



Original Article

Microstructural Characterization and FORC Analysis of Magnetic Domain and reversal Behavior in Spinel-Type Hard and Soft Ferrites

Abbas Bachacheri, Hossein Nikmanesh*

Department of Physics, Persian Gulf University, Bushehr 75169, Iran

Received: May 05, 2025

Revised: Jul 15, 2025

Accepted: Aug 03, 2025

Abstract: In this study, the First Order Reversal Curve (FORC) method was employed to investigate the magnetic domain behavior and analyze the magnetic properties of hard (cobalt ferrite) and soft (nickel ferrite) spinel ferrites. The samples were prepared using standard methods, and their structural and magnetic characteristics were examined using analyses such as X-ray diffraction (XRD) and vibrating sample magnetometry (VSM). Using FORC diagrams, the coercivity distribution, magnetic interactions, and magnetization reversal behavior of the samples were analyzed. The results indicated significant differences between hard and soft samples in terms of magnetic characteristics such as the FORC distribution, distribution peaks, and irreversible regions. This study demonstrates that FORC analysis is a powerful tool for gaining deeper insight into the magnetic domain structures and internal interactions in nanostructured magnetic materials.

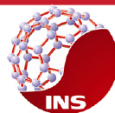
Keywords: FORC, CoFe₂O₄ nanoparticles, NiFe₂O₄ nanoparticles, cation distribution, structural properties, magnetic properties

*Corresponding Author: h.nikmanesh@yahoo.com

How to Cite This Article:

Bachacheri A., Nikmanesh H., Microstructural Characterization and FORC Analysis of Magnetic Domain and reversal Behavior in Spinel-Type Hard and Soft Ferrites. Nanomeghyas . 2025;12(1):35-44. DOI: [10.22034/ns.2025.2059788.1387](https://doi.org/10.22034/ns.2025.2059788.1387)





مشخصه‌یابی ریزساختاری و تحلیل FORC حوزه مغناطیسی و رفتار بازگشتی در فریت‌های سخت و نرم نوع اسپینل

عباس بچاچری، حسین نیک‌منش*

گروه فیزیک، دانشکده علوم و فناوری نانو و زیستی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر ۷۵۱۶۹، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۷/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۱۵

چکیده: در این پژوهش، از روش منحنی بازگشتی درجه اول (First Order Reversal Curve – FORC) به منظور بررسی رفتار حوزه‌های مغناطیسی و تحلیل خواص مغناطیسی فریت‌های اسپینل سخت (فریت کبالت) و نرم (فریت نیکل) استفاده شده است. نمونه‌ها با استفاده از روش‌های استاندارد تهیه و ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی آن‌ها به کمک آنالیزهایی نظیر XRD و VSM مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از نمودارهای FORC، توزیع وادارندگی، برهم‌کنش‌ها و رفتار برگشت‌پذیری مغناطیسی نمونه‌ها تحلیل گردید. نتایج نشان داد که نمونه‌های سخت و نرم دارای تفاوت‌های معناداری در ویژگی‌های مغناطیسی از جمله چگالی نقاط FORC، پیک توزیع و ناحیه‌های برگشت‌ناپذیر می‌باشند. این بررسی نشان می‌دهد که تحلیل FORC ابزار قدرتمندی برای درک عمیق‌تر از ساختار حوزه‌های مغناطیسی و برهم‌کنش‌های داخلی در مواد مغناطیسی نانو ساختار است.

واژگان کلیدی: FORC، نانوذرات CoFe_2O_4 ، نانوذرات NiFe_2O_4 ، توزیع کاتیون، ویژگی‌های ساختاری، ویژگی‌های مغناطیسی

*h.nikmanesh@yahoo.com

نحوه استناد به این مقاله:

بچاچری، عباس، نیک‌منش، حسین، مشخصه‌یابی ریزساختاری و تحلیل FORC حوزه مغناطیسی و رفتار بازگشتی در فریت‌های سخت و نرم نوع اسپینل. *نانومقیاس*، ۱۲(۱)، ۳۵–۴۴. DOI: 10.22034/ns.2025.2059788.1387

۱ مقدمه

علم مواد را به خود جلب کرده‌اند. این مواد با دارا بودن ویژگی‌هایی مانند میدان وادارندگی بالا، مغناطش اشباع مناسب و پایداری حرارتی و شیمیایی مطلوب، گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهایی همچون محیط‌های ذخیره‌سازی مغناطیسی، کاربردهای زیست‌پزشکی، جاذب‌های امواج مایکروویو و سیستم‌های کاتالیستی محسوب می‌شوند. در میان روش‌های

نانوذرات فریت اسپینل (MFe_2O_4) به دلیل خواص مغناطیسی منحصر به فرد، پایداری شیمیایی بالا و کاربردهای گسترده در حوزه‌های مختلف فناوری، توجه بسیاری از پژوهشگران



۱۸]. آنیت و همکارانش آنالیز FORC را روی نانوکامپوزیت‌های آهن-نیکل (روی-فریت) انجام دادند. آنها گزارش دادند که توزیع‌های ناهمسانگردی در نمونه‌های مورد مطالعه متمایز بوده که نشان‌دهنده برهمکنش‌های بین نانوخوشه‌های فریت و آهن است. این مشاهده بیشتر توسط توزیع‌های FORC پشتیبانی شد [۱۹]. از طرفی در سال ۲۰۱۹ یاسمیان و همکارانش خواص ساختاری، مغناطیسی و هایپرترمیا $\text{Ni}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 1$) را به کمک منحنی‌های بازگشت مرتبه اول بررسی کرده‌اند [۲۰]. به هر حال، آنالیز منحنی معکوس مرتبه اول، کاهش کسر سوپرپارامگناطیس مربوطه را از ۷۷ به ۲۹ درصد هنگام افزایش غلظت Ni (x) از ۰ به ۱ نشان می‌دهد. نتایج مربوط به خواص هایپرترمیا مغناطیسی نشان می‌دهد که نانوذرات $\text{Ni}_{0.6}\text{Fe}_{2.4}\text{O}_4$ و $\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$ بالاترین راندمان گرمایشی را دارند و به ترتیب مقادیر توان اتلاف ویژه ۱۷۰،۵ و ۱۶۹ وات بر گرم را در محیط آبی با غلظت ۳ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر و ۲۰۰،۵ و ۱۹۸،۴ وات بر گرم را برای غلظت ۱،۵ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر ایجاد می‌کنند.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در سنتز نانوذرات فریت کبالت و نیکل، هنوز پرسش‌های اساسی بسیاری درباره رابطه دقیق بین شرایط سنتز، ریزساختار حاصل و خواص مغناطیسی بدون پاسخ مانده‌اند. این پژوهش با به‌کارگیری ترکیبی از روش‌های پیشرفته مشخصه‌یابی شامل پراش پرتو ایکس همراه با تحلیل ریتولد، میکروسکوپ الکترونی عبوری با وضوح بالا، میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی، به بررسی سیستماتیک این روابط پرداخته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که روش سنتز تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات دارد. به‌ویژه، نمودارهای FORC الگوهای گذار از رفتار ابرپارامگناطیس به تک‌حوزه در اندازه‌های بزرگ‌تری نسبت به نانوذرات سنتز شده با روش‌های دیگر رخ می‌دهد.

یافته‌های این تحقیق نه‌تنها درک ما از روابط ساختار-خواص در نانوذرات فریت نیکل و کبالت را عمیق‌تر می‌کند، بلکه راهنمای ارزشمندی برای طراحی و سنتز هدفمند این مواد برای کاربردهای خاص ارائه می‌دهد. به‌عنوان مثال، می‌توان با بهینه‌سازی شرایط هیدروترمال، نانوذراتی با ناهمسانگردی مغناطیسی بالا برای کاربردهای ذخیره‌سازی اطلاعات، یا نانوذراتی با برهمکنش‌های کنترل‌شده برای کاربردهای زیست‌پزشکی مانند هایپرترمیا تولید کرد. این مطالعه همچنین روش سنتز هیدروترمال را به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تولید مواد با خواص مغناطیسی دقیقاً کنترل‌شده تثبیت می‌کند.

مختلف سنتز نانوذرات، روش هیدروترمال به دلیل امکان کنترل دقیق اندازه ذرات، ریخت‌شناسی و درجه بلورینگی از طریق تنظیم پارامترهای سنتز مانند دما، pH و زمان واکنش، جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است [۴-۱].

فریت‌های کبالت (CoFe_2O_4) و نیکل (NiFe_2O_4) به‌عنوان دو عضو مهم از خانواده فریت‌های اسپینلی، به دلیل خواص ساختاری و مغناطیسی منحصر به فرد خود مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته‌اند [۵-۱۶]. رفتار مغناطیسی این نانوذرات ارتباط تنگاتنگی با ویژگی‌های ساختاری آنها در سطوح مختلف دارد. توزیع کاتیون‌های Ni^{2+} و Co^{2+} و Fe^{3+} بین جایگاه‌های چهاروجهی و هشت‌وجهی در ساختار اسپینل، اندازه بلورک‌ها و ذرات، و اثرات سطحی همگی نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین خواص مغناطیسی نهایی ایفا می‌کنند. از دیدگاه ساختاری، این مواد دارای شبکه بلوری مکعبی با گروه فضایی $Fd3m$ هستند که در آن یون‌های فلزی بین زیرشبکه‌های چهاروجهی (A) و هشت‌وجهی (B) توزیع می‌شوند. در فریت کبالت که به‌صورت نیمه وارونگی ساختار را نشان می‌دهد، یون‌های Co^{2+} تمایل به اشغال موقعیت‌های هشت‌وجهی دارند، در حالی که در فریت نیکل با ساختار معکوس، یون‌های Ni^{2+} عمدتاً در موقعیت‌های هشت‌وجهی قرار می‌گیرند. این تفاوت در توزیع کاتیونی منجر به رفتار مغناطیسی متمایز در این دو ماده می‌شود؛ به‌طوری که فریت کبالت به دلیل ثابت ناهمسانگردی بالا (حدود $200-300 \text{ kJ/m}^3$) و وادارندگی قابل توجه (تا 5400 emu/g) شناخته می‌شود، در حالی که فریت نیکل با وادارندگی پایین‌تر (حدود 100 Oe) و مغناطش اشباع بالاتر (حدود 50 emu/g) مشخص می‌گردد. بررسی‌های مغناطیسی نشان می‌دهد که اندازه نانوذرات تأثیر قابل توجهی بر رفتار مغناطیسی این مواد دارد، به‌طوری که با کاهش اندازه ذرات به زیر ۲۰ نانومتر، پدیده سوپرپارامگناطیس در هر دو سیستم مشاهده می‌شود. مطالعات ساختاری با استفاده از تکنیک‌هایی مانند پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) تأیید می‌کند که پارامترهای سنتز مانند دما و زمان کلسیناسیون می‌توانند بر درجه بلورینگی، اندازه ذرات و توزیع کاتیونی تأثیر بگذارند که این عوامل به نوبه خود خواص مغناطیسی ماده را کنترل می‌کنند.

اگرچه روش‌های مرسوم مشخصه‌یابی مانند مغناطش‌سنج نمونه ارتعاشی اطلاعات ارزشمندی درباره خواص مغناطیسی توده‌ای ارائه می‌دهند، اما اغلب قادر به آشکارسازی ارتباط پیچیده بین برهمکنش‌های مغناطیسی محلی و ریزساختار نانوذرات نیستند. در این زمینه، روش تحلیل منحنی‌های بازگشت مرتبه اول (FORC) به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای بررسی توزیع وادارندگی، برهمکنش‌های بین ذره‌ای و گذار بین حالت‌های مختلف حوزه مغناطیسی ظهور کرده است [۱۷].

۲ مواد و روش آزمایش

در این مطالعه، نانوذرات CoFe_2O_4 به روش هیدروترمال تهیه شدند. در این روش کریستالین Co و Fe با نسبت مولی ۱:۲ با هم ترکیب شده و در آب دییونیزه حل شده‌اند. پس از همگن‌سازی، محلول ۰٫۵ مولار NaOH به صورت قطره‌ای به مخلوط اضافه شده است. پس از ۳۰ دقیقه هم‌زدن اضافی، محلول نهایی در یک اتوکلاو قرار گرفته و با نرخ گرمایش ۲ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه، تا دمای ۲۲۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده است. اتوکلاو به صورت طبیعی تا دمای اتاق سرد شده و نانوذرات حاصل جمع‌آوری و سه بار با آب دییونیزه و سپس سه بار با اتانول شسته شدند تا ناخالصی‌های باقی‌مانده حذف شوند. در نهایت، پودرها به مدت ۳ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. این نمونه با نام COF برچسب‌گذاری شده است.

نانوذرات NiFe_2O_4 به روش سل-ژل خوداختراقی به کمک سورفکتانت پلی‌وینیل‌الکل (PVA) سنتز شدند. در ابتدا، نیترات نیکل و آهن در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دییونیزه حل شدند. سپس PVA در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد و طی مدت ۳ ساعت به صورت تدریجی به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دییونیزه اضافه شده است. محلول نیترات‌ها به صورت قطره‌ای به محلول PVA افزوده شده و به مدت ۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد هم‌زده شده است. پس از آن، ژل حاصل تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت حرارت داده شده تا کاملاً خشک شود. پودر

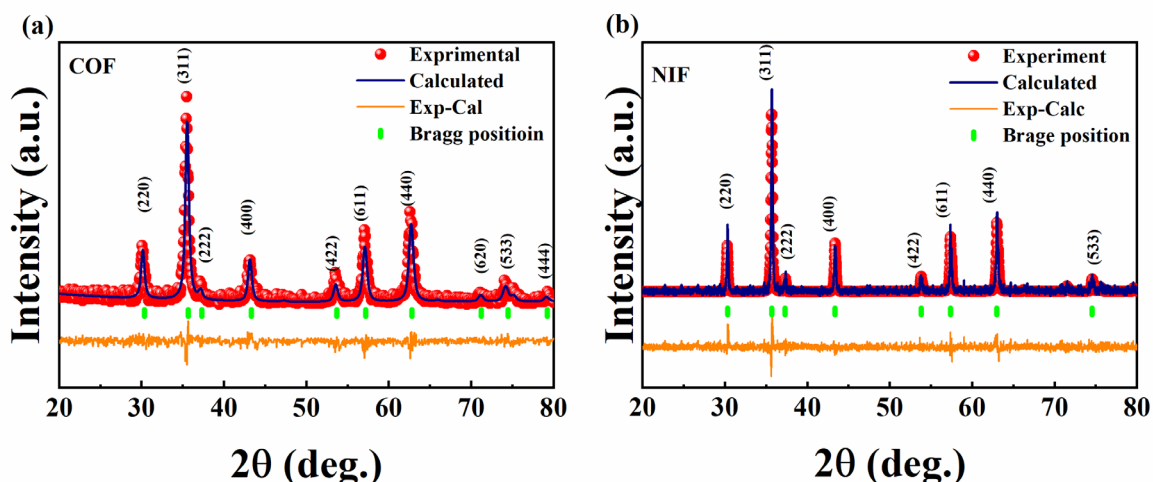
به‌دست‌آمده به مدت ۶۰ دقیقه با استفاده از هاون آسیاب شده است. در مرحله بعد، پودر در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ گرمایش ۴ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه، بازپخت شده و به مدت ۳ ساعت در این دما نگه داشته شده است. این نمونه با نام NIF برچسب‌گذاری شده است.

۳ نتایج و بحث

۳-۱ الگوی پراش پرتوی ایکس (XRD)

شکل ۱ الگوهای XRD فریت کبالت و فریت نیکل را نشان می‌دهد. قله‌های مربوط به صفحات (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۲۲۲)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۶۱۱)، (۴۴۰)، (۶۲۰)، (۵۳۳) و (۴۴۴) برای COF و صفحات (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۲۲۲)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۶۱۱)، (۴۴۰) و (۵۳۳) برای NIF با کارت استاندارد JCPDS شماره ۰۸۱-۷۲۴۹-۰۱ در تطابق‌اند. با استفاده از نرم‌افزار MAUD ۰۱ در تطابق‌اند. برای هر دو نمونه انجام شده که ساختار فریت اسپینل بدون هیچ گونه ناخالصی را در الگوهای XRD تایید می‌کند.

جدول ۱ پارامتر sig، ثابت شبکه تجربی (a) و نظری (a_{th})، اندازه ذرات (D)، و کرنش شبکه (ϵ) را نشان می‌دهد. پارامتر sig خوبی برآزش را نشان



شکل ۱. الگوی پراش پرتوی ایکس (a) فریت کبالت (b) فریت نیکل به همراه نمودار برآزش شده به وسیله نرم‌افزار MAUD

جدول ۱. پارامتر sig، ثابت شبکه تجربی (a) و نظری (a_{th})، اندازه ذرات (D)، و کرنش شبکه (ε)

ε (%)	D (nm)	a _{th} (Å)	a (Å)	sig	
۰-۰.۸	۳۵/۱۰	۸/۳۴۱	۸/۳۳۸	۱/۰.۸	NIF
۰/۱.۰	۴۳/۸۰	۸/۳۸۹	۸/۳۸۲	۱/۱.۱	COF

جدول ۲. توزیع کاتیون

جایگاه چهاروجهی (A)	جایگاه هشتوجهی (B)	
(Fe ₁ ³⁺)	[Ni _{0.767} ²⁺ Ni _{0.233} ³⁺ Fe _{0.233} ²⁺ Fe _{0.767} ³⁺]	NIF
(Fe _{0.462} ²⁺ Fe _{0.538} ³⁺)	[Co _{0.538} ²⁺ Co _{0.462} ³⁺ Fe ₁ ³⁺]	COF

جدول ۳. مقادیر مربوط به طول باندهای جایگاه‌های چهاروجهی (d_{AX}) و هشتوجهی (d_{BX})، طول لبه چهاروجهی (d_{AXE})، طول لبه هشتوجهی مشترک و غیرمشترک (d_{BXE} و d_{BXEU}).

d _{BXEU} (Å)	d _{BXE} (Å)	d _{AXE} (Å)	d _{BX} (Å)	d _{AX} (Å)	
۲/۷۶	۲/۸۴	۳/۰۵	۲/۰۵	۱/۸۷	NIF
۲/۷۷	۲/۷۷	۳/۱۶	۲/۰۳	۱/۹۳	COF

$$d_{AX} = 1.732a(u - 0.25) \quad (۱)$$

$$d_{BX} = a(3u^2 - 2.75u + 0.6719)^{1/2} \quad (۲)$$

$$d_{AXE} = 1.4142a(2u - 0.5) \quad (۳)$$

$$d_{BXE} = 1.4142a(1 - 2u) \quad (۴)$$

$$d_{BXEU} = a(4u^2 - 3u + 0.6875)^{1/2} \quad (۵)$$

که در روابط بالا a ثابت شبکه و u شاخص مکان اکسیژن است.

شاخص مکان اکسیژن از رابطه $u = \frac{r_A + R_O}{\sqrt{3}a} + \frac{1}{4}$

می‌آید [۲۹، ۲۸]. اندازه این باندها اندازه برهمکنش‌های تبادلی و ابرتبادلی را در ساختار اسپینل تعیین می‌کند. همچنین، ثابت شبکه نیز تحت تاثیر اندازه باندها است [۲۴، ۱۴].

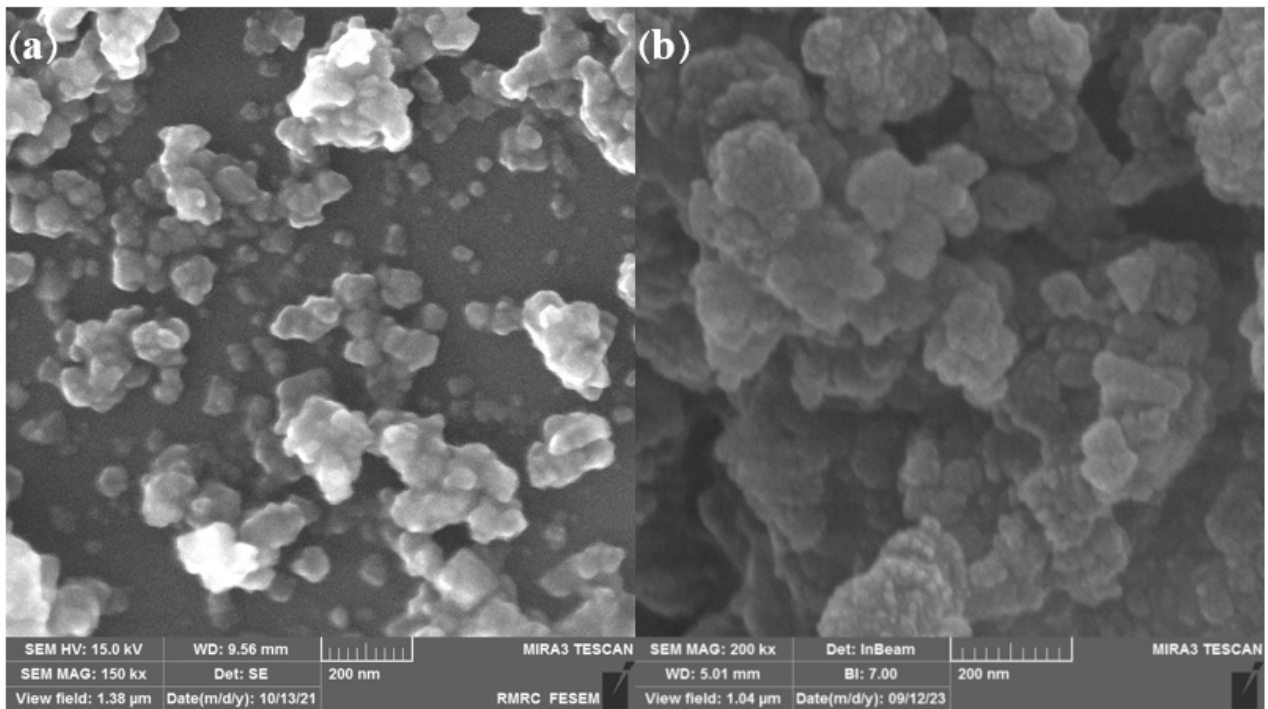
۲-۳ ریخت شناسی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (FESEM) نمونه COF، ذرات هشت وجهی و کلوخه شده را نشان می‌دهد

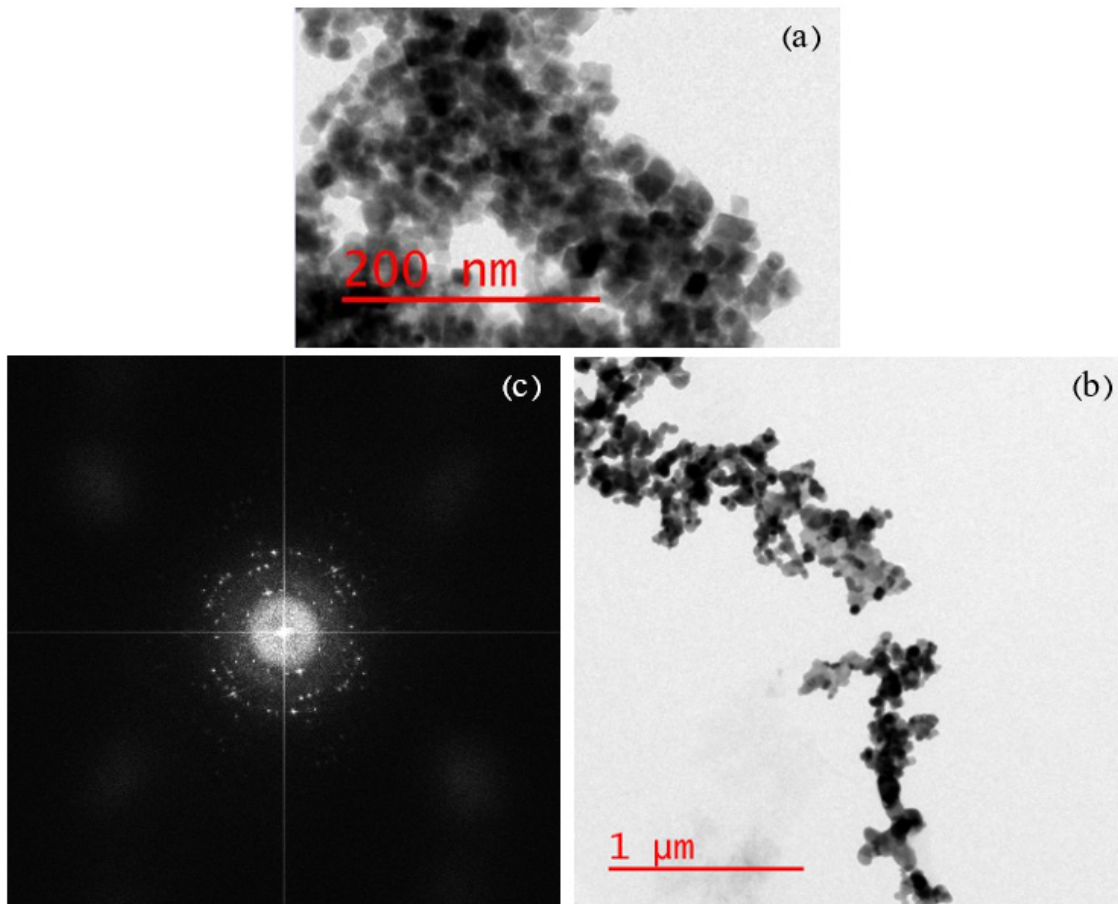
می‌دهد [۲۲، ۲۱]. هرچه این پارامتر به ۱ نزدیک تر باشد، تطابق داده تجربی و نظری در برازش ریتولد بهتر بوده است. مقدار بدست آمده برای sig نشان دهنده تطابق خوب داده تجربی و نظری می‌باشد. با استفاده از نرم‌افزار MAUD، مقادیر a بدست آمده است. همچنین، مقادیر a_{th} با استفاده از توزیع کاتیون بدست آمده است [۱۱، ۱۴، ۲۳، ۲۴]. تطابق خوبی بین ثابت شبکه تجربی و نظری وجود دارد که نشان می‌دهد توزیع کاتیون بدست آمده مناسب نمونه‌های ما است.

توزیع کاتیون بدست آمده در جدول ۲ قرار گرفته است. با اینکه فریت نیکل و فریت کبالت، هر دو در حالت توده‌ای خود، دارای ساختار اسپینل معکوس هستند؛ نمونه NIF دارای ساختار اسپینل معکوس و نمونه COF دارای ساختار اسپینل معکوس جزیی می‌باشد.

طول باندهای جایگاه‌های چهاروجهی (d_{AX}) و هشتوجهی (d_{BX})، طول لبه چهاروجهی (d_{AXE})، طول لبه هشتوجهی مشترک و غیرمشترک (d_{BXE} و d_{BXEU}) را با استفاده از روابط زیر بدست می‌آند [۲۵-۲۷]:



شکل ۲. تصاویر FESEM فریت کبالت (a) و فریت نیکل (b).



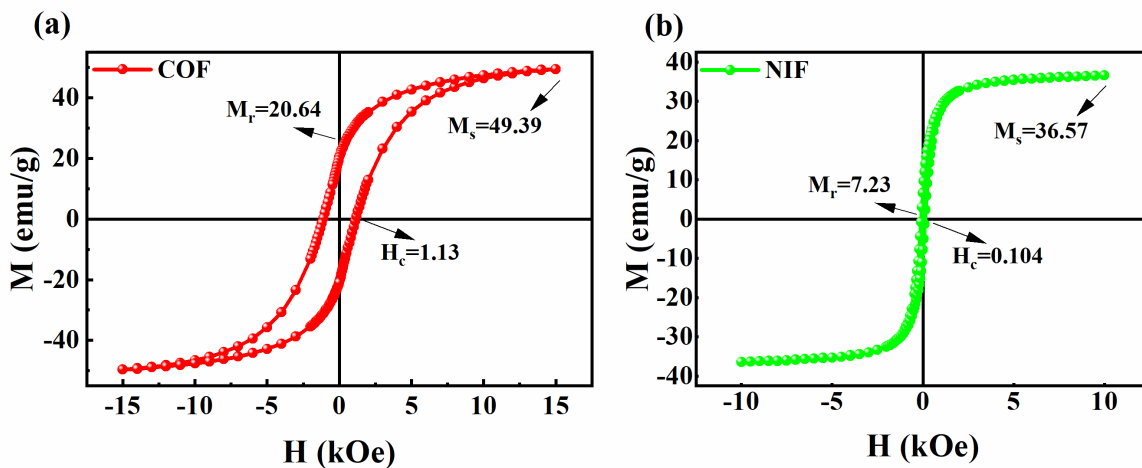
شکل ۳. تصاویر HRTEM فریت کبالت (a) و فریت نیکل (b) و تصویر الگوی SAED فریت کبالت (c).

۳-۳ تحلیل مغناطیسی سنج نمونه مرتعش (VSM)

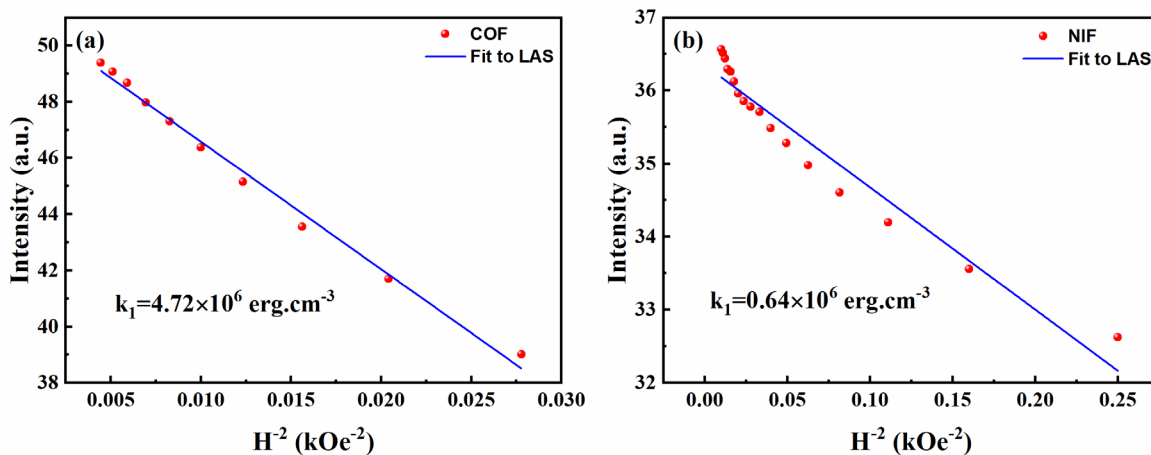
۱-۳-۳ حلقه پسماند

حلقه پسماند مغناطیسی نمونه های COF و NIF بدست آمده و در شکل ۴ نمایش داده شده است. همانطور که از شکل قابل مشاهده است، نمونه COF یک فریت اسپینل با میدان وادارندگی $1/13 \text{ kOe}$ ، و مغناطش متوسط $49/39 \text{ emu/g}$ می باشد و با توجه به میزان بالای وادارندگی به عنوان یک فریت سخت محسوب می شود. درحالی که نمونه NIF یک فریت نرم با $0/104 \text{ kOe}$ ، و مغناطش متوسط $36/57 \text{ emu/g}$ می باشد و در مقایسه با فریت کبالت یک فریت نرم محسوب می شود. شکل ۵ داده های برازش شده به روش قانون نزدیک

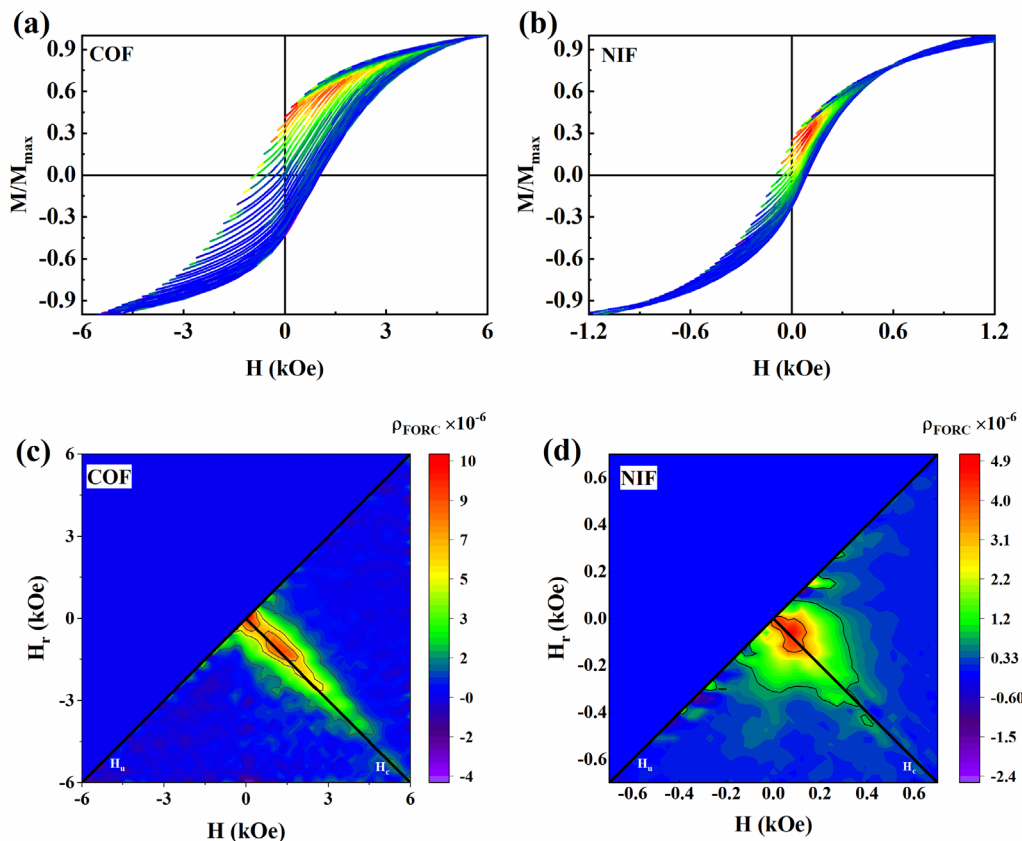
(شکل ۲-ا). همچنین تصویر (b) شکل ۲، ذرات کروی شکل نمونه NIF را نشان می دهد که به صورت کلوخه ای در آمده اند. کلوخه شدن ذرات، در هر دو نمونه، می تواند به دلیل حضور یک برهم کنش مغناطیسی در بین ذرات باشد. شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری وضوح بالا (HRTEM) را نشان می دهد. شکل هشت وجهی، و کروی ذرات COF و NIF به خوبی در این تصاویر قابل مشاهده است. تصویر الگوی پراش الکترونی ناحیه گزینشی (SAED) نمونه COF در شکل ۲-ب قرار گرفته است. این الگوها مجموعه ای از حلقه های دبی را نشان می دهند که مربوط به صفحات hkl ساختار اسپینل فریت هستند. پخش شدگی این حلقه های دبی، در حالی که هیچ حلقه پراش دیگری دیده نمی شود، تشکیل ساختار اسپینل با بلورینگی خوب در مقیاس نانو را تأیید می کند [۳۰، ۳۳].



شکل ۴. نمودار حلقه پسماند (a) فریت کبالت و (b) فریت نیکل.



شکل ۵. داده های برازش شده به روش LSA



شکل ۶. نمودار FORC نمونه فریت کبالت و (b) فریت نیکل به همراه نمودار توزیع FORC (c) فریت کبالت و (d) فریت نیکل.

درحالی که فاز مغناطیسی سخت این ماده مربوط به نانوذرات بزرگتر است [۳۲، ۱۸]. نانوذرات این نمونه دارای یک توزیع وادارندگی وسیع و برهمکنش نسبتاً قوی می‌باشند.

همانطور که از شکل ۶-d قابل مشاهده است الگوی نمودار توزیع FORC نمونه NIF از یک سری خطوط همتراز باز تشکیل شده است که بر روی H_H به سمت مبدا مختصات متمایل می‌شوند. این الگوی نمونه NIF، حالت شبه تک حوزه را نشان می‌دهد که ثابت می‌کند اندازه نانوذرات نمونه NIF در نزدیکی اندازه بحرانی حالت چند حوزه هستند [۱۸، ۳۲، ۳۳]. با استفاده از این اطلاعات، محققان و مهندسان می‌توانند مواد مغناطیسی مانند فریت کبالت و نیکل را با ویژگی‌های مطلوب برای کاربردهای خاص خود انتخاب کنند. به عنوان مثال، در طراحی حافظه‌های مغناطیسی، درک توزیع میدان‌های داخلی و اندرکنش‌های مغناطیسی می‌تواند به بهبود ظرفیت و سرعت ذخیره‌سازی اطلاعات کمک کند. در سنسورها، پسماند مغناطیسی دقیق می‌تواند دقت و حساسیت سنسور را افزایش دهد [۱۷، ۳۲، ۳۴].

شدن به مغناطش اشباع (LSA) رانشان می‌دهد [۱۰، ۱۱]. ثابت ناهمسانگردی (k_1) بدست آمده این نمونه‌ها در این تصاویر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه COF با $k_1 = 4/72 \cdot 10^6$ دارای یک ناهمسانگردی بزرگ و نمونه NIF با $k_1 = 0/64 \cdot 10^6$ دارای ناهمسانگردی کم هستند.

۳-۳-۲ تحلیل منحنی بازگشتی درجه اول (FORC)

به منظور بررسی رفتار بازگشتی و حالت حوزه‌های COF و NIF، آنالیز FORC به کار گرفته شده است. شکل ۶ نمودارهای FORC و توزیع FORC نمونه‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۶-c حالت تک حوزه با دو قله در موقعیت‌های $H_c = 0$ Oe و $H_c = 1081$ Oe و نرم، را برای نمونه COF نشان می‌دهد [۱۷، ۳۱]. فاز مغناطیسی نرم این ماده مربوط به نانوذراتی است که اندازه آن‌ها نزدیک به اندازه بحرانی حالت ابرپارامغناطیس است

<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.12.077>

- [7] Amiri, S. and H. Shokrollahi, The role of cobalt ferrite magnetic nanoparticles in medical science. *Materials Science and Engineering: C*, 2013. 33(1): p. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.09.003>
- [8] Joshi, S., et al., Structural, magnetic, dielectric and optical properties of nickel ferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation method. *Journal of Molecular structure*, 2014. 1076: p. 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2014.07.048>
- [9] Maaz, K., et al., Temperature dependent coercivity and magnetization of nickel ferrite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010. 322(15): p. 2199-2202. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.02.010>
- [10] Modabberasl, A., et al., Hydrothermal as a synthesis method for characterization of structural, morphological and magnetic properties of Co-Al ferrite nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 2024. 314: p. 128832. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128832>
- [11] Mohammadbagheri, E., et al., Impact of shape and size of particles on the magnetic properties of chromium doped cobalt ferrite. *Materials Chemistry and Physics*, 2023. 301: p. 127551. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127551>
- [12] Nejati, K. and R. Zabihi, Preparation and magnetic properties of nano size nickel ferrite particles using hydrothermal method. *Chemistry Central Journal*, 2012. 6(1): p. 1-6. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-23>
- [13] Nikmanesh, H. and M. Eshraghi, Cation distribution, magnetic and structural properties of $\text{CoCr}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$: effect of calcination temperature and chromium substitution. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019. 471: p. 294-303. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.102>
- [14] Nikmanesh, H., et al., Structural and magnetic properties of CoFe_2O_4 ferrite nanoparticles doped by gadolinium. *Nanotechnology*, 2021. 33(4): p. 045704. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac31e8>
- [15] Nikmanesh, H., et al., Effects of annealing temperature on exchange spring behavior of barium hexaferrite/nickel zinc ferrite nanocomposites. *Journal of Electronic Materials*, 2017. 46: p. 5933-5941. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5576-8>
- [16] Umüt, E., et al., Nickel ferrite nanoparticles for simultaneous use in magnetic resonance imaging and magnetic fluid hyperthermia. *Journal of colloid and interface science*, 2019. 550: p. 199-

۴ نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که منحنی‌های بازگشتی درجه اول (FORC) اطلاعات دقیق و جامعی از رفتار مغناطیسی فریت‌های اسپینل سخت و نرم فراهم می‌کنند. تفاوت در توزیع FORC و شدت برهم‌کنش‌ها بین نمونه‌ها بیانگر تأثیر ترکیب و ریزساختار بر ویژگی‌های مغناطیسی آن‌ها است. نمونه‌های COF دارای ناحیه‌های برگشت‌ناپذیر بزرگ‌تر و پیک‌هایی در ناحیه‌های با وادارنگی بالا بودند، در حالی که نمونه‌های نرم رفتار مغناطیسی با برگشت‌پذیری بیشتر از خود نشان دادند. این یافته‌ها نقش مهمی در طراحی و انتخاب مواد مغناطیسی با ویژگی‌های خاص برای کاربردهای مختلف مانند حافظه‌های مغناطیسی و حسگرها ایفا می‌کنند. استفاده از آنالیز FORC به عنوان روشی مکمل و پیشرفته، درک دقیق‌تری از ویژگی‌های مغناطیسی نانومواد فراهم می‌سازد.

۵ مراجع

- [1] Lemine, O., et al., Comparative heating efficiency of hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) and nickel ferrite nanoparticles for magnetic hyperthermia application. *Ceramics International*, 2020. 46(18): p. 28821-28827. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.047>
- [2] Jacob, B.P., et al., Influence of preparation method on structural and magnetic properties of nickel ferrite nanoparticles. *Bulletin of Materials Science*, 2011. 34(7): p. 1345-1350. <https://doi.org/10.1007/s12034-011-0326-7>
- [3] Gupta, N., et al., Current development in synthesis and characterization of nickel ferrite nanoparticle. *Materials Today: Proceedings*, 2017. 4(2): p. 342-349. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.031>
- [4] Ati, A.A., Z. Othaman, and A. Samavati, Influence of cobalt on structural and magnetic properties of nickel ferrite nanoparticles. *Journal of Molecular Structure*, 2013. 1052: p. 177-182. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2013.08.040>
- [5] Abraham, T., Economics of ceramic magnet. *American Ceramic Society Bulletin*, 1994. 73(8): p. 62-65.
- [6] Ahmad, T., et al., Chitosan-coated nickel-ferrite nanoparticles as contrast agents in magnetic resonance imaging. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015. 381: p. 151-157.

- surface, thermal, chemical, and magnetic properties of Al-doped nanostructured copper ferrites. *Ceramics International*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.149>
- [26] Ravinder, D. and A. Edukondalu, Effect of Ce³⁺ ion doped Ni-Zn ferrites: Structural, optical and low temperature magnetic properties. *Chinese Journal of Physics*, 2023. 81: p. 171-180. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2022.11.019>
- [27] Saffari, F., et al., Effects of Co-substitution on the structural and magnetic properties of Ni_xCo_{1-x}Fe₂O₄ ferrite nanoparticles. *Ceramics International*, 2015. 41(6): p. 7352-7358. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.02.038>
- [28] Amer, M., et al., Structural and physical properties of the nano-crystalline Al-substituted Cr-Cu ferrite. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2013. 343: p. 286-292. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.05.008>
- [29] Debnath, S., A. Das, and R. Das, Effect of cobalt doping on structural parameters, cation distribution and magnetic properties of nickel ferrite nanocrystals. *Ceramics International*, 2021. 47(12): p. 16467-16482. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.095>
- [30] Humbe, A.V., et al., Cation distribution, magnetic and hyperfine interaction studies of Ni-Zn spinel ferrites: role of Jahn Teller ion (Cu²⁺) substitution. *Materials Advances*, 2020. 1(4): p. 880-890. <https://doi.org/10.1039/D0MA00251H>
- [31] Pike, C.R., A.P. Roberts, and K.L. Verosub, First order reversal curve diagrams and thermal relaxation effects in magnetic particles. *Geophysical Journal International*, 2001. 145(3): p. 721-730. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01419.x>
- [32] O'handley, R.C., *Modern magnetic materials: principles and applications*. 1999.
- [33] Roberts, A.P., et al., Searching for single domain magnetite in the "pseudo-single-domain" sedimentary haystack: Implications of biogenic magnetite preservation for sediment magnetism and relative paleointensity determinations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012. 117(B8). <https://doi.org/10.1029/2012JB009412>
- [34] Franco, V. and B. Dodrill, *Magnetic measurement techniques for materials characterization*. 2021: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70443-8>
209. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.04.092>
- [17] Pike, C.R., A.P. Roberts, and K.L. Verosub, Characterizing interactions in fine magnetic particle systems using first order reversal curves. *Journal of Applied Physics*, 1999. 85(9): p. 6660-6667. <https://doi.org/10.1063/1.370176>
- [18] Roberts, A.P., C.R. Pike, and K.L. Verosub, First-order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000. 105(B12): p. 28461-28475. <https://doi.org/10.1029/2000JB900326>
- [19] Giri, A.K., et al., Magnetic distributions of iron-(nickel zinc ferrite) nanocomposites from first order reversal curve analysis. *Journal of Applied Physics*, 2013. 113(17): p. 173908. <https://doi.org/10.1063/1.4803545>
- [20] Yasemian, A.R., M. Almasi Kashi, and A. Ramazani, Hyperthermia properties of Ni_xFe_{3-x}O₄ nanoparticles: a first-order reversal curve investigation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019. 30: p. 21278-21287. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02501-8>
- [21] Modi, K., et al., Infrared spectral evolution, elastic, optical and thermodynamic properties study on mechanically milled Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ spinel ferrite. *Journal of Molecular Structure*, 2013. 1049: p. 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2013.06.051>
- [22] Bid, S., P. Sahu, and S. Pradhan, Microstructure characterization of mechanothesized nanocrystalline NiFe₂O₄ by Rietveld's analysis. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2007. 39(2): p. 175-184. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2007.01.005>
- [23] Nikmanesh, H., et al., Effect of praseodymium in cation distribution, and temperature-dependent magnetic response of cobalt spinel ferrite nanoparticles. *Nanotechnology*, 2022. 33(27): p. 275709. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac5ee4>
- [24] Nikmanesh, H., et al., Structural features and temperature-dependent magnetic response of cobalt ferrite nanoparticle substituted with rare earth sm³⁺. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022. 543: p. 168664. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168664>
- [25] Rather, S.-u., et al., Morphological, structural,