic nanoparticles Fe_3O_4 and Fe_3O_4 -chitosan derived from *Prosopis farcta* biomass extract and their performance in the sorption of lead(II). *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;254:127663.
- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{RGO}$ Nanocomposite with Enhanced Photocatalytic Performance for Cr(VI) Reduction, Phenol Degradation, and Antibacterial Activity. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2017;5(11):10551-62.
10. Demirci S, Dikici T, Yurddaskal M, Gultekin S, Toparli M, Celik E. Synthesis and characterization of Ag doped TiO_2 heterojunction films and their photocatalytic performances. *Applied Surface Science*. 2016;390:591-601.
11. Vinayagam R, Varadavenkatesan T, Selvaraj RJJoCS. Evaluation of the Anticoagulant and Catalytic Activities of the *Bridelia retusa* Fruit Extract-Functionalized Silver Nanoparticles. 2017;28:2919-32.
12. Rezanian S, Park J, Md Din MF, Mat Taib S, Talaiekhosani A, Kumar Yadav K, et al. Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: A review of recent studies. *Marine Pollution Bulletin*. 2018;133:191-208.
13. Dubey SP, Lahtinen M, Sillanpää M. Green synthesis and characterizations of silver and gold nanoparticles using leaf extract of *Rosa rugosa*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010;364(1):34-41.
14. Souri M, Hoseinpour V, Ghaemi N, Shakeri A. Procedure optimization for green synthesis of manganese dioxide nanoparticles by *Yucca gloriosa* leaf extract. *International Nano Letters*. 2019;9(1):73-81.
15. Pai S, H S, Varadavenkatesan T, Vinayagam R, Selvaraj R. Photocatalytic zinc oxide nanoparticles synthesis using *Peltophorum pterocarpum* leaf extract and their characterization. *Optik*. 2019;185:248-55.