

Research Paper

A new method for the green synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles using Alliaceae plant extract and investigating their properties

Ali Mohammad Amani¹, Kazem Jamali², Ali Jalngjo³, Ehsan Vafa⁴, Milad Abbasi⁵, Sareh Mosleh

-Shirazi^{6*}, Seyed Reza Kasae⁷, Ahmad Vaez⁸

1- Associate Professor, Department of Nanomedicine, School of Advanced Medical Sciences and Technologies, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran

2- Assistant Professor, Shahid Rajaei Trauma Research Center (Emtiaz) Shiraz, Shiraz University of Medical Sciences

3- Assistant Professor, Department of Emergency, School of Medicine, Namazi Teaching Hospital, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran

4- Postdoctoral student, Department of Nanomedicine, School of Advanced Medical Sciences and Technologies, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran

5- Master's student, Department of Nanomedicine, School of Advanced Medical Sciences and Technologies, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran

6- Assistant Professor, Department of Materials Science and Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

7- Assistant Professor, Shiraz Endocrine and Metabolism Research Center, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran

8- Assistant Professor, Department of Tissue Engineering, School of Advanced Medical Sciences and Technologies, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran

Received: 2024/02/27

Revised: 2024/03/22

Accepted: 2024/04/03

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2024.33129.2035](https://doi.org/10.30495/jnm.2024.33129.2035)

Keywords:

Magnetite nanoparticles, Allium hooshidaryae, Green Synthesis.

Abstract

Introduction: In recent years, iron oxide-based magnetic nanoparticles have been widely used for a variety of environmental and medical applications, including the purification and separation of pharmaceutical, dye, and heavy metal contaminants, as well as drug delivery and labeling systems. Due to the fact that magnetite (Fe₃O₄) has superior magnetic and electrical properties, iron oxide has attracted the most interest among many nanostructured materials.

Methods: In this research, magnetite nanoparticles (Fe₃O₄) were successfully synthesized using a green process. This method is simple, fast, cost-effective, and biocompatible. Allium hooshidaryae (Alliaceae) plant extract was used as a stabilizing and reducing agent in this process. Green synthesized nanoparticles were characterized by several structural and physical techniques, like Vibrating Sample Magnetometer (VSM), X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared (FTIR), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), Transmission Electron Microscope (TEM) and scanning electron microscope (SEM).

Findings: XRD results showed that the synthesized nanoparticles are FCC structure with high purity. FTIR results proved the binding of functional group present in this plant and Fe₃O₄ nanoparticles. Also, in FTIR analysis, the presence of two absorption peaks of 559.96 cm⁻¹ and 432.57 cm⁻¹ confirmed the successful green synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles. SEM and TEM images showed that the green synthesized Fe₃O₄ nanoparticles are mostly spherical and have an average size of 35.73 nm. As a result, the synthesized nanoparticles have the potential to have useful benefits in future nanomedicine.

Citation: Ali Mohammad Amani, Kazem Jamali, Ali Jalngjo, Ehsan Vafa, Milad Abbasi, Sareh Mosleh Shirazi, Seyed Reza Kasae, Ahmad Vaez, A new method for the green synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles using Alliaceae plant extract and investigating their properties, Quarterly Journal of New Materials. 2023; 14 (53): 35-52.

*Corresponding author: Sareh Mosleh-Shirazi

Address: Department of Materials Science and Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Tell: +989173088976

Email: mosleh@sutech.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

In recent years, iron oxide-based magnetic nanoparticles have been widely used for a variety of environmental and medical applications, including the purification and separation of pharmaceutical, dye, and heavy metal contaminants, as well as drug delivery and labeling systems. Due to the fact that magnetite (Fe₃O₄) has superior magnetic and electrical properties, iron oxide has attracted the most interest among many nanostructured materials. Most of the research on the synthesis of iron oxide nanoparticles has focused on methods that use clinical laboratory chemicals as reducing agents. These compounds are often dangerous for human health, very expensive, and harmful to the environment. A number of researchers have proposed green biosynthesis of nanoparticles as an alternative method that is also safe for the environment.

The aim of this research is to investigate the effectiveness of a simple, cost-effective, and environmentally friendly method for the green synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles using Alliaceae plant extract. This extract has the potential to act as a stabilizing agent in green chemistry for the synthesis of nanoparticles without the use of harmful chemicals. Furthermore, the structure, physical, and magnetic properties of green synthesized Fe₃O₄ nanoparticles were evaluated that these nanoparticles can be suitable for use in future nanomedicine.

Findings and Discussion

Green synthesized nanoparticles were characterized by several structural and physical techniques, like Vibrating Sample Magnetometer (VSM), X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared (FTIR), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), Transmission Electron Microscope (TEM) and scanning electron microscope (SEM).

The chemical components present in the extract of *Allium hooshidaryae* act as a reducing agent as well as a stabilizing agent and interact with a mixed solution containing Fe³⁺ and Fe²⁺ ions using an easy co-precipitation process to form Fe₃O₄ nanoparticles. The color of the reaction solution of iron chloride salts and the extract of *Allium hooshidaryae* changed from light brown to black after the addition of 2 M NaOH which indicated the formation of Fe₃O₄ nanoparticles. The green synthesized Fe₃O₄ nanoparticles could be immediately attracted by an external magnet, which is evidence for the magnetic properties of the nanoparticles.

The XRD patterns of synthesized Fe₃O₄ nanoparticles at 2θ equal to 30°, 35.63°, 43.5°, 57.1°, 63.0° and 73.5° were detected, which correspond to crystal planes of (220), (311), (400), (511), (440), and (533), respectively, reflecting the face-centered cubic (FCC) structure of Fe₃O₄ nanoparticles.

SEM and TEM images showed that the green synthesized Fe₃O₄ nanoparticles are mostly spherical and have an average size of 35.73 nm. Because the Alliaceae compounds act effectively as coating and stabilizing agent, which lead to the synthesis of anisotropic nanostructures with a low degree of aggregation that is a significant advantage of the green synthesis method compared to the chemical production method.

FTIR results proved the binding of functional group present in this plant and Fe₃O₄ nanoparticles. Also, in FTIR analysis, the presence of two absorption peaks of 559.96 cm⁻¹ and 432.57 cm⁻¹ confirmed the successful green synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles.

VSM results revealed that the green synthesized Fe₃O₄ nanoparticles have supermagnetic properties with 58 emu/g magnetic saturation. The magnetic properties of Fe₃O₄ nanoparticles are not reduced by plant biomolecules, but the biomolecules protect nanoparticles from intraparticle interaction and make the magnetic properties more stable against the environment.

Conclusion

In the present research, Fe₃O₄ nanoparticles were effectively synthesized using a simple, cost-effective, and biocompatible method. The extract of *Allium hooshidaryae* was used as a reducing or stabilizing agent, and no harmful chemicals were used for the synthesis. Fe₃O₄ nanoparticles have an FCC structure with spherical shape, and the functional groups found in the extract of *Allium hooshidaryae* are placed on the surface of the Fe₃O₄ nanoparticles. The Fe₃O₄ nanoparticles possess supermagnetic properties, which predicts that green synthesized Fe₃O₄ nanoparticles are ideal for use in various applications, especially in biomedical applications.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Conducting experiments and initial writing: Milad Abbasi

Results and Data analysis: Ehsan Vafa, Seyed Reza Kasaei

Final writing: Kazem Jamali, Ali Jangjo, Sareh Mosleh-Shirazi, Ahmad Vaez

Supervision: Ali Mohammad Amani, Sareh Mosleh-Shirazi

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

یک روش نوین برای سنتز سبز نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از عصاره گیاه آلیاسه و بررسی خواص آن‌ها

علی محمد امانی^۱، کاظم جمالی^۲، علی جنگجو^۳، احسان وفا^۴، میلاد عباسی^۵، ساره مصلح شیرازی^{۶*}، سید رضا کسائی^۷، احمد واعظ^۸

۱- دانشیار، گروه نانوپزشکی، دانشکده علوم و فناوری نوین پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

۲- استادیار، مرکز تحقیقات ترومای شهید رجایی (امتیاز) شیراز، دانشگاه علوم پزشکی شیراز

۳- استادیار، گروه اورژانس، دانشکده پزشکی، بیمارستان آموزشی نمازی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

۴- دانشجوی پسادکتری، گروه نانوپزشکی، دانشکده علوم و فناوری نوین پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

۵- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه نانوپزشکی، دانشکده علوم و فناوری نوین پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

۶- استادیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۷- استادیار، مرکز تحقیقات غدد و متابولیسم شیراز، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

۸- استادیار، گروه مهندسی بافت، دانشکده علوم و فناوری نوین پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۸

تاریخ داوری: ۱۴۰۳/۰۱/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵

مقدمه: در سال‌های اخیر، نانوذرات مغناطیسی مبتنی بر اکسید آهن برای انواع کاربردهای زیست‌محیطی و پزشکی، از جمله خالص‌سازی و جداسازی آلودگی‌های دارویی، رنگی و فلزات سنگین و همچنین سیستم‌های تحویل دارو و برچسب‌گذاری، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به این که مگنتیت (Fe_3O_4) دارای ویژگی‌های مغناطیسی و الکتریکی برتری است، در میان بسیاری از مواد نانوساختار اکسید آهن بیشترین علاقه را به خود جلب کرده است.

روش: در این پژوهش، نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) با استفاده از یک فرآیند سبز با موفقیت سنتز شد. این روش، روشی ساده، سریع، مقرون به صرفه و زیست‌سازگار است. عصاره گیاه آلیوم هوشیدریا (آلیاسه) به عنوان یک عامل تثبیت کننده و کاهنده در این فرآیند استفاده شد. برای مشخصه‌یابی و بررسی خواص مورفولوژی نانوذرات Fe_3O_4 از روش‌هایی همچون مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی (VSM)، پراش پرتو ایکس (XRD)، تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)، طیف‌سنجی پرتو ایکس پراکنده انرژی (EDS)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج آزمون XRD نشان داد که نانوذرات سنتز شده با خلوص بالا و ساختار FCC است. نتایج FTIR اتصال گروه عاملی موجود در این گیاه و نانوذرات Fe_3O_4 را اثبات کرد. همچنین، در آنالیز FTIR، وجود دو پیک جذبی $559/96\text{ cm}^{-1}$ و $432/57\text{ cm}^{-1}$ سنتز موفقیت-آمیز نانوذرات Fe_3O_4 را تایید کرد. تصاویر SEM و TEM نشان داد که نانوذرات Fe_3O_4 تولید شده عمدتاً به شکل کروی بوده و به‌طور متوسط دارای اندازه $35/73$ نانومتر است.

نتیجه‌گیری: بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نانوذرات سنتز شده می‌توانند برای استفاده در نانوپزشکی آینده مناسب باشند.

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2024.33129.2035](https://doi.org/10.30495/jnm.2024.33129.2035)

واژه‌های کلیدی:

نانوذرات مگنتیت، آلیوم هوشیدریا، سنتز سبز.

* نویسنده مسئول: ساره مصلح شیرازی

نشانی: دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران.

تلفن: ۰۹۱۷۳۰۸۸۹۷۶

پست الکترونیکی: mosleh@sutech.ac.ir

مقدمه

نانومواد به‌عنوان ذرات کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر در حداقل یک بعد در نظر گرفته می‌شوند [۱، ۲]. نانومواد در مقایسه با موادی با ماهیت مشابه به‌صورت توده‌ای هستند، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی استثنائی و مطلوبی را نشان می‌دهند [۳]. این ویژگی‌ها شامل یک سطح ویژه بالا و همچنین عملکرد قابل توجه در زمینه‌های فعالیت حرارتی، الکتریکی، نانو کاتالیست، مغناطیسی، نوری و مکانیکی می‌شود [۴-۸]. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فردی که نانوذرات دارند، آن‌ها کاربرد گسترده‌ای در انواع رشته‌های علمی، از جمله محیط‌زیست [۹، ۱۰] پزشکی [۱۰-۱۲]، الکترونیک [۱۳] و بسیاری حوزه‌های دیگر دارند. نانوذرات (NPs) کاربردهای علمی متنوعی دارند و این کاربردها به‌شدت به ویژگی‌هایی مانند قطر، تخلخل سطح، مورفولوژی، بار سطحی، توپولوژی و آرایش ساختاری آن‌ها وابسته می‌باشد [۱۴-۱۸]. گروه‌های عملکردی مختلف می‌توانند اندازه، ساختار و سطح نانوذرات را تغییر دهند تا تغییرات مورد نظر را در ویژگی‌های آن‌ها ایجاد کنند [۱۸، ۱۹]. بسیاری از فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی مختلف وجود دارد که ممکن است برای سنتز موفقیت‌آمیز نانوذرات مورد استفاده قرار گیرد [۲۰-۲۵]. استفاده از هر یک از این رویکردها می‌تواند منجر به تشکیل یک مشخصه خاص در ذرات شود، که سپس می‌تواند عملکرد آن‌ها را برای یک کاربرد خاص بهبود بخشد [۲۶-۳۱]. در مقایسه با روش‌های فیزیکی، ساخت نانوذرات از طریق روش‌های شیمیایی به‌روش ترجیحی در دهه‌های اخیر تبدیل شده‌است [۳۲-۳۴]. با این حال، روش‌های شیمیایی معمولاً پرهزینه هستند و نیاز به انرژی زیادی و گاهی اوقات محصولات شیمیایی سمی و مضر دارند، که بقایای آن‌ها باعث ایجاد خطر آشکار برای محیط‌زیست می‌شود. علاوه بر این، استفاده از این فناوری‌ها در ایجاد نانوذرات ممکن است منجر به تولید تعدادی ضایعات یا محصولات جانبی مضر شود که کاربرد نانوذرات در زیست‌پزشکی را محدود می‌کند.

محققان روش‌های سنتز سبز را برای نانوذرات، به‌ویژه با توجه به نانوذرات فلزی و همچنین اکسیدهای آن‌ها معرفی کرده‌اند که به آن‌ها اجازه می‌دهد تا تعدادی از معایب و چالش‌هایی را که قبلاً با روش‌های مورد استفاده برای ایجاد نانوذرات، به‌ویژه روش‌های شیمیایی مرتبط بود، برطرف کنند [۳۵-۳۷]. از آنجایی که روش‌های سنتز سبز از ارگانیک‌های طبیعی (جلبک‌ها، ویروس‌ها، باکتری‌ها و غیره) یا عصاره گیاهان به‌عنوان عوامل کاهش دهنده و تثبیت کننده جایگزین مواد شیمیایی مضر و خطرناک استفاده می‌کنند، این رویکردها از نظر زیست محیطی بی‌خطر و مقرون به صرفه هستند. علاوه بر این، آنها به زمان و تلاش بسیار کمی نیاز دارند [۳۸-۴۲]. با وجود این، استفاده از عوامل مشتق شده از گیاه در تولید نانوذرات نسبت به استفاده از عوامل بیولوژیکی جایگزین، مؤثرتر در نظر گرفته شده‌است. این مزیت ناشی از ظرفیت ترکیبات مشتق شده از گیاه برای دست‌کاری قطر و ساختار نانوذرات و همچنین توانایی عوامل گیاهی برای تولید ریزذرات در حجم‌های انبوه است [۴۳].

ساخت نانوذرات از طریق استفاده از عصاره‌های گیاهی شامل یک روش خارج سلولی است که در آن از عصاره‌های گیاهی به‌صورت مستقیم برای ساخت نانوذرات استفاده می‌شود. در خصوص مبحث بیوسنتز

نانوساختارهای فلزی از طریق عصاره‌های گیاهی و به‌منظور جلوگیری از تجمع آن‌ها و همچنین کنترل اندازه ذرات، سه عنصر حیاتی وجود دارد که باید در نظر گرفته شوند: (۱) وجود یک عامل کاهش‌دهنده، (۲) وجود یک نمک فلزی، و (۳) وجود عامل تثبیت کننده [۴۴، ۴۵]. تعداد زیادی از مولکول‌های زیستی که در گیاهان یافت می‌شوند، از جمله کربوهیدرات‌ها، ساپونین‌ها، شکر، اسیدهای آمینه، آنزیم‌ها، آلکالوئیدها، ترپنوئیدها، پروتئین‌ها، ترکیبات فنل، ویتامین‌ها و تانن‌ها، پتانسیل کاهش اثرات بیولوژیکی را دارند. یون‌های فلزی برای کاهش ترکیبات فعال زیستی یا تثبیت مواد شیمیایی خود را به ساختار در حال تشکیل می‌چسبانند، در نهایت به اتم‌های فلزی کاهش می‌یابند و متعاقباً با توجه به ویژگی‌های متمایز خود فلزات مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴۶-۴۸].

در ایران ۷۵ گونه مختلف از سرده آلیوم مشاهده شده‌است. سرده آلیوم در فارسی سیر نامیده می‌شود و از خانواده آلیاسه است. ۳۱ مورد از آنها را فقط می‌توان در مناطق کوهستانی خاصی یافت که با سطوح بالای رطوبت و خاک‌های اسیدی متمایز می‌شوند. در این میان، آلیوم هوشداریا، گیاهی بومی است که در سراسر شمال غرب ایران پراکنده شده‌است و در زبان کردی به "لوشاه" نیز معروف است [۴۹، ۵۰]. گیاهان آلیوم از مواد مغذی ضروری از جمله منابع معدنی و ویتامین‌ها مانند C و B تشکیل شده‌است. آنها همچنین به‌عنوان منشأ احتمالی عناصر تشکیل دهنده غیرفرار مانند ترکیبات فنلی، به‌ویژه تری ترپنوئیدها، ترکیبات نیتروژن‌دار، ساپونین‌ها، فلاونوئیدها و پروتئین‌ها شناخته می‌شوند که همگی برای طیف وسیعی از خواص دارویی و همچنین درمانی قابل استفاده هستند [۵۱-۵۳]. گونه‌های آلیوم نه تنها تأثیر مفیدی بر شرایط قلبی عروقی و همچنین فشار خون دارند، بلکه به‌صورت گسترده علاوه بر اختلالات معده و ریه، در درمان روماتیسم، سل و آترواسکلروز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵۴، ۵۵].

در سال‌های اخیر، نانوذرات مغناطیسی مبتنی بر اکسید آهن برای انواع کاربردهای زیست‌محیطی و پزشکی، از جمله خالص‌سازی و جداسازی آلودگی‌های دارویی، رنگی و فلزات سنگین و همچنین سیستم‌های تحویل دارو و برجسب‌گذاری، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به این که مگنتیت (Fe_3O_4) دارای ویژگی‌های مغناطیسی و الکتریکی برتری است، در میان بسیاری از مواد نانوساختار اکسید آهن بیشترین علاقه را به خود جلب کرده است. نانوذرات Fe_3O_4 نوع منحصر به فردی از خواص مغناطش را دارند که از آن به‌عنوان ساختارهای ابرپارامگناطیس یاد می‌شود [۵۶]. از آنجایی که نانوذرات Fe_3O_4 ویژگی ابرپارامگناطیس را دارند، پاسخ مغناطیسی آنها همانند پارامگناطیس‌های اتمی است. بنابراین، آنها به‌عنوان یک حوزه مغناطیسی واحد پس از رسیدن به دمای آستانه عمل می‌کنند و نقشی ویژه در ناهمسانگردی اضافی و مغناطش با درصد اشباع بالا را دارند. این خواص باعث می‌شود که این نانوذرات اکسید آهن به‌راحتی در یک میدان مغناطیسی اعمال شده خارجی جدا شوند [۵۷].

اکثر تحقیقاتی که در مورد تولید نانوذرات اکسید آهن انجام شده است بر روی روش‌هایی متمرکز بوده است که از مواد شیمیایی آزمایشگاهی بالینی به‌عنوان عوامل کاهش‌دهنده استفاده می‌کنند. این ترکیبات اغلب برای

نانوذرات Fe_3O_4 یک شبانه خشک شد تا در مراحل بعدی مورد استفاده قرار گیرد.

خصوصیات نانوذرات سنتز سبز شده Fe_3O_4

به منظور تایید سنتز، مورفولوژی، و خصوصیات بصری نانوذرات Fe_3O_4 از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM، Carl Zeiss-EM10C)، استفاده شد. ساختار و مورفولوژی نانوذرات Fe_3O_4 با استفاده از یک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM، TESCAN، VEGA3)، که مجهز به طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) بود، مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تجزیه و تحلیل ساختار نانوذرات Fe_3O_4 ، از نرم افزار پراش سنخ پرتو ایکس PANalytical X'Pert Pro استفاده شد. برای شناسایی گروه عملکردی نانوذرات Fe_3O_4 از طیف تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) (بروکر، ALPHA) استفاده شد. به منظور تهیه ریزنمونه از نانوذرات، نمونه‌های خشک شده با استفاده از برومید پتاسیم (KBr) آسیاب شدند و سپس در محدوده طول موج $4000-400\text{ cm}^{-1}$ از طریق آسیاب گلوله‌ای مورد آنالیز قرار گرفتند. به منظور تعیین رفتار مغناطیسی نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده، از مغناطیس سنخ نمونه ارتعاشی (VSM، مدل LBKFB، شرکت مغناطیس دقیق کویر، ایران) استفاده شد.

نتایج

اجزای شیمیایی موجود در عصاره الیوم هوشداریا^۱ به عنوان عامل کاهنده و همچنین عامل تثبیت کننده عمل می کنند و با استفاده از یک فرایند هم‌رسوبی آسان برای تشکیل نانوذرات Fe_3O_4 با محلول مخلوط شامل یون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} برهم‌کنش می کنند. رنگ محلول واکنش نمک‌های کلرید آهن و عصاره الیوم هوشداریا پس از اضافه شدن $NaOH$ ۲ مولار (در حالی که محلول به مدت تقریبی ۱۵ دقیقه هم زده شد)، از قهوه‌ای روشن به سیاه تغییر یافت. این تغییر رنگ نشان‌دهنده تشکیل نانوذرات Fe_3O_4 بود (شکل ۱الف). امکان جداسازی نانوذرات Fe_3O_4 با کمک یک آهنربای خارجی که در بخش پایین ظرف آزمایشگاهی قرار گرفته بود وجود داشت. شکل ۱-ب به وضوح نشان می‌دهد که نانوذرات Fe_3O_4 تولید شده را می‌توان فوراً توسط یک آهنربای خارجی جذب کرد، که شاهدهی بر این ادعا است که نانوذرات دارای ویژگی‌های مغناطیسی هستند. پس از برداشتن آهنربا، نانوذرات به راحتی با تکان دادن شیشه آزمایش پراکنده شدند. برای سنتز نانوذرات Fe_3O_4 ، یک بستر واکنشی متشکل از Fe^{3+} کلرید و Fe^{2+} کلرید با نسبت مولی ۲:۱ به مخلوط آبی اضافه شدند. از آنجایی که نانوذرات Fe_3O_4 تمایل زیادی به تجمع در آگلومره شدن از خود نشان می‌دهند، رسوب اتفاق می‌افتد. این به این دلیل است که نانوذرات تجمع یافته نسبت سطح به حجم کمتری نسبت به ذرات جداگانه دارند

سلامت انسان خطرناک، بسیار پرهزینه و برای محیط زیست مضر هستند. تعدادی از محققین سنتز زیست سبز نانوذرات را به عنوان روشی جایگزین پیشنهاد کرده‌اند که برای محیط زیست نیز ایمن است. استفاده از پوشش‌های مناسب که ظرفیت جذب بالایی دارند، می‌تواند منجر به ساخت نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی شود که می‌توانند برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرند [۵۸-۶۰].

هدف از این تحقیق، بررسی اثربخشی یک روش ساده، مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست برای سنتز نانوذرات مغناطیسی زیست تخریب پذیر Fe_3O_4 با استفاده از عصاره گیاه آلیاسه است. این عصاره، پتانسیل این را دارد که به عنوان یک عامل تثبیت کننده در شیمی سبز جهت سنتز نانوذرات بدون استفاده از مواد شیمیایی مضر عمل کند. همچنین، خواص ساختاری، فیزیکی و مغناطیسی نانوذرات سنتز سبز شده Fe_3O_4 مورد ارزیابی قرار گرفت که این نانوذرات می‌توانند برای استفاده در نانوپزشکی آینده مناسب باشند.

مواد و روش‌ها

مواد

در طول این پژوهش، از این مواد شیمیایی استفاده شد: کلرید آهن (III) ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$)، کلرید آهن (II) ($FeCl_2 \cdot 6H_2O$)، اتانول (C_2H_6O) و $NaOH$ ۲ مولار که از مرک، آلمان خریداری شد. برای تهیه تمام محلول‌های آبی که از آزمایشگاه نانوتکنولوژی دانشگاه علوم پزشکی شیراز به دست آمده بود، از آب دیونیزه استفاده شد.

روش‌ها

تهیه عصاره گیاه الیوم هوشداریا (آلیاسه)

برای استخراج گیاه آلیاسه، ابتدا ۵ گرم گیاه توزین شد و سپس به ۱۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه شده اضافه شد. بعد از اینکه محلول به جوش آمد، محلول حاوی گیاه به مدت ۱۵ دقیقه دیگر روی هیتر قرار گرفت. پس از آن عصاره گیاه با گذراندن از کاغذ صافی جداسازی شد و سه بار سانتریفیوژ شد تا عصاره یکدست از گیاه به دست آید. جهت استفاده در مرحله بعد، این عصاره در دمای ۵ درجه سانتی گراد نگهداری شد.

سنتز سبز نانوذرات Fe_3O_4

به منظور تولید نانوذرات Fe_3O_4 از فرآیند سنتز سبز استفاده شد. در این روش، ابتدا در دمای ۷۵ درجه ۲ میلی مول $FeCl_3$ و ۱ میلی مول $FeCl_2$ در ۷ میلی لیتر آب دیونیزه حل شده و به مدت ۱۰ دقیقه تحت همزن مغناطیسی قرار گرفت. پس از آن، مخلوط را از همزن خارج و در دمای اتاق سرد شد. سپس ۷ میلی لیتر از عصاره گیاه الیوم هوشداریا را به محلول اضافه کرده و به مدت ۱۰ دقیقه به هم زده شد. در مرحله بعدی $NaOH$ ۲ مولار به محلول به صورت قطره‌ای اضافه شد و این کار تا زمانی که pH به ۸ رسید، ادامه یافت. هنگامی که رنگ محلول از قهوه‌ای به تیره تغییر یافت، تشکیل نانوذرات Fe_3O_4 مشاهده شد. پس از آن، محلول سه بار با آب دیونیزه و اتانول سانتریفیوژ شد و سپس

¹- Allium hooshidaryae (Alliaceae)

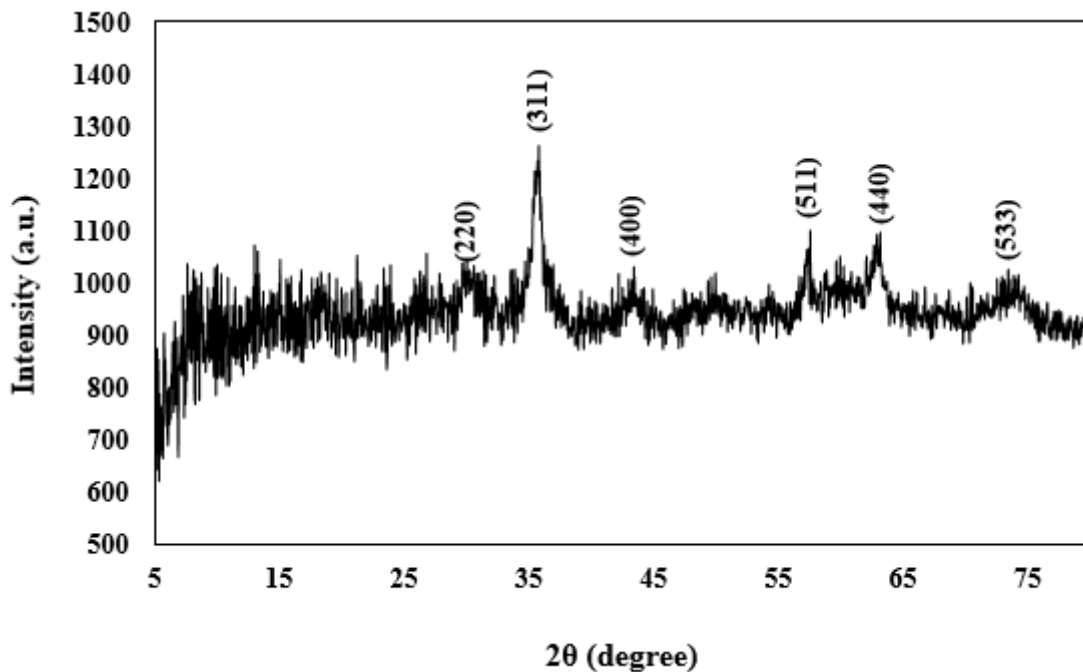
(۴۰۰)، (۵۱۱)، (۴۴۰)، و (۵۳۳) مطابقت دارند. این صفحات کریستالی ساختار مکعبی مراکز وجوه پر (FCC) نانوذرات Fe_3O_4 را بر اساس داده‌های برگرفته شده از نوشته‌های منتشر شده منعکس می‌کنند (فایل شماره: JCPDS-۰۰۳-۰۸۶۳-۰۱) [۶۱].

که منجر به مصرف انرژی کمتری می‌شود. این پدیده‌ای است که احتمالاً اگر نانوذرات دارای سطحی با بار سطحی بسیار اندک باشند بیشتر رخ می‌دهد [۵۸].

شکل ۲ الگوهای XRD نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده را نشان می‌دهد. پیک‌های پراش نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده در 2θ برابر با 30° درجه، $35/63^\circ$ درجه، $43/5^\circ$ درجه، $57/1^\circ$ درجه، $63/0^\circ$ درجه و $73/5^\circ$ درجه شناسایی شدند که به ترتیب با صفحات کریستالی (۳۱۱)، (۲۲۰)،



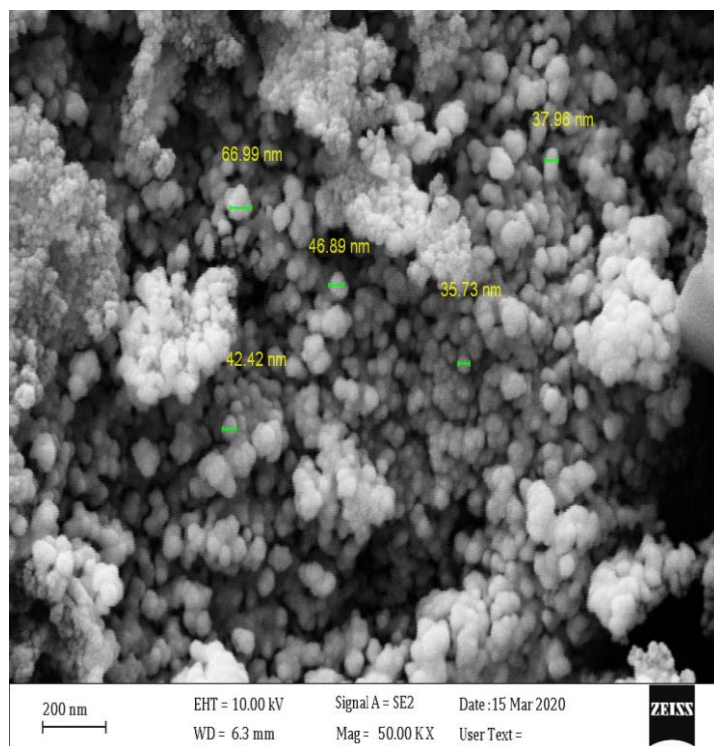
شکل ۱- (الف) سنتز سبز نانوذرات Fe_3O_4 ، (ب) جداسازی نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده از مخلوط واکنش به وسیله یک آهنربای خارجی مقرر در کف مخلوط



شکل ۲- طیف XRD نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده

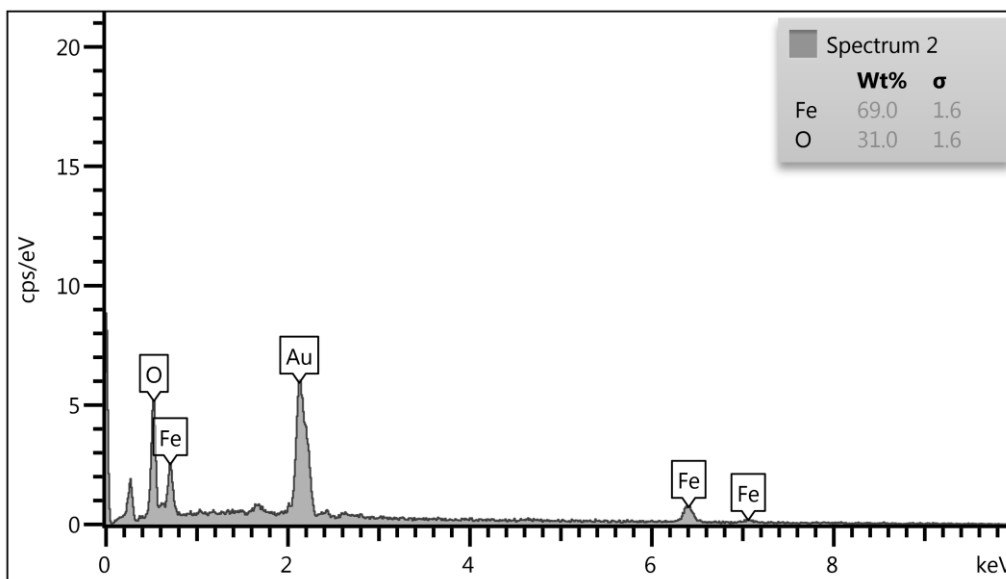
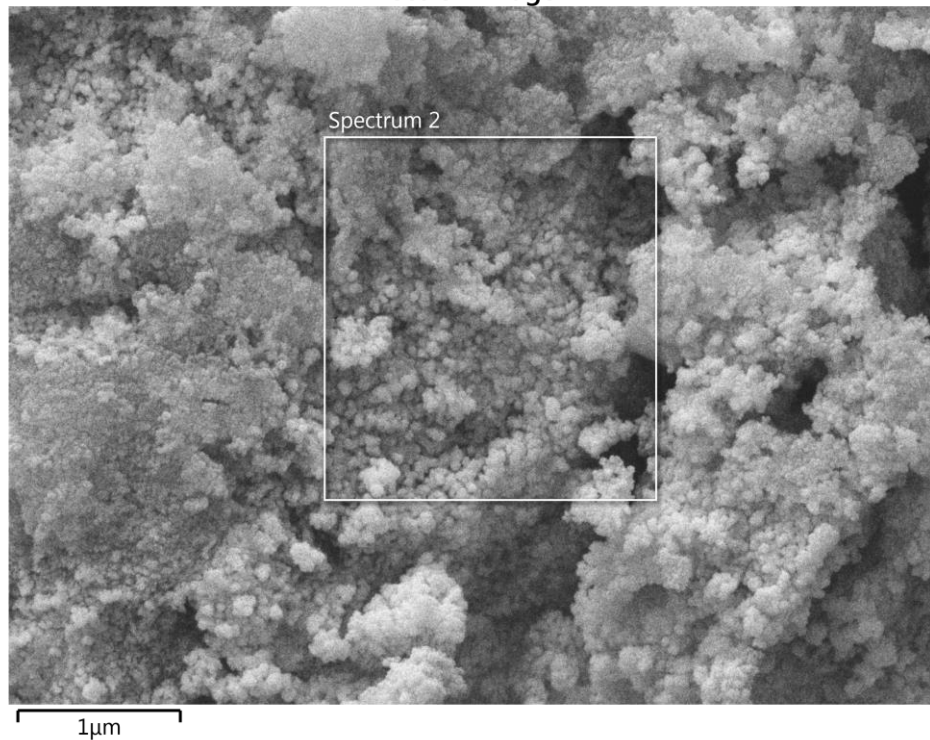
همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، از طیف سنجی FTIR استفاده شد تا گروه‌های عاملی مربوط به الیوم هوشداریا که به‌عنوان عوامل تثبیت‌کننده و عامل کاهنده در سنتز نانوذرات Fe_3O_4 نقش داشتند، شناسایی شوند. در سنتز نانوذرات Fe_3O_4 باندهای جذبی در $3366/84$ ، $1620/67$ ، $1380/52$ ، $1113/01$ ، $559/06$ و $432/57 \text{ cm}^{-1}$ مشاهده شد. یک پیک جذبی در $3366/84 \text{ cm}^{-1}$ از نانوذرات سنتز شده، نشان‌دهنده ارتعاش کششی O-H موجود در گروه هیدروکسیل عصاره بود [۶۴]. پیک‌های جذبی که در $1620/67 \text{ cm}^{-1}$ رخ داده بودند نشان‌دهنده کشش خمشی C-H از هیدروکربن‌های آروماتیک موجود در عصاره بود. ارتعاشات اصلاح شده گروه C-H از هیدروکربن‌ها و ارتعاشات خمشی گروه C-O در عصاره مربوط به پیک‌های جذبی بود که به‌ترتیب در $1380/52 \text{ cm}^{-1}$ و $1113/01 \text{ cm}^{-1}$ ظاهر شدند [۶۵]. پیوند فلز-اکسیژن مشاهده شده در $559/96 \text{ cm}^{-1}$ متعلق به ارتعاشات کششی ذاتی فلزات در محل چهار وجهی است، در حالی که پیوند فلز-اکسیژن شناسایی شده در $432/57 \text{ cm}^{-1}$ به کشش هشت‌وجهی-فلزی Fe-O نسبت داده شد [۶۶]. سنتز نانوذرات Fe_3O_4 با حضور این پیک‌های متمایز نشان داده شد. این پیک‌های متمایز مطابق با الگوی ساختاری نانوذرات Fe_3O_4 بودند که معمولاً در محدوده 400 تا 600 cm^{-1} یافت می‌شوند [۶۷].

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نانوذرات Fe_3O_4 را نشان می‌دهد. اکثر نانوذرات Fe_3O_4 دارای مورفولوژی کروی بوده و به خوبی پراکنده شده بودند. میانگین اندازه آن‌ها در حدود $35/73$ نانومتر است. تجمعات جزئی نانوذرات ممکن است ناشی از نیروهای برشی و نیروهای واندروالسی باشد که در مقیاس نانومتری نانوذرات را به یکدیگر متصل می‌کند. علاوه بر این، حضور گروه‌های هیدروکسیل در سرتاسر عصاره گیاه ممکن است با عمل به‌عنوان یک نیروی محرکه احتمالی در تجمع نانوذرات نقش داشته باشد. طیف EDS از نانوذرات Fe_3O_4 در شکل ۴ نشان داده شده است. محتوای آهن نانوذرات پودری ۶۹ درصد وزنی بود، در حالی که محتوای اکسیژن نانوذرات ۳۱ درصد وزنی است. در نتیجه، طیف EDS گرفته شده از نمونه‌های Fe_3O_4 نشان داد که ترکیبات سنتز شده دارای درجه خلوص بالایی هستند که به دلیل وجود عناصر اکسیژن و آهن در آن‌ها بود. تصویر نانوذرات Fe_3O_4 که توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) به دست آمده‌اند در شکل ۵ ارائه شده است. بر اساس تصویر، قطر نانوذرات یکنواخت تولید شده تقریباً 35 نانومتر بود و آنها درجه تجمع پایینی داشتند. همچنین، نتایج TEM به خوبی با نتایج SEM مطابقت دارد (شکل ۳) زیرا ترکیبات آلیاسه به طور موثر به عنوان عوامل تثبیت‌کننده و پوشش‌دهنده عمل می‌کنند که موجب سنتز نانو ساختارهای ناهمسانگرد با درجه تجمع پایین می‌گردد که مزیت قابل توجه روش تولید سبز در مقایسه با روش تولید شیمیایی است [۶۲، ۶۳].



شکل ۳- تصویر SEM از نانوذرات Fe_3O_4 سنتز سبز شده

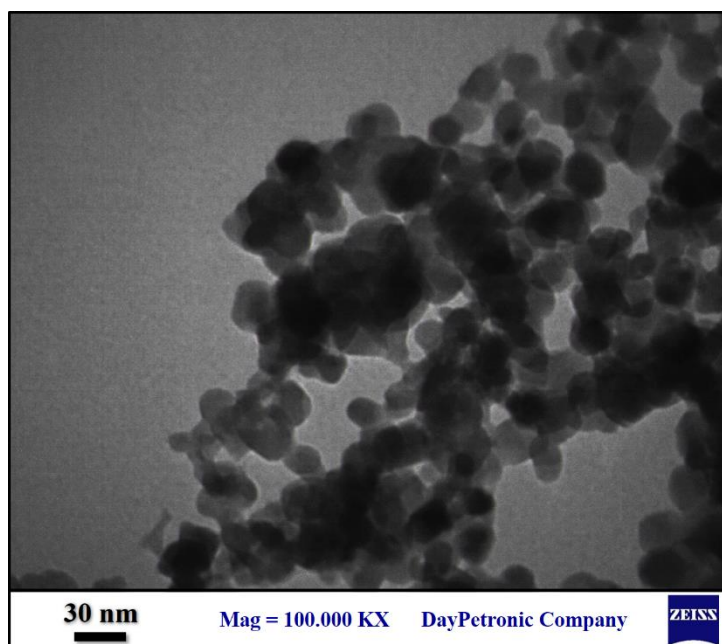
Electron Image 2



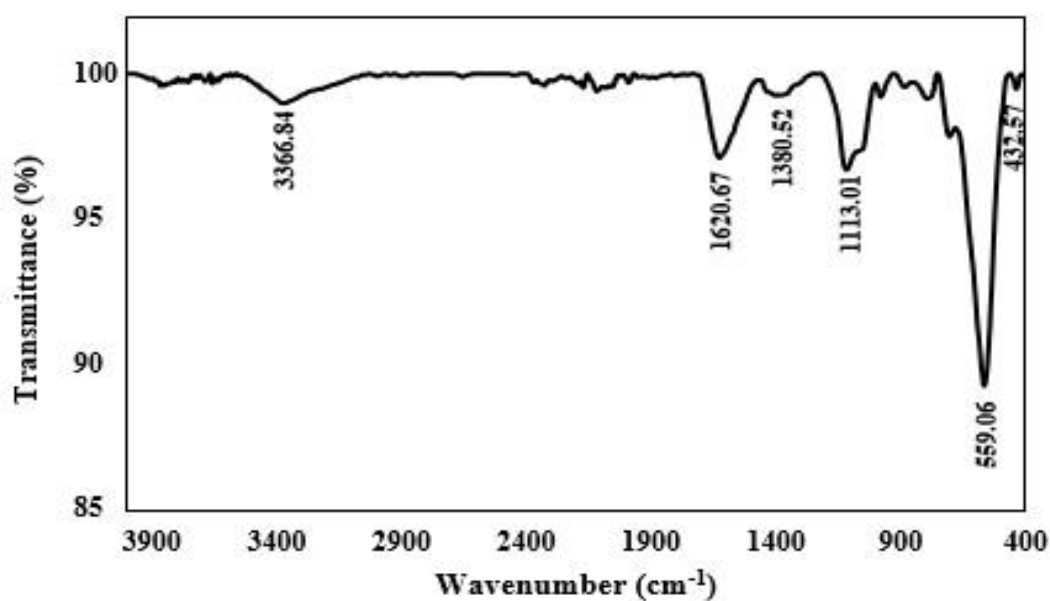
شکل ۴- طیف EDS از نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده

است. همچنین خواص مغناطیسی نانوذرات توسط زیست مولکول‌های گیاهی کاهش نیافته است، بلکه نانوذرات را از برهمکنش درون ذره‌ای محافظت می‌کند و خواص مغناطیسی را در برابر محیط پایدارتر می‌کند [۶۸، ۳۲]. یوسفی و همکاران نشان دادند که نانوذرات سنتز سبز شده Fe_3O_4 با استفاده از عصاره پوست میوه گارسینیا منگوستانا دارای ویژگی فوق مغناطیسی با اشباع مغناطیسی 58 emu/g است [۶۸].

شکل ۷ نتایج آنالیز VSM انجام شده بر روی ذرات Fe_3O_4 سنتز شده را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر، خواص مغناطیسی نانوذرات سنتز شده در میدان مغناطیسی 10000 تا -10000 Oe در دمای محیط ارزیابی شد (شکل ۸). همانطور که در تصویر مشاهده می‌شود، هیچ‌گونه حلقه هیستریزس مغناطیسی وجود ندارد. این یافته تأیید می‌کند که این نانوذرات دارای ویژگی فوق مغناطیسی با اشباع مغناطیسی 58 emu/g



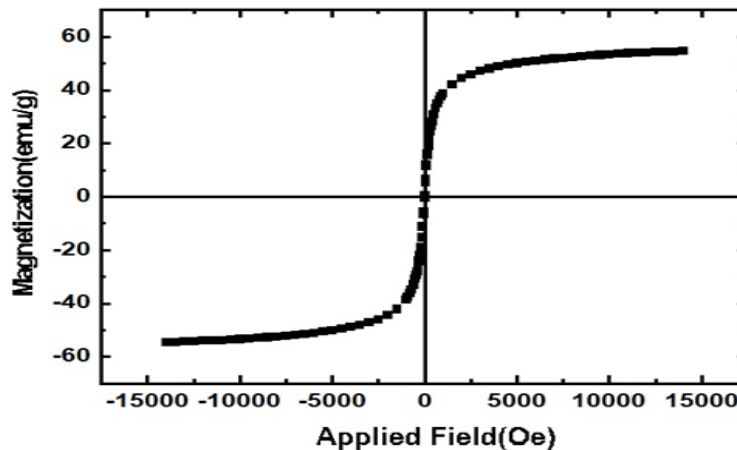
شکل ۵- تصویر TEM از نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده



شکل ۶- طیف سنجی FTIR نانوذرات سنتز سبز شده Fe_3O_4

کاربردهای زیست‌پزشکی هدایت شوند. با این حال، نیاز است که تحقیقات آینده بیشتر بر روی این خاصیت متمرکز شوند.

بر اساس یافته‌های VSM، می‌توان فهمید که نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده می‌توانند توسط یک میدان مغناطیسی اعمال شده خارجی حرکت کنند و احتمالاً به‌طور مستقیم به یک هدف خاص در بدن برای اهداف



شکل ۷- آنالیز VSM از نانوذرات Fe_3O_4

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، نانوذرات Fe_3O_4 به‌طور مؤثر با استفاده از روشی ساده، مقرون به صرفه و زیست‌سازگار تولید شد. عصاره الیوم هوشداریا به‌عنوان عامل کاهنده یا تثبیت کننده استفاده شد و هیچ‌گونه ماده شیمیایی مضر برای سنتز استفاده نشد. نتایج XRD نشان داد که نانوذرات Fe_3O_4 دارای ساختار FCC است. با استفاده از طیف سنجی FTIR مشارکت گروه‌های عاملی یافت شده در عصاره الیوم هوشداریا نشان داده شد و صحت آن در فرآیند سنتز نانوذرات Fe_3O_4 تأیید شد. وجود پیک‌های جذبی قابل مشاهده در $559/96\text{ cm}^{-1}$ و $432/57\text{ cm}^{-1}$ شواهدی قطعی برای سنتز و تشکیل نانوذرات Fe_3O_4 ارائه دادند. نتایج آنالیز TEM و SEM ساختار و ابعاد نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده را نشان داد. اکثر نانوذرات به‌شکل کروی و قطر آن‌ها به‌طور متوسط حدود $35/73$ نانومتر می‌باشد. آنالیز VSM نشان داد که نانوذرات تشکیل شده دارای خاصیت فوق مغناطیسی و اشباع مغناطیسی 58 emu/g است. پیش‌بینی می‌شود که نانوذرات Fe_3O_4 که با روش سبز و ایمن سنتز شده شده‌اند برای استفاده در بخش‌های کاربردی مختلف، به‌ویژه موارد مربوط به کاربردهای زیست‌پزشکی، ایده‌آل باشند.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

مشارکت نویسندگان

انجام آزمایش‌ها و نگارش اولیه: میلاد عباسی؛

تحلیل داده‌ها و نتایج: احسان وفا، سید رضا کسایی؛
نگارش نهایی: کاظم جمالی، علی جنگجو، ساره مصلح شیرازی، احمد واعظ؛
نظارت: علی محمد امانی، ساره مصلح شیرازی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Baig N, Kammakam I, Falath W. Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*. 2021;2(6):1821-71. DOI: 10.1039/D0MA00807A.
2. Azizli MJ, Vafa E, Rezaeeparto K, Parham S, Mokhtary M, Jahankhah Z. Preparation, characterization, and compatibilization of novel rubber nanocomposites for mechanical applications: relationship between electrical properties, morphology, and rheology. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2023;37(19):2754-78. DOI: 10.1080/01694243.2023.2166613.
3. Joudeh N, Linke D. Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. *Journal of Nanobiotechnology*. 2022;20(1):262. DOI: 10.1186/s12951-022-01477-8.
4. Khan I, Saeed K, Khan I. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian journal of chemistry*. 2019;12(7):908-31. DOI: 10.1016/j.arabjc.2017.05.011.
5. Coetzee D, Venkataraman M, Militky J, Petru M. Influence of nanoparticles on thermal and electrical conductivity of composites. *Polymers*. 2020;12(4):742. DOI: 10.3390/polym12040742
6. Rostamizadeh S, Abdollahi F, Shadjou N, Amani AM. MCM-41-SO₃H: a novel reusable nanocatalyst for synthesis of amidoalkyl naphthols under solvent-free conditions. *Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly*. 2013;144:1191-6. DOI: 10.1007/s00706-013-0936-4
7. Rostamizadeh S, Aryan R, Ghaieni HR, Amani AM. An efficient one-pot procedure for the preparation of 1, 3, 4-thiadiazoles in ionic liquid [bmim] BF₄ as dual solvent and catalyst. *Heteroatom Chemistry: An International Journal of Main Group Elements*. 2008;19(3):320-4. DOI: 10.1002/hc.20432
8. Habibi A, Tarameshloo Z, Rostamizadeh S, M Amani A. Efficient synthesis of 3-Aminoimidazo [1, 2-a] pyridines using Silica-Supported perchloric acid (HClO₄-SiO₂) as a novel heterogenous catalyst. *Letters in Organic Chemistry*. 2012;9(3):155-9. DOI: 10.2174/157017812800167439
9. Rostamizadeh S, Aryan R, Ghaieni HR, Amani AM. Solvent-free chemoselective synthesis of some novel substituted 2-arylbenzimidazoles using amino acid-based prolinium nitrate ionic liquid as catalyst. *Journal of Heterocyclic Chemistry*. 2009;46(1):74-8. DOI: 10.1002/jhet.35.
10. Soares S, Sousa J, Pais A, Vitorino C. Nanomedicine: principles, properties, and regulatory issues. *Frontiers in chemistry*. 2018;360. DOI: 10.3389/fchem.2018.00360
11. Mitchell MJ, Billingsley MM, Haley RM, Wechsler ME, Peppas NA, Langer R. Engineering precision nanoparticles for drug delivery. *Nature reviews drug discovery*. 2021;20(2):101-24. DOI: 10.1038/s41573-020-0090-8.
12. Hoseinzadeh A, Ghodousi Johari H, Anbardar MH, Tayebi L, Vafa E, Abbasi M, et al. Effective treatment of intractable diseases using nanoparticles to interfere with vascular supply and angiogenic process. *European Journal of Medical Research*. 2022;27(1):232. DOI: 10.1186/s40001-022-00833-6.
13. Pandey P. Role of nanotechnology in electronics: A review of recent developments and patents. *Recent Patents on Nanotechnology*. 2022;16(1):45-66. DOI: 10.2174/1872210515666210120114504.

14. Anastasiadis SH, Chrissopoulou K, Stratakis E, Kavatzikidou P, Kaklamani G, Ranella A. How the physicochemical properties of manufactured nanomaterials affect their performance in dispersion and their applications in biomedicine: A review. *Nanomaterials*. 2022;12(3):552. DOI: 10.3390/nano12030552.
15. Gulumian M, Andraos C, Afantitis A, Puzyn T, Coville NJ. Importance of surface topography in both biological activity and catalysis of nanomaterials: can catalysis by design guide safe by design? *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(15):8347. DOI: 10.3390/ijms22158347.
16. Mosleh-Shirazi S, Akhlaghi F. Tribological behavior of Al/SiC and Al/SiC/2 vol% Gr nanocomposites containing different amounts of nano SiC particles. *Materials Research Express*. 2019;6(6):065039. DOI: 10.1088/2053-1591/ab0929.
17. Amani AM, Tayebi L, Abbasi M, Vaez A, Kamyab H, Chelliapan S, et al. The Need for Smart Materials in an Expanding Smart World: MXene-Based Wearable Electronics and Their Advantageous Applications. *ACS Omega*. 2023. DOI: 10.1021/acsomega.3c06590.
18. Mosleh-Shirazi S, Janghorban K. Design. Investigation of physical and chemical properties of polypropylene hybrid nanocomposites. *Materials & Design*. 2012;34:474-8. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.027.
19. Sanità G, Carrese B, Lamberti A. Nanoparticle surface functionalization: how to improve biocompatibility and cellular internalization. *Frontiers in molecular biosciences*. 2020;7:587012. DOI: 10.3389/fmolb.2020.587012.
20. Rostamizadeh S, Ghaieni H, Aryan R, Amani A. Zinc chloride catalyzed synthesis of 5-substituted 1H-tetrazoles under solvent free condition. *Chinese Chemical Letters*. 2009;20(11):1311-4. DOI: 10.1016/j.ccllet.2009.06.020.
21. Rostamizadeh S, Ghaieni HR, Aryan R, Amani AM. Clean one-pot synthesis of 1, 2, 4-oxadiazoles under solvent-free conditions using microwave irradiation and potassium fluoride as catalyst and solid support. *Tetrahedron*. 2010;66(2):494-7. DOI: 10.1016/j.tet.2009.11.063.
22. Rostamizadeh S, Amani AM, Aryan R, Ghaieni HR, Norouzi L. Very fast and efficient synthesis of some novel substituted 2-arylbenzimidazoles in water using $ZrOCl_2 \cdot nH_2O$ on montmorillonite K10 as catalyst. *Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly*. 2009;140:547-52. DOI: 10.1007/s00706-008-0087-1.
23. Rostamizadeh S, Shadjou N, Amani AM, Balalaie S. Silica supported sodium hydrogen sulfate ($NaHSO_4/SiO_2$): A mild and efficient reusable catalyst for the synthesis of aryl-14-H-dibenzo [a, j] xanthenes under solvent-free conditions. *Chinese Chemical Letters*. 2008;19(10):1151-5. DOI: 10.1016/j.ccllet.2008.07.026.
24. Rostamizadeh S, Aryan R, Ghaieni HR, Amani AM. Aqueous $NaHSO_4$ catalyzed regioselective and versatile synthesis of 2-thiazolamines. *Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly*. 2008;139:1241-5. DOI: 10.1007/s00706-008-0906-4.
25. Mirzaei A, Oum W, Ham H, Kwon YJ, Mosleh-Shirazi S, Shin KY, et al. Catalyst and substrate-free synthesis of graphene nanosheets by unzipping C60 fullerene clusters using a pulse current method. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2022;149:106831. DOI: 10.1016/j.mssp.2022.106831.
26. Mousavi SM, Hashemi SA, Arjmand O, Amani AM, Babapoor A, Fateh M, et al.

Erythrosine Adsorption from Aqueous Solution via Decorated Graphene Oxide with Magnetic Iron Oxide Nano Particles: Kinetic and Equilibrium Studies. *Acta Chimica Slovenica*. 2018;65(4). DOI: 10.17344/acsi.2018.4537.

27. Mahdavinia GH, Rostamizadeh S, Amani AM, Sepehrian H. Fast and efficient method for the synthesis of 2-arylbenzimidazoles using MCM-41-SO₃H. 2012. DOI: 10.1515/hc-2011-0056.

28. Rostamizadeh S, Amani AM, Mahdavinia GH, Shadjou N. Silica supported ammonium dihydrogen phosphate (NH₄H₂PO₄/SiO₂): A mild, reusable and highly efficient heterogeneous catalyst for the synthesis of 14-aryl-14-H-dibenzo [a, j] xanthenes. *Chinese Chemical Letters*. 2009;20(7):779-83. DOI: 10.1016/j.ccllet.2009.03.016.

29. Mousavi SM, Hashemi SA, Amani AM, Saed H, Jahandideh S, Mojoudi F. Polyethylene terephthalate/acryl butadiene styrene copolymer incorporated with oak shell, potassium sorbate and egg shell nanoparticles for food packaging applications: control of bacteria growth, physical and mechanical properties. *Polymers from Renewable Resources*. 2017;8(4):177-96. DOI: 10.1177/204124791700800403.

30. Amani A. Synthesis and biological activity of piperazine derivatives of phenothiazine. *Drug research*. 2014;5-8. DOI: 10.1055/s-0033-1364001.

31. Akhlaghi F, Mosleh-Shirazi S. Effect of SiC nanoparticles content and milling time on the characteristics of Al/SiC nanocomposite powders produced via mechanical milling. *Advanced Materials Research*. 2014;829:505-9. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.829.505.

32. Amani AM, Danaie P, Vaez A, Gholizadeh R, Firuzyar T, Dehghani F, et al. Rutin precursor for the synthesis of

superparamagnetic ZnFe₂O₄ nanoparticles: Experimental and density functional theory. *Applied Physics A*. 2022;128(8):696. DOI: 10.1007/s00339-022-05763-y.

33. Dehghani F, Shahmoradi S, Naghizadeh M, Firuzyar T, Vaez A, Kasaei SR, et al. Magnetic graphite-ODA@ CoFe₂O₄: attempting to produce and characterize the development of an innovative nanocomposite to investigate its antimicrobial properties. *Applied Physics A*. 2022;128(3):250. DOI: 10.1007/s00339-022-05387-2.

34. Mosleh-Shirazi S, Kasaei SR, Dehghani F, Kamyab H, Kirpichnikova I, Chelliapan S, et al. Investigation through the anticancer properties of green synthesized spinel ferrite nanoparticles in present and absent of laser photothermal effect. *Ceramics International*. 2023;49(7):11293-301. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.11.329.

35. Dehghani F, Mosleh-Shirazi S, Shafiee M, Kasaei SR, Amani AM. Antiviral and antioxidant properties of green synthesized gold nanoparticles using *Glaucium flavum* leaf extract. *Applied Nanoscience*. 2023;13(6):4395-405. DOI: 10.1007/s13204-022-02705-1.

36. Sadeghipour Y, Alipour MH, Ghaderi Jafarbeigloo HR, Salahvarzi A, Mirzaii M, Amani AM, et al. Evaluation antibacterial activity of biosynthesized silver nanoparticles by using extract of *Euphorbia Pseudocactus* Berger (*Euphorbiaceae*). *Nanomedicine Research Journal*. 2020;5(3):265-75. DOI: 10.22034/NMRJ.2020.03.007.

37. Mahdavinia GH, Amani A, Sepehrian H. MCM-41-SO₃H as a Highly Efficient Sulfonic Acid Nanoreactor for the Rapid and Green Synthesis of Some Novel Highly Substituted Imidazoles under Solvent-Free Condition. *Chinese Journal of Chemistry*. 2012;30:703. DOI: 10.1002/cjoc.201280008.

38. Shabani L, Kasaei SR, Chelliapan S, Abbasi M, Khajehzadeh H, Dehghani FS, et al. An investigation into green synthesis of Ru template gold nanoparticles and the in vitro photothermal effect on the MCF-7 human breast cancer cell line. *Applied Physics A*. 2023;129(8):564. DOI: 10.1007/s00339-023-06832-6.
39. Shaker Ardakani L, Alimardani V, Tamaddon AM, Amani AM, Taghizadeh S. Green synthesis of iron-based nanoparticles using *Chlorophytum comosum* leaf extract: methyl orange dye degradation and antimicrobial properties. *Heliyon*. 2021;7(2):e06159. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06159.
40. Gheisari F, Kasaei SR, Mohamadian P, Chelliapan S, Gholizadeh R, Zareshahrabadi Z, et al. Bromelain-loaded silver nanoparticles: Formulation, characterization and biological activity. *Inorganic Chemistry Communications*. 2024;161:112006. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.112006.
41. Amani AM, Tayebi L, Vafa E, Abbasi M, Vaez A, Kamyab H, et al. On the horizon of greener pathways to travel into a greener future portal: Green MXenes, environment-friendly synthesis, and their innovative applications. *Journal of Cleaner Production*. 2024;436:140606. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140606.
42. Hosseinzadeh A, Zamani A, Johari HG, Vaez A, Golchin A, Tayebi L, et al. Moving beyond nanotechnology to uncover a glimmer of hope in diabetes medicine: Effective nanoparticle-based therapeutic strategies for the management and treatment of diabetic foot ulcers. *Cell Biochemistry and Function*. 2023. DOI: 10.1002/cbf.3816.
43. Shah M, Fawcett D, Sharma S, Tripathy SK, Poinern GEJ. Green Synthesis of Metallic Nanoparticles via Biological Entities. *Materials* (Basel). 2015;8(11):7278-308. DOI: 10.3390/ma8115377.
44. Ledwith DM, Whelan AM, Kelly JM. A rapid, straight-forward method for controlling the morphology of stable silver nanoparticles. *Journal of Materials Chemistry*. 2007;17(23):2459-64. DOI: 10.1039/B702141K.
45. Peralta-Videa JR, Huang Y, Parsons JG, Zhao L, Lopez-Moreno L, Hernandez-Viezas JA, et al. Plant-based green synthesis of metallic nanoparticles: scientific curiosity or a realistic alternative to chemical synthesis? *Nanotechnology for Environmental Engineering*. 2016;1(1):4. DOI: 10.1007/s41204-016-0004-5.
46. Kuppasamy P, Yusoff MM, Maniam GP, Govindan N. Biosynthesis of metallic nanoparticles using plant derivatives and their new avenues in pharmacological applications - An updated report. *Saudi Pharm J*. 2016;24(4):473-84. DOI: 10.1016/j.jsps.2014.11.013.
47. Marslin G, Siram K, Maqbool Q, Selvakesavan RK, Kruszka D, Kachlicki P, et al. Secondary Metabolites in the Green Synthesis of Metallic Nanoparticles. *Materials* (Basel). 2018;11(6). DOI: 10.3390/ma11060940.
48. Vafa E, Azizli MJ, Tayebi L, Amani AM, Kamyab H. Integrating bioactive glass with compatibilizer: A novel approach for hard tissue regeneration using PXDDA-co-PLA/PLCL/PGLA nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*. 2024;316:129070. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2024.129070.
49. Mashayekhi S, Zarre S, Fritsch R, Attar F. A new species of *Allium* subgen. *Melanocrommyum* sect. *Compactoprason* (Alliaceae) from Iran. *Feddes Repertorium*. 2005;116:191-4. DOI: 10.1002/fedr.200411065.

50. Snoussi M, Noumi E, Hajlaoui H, Bouslama L, Hamdi A, Saeed M, et al. Phytochemical Profiling of *Allium subhirsutum* L. Aqueous Extract with Antioxidant, Antimicrobial, Antibiofilm, and Anti-Quorum Sensing Properties: In Vitro and In Silico Studies. *Plants (Basel)*. 2022;11(4). DOI: 10.3390/plants11040495.
51. Lanzotti V. The analysis of onion and garlic. *J Chromatogr A*. 2006;1112(1-2):3-22. DOI: 10.1016/j.chroma.2005.12.016.
52. Vickers NJ. Animal Communication: When I'm Calling You, Will You Answer Too? *Curr Biol*. 2017;27(14):R713-r5. DOI: 10.1016/j.cub.2017.05.064.
53. Vafa E, Bazargan-Lari R, Bahrololoom ME. Synthesis of 45S5 bioactive glass-ceramic using the sol-gel method, catalyzed by low concentration acetic acid extracted from homemade vinegar. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;10:1427-36. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.12.093.
54. Thomson M, Ali M. Garlic [*Allium sativum*]: a review of its potential use as an anti-cancer agent. *Curr Cancer Drug Targets*. 2003;3(1):67-81. DOI: 10.2174/1568009033333736.
55. Lira S, Almeida R, Almeida FR, Oliveira F, Duarte J. Preliminary Studies on the Analgesic Properties of the Ethanol Extract of *Combretum leprosum*. *Pharmaceutical Biology*. 2008;40:213-5. DOI: 10.1076/phbi.40.3.213.5837.
56. Azizi A. Green Synthesis of Fe₃O₄ Nanoparticles and Its Application in Preparation of Fe₃O₄/Cellulose Magnetic Nanocomposite: A Suitable Proposal for Drug Delivery Systems. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2020;30. DOI: 10.1007/s10904-020-01500-1.
57. Latha N, C.Ramesh, Kumar KT, Ragunathan V. Green Synthesis of Cr₂O₃ Nanoparticles Using *Tridax procumbens* Leaf Extract and its Antibacterial Activity on *Escherichia coli*. *Current Nanoscience*. 2012;8:603-7. DOI: 10.2174/157341312801784366.
58. Makarov VV, Makarova SS, Love AJ, Sinitsyna OV, Dudnik AO, Yaminsky IV, et al. Biosynthesis of stable iron oxide nanoparticles in aqueous extracts of *Hordeum vulgare* and *Rumex acetosa* plants. *Langmuir*. 2014;30(20):5982-8. DOI: 10.1021/la501192a.
59. Niraimathee VA, Subha V, Ramaswami Sachidanandan ER, Renganathan S. Green synthesis of iron oxide nanoparticles from *Mimosa pudica* root extract. *International Journal of Environment and Sustainable Development*. 2016;15:227. DOI: 10.1504/IJESD.2016.077370.
60. Sajjadi M, Nasrollahzadeh M, Sajadi SM. Green synthesis of Ag/Fe₃O₄ nanocomposite using *Euphorbia peplus* Linn leaf extract and evaluation of its catalytic activity. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2017;497:1-13. DOI: 10.1016/j.jcis.2017.02.037.
61. Izadiyan Z, Shameli K, Miyake M, Hara H, Mohamad SEB, Kalantari K, et al. Cytotoxicity assay of plant-mediated synthesized iron oxide nanoparticles using *Juglans regia* green husk extract. *Arabian Journal of Chemistry*. 2020;13(1):2011-23. DOI: 10.1016/j.arabjc.2018.02.019
62. Gheisari F, Reza Kasaei S, Mohamadian P, Chelliapan S, Gholizadeh R, Zareshahrabadi Z, et al. Bromelain-loaded silver nanoparticles: Formulation, characterization and biological activity. *Inorganic Chemistry Communications*. 2024;161:112006. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.112006.
63. Eghtedari M, Liopo AV, Copland JA, Oraevsky AA, Motamedi M. Engineering of Hetero-Functional Gold Nanorods for the in vivo Molecular Targeting of Breast Cancer

Cells. Nano Letters. 2009;9(1):287-91. DOI: 10.1021/nl802915q.

64. Awwad A, Salem N. A Green and Facile Approach for Synthesis of Magnetite Nanoparticles. Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2012;2:208-13. DOI: 10.5923/j.nn.20120206.09.

65. Yadav M. Study on thermal and mechanical properties of cellulose/iron oxide bionanocomposites film. Composites Communications. 2018;10:1-5. DOI: 10.1016/j.coco.2018.04.010.

66. Demir A, Topkaya R, Baykal A. Green synthesis of superparamagnetic Fe_3O_4 nanoparticles with maltose: Its magnetic investigation. Polyhedron. 2013;65:282-7. DOI: 10.1016/j.poly.2013.08.041.

67. Yuvakkumar R, Hong SI. Green Synthesis of Spinel Magnetite Iron Oxide Nanoparticles. Advanced Materials Research. 2014;1051:39-42. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1051.39.

68. Yusefi M, Shameli K, Su Yee O, Teow S-Y, Hedayatnasab Z, Jahangirian H, et al. Green synthesis of Fe_3O_4 nanoparticles stabilized by a *Garcinia mangostana* fruit peel extract for hyperthermia and anticancer activities. International journal of nanomedicine. 2021;2515-32. DOI: 10.2147/IJN.S284134.

