

مطالعه اثر اندازه ذرات روی نرخ جذب ویژه نانوذرات فریت کبالت در یک میدان مغناطیسی بسامد رادیویی

باقر اصلی بیکی و گلثوم حسنزاده

دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

پست الکترونیکی: b.aslibeiki@tabrizu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۰۹/۱۸)

چکیده

تحقیقات نشان می‌دهد که اندازه نانوذرات مغناطیسی تأثیر مهمی روی ویژگی‌های آنها می‌گذارد، به طوری که احتمال وجود یک اندازه بهینه در استفاده از آنها در کاربردهای پزشکی گزارش شده است. از این رو در این تحقیق نانوذرات فریت کبالت به روش هم‌رسوبی در دمای ۸۰ درجه سلسیوس تهیه شده و سپس پودر حاصل در کوره و در دماهای ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفت تا نانوذراتی با اندازه‌های مختلف حاصل شود. پراش پرتو X نمونه‌ها، تشکیل فاز خالص اسپینلی را در مورد نانوذرات تأیید کرد و اندازه متوسط بلورک‌های نمونه‌ها توسط رابطه شرر ۸/۱۸، ۹/۰۴، ۸/۹۵، ۹/۵۵، ۱۰/۴۰ و ۱۱/۱۲ نانومتر به ترتیب برای نمونه‌های سنتز شده در دماهای ۱۵۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس به دست آمد. اندازه‌گیری‌های ویژگی‌های مغناطیسی گویای افزایش میدان وادارندگی و مغناطش اشباع با افزایش اندازه است. بازده گرمایی تعلیق نانوذرات تحت اعمال میدان مغناطیسی متناوب با بسامد ۹۲ kHz اندازه‌گیری و منحنی افزایش دما بر حسب زمان به دست آمد. این آزمایش‌ها نشان داد که بیشترین مقدار نرخ جذب ویژه برای نانوذرات با اندازه حدود ۹ nm حاصل می‌شود و ذرات بزرگ‌تر و یا کوچک‌تر از آن مقدار نرخ جذب کمتری به دست می‌دهد. نتایج این تحقیق مبین وجود یک اندازه بهینه برای کاربردهای گرمادرمانی مغناطیسی است که در آن بیشترین بازده گرمایی حاصل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فریت اسپینلی، نانوذرات CoFe_2O_4 ، مغناطش، اندازه ذره، گرمادرمانی مغناطیسی

۱. مقدمه

تصویربرداری تشدید مغناطیسی و گرمادرمانی سلول‌های سرطانی اشاره کرد [۱ و ۲]. استفاده از نانوذرات مغناطیسی یکی از روش‌های گرمادرمانی است که اصطلاحاً به آن گرمادرمانی مغناطیسی گفته می‌شود. در این روش تعلیق شامل نانوذرات مغناطیسی هنگام اعمال میدان مغناطیسی متناوب از

امروزه فناوری نانو به دلیل تغییرات قابل ملاحظه‌ای که در خواص فیزیکی و شیمیایی مواد ایجاد می‌کند به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف صنعت و پزشکی مورد استفاده است. از کاربردهای پزشکی و دارویی نانوذرات می‌توان به رسانش دارو،

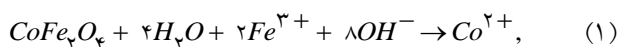
یک میدان با دامنه و بسامد خاص، یک اندازه بهینه برای نانوذرات گزارش شده که در آن، مجموع گرمای حاصل شده از واهلش نیل و براون بیشینه مقدار خود را خواهد داشت. از این رو یافتن اندازه بهینه نانوذرات مغناطیسی برای تولید گرما، یکی از زمینه‌های جذاب برای محققین است [۷-۱۰].

بنا بر مطالب اشاره شده، در این تحقیق نانوذرات فریت کبالت با اندازه ذرات مختلف تهیه شد و پس از مشخصه‌یابی‌های ساختاری و مغناطیسی، میزان نرخ جذب ویژه آنها محاسبه شد تا نمونه‌ای که بیشترین مقدار بازده گرمایی در روش گرمادرمانی را دارد مشخص شود.

۲. آزمایش

۲.۱. مواد اولیه و روش سنتز نمونه‌ها

برای تهیه نانوذرات فریت کبالت از نمک‌های فلزی شامل کلرید آهن سه ظرفیتی ($\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) و کلرید کبالت ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) با نسبت ۲ به ۱ و رعایت استکیومتری دقیق و همچنین هیدروکسید سدیم (NaOH) به عنوان عامل رسوب دهنده استفاده شد. بدین منظور ابتدا ۰/۱۳ مول از کلرید آهن سه ظرفیتی ($\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) و ۰/۰۶۵ مول کلرید کبالت ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) در ۵۰ سی سی آب دوبار یونیزه شده، ریخته شد و بشر حاوی محلول نمک‌های فلزی بر روی گرمکن و همزن مغناطیسی قرار گرفت. محلول نارنجی رنگ حاصل به مدت ده دقیقه توسط همزن مغناطیسی همزده شد و همزمان دمای محلول به ۸۰ درجه سلسیوس رسانده شد (شکل ۱. الف). پس از آن مقدار ۰/۲۰۸ مول سود (NaOH) حل شده در ۵۰ سی سی آب دو بار یونیزه به محلول نمک‌ها اضافه شد که باعث ایجاد رسوب مشکی رنگ در بشر شد (شکل ۱. ب). فرایند همزدن به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۸۰ درجه ادامه پیدا کرد. تشکیل رسوب در این روش طبق رابطه شیمیایی زیر رخ می‌دهد:



پس از سرد شدن محلول، بشر بر روی یک آهنربای قوی نئودیمیومی قرار گرفت تا رسوب حاصل ته نشین شود (شکل

طریق سازوکارهای اتلاف پسماند و اتلاف واهلش گرما تولید می‌کنند. گرمای ایجاد شده در این روش دمای سلول‌های سرطانی را به بالاتر از ۴۲ درجه سلسیوس افزایش داده و موجب تخریب این سلول‌ها می‌شود. روش گرمادرمانی مغناطیسی به دلیل اثرات جانبی کم، مورد توجه بسیاری واقع شده و تحقیقات در زمینه استفاده از موادی مانند فریت‌های اسپینلی که بیشترین بازده گرمایی را داشته باشند، گسترش یافته است [۳].

فریت‌های اسپینلی با فرمول شیمیایی $M\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($M = \text{Fe}, \text{Co}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Ni}$) از جمله مواد مغناطیسی هستند که به دلیل ویژگی‌هایی مانند پایداری شیمیایی، مغناطش نسبتاً بالا و تولید گرما در میدان‌های مغناطیسی با بسامدهای بالا، توجه زیادی را در زمینه کاربردهای پزشکی جلب کرده‌اند. فریت کبالت (CoFe_2O_4) یکی از فریت‌های مغناطیسی است که دارای خصوصیتی مانند دمای کوری بالا (520°C)، میدان وادارندگی بالا (۵/۴ kOe)، مغناطش اشباع متوسط (80 emu/g)، ثابت ناهمسانگردی بالا (10^6 erg/cm^3)، سختی مکانیکی، مقاومت الکتریکی و همچنین پایداری شیمیایی بالا است. این ویژگی‌ها فریت کبالت را برای کاربرد در زمینه‌های دارویی و از جمله گرمادرمانی مناسب ساخته است. کمیت‌های متعددی روی میزان گرمای تولید شده توسط نانوذرات در روش گرمادرمانی تأثیر می‌گذارد. مغناطش اشباع، ناهمسانگردی مغناطیسی، برهم‌کنش‌های بین ذره‌ای، میدان و بسامد اعمالی و غلظت تعلیق نانوذرات از مهم‌ترین آنها به شمار می‌آیند [۲ و ۴-۶]. یکی از پارامترهای مهم تأثیر گذار بر بازده گرمایی، اندازه نانوذرات است. تحقیقات نشان می‌دهد که نانوذرات با اندازه‌های مختلف، بازده گرمایی متفاوتی دارند [۷-۹]. در هر میدان مغناطیسی با بسامد خاص؛ واهلش نیل و براون وابسته به اندازه نانوذرات است. در ذرات کوچک‌تر واهلش نیل حاکم است و اثر بیشتری در گرمای تولید شده دارد. با افزایش اندازه ذرات از یک حد به بعد نقش واهلش نیل در گرمای تولید شده کمتر می‌شود و عوامل دیگری مانند واهلش براون و اتلاف پسماند نقش مهم‌تری خواهند داشت. در



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مراحل روش هم‌رسوبی برای تهیه نانوذرات فریت کبالت. (الف) محلول حاوی نمک های فلزی، (ب) تشکیل رسوب بعد از ریختن سود و (ج) جداسازی رسوب حاصل با آهنربا.

دستگاه VSM دانشگاه کاشان با پیشینه دامنه میدان اعمالی یک تسلا استفاده شده است. برای اندازه‌گیری نرخ جذب ویژه نانوذرات و همچنین میزان افزایش دمای نانوذرات مغناطیسی در میدان مغناطیسی بسامد رادیویی، از گرمکن القایی ساخته شده در دانشگاه تبریز استفاده شد. اساس کار گرمکن القایی، تولید جریان الکتریکی متناوب و عبور آن از یک سیم پیچ مسی است که تعلیق حاوی نانوذرات در داخل آن قرار گرفته است. با عبور جریان الکتریکی از سیم پیچ مسی یک میدان مغناطیسی متناوب با همان بسامد جریان در آن ایجاد می‌شود که باعث تولید گرما در تعلیق می‌شود. در این تحقیق بسامد میدان مغناطیسی متناوب ۹۲ kHz بوده و دامنه میدان اعمال شده برابر با ۲۷ Oe است. اجزای اصلی گرمکن القایی شامل مبدل ایجاد جریان با بسامد بالا، سیم پیچ مسی و سیستم خنک کننده است، برای خنک کردن سیم پیچ مسی از آب دوبار یونیزه استفاده می‌شود. تصویر این دستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است. با استفاده از این دستگاه روند افزایش دمای نمونه‌ها بر حسب زمان در مدت زمان بیست دقیقه با دماسنج الکلی اندازه‌گیری شد و منحنی تغییرات دما (ΔT) بر حسب زمان برای تمام نمونه‌ها رسم شد.

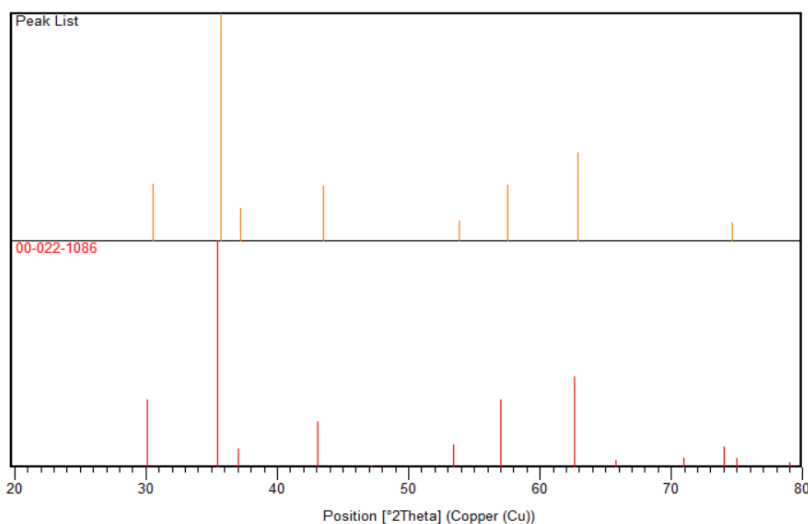
۱. ج). رسوب تهیه شده چندین بار با آب مقطر شسته شد و در مرحله نهایی از کاغذ صافی برای جدا سازی مواد استفاده شد. پس از یک روز ماده حاصل به صورت پودر کاملاً خشک به دست آمد. برای رشد اندازه نانوذرات پودر حاصل به مدت یک ساعت در کوره و در دماهای ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه حرارت داده شد. نمونه‌ها بر حسب دمای بازپخت به صورت C۱۵۰، C۲۰۰، C۳۰۰، C۴۰۰، C۵۰۰ و C۶۰۰ نامگذاری شدند.

۲.۲. مشخصه‌یابی و اندازه‌گیری‌ها

برای بررسی ویژگی‌های ساختاری و تعیین ساختار بلوری نمونه‌ها که به شکل پودر تهیه شده بودند از دستگاه XRD شرکت فیلیپس ساخت هلند، مدل PW۱۷۳۰ استفاده شده است. در این آزمایش‌ها پرتو X مربوط به $\text{Cu-K}\alpha$ با طول موج ۱٫۵۴ آنگستروم است و محدوده زاویه روبش از ۲۰ تا ۸۰ درجه انتخاب شد. توزیع اندازه و اندازه متوسط نانوذرات با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان مدل MIRA۳FEG-SEM ساخت کمپانی Tescan کشور چک به دست آمد. برای بررسی ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌ها از



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) دستگاه گرمکن القایی ساخته شده در دانشکده فیزیک دانشگاه تبریز جهت انجام آزمایش‌های گرمادرمانی مغناطیسی.



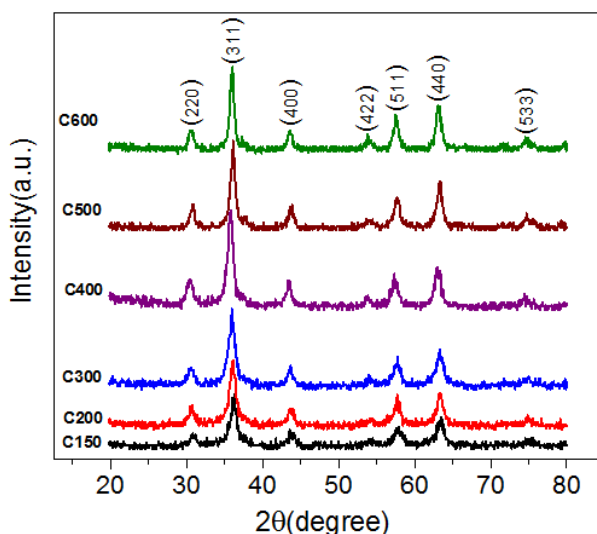
شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تطبیق زوایای پراش الگوی پراش پرتو ایکس نمونه C_{400} با کارت استاندارد با استفاده از نرم‌افزار X'pert.

۳. نتایج و بحث

الگوی به دست آمده از پراش پرتو ایکس توسط نرم‌افزار X'pert مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل بیانگر تشکیل فاز خالص ساختار اسپینلی فریت کبالت است. محل قله‌ها، شدت نسبی آنها و پهنایشان به خوبی با الگوی حاصل از پودر استاندارد فریت کبالت مطابقت می‌کند. برای مثال تطبیق مکان قله‌های براگ نمونه C_{400} با کارت استاندارد مربوط به فریت کبالت به شماره کارت (۲۲-۱۰۸۶) در شکل ۳ نشان داده شده

است. همان گونه که ملاحظه می‌شود قله‌های براگ به ازای زوایای $۳۰/۲$ ، $۳۵/۷$ ، $۳۷/۵$ ، $۴۳/۵$ ، $۵۳/۸$ ، $۵۷/۵$ ، $۶۲/۹$ و $۷۴/۶$ درجه رخ داده‌اند. این زوایا به ترتیب مربوط به بازتاب براگ از صفحات ۲۲۰ ، ۳۱۱ ، ۲۲۲ ، ۴۰۰ ، ۴۲۲ ، ۵۱۱ ، ۴۴۰ و ۵۳۳ ساختار اسپینلی هستند [۱۱].

الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه‌ها در شکل ۴ آورده شده است. همان گونه که دیده می‌شود با افزایش دمای بازپخت پهنای قله‌ها کاهش و شدت آنها افزایش یافته است.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) الگوی پراش پرتو ایکس نانوذرات فریت کبالت سنتز شده در دماهای مختلف.

جدول ۱. ثابت شبکه (a)، حجم سلول واحد (V) و چگالی (ρ) نمونه‌های فریت کبالت سنتز شده در دماهای مختلف.

نام نمونه	C150	C200	C300	C400	C500	C600
a (Å)	۸,۲۵	۸,۲۹	۸,۳۱	۸,۳۱	۸,۲۹	۸,۳۰
V (Å ^۳)	۵۶۰,۸۵	۵۷۰,۱۶	۵۷۳,۰۸	۵۷۳,۵۵	۵۶۹,۳۰	۵۷۲,۲۲
ρ (g/cm ^۳)	۵,۵۶	۵,۴۷	۵,۴۴	۵,۴۴	۵,۴۸	۵,۴۵

ارتفاع بیشینه و θ زاویه مربوط به قله براگ است. از آنجایی که ساختار اسپینلی فریت کبالت مکعبی است، برای به دست آوردن ثابت شبکه و حجم سلول واحد از روابط زیر استفاده شد:

$$a = d_{hkl} \left(h^2 + k^2 + l^2 \right)^{1/2}, \quad (3)$$

$$V = a^3, \quad (4)$$

در این روابط h, k و l شاخص‌های میلر و d_{hkl} فاصله صفحات بلوری است که از الگوی پراش پرتو ایکس به دست می‌آید. با توجه به این که در هر سلول واحد هشت واحد فرمول شیمیایی وجود دارد می‌توان چگالی نانوذرات تهیه شده را نیز طبق رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\rho = \frac{zM}{N_a V}, \quad (5)$$

در این رابطه M جرم مولکولی CoFe_2O_4 و N_a عدد آوگادرو است. نتایج محاسبات ویژگی‌های ساختاری نمونه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

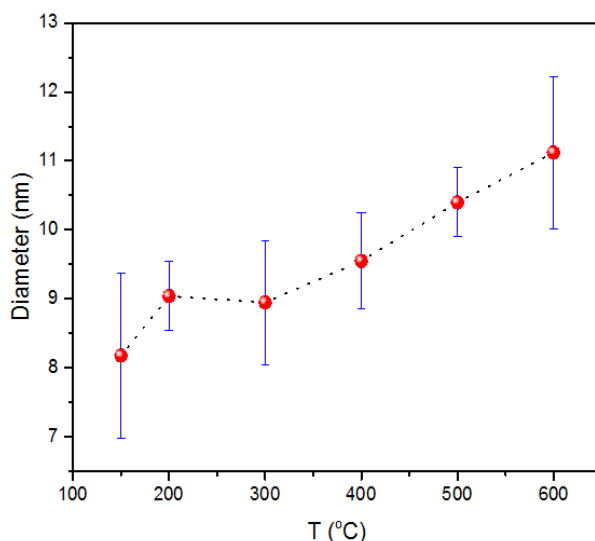
همان گونه که از جدول ۱ دیده می‌شود، در حالت کلی با

این مسئله بیانگر افزایش بلورینگی و افزایش اندازه نانوذرات است. چنین نتیجه‌ای در مطالعات بسیاری گزارش شده است. فابریس و همکاران نانوذرات فریت کبالت با روش لیزر تپی تهیه کردند و سپس پودر حاصل را در دماهای ۳۰۰، ۴۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس قرار دادند [۱۲]. نتایج آنها نشان داد که شدت قله‌های براگ با افزایش دما افزایش یافته است. آنها افزایش شدت قله‌ها را به افزایش بلورینگی با افزایش دمای بازپخت نسبت دادند. همچنین نتایج آنها نشان داد که با افزایش دمای بازپخت اندازه نانوذرات از ۴٫۳ نانومتر تا ۳۳٫۳ نانومتر رشد می‌کند و ثابت شبکه نیز با رسیدن دمای بازپخت به ۶۰۰ درجه به مقدار نمونه حجمی نزدیک‌تر می‌شود.

از طریق الگوی پراش پرتو ایکس و استفاده از رابطه شرر اندازه بلورک‌های نانوذرات فریت کبالت تهیه شده محاسبه شد:

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (2)$$

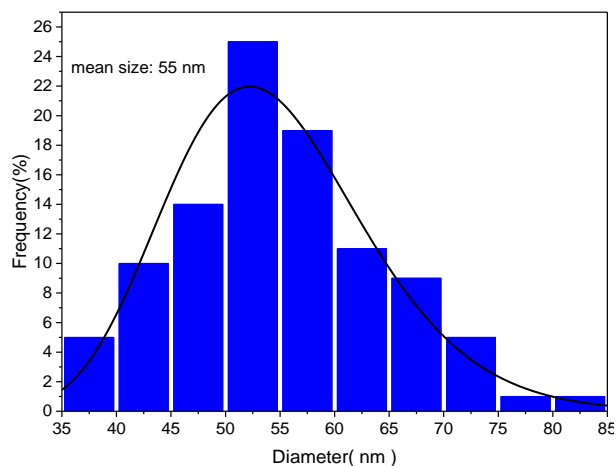
در این رابطه λ طول موج پرتو ایکس، β پهنای قله در نصف



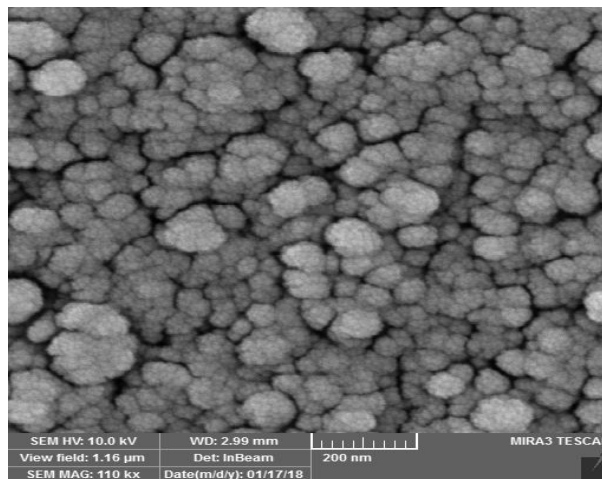
شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات اندازه بلورک‌ها در نانوذرات فریت کبالت با افزایش دمای پخت.

مطالعه آنها افزایش اندازه ذرات هم ناشی از اندازه دمای بازپخت و هم ناشی از زمان بازپخت است [۱۵ و ۱۶]. از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بررسی ریخت شناسی نمونه‌ها استفاده شد. به عنوان مثال تصویر مربوط به نمونه C_{400} در شکل ۶ آمده است. این تصویر نشان می‌دهد که نانوذرات فریت کبالت سنتز شده کروی بوده و کلوخه‌ای هستند. اندازه متوسط کلوخه‌ها با استفاده از نرم‌افزار دیجی مایزرا^۱ و برازش توزیع اندازه با تابع لگاریتمی نرمال به دست آمد (جدول ۲). نکته حائز اهمیت این است که اندازه‌های محاسبه شده با رابطه شرر و اندازه حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، باهم متفاوت هستند. اندازه‌های حاصل از تصاویر SEM بزرگ‌تر از مقادیر حاصل از رابطه شرر است. از آنجایی که تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نانوذرات است، به هم چسبیدن نانوذرات باعث می‌شود که ذرات بزرگ‌تر دیده شوند. در واقع اندازه‌های گزارش شده مربوط به چندین ذره است که به هم چسبیده‌اند و کلوخه‌هایی از نانوذرات تشکیل داده‌اند. افزایش دمای بازپخت به دلیل افزایش انرژی اتم‌های سطح و تمایل به کاهش سطح انرژی باعث به هم چسبیدن نانوذرات و افزایش کلوخگی آنها می‌شود. همان‌طور که از جدول ۲ ملاحظه می‌شود میزان

افزایش دمای پخت ثابت شبکه و چگالی نمونه‌ها تغییر چندانی نداشته است. در نمونه C_{150} احتمالاً به دلیل وجود ناکاملی‌ها و نواقص شبکه طول پیوندها کمی کوتاه‌تر از نمونه‌های دیگر است که این عامل منجر به کاهش ثابت شبکه در این نمونه شده است. بیشترین تأثیر دمای بازپخت بر اندازه ذرات است که یک روند افزایشی در اندازه نانوذرات با افزایش دمای بازپخت مشاهده می‌شود. شکل ۵ افزایش اندازه نانوذرات با افزایش دمای بازپخت را نشان می‌دهد. علت افزایش اندازه نانوذرات در اثر افزایش دمای بازپخت را می‌توان به این صورت توضیح داد که با افزایش دمای بازپخت انرژی اتم‌های موجود در سطح نانوذرات افزایش می‌یابد. چون نسبت اتم‌های موجود در سطح نسبت به اتم‌های داخلی در نانوذرات عدد بزرگی است، بنابراین با افزایش انرژی اتم‌های سطحی، انرژی نانوذرات افزایش یافته و سیستم ناپایدار می‌شود. تمایل به کاهش انرژی از طریق پیوند میان اتم‌های سطحی ذرات همسایه و افزایش اندازه ذرات و در نتیجه کاهش نسبت سطح به حجم، میسر می‌شود. همچنین افزایش دمای بازپخت باعث کاهش نقص‌های شبکه بلوری شده و با افزایش برهم‌کنش بین بلورک‌ها، باعث افزایش اندازه نانوذرات می‌شود [۱۳ و ۱۴]. ماز و همکاران افزایش اندازه ذرات در اثر افزایش دمای بازپخت را برای نانوذرات فریت کبالت و فریت نیکل در دو تحقیق مجزا مشاهده کردند. بر طبق



(ب)



(الف)

شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه C۴۰۰ و (ب) توزیع اندازه کلوخه‌های نانوذرات.

جدول ۲. اندازه متوسط کلوخه‌های نانوذرات فریت کبالت به دست آمده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی.

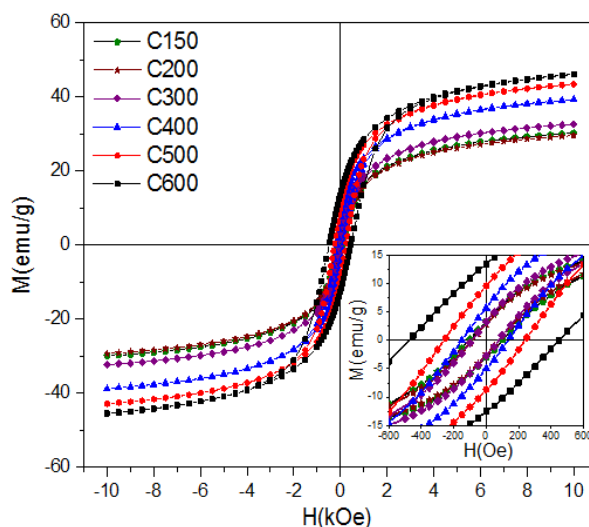
نام نمونه	C۱۵۰	C۲۰۰	C۳۰۰	C۴۰۰	C۵۰۰	C۶۰۰
اندازه متوسط کلوخه های نانوذرات	۲۷±۴	۳۰±۴	۳۴±۷	۵۵±۹	۶۹±۱۲	۸۷±۱۸

مواد مغناطیسی نیز با کاهش اندازه در حد نانو، به دلیل افزایش لایه سطحی کاهش می‌یابد. برای بررسی تغییرات ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات فریت کبالت سنتز شده در تحقیق حاضر، مغناطش نمونه‌ها با اعمال بیشینه میدان مغناطیسی یک تسلا توسط دستگاه VSM اندازه‌گیری شد. نمودار مغناطش نمونه‌های فریت کبالت که در شکل ۷ آمده، نشان می‌دهد که همه نمونه‌ها دارای پسماند مغناطیسی غیر صفر هستند یعنی هیچکدام در ناحیه ابرپارامغناطیس قرار نمی‌گیرند.

در جدول ۳ مقادیر میدان وادارندگی (H_c)، مغناطش اشباع (M_s) و مغناطش باقیمانده (M_r) و نسبت M_r/M_s برای نمونه‌ها آورده شده است. همان گونه که در جدول ۳ دیده می‌شود نمودار H_c بر حسب دمای بازپخت، یک روند افزایشی دارد، یعنی با افزایش اندازه نانوذرات میدان وادارندگی در حال افزایش است. نتیجه حاصل نشان دهنده این امر است که نانوذرات فریت کبالت تهیه شده تک حوزه هستند. در واقع بالای حد ابرپارامغناطیس، میدان وادارندگی با افزایش اندازه

کلوخه شدن نانوذرات با افزایش دمای بازپخت، بیشتر می‌شود. علت کلوخه‌ای بودن نانوذرات همچنین می‌تواند به دلیل مغناطیسی بودن ذرات و حضور برهم‌کنش‌های بین ذره‌ای باشد [۱۷]. کلوخه شدن نانوذرات تهیه شده در پژوهش‌های بسیاری گزارش شده است. اصلی بیکی و همکارانش در یک تحقیق نانوذرات $MnFe_2O_4$ را تهیه کردند تا اثر برهم‌کنش‌های دوقطبی-دوقطبی را بر ویژگی‌های مغناطیسی و ناهمسانگردی نانوذرات بررسی کنند [۱۷]. در این تحقیق تصاویر SEM کلوخه بودن نانوذرات را نشان داد. نویسندگان کلوخه بودن نانوذرات مغناطیسی را ناشی از برهم‌کنش‌های مغناطواستاتیک بین نانوذرات اعلام کردند.

ویژگی‌های مغناطیسی مواد نانوساختار مانند میدان وادارندگی و مغناطش اشباع، به شدت تحت تأثیر اندازه ذرات هستند. میدان وادارندگی دارای یک بیشینه در حد تک حوزه شدن است و برای اندازه‌های کوچک‌تر و بزرگ‌تر از این اندازه بحرانی یک روند کاهشی را نشان می‌دهد [۱۸]. مغناطش اشباع



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی‌های مغناطش نمونه‌های نانوذرات فریت کبالت.

جدول ۳. ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌های فریت کبالت.

نام نمونه	C۱۵۰	C۲۰۰	C۳۰۰	C۴۰۰	C۵۰۰	C۶۰۰
H _c (Oe)	۱۰۱	۸۱	۲۹,۴۳	۳۲,۴۸	۳۹,۰۴	۴۳,۱۳
M _s (emu/g)	۳۰,۰۷	۲۹,۴۳	۲۹,۴۳	۳۲,۴۸	۳۹,۰۴	۴۳,۱۳
M _r (emu/g)	۳,۳۶	۲,۸۹	۲,۸۹	۳,۲۷	۵,۵۷	۹,۶۶
M _r /M _s	۰,۱۱	۰,۱۰	۰,۱۰	۰,۰۸	۰,۱۴	۰,۲۲

و ادارینگی را مشاهده کردند. آنها رسیدن دیواره حوزه‌ها به مرز دانه‌ها و نیاز به انرژی بیشتر برای معکوس کردن جهت مغناطش را از عوامل پیشینه شدن میدان و ادارینگی در حد تک حوزه شدن دانستند [۲۰]. در ناحیه چند حوزگی رابطه میدان و ادارینگی و اندازه با رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۱]:

$$H_C = P_1 \frac{\sqrt{AK}}{J_s d} \quad (6)$$

در این رابطه P_1 ثابت تناسب، A ثابت تبدالی، K ثابت ناهمسانگردی، J_s چگالی انرژی تبدالی و d قطر ذرات است. همان طور که دیده می‌شود در این ناحیه میدان و ادارینگی با اندازه ذرات رابطه عکس دارد. برای ذرات خیلی ریز رابطه میدان و ادارینگی و اندازه ذرات به صورت زیر است [۲۲]:

$$H_C = P_1 \frac{K^* d^6}{J_s A} \quad (7)$$

که در آن P_1 ثابت تناسب است. طبق رابطه بالا میدان

نانوذرات مغناطیسی، افزایش یافته و در اندازه بحرانی تک حوزه شدن به بیشترین مقدار خود می‌رسد و سپس با افزایش اندازه ذرات، مقدار آن کاهش می‌یابد. علت این پدیده آن است که در حالت چند حوزه، فرایند دنبال کردن جهت میدان مغناطیسی خارجی از طریق جابه‌جایی دیواره حوزه‌ها است در حالی که در حالت تک حوزه، این فرایند با عوض شدن جهت‌گیری ابراسپین ذرات صورت می‌گیرد. چنین نتیجه‌ای در بسیاری از تحقیقات نیز به دست آمده است. یوکیو و همکاران در یک مطالعه، نانوذرات فریت کبالت را در دماهای مختلف سنتز کردند و نمونه‌هایی در اندازه‌های ۲,۵ تا ۴۷,۵ نانومتر به دست آوردند [۱۹]. در تحقیق آنها نمودار میدان و ادارینگی بالای حد ابرپارامغناطیس و زیر حد تک حوزه شدن یک روند افزایش با اندازه ذرات را نشان داد. در تحقیق دیگری مینگ ما و همکارانش وابستگی قوی بین اندازه نانوذرات و میدان

جدول ۴. مقادیر ضخامت لایه سطحی برای نمونه‌های فریت کبالت در تحقیق حاضر.

نام نمونه	C۱۵۰	C۲۰۰	C۳۰۰	C۴۰۰	C۵۰۰	C۶۰۰
ضخامت لایه سطحی بر حسب آنگستروم	۸،۵	۹،۵	۸،۸	۸،۱	۸،۰	۷،۹

و ادارندگی برای ذرات بسیار کوچک با افزایش اندازه ذرات افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار و ادارندگی در طول تبادل ذرات $d = \sqrt{\frac{A}{K}}$ به دست می‌آید که در پژوهش فوق برای فریت کبالت ۲۷ نانومتر اعلام شده است. تغییرات میدان و ادارندگی در اندازه‌های بالاتر و پایین‌تر از این اندازه روند کاهشی دارد و این نتیجه تجربی در توافق با روابط بالا است.

ماز و همکاران با بررسی تغییرات ویژگی‌های مغناطیسی بر حسب اندازه نانوذرات برای فریت نیکل و فریت کبالت در دو دمای ۳۰۰ و ۷۷ کلوین نتیجه مشابهی را به دست آوردند. آنها نشان دادند که پایین‌تر از اندازه بحرانی تک حوزه شدن، با کاهش اندازه ذرات میدان و ادارندگی کاهش می‌یابد [۱۵ و ۱۶]. همچنین در این تحقیق تغییرات مغناطش اشباع نانوذرات فریت کبالت و فریت نیکل بر حسب اندازه مورد بررسی قرار گرفت و کاهش مغناطش اشباع نمونه‌ها نسبت به مقدار نمونه حجمی با کاهش اندازه گزارش شده است.

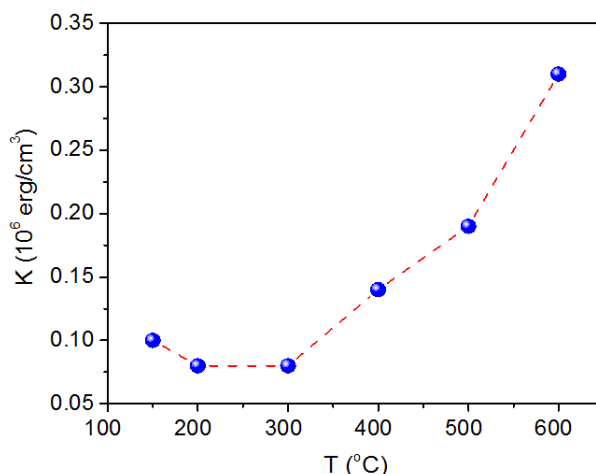
در تحقیق حاضر مغناطش اشباع همه نمونه‌ها کمتر از مقدار آن برای نمونه حجمی ۸۰ emu/g است و بیشترین مقدار آن برای نمونه C۶۰۰ برابر با ۴۵،۷۷ emu/g است. با کاهش دمای بازپخت و در نتیجه کاهش اندازه نانوذرات تا حد ۲۹،۴۳ emu/g کاهش می‌یابد. البته برای نمونه C۱۵۰ اندکی افزایش در مغناطش اشباع دیده می‌شود که می‌تواند به دلیل خطای دستگاه باشد. کوچک‌تر بودن مغناطش اشباع برای نانوذرات مغناطیسی نسبت به نمونه حجمی و همچنین روند کاهشی آن با کاهش اندازه می‌تواند ناشی از عواملی مانند افزایش ضخامت لایه سطحی با اسپین‌های بی‌نظم باشد که با کاهش اندازه نانوذرات اتفاق می‌افتد و سبب کاهش مغناطش اشباع می‌شود [۲۳]. همچنین کاهش مغناطش اشباع با کاهش اندازه نانوذرات به عواملی مانند تشکیل لایه مرده مغناطیسی در سطح، انحراف از توزیع کاتیونی نرمال و حضور آب جذب

شده در حین تهیه نمونه‌ها می‌تواند مربوط باشد [۲۴ و ۲۵]. کوداما و همکاران کاهش مغناطش اشباع با کاهش اندازه ذرات را گزارش کردند و آن را ناشی از حضور یک لایه خنثی با اسپین‌هایی با جهت‌گیری کاتوره‌ای در سطح ذرات، دانستند [۲۶]. کوریال و همکاران نشان دادند که یک لایه بی‌نظم روی سطح نانوذرات می‌تواند به عنوان یک لایه مرده مغناطیسی عمل کند [۲۷]. در یک مطالعه دیگر گزارش شد که وجود لایه مرده مغناطیسی می‌تواند به دلیل کج شدگی اسپین‌های سطحی، حضور لایه ناهمسانگرد، فقدان نظم بلند برد در لایه سطحی و وجود یون‌های آهن اشباع نشده در لایه سطحی ناشی از غیاب اکسیژن باشد [۲۸]. چن و همکاران ضخامت پوسته را با رابطه زیر محاسبه کردند [۲۹]:

$$M_s = M_{s(\text{bulk})}(1 - \epsilon t / d), \quad (8)$$

که در آن $M_{s(\text{bulk})}$ مغناطش اشباع نمونه حجمی، t ضخامت لایه بی‌نظم سطحی و d قطر نانوذرات است. سورندرا و همکاران با کمک این رابطه، ضخامت لایه سطحی را برای نانوذرات فریت کبالت در دمای ۳۰۰ و ۱۰ کلوین در حدود ۱۱ و ۶ آنگستروم به دست آوردند [۳۰]. آنها اعلام کردند که با افزودن پوشش سطحی اسید اولئیک، ضخامت لایه خنثی تا حد ۴ آنگستروم کاهش یافته و مغناطش اشباع افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی در خصوص کاهش اثر لایه مرده روی مغناطش اشباع نانوذرات فریت منگنز با استفاده از پوشش پلیمری تری اتیلن گلیکول گزارش شده است [۳۱]. در تحقیق حاضر ضخامت لایه سطحی برای نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۸)، مقادیر مغناطش اشباع نمونه‌ها، مغناطش اشباع نمونه حجمی (۸۰ emu/g) و اندازه بلورک‌های به دست آمده با رابطه شرر، محاسبه شد و نتایج در جدول ۴ آورده شده است.

همان‌گونه که از داده‌های این جدول قابل مشاهده است ضخامت لایه سطحی نمونه‌ها با افزایش اندازه ذرات، کاهش



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات ثابت ناهمسانگردی نمونه‌های فریت کبالت بر حسب دمای بازیخت.

ناهمسانگردی سطحی مربوط به ممان‌های مغناطیسی در سطح نانوذرات است و مقدار آن با افزایش اندازه ذرات کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر ناهمسانگردی حجمی مربوط به هسته منظم نانوذرات است و در محدوده ذرات تک حوزه، مقدار آن با افزایش اندازه ذرات افزایش می‌یابد. در نانوذرات سنتز شده در این تحقیق، با افزایش اندازه ذرات و تقابل میان افزایش ناهمسانگردی حجمی و کاهش ناهمسانگردی سطحی، در نهایت منجر به افزایش ناهمسانگردی کل شده است.

۳.۱. اندازه‌گیری‌های مربوط به گرمادرمانی مغناطیسی

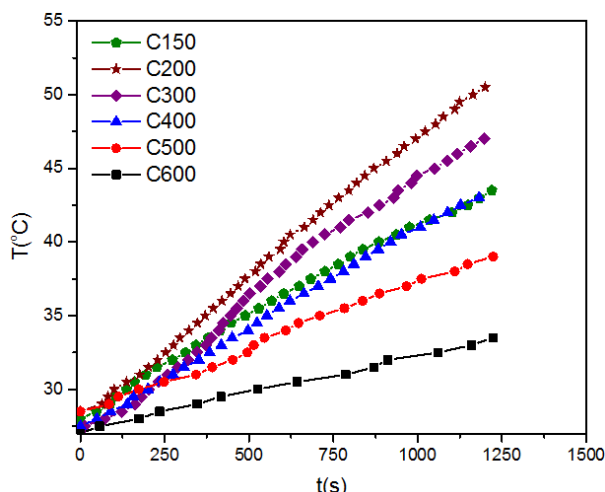
امروزه یکی از روش‌های بالقوه جایگزین برای از بین بردن توده‌های سرطانی، استفاده از گرمادرمانی مغناطیسی است که به خاطر کاهش اثرات جانبی مورد توجه محققین واقع شده است [۹، ۳۲ و ۳۳]. این روش بر مبنای افزایش دمای سلول‌های سرطانی تا بالاتر از دمای ۴۲ درجه سلسیوس توسط نانوذرات مغناطیسی با اعمال میدان مغناطیسی متناوب است. گرمای تولید شده توسط نانوذرات مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی متناوب، توسط سازوکارهای الف) جریان‌های گردابی، ب) اتلاف پسماند و پ) اتلاف واهلش صورت می‌گیرد. با شناخت دقیق این سازوکارها و عوامل تأثیرگذار بر آنها می‌توان شرایط بهینه برای گرمادرمانی مغناطیسی را تعیین کرد. توان اتلافی از جریان‌های گردابی، که به دلیل تغییرات میدان مغناطیسی و ایجاد جریان‌های

می‌یابد؛ به طوری که برای نمونه $C600$ با اندازه $11/12 \text{ nm}$ ، ضخامت لایه سطحی در حد $7/9$ آنگستروم به دست آمد. همان گونه که در جدول ۳ قابل مشاهده است، با کاهش دمای بازیخت و در نتیجه کاهش اندازه نانوذرات مقادیر مغناطش باقیمانده نمونه‌ها کاهش یافته است. چنین نتیجه‌ای با توجه به نزدیک شدن به اندازه بحرانی ابرپارامغناطیس شدن، قابل پیش‌بینی است. با نزدیک شدن به حد ابرپارامغناطیس افت و خیزهای گرمایی بر انرژی سد ناهمسانگردی غلبه کرده و نظم بلند برد بین نانوذرات از بین رفته و مقادیر میدان وادارندگی و مغناطش باقی‌مانده نانوذرات به صفر می‌رسد.

ناهمسانگردی مغناطیسی یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات است. اندازه ذرات می‌تواند روی مقدار ناهمسانگردی تأثیر بگذارد. برای محاسبه ثابت ناهمسانگردی از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۷]:

$$K = M_s \times H_a / 2, \quad (9)$$

در این رابطه H_a میدان ناهمسانگردی و برابر با میدانی است که در آن اختلاف بین شاخه مغناطش و مغناطش زدا کوچک‌تر از $3/3$ مغناطش اشباع باشد [۱۷]. ثابت ناهمسانگردی محاسبه شده برای نمونه‌های $C150$ تا $C600$ ، همان گونه که در شکل ۸ قابل مشاهده است، یک روند افزایشی دارد. بنابراین ثابت ناهمسانگردی با افزایش اندازه نانوذرات، در حال افزایش است. ثابت ناهمسانگردی شامل دو بخش سطحی و حجمی است.



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) رشد دمای تعلیق شامل پودر نانوذرات فریت کبالت.

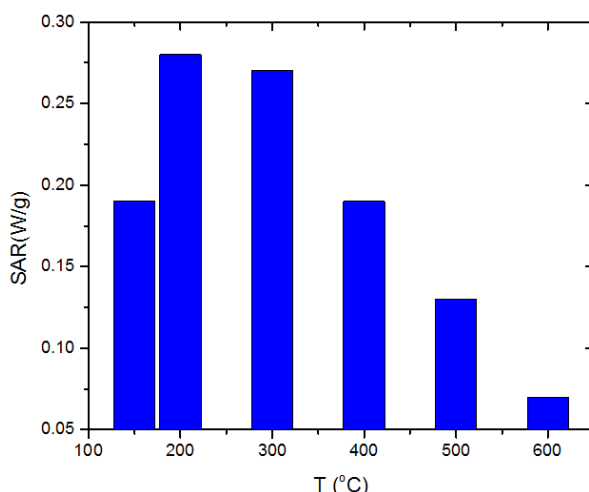
کند [۳۵].

گرمای تولید شده در نانوذرات تک حوزه ناشی از جهت‌گیری ابر اسپین ذره در جهت میدان متناوب خارجی است که توسط سازوکارهای واهلش نیل و واهلش براون صورت می‌گیرد. در واهلش نیل میدان مغناطیسی خارجی بر انرژی سد ناهمسانگردی غلبه کرده و باعث اتلاف انرژی می‌شود. با کاهش اندازه ذرات، زمان واهلش نیل کاهش یافته و واهلش نیل سازوکار غالب تغییر جهت ابر اسپین خواهد بود. اما در صورتی که جهت‌گیری ابر اسپین ذره در جهت میدان خارجی، توسط چرخش ذره صورت گیرد، این فرایند واهلش براونی است. در این سازوکار اصطکاک ناشی از گرانروی سیال باعث ایجاد گرما می‌شود [۳۶ و ۳۷].

در تحقیق حاضر، پودر نمونه‌های تهیه شده نانوذرات فریت کبالت به صورت تعلیق ۱۰ درصد آماده شدند و در دستگاه گرمکن القایی تحت میدان مغناطیسی متناوب با بسامد ۹۲kHz و دامنه میدان ۲۷ Oe قرار گرفتند. افزایش دمای تعلیق‌ها در مدت زمان ۲۰ دقیقه اندازه‌گیری و ثبت شد (شکل ۹). همان گونه که دیده می‌شود تعلیق پودر نانوذرات ۲۰۰C بیشترین رشد دما در حد ۲۲ درجه و سپس تعلیق شامل پودر نمونه ۳۰۰C در حد ۲۰ درجه را نشان دادند. کمترین رشد دما نیز مربوط به نمونه‌های ۵۰۰C و ۶۰۰C به ترتیب با ۱۰/۵ و ۶/۵ درجه به دست آمد. نرخ جذب ویژه

القایی صورت می‌گیرد، به دست می‌آید. با توجه به این مسئله می‌توان دریافت که در نانوذرات بسیار ریز به دلیل اندازه کوچک، مقدار اتلاف جریان‌های گردابی بسیار کم خواهد بود.

از طرفی در نانوذراتی که دارای پسماند مغناطیسی هستند، هنگام اعمال میدان مغناطیسی متناوب، به خاطر اتلاف پسماند، گرمایی تولید می‌شود که با میدان وادارندگی در ارتباط مستقیم قرار دارد. بنابراین میدان وادارندگی پارامتر کلیدی است که بر تولید گرما توسط نانوذرات از طریق اتلاف پسماند تأثیر می‌گذارد؛ که خود نیز تحت تأثیر تغییرات اندازه نانوذرات است. علاوه بر این، دامنه میدان اعمالی و بسامد آن نیز بر گرمای تولید شده تأثیرگذار است. در صورتی که دامنه میدان متناوب اعمالی از میدان وادارندگی نانوذرات کوچک‌تر باشد ($H_C < H_C$)، حلقه پسماند اشباع نشده شکل می‌گیرد و این امر می‌تواند تولید گرما را کاهش دهد [۳۴]. اگر دامنه میدان متناوب خارجی از میدان وادارندگی نانوذرات بزرگ‌تر باشد ($H_C > H_C$)، حلقه پسماند اشباع شده، مسئول تولید گرما خواهد بود. اما با کوچک شدن میدان وادارندگی و کاهش مساحت حلقه، توان تولیدی کاهش می‌یابد. برای ایجاد بالاترین مقدار ممکن بازده گرمایی، باید میدان وادارندگی تا حد ممکن به دامنه میدان متناوب خارجی نزدیک شود. در مورد استفاده برای درمان تومورهای سرطانی، برای کاهش اثرات جانبی نباید دامنه و بسامد میدان متناوب خارجی از ۲۰۰Oe و ۱۰۰ kHz تجاوز



شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار نرخ جذب ویژه (SAR) نانوذرات فریت کبالت بر حسب دمای بازپخت.

(SAR) نانوذرات با رابطه زیر محاسبه شد:

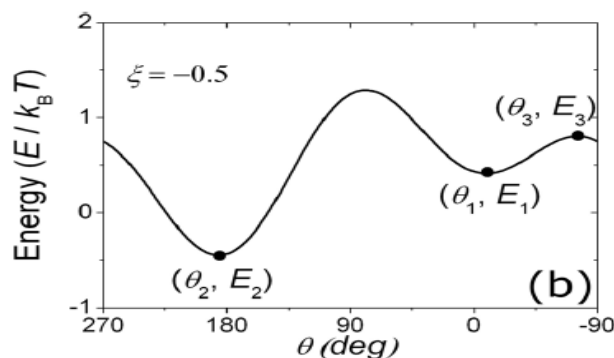
$$SAR = \left(\frac{m_w}{m_{np}} \right) C \left(\frac{dT}{dt} \right) \quad (10)$$

در این رابطه m_w جرم آب، m_{np} جرم نانوذرات، C گرمای ویژه آب و $\frac{dT}{dt}$ شیب ابتدای منحنی رشد دما بر حسب زمان است. نمودار SAR بر حسب دمای پخت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به داده‌های به دست آمده مشخص می‌شود که رشد دمای نانوذرات فریت کبالت و در نتیجه SAR مربوط به آنها به شدت تحت تأثیر اندازه نانوذرات و همچنین ویژگی‌های مغناطیسی آنها است؛ به طوری که با کاهش دمای بازپخت و کاهش اندازه نانوذرات، رشد دما افزایش می‌یابد. البته در مورد نمونه $C150$ با وجود کاهش اندازه آن، رشد دما بر خلاف روند قبلی شاهد روند کاهشی بوده است. افزایش رشد دما همچنین دارای رابطه معکوس با ویژگی‌های مغناطیسی مانند میدان وادارندگی H_c و مغناطش اشباع M_s است و با کاهش این پارامترها افزایش می‌یابد. پایین بودن رشد دمای نمونه $C150$ بر خلاف اندازه کوچک‌تر آن، از این نظر قابل توجیه است که میدان وادارندگی و مغناطش اشباع آن بزرگ‌تر از نمونه‌های $C200$ و $C300$ است. توجه به مقادیر SAR و میدان وادارندگی نشان می‌دهد که در نمونه‌های حاضر بین این دو کمیت رابطه عکس وجود دارد. کاهش رشد دما با افزایش میدان وادارندگی نشان دهنده آن است که سازو کار غالب تولید گرما در مورد

نانوذرات تهیه شده اتلاف پسماند نیست و سازو کار واهلش، مسئول گرمای تولید شده در این نمونه‌ها است.

باکواقلیدس و همکارانش با مطالعه اثر اندازه نانوذرات مگمایت روی بازده گرمادرمایی، یک نسبت معکوس بین اندازه نانوذرات و SAR برای نانوذرات ۱۰ تا ۱۳ نانومتری گزارش کردند. در این مطالعه SAR برای نانوذرات ۱۰ نانومتری یک بیشینه نشان می‌داد که با اندازه بحرانی برای واهلش نیل در توافق بود [۸]. آنها مشاهده کردند که مقدار SAR با افزایش اندازه ذرات تا ۱۳ nm کاهش یافته و پس از آن دوباره شروع به افزایش می‌کند. باکواقلیدس و همکارانش محدوده اندازه بررسی شده برای تولید گرما را به سه ناحیه تقسیم کردند: (۱) ناحیه زیر ۱۰ نانومتر که نانوذرات رفتار ابرپارامغناطیس دارند. (۲) ناحیه بین ۱۰ تا ۱۳ نانومتر که ناحیه انتقال از ابرپارامغناطیس به فرومغناطیس است و در این ناحیه اتلاف واهلش نیل مسئول تولید گرما است. (۳) ناحیه بالاتر از ۱۳ نانومتر که ناحیه فرومغناطیس است و در این ناحیه سازوکار غالب تولید گرما، اتلاف پسماند است.

در صورتی که اتلاف پسماند مسئول تولید گرما در مورد نانوذرات باشد، بین SAR و مساحت حلقه پسماند میدان AC رابطه مستقیم وجود دارد. برای محاسبه مساحت حلقه در حالتی که گشتاور مغناطیسی ذره در جهت میدان متناوب خارجی باشد، غلبه بر سد انرژی ناهمسانگردی در حالت $H=H_a$ رخ



شکل ۱۱. نمایش انرژی نانوذرات بر حسب زاویه بین مغناطش ذره و محور آسان در حضور میدان مغناطیسی [۳۸].

ثابت ناهمسانگردی باعث کاهش انرژی سد ناهمسانگردی شده و زمان واهلش را کاهش داده و باعث تولید بیشتر گرما می شود. در نتیجه همان طور که قبلاً نیز اشاره شد با کاهش ثابت ناهمسانگردی، SAR افزایش می یابد. به دلیل کلوخه بودن نانوذرات و در نتیجه سنگین شدن نانوذرات، واهلش براونی نمی تواند مسئول گرمای تولید شده باشد.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق نانوذرات CoFe_2O_4 با اندازه های مختلف به روش هم رسوبی تهیه شدند. الگوی پراش پرتو ایکس تشکیل فاز بلوری خالص اسپینلی را در نمونه های تهیه شده تأیید کرد. بزرگ بودن اندازه نانوذرات در تصاویر میکروسکوپی SEM نسبت به اندازه های به دست آمده از رابطه شرر به تشکیل کلوخه هایی از نانوذرات ربط داده شد. همچنین میزان کلوخه های بودن ذرات با افزایش دمای بازپخت افزایش یافت. منحنی های مغناطش نشان داد که همه نمونه ها در محدوده فرومغناطیس بوده و دارای پسماند هستند. اندازه میدان وادارندگی و مغناطش اشباع همه نانوذرات کمتر از نمونه حجمی بوده و روند کلی آن با افزایش دمای بازپخت و در نتیجه افزایش اندازه نانوذرات افزایشی است که نشان می دهد نانوذرات تهیه شده در ناحیه تک حوزه هستند. کم بودن مغناطش اشباع نمونه ها از مقدار حجمی آن به علت وجود لایه سطحی با اسپین های نامنظم در نانوذرات است. روند افزایشی ثابت ناهمسانگردی هم با افزایش اندازه نانوذرات قابل مشاهده است. اندازه گیری رشد دمای

می دهد. در این حالت حلقه پسماند مستطیلی می شود و مساحت حلقه به صورت زیر محاسبه می شود [۳۸]:

$$\begin{aligned} A &= 2H_c M_s = 2H_a M_s, \\ H_a &= 2K_{eff} / M_s, \\ A &= 4K_{eff}, \end{aligned} \quad (11)$$

در حالتی که جهت گشتاور مغناطیسی در حالت تصادفی باشد طبق مدل استونز-ولفارد، $H_c = 0.48H_a$ و $A = 2H_c M_s$ در نتیجه:

$$A = 1.92K_{eff}, \quad (12)$$

بنابراین اگر تلاف پسماند سازوکار غالب برای تولید گرما باشد، مقدار SAR با ثابت ناهمسانگردی رابطه مستقیم خواهد داشت؛ در صورتی که در تحقیق حاضر بین این دو کمیت رابطه عکس وجود دارد. همین روند عکس بین ثابت ناهمسانگردی و SAR نیز دیده می شود که با توجه به رابطه بین میدان وادارندگی و ثابت ناهمسانگردی قابل پیش بینی است. در توجیه این پدیده می توان گفت که در صورت اعمال میدان متناوب خارجی و نیز وجود انرژی سد ناهمسانگردی، انرژی ذره از رابطه زیر به دست می آید:

$$E = KV \sin^2 \theta - \mu B \cos(\alpha - \theta). \quad (13)$$

با رسم نمودار انرژی بر حسب θ ، طبق شکل ۱۱، دو نقطه تعادل دیده می شود. اگر دامنه میدان متناوب خارجی کمتر از آن میدان ناهمسانگردی باشد ($H_{\max} < H_c$)، طبق رابطه بالا باعث کاهش انرژی سد ناهمسانگردی شده و امکان افت و خیز دمایی مغناطش ذره بین دو حالت را پدید می آورد؛ که زمان آن با زمان واهلش نیل $\tau = \tau_0 \exp(\Delta E / k_B T)$ تعیین می شود. کاهش

شده است. و با توجه به کلوخه‌ای بودن ذرات، واهلش براون نقش مهمی در SAR ندارد و نقش عمده در بازده گرمادرمایی این نمونه‌ها بر عهده واهلش نیل است. واهلش نیل نیز به شدت تحت تأثیر اندازه نانوذرات است به طوری که اندازه بهینه نانوذرات فریت کبالت برای بیشترین بازده گرمایی در این تحقیق در حدود ۹ nm به دست آمد.

نانوذرات در میدان مغناطیسی بسامد رادیویی نشان داد که بیشترین مقدار SAR برای نمونه C_{200} به دست می‌آید و برای بقیه نمونه‌ها روند کاهشی دارد. با توجه به کمینه بودن میدان وادارندگی و ثابت ناهمسانگردی درنمونه C_{200} معلوم می‌شود که اتلاف پسماند نمی‌تواند تولید گرما در این نانوذرات را توضیح دهد و به جای آن سازوکار واهلش مسئول گرمای تولید

مراجع

17. B Aslibeiki, P Kameli, and H Salamati, *Journal of Applied Physics* **119** (2016) 063901.
18. B Aslibeiki, P Kameli, and H Salamati, *Iran. J. Phys. Res.* **16**, 4 (2017) 251.
۱۸. ب اصلی بیکی، پ کاملی، و هـ سلامتی، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۱۶، ۴ (۱۳۹۵) ۲۵۱.
19. Y Qu, H Yang, N Yang, Y Fan, H Zhu, G Zou, *Materials Letters* **60** (2006) 3548.
20. M Ma, Y Wu, J Zhou, Y Sun, Y Zhang, and N Gu, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **68** (2004) 33.
21. M Kersten, *Z Phys.* **44** (1943) 63.
22. G Herzer, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **112** (1992) 258.
23. B Aslibeiki, P Kameli, and M Ehsani, *Ceramics International* **42** (2016) 12789.
24. T Daou, J Greneche, G Pourroy, S Buathong, A Derory, C Ulhaq-Bouillet, B Donnio, D Guillon, and S Begin-Colin, *Chemistry of Materials* **20** (2008) 5869.
25. R Borges, W Guichard, J Lunney, J Coey, and F Ott, *Journal of Applied Physics* **89** (2001) 3868.
26. R H Kodama, A E Berkowitz, E McNiff Jr, and S Foner, *Physical Review Letters* **77** (1996) 394.
27. J Curiale, M Granada, H Troiani, R Sánchez, A Leyva, P Levy, and K Samwer, *Applied Physics Letters* **95** (2009) 043106.
28. M Grigorova, H Blythe, V Blaskov, V Rusanov, V Petkov, V Masheva, D Nihtianova, L M Martinez, J Munoz, and M Mikhov, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **183** (1998) 163.
29. J Chen, C Sorensen, K Klabunde, G Hadjipanayis, E Devlin, and A Kostikas, *Phys. Rev. B* **54** (1996) 9288.
30. M K Surendra, R Dutta, and M R Rao, *Materials Research Express* **1** (2014) 026107.
31. B Aslibeiki and P Kameli, *Iran. J. Phys. Res.* **17**, 3 (2017) 421.
۳۱. ب اصلی بیکی و پ کاملی، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۱۷، ۳ (۱۳۹۶) ۴۲۱.
1. C Sun, J S Lee, and M Zhang, *Adv. Drug. Deliv. Rev.* **60** (2008) 1252.
2. S Ebrahimisadr, B Aslibeiki, and R Asadi, *Physica C* **549** (2018) 119.
3. I Sharifi, H Shokrollahi, and S Amiri, *J. Magn. Magn. Mater.* **324** (2012) 903.
4. M Jeun, S Bae, A Tomitaka, Y Takemura, K H Park, S H Paek, and K W Chung, *Appl. Phys. Lett.* **95** (2009) 082501.
5. G Vallejo-Fernandez, Apos, and K Grady, *Appl. Phys. Lett.* **103** (2013) 142417.
6. R R Shah, T P Davis, A L Glover, D E Nikles, and C S Brazel, *J. Magn. Magn. Mater.* **387** (2015) 96.
7. Ö Çelik, M M Can, and T Firat, *Journal of Nanoparticle Research* **16** (2014) 2321.
8. K Bakoglidis, K Simeonidis, D Sakellari, G Stefanou, and M Angelakeris, *IEEE Trans Magn* **48** (2012) 1320.
9. B Aslibeiki, M H Ehsani, F Nasirzadeh, and M A Mohammadi, *Materials Research Express* **4** (2017) 075051.
10. B Mehdaoui, A Meffre, J Carrey, S Lachaize, L M Lacroix, M Gougeon, B Chaudret, and M Respaud, *Adv. Funct. Mater.* **21** (2011) 4573.
11. M Houshiar, A Abareshi, S Porzamani, and L Jamilpanah, *Iran. J. Phys. Res.* **18** (2018) 359.
۱۱. م هوشیار، ا ابارشی، س پورزمانی، و ل جمال پناه، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۸، ۲ (۱۳۹۷) ۳۵۹.
12. F Fabris, Y Xing, D Franceschini, D Sanchez, M Alzamora, and W Nunes, *Journal of Applied Physics* **122** (2017) 063901.
13. T Raming, A J Winnubst, C M van Kats, and A Philipse, *Journal of Colloid and Interface Science* **249** (2002) 346.
14. B Aslibeiki, G Varvaro, D Peddis, and P Kameli, *J Magn Magn Mater* **422** (2017) 7.
15. K Maaz, A Mumtaz, S Hasanain, and A Ceylan, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **308** (2007) 289.
16. K Maaz, S Karim, A Mumtaz, S Hasanain, J Liu, and J Duan, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **321** (2009) 1838.

- N Waldöfner, R Scholz, S Deger, P Wust, S Loening, and A Jordan, *International Journal of Hyperthermia*, **21** (2005) 637.
36. H Rudolf, D Silvio, M Robert, and Z Matthias, *J. Phys. Condens. Matter*. **18** (2006) S2919.
37. B Aslibeiki, P Kameli, and H Salamati, *Journal of Nanoparticle Research* **15** (2013) 1.
38. J Carrey, B Mehdaoui, and M Respaud, *Journal of Applied Physics* **109** (2011) 083921.
32. R D Raland, D Saikia, C Borgohain, and J P Borah, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** (2017) 325004.
33. E Myrovali, N Maniotis, A Makridis, A Terzopoulou, V Ntomprougkidis, K Simeonidis, D Sakellari, O Kalogirou, T Samaras, R Salikhov, M Spasova, M Farle, U Wiedwald, and M Angelakeris, *Scientific Reports* **6** (2016) 37934.
34. W Zhang, X Zuo, Y Niu, C Wu, S Wang, S Guan, and S R P Silva, *Nanoscale* **9** (2017) 13929.
35. M Johannsen, U Gneveckow, L Eckelt, A Feussner,