



بررسی اثر اندازه و دما بر خواص مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن با استفاده از معادله لانگوین

مهشید سالاری-دکتر کاظم نقوی*

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان

چکیده

این پژوهش به بررسی تأثیر اندازه و دما بر خواص مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن می‌پردازد. نانوذرات اکسید آهن به دلیل خواص منحصر به فردشان در زمینه‌های مختلف از جمله پزشکی، الکترونیک و محیط زیست کاربرد دارند. در این مطالعه، از مدل لانگوین برای تحلیل رفتار پارامغناطیسی نانوذرات در ابعاد و دماهای مختلف استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که با افزایش دما، مغناطش اشباع نانوذرات کاهش می‌یابد، که این پدیده به دلیل افزایش نوسانات حرارتی اسپین‌هاست. در مقابل، با افزایش اندازه ذرات، مغناطش اشباع نانوذرات افزایش می‌یابد، که ناشی از کاهش اثرات سطحی و تقویت تعاملات مبادله‌ای بین اسپین‌ها است. این یافته‌ها می‌توانند در طراحی و بهینه‌سازی نانوذرات اکسید آهن برای کاربردهای مختلف، به ویژه در فناوری‌های نوین، مفید واقع شوند.

واژه‌های کلیدی: نانوذره؛ اکسید آهن؛ مغناطش اشباع؛ معادله لانگوین؛ پارامغناطیس

ایمیل نویسنده مسئول: kazem.naghavi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۷

مقدمه

نانوذرات اکسید آهن به دلیل خواص مغناطیسی منحصر به فرد، زیست‌سازگاری و پایداری شیمیایی، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف از جمله تصویربرداری پزشکی، دارورسانی هدفمند و حسگرهای مغناطیسی پیدا کرده‌اند. خواص مغناطیسی این نانوذرات به شدت تحت تأثیر اندازه و دما قرار دارد و درک این وابستگی برای بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها در کاربردهای مختلف ضروری است. [۱]

این تحقیق به بررسی تأثیر اندازه و دما بر خواص مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن با استفاده از مدل لانگوین می‌پردازد. مدل لانگوین به عنوان یک مدل کلاسیک، توصیف مناسبی از رفتار مغناطیسی نانوذرات تک‌دامنه در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی، تأثیر تغییر اندازه و دما بر مغناطش اشباع، ضریب کوری و سایر پارامترهای مغناطیسی مورد بررسی قرار

می‌گیرد.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با کاهش اندازه نانوذرات، پدیده ابرپارامغناطیسی برجسته‌تر می‌شود و مغناطش اشباع کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش دما باعث کاهش مغناطش اشباع و افزایش ناپایداری مغناطیسی می‌شود. این یافته‌ها می‌تواند در طراحی و ساخت نانوذرات اکسید آهن با خواص

مغناطیسی مطلوب برای کاربردهای خاص مورد استفاده قرار گیرد.

۲- بخش تئوری

فناوری نانو به عنوان یک حوزه علمی نوین، به مطالعه، طراحی و کاربرد مواد در مقیاس نانو (۱ تا ۱۰۰ نانومتر) می‌پردازد. این فناوری به دلیل خواص منحصر به فرد مواد در این مقیاس، نظیر افزایش نسبت سطح به حجم و ظهور اثرات کوانتومی، به سرعت در حال گسترش است و تأثیرات عمیقی بر صنایع مختلف دارد. نانوذرات، به عنوان واحدهای سازنده بنیادین در فناوری نانو، از مواد مختلفی مانند فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و نیمه‌هادی‌ها ساخته می‌شوند و خواص آن‌ها به شدت وابسته به اندازه، شکل و ترکیب شیمیایی آن‌ها است. [۲]

نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4 و Fe_2O_3) به عنوان یکی از مهم‌ترین نانومواد، به دلیل خواص مغناطیسی، شیمیایی، زیست‌سازگاری و فراوانی خود، در زمینه‌های مختلفی از جمله پزشکی (دارورسانی هدفمند، تصویربرداری مغناطیسی، هایپرترمی)، محیط زیست (تصفیه آب و خاک، حذف آلاینده‌ها) و الکترونیک (ذخیره‌سازی داده‌ها، حسگرها) کاربرد دارند. [۳]

هدف از این تحقیق، بررسی و تحلیل تأثیر اندازه و دما بر خواص مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن با استفاده از معادله لانگوین است. این بررسی به منظور درک بهتر رفتار مغناطیسی این نانوذرات و بهینه‌سازی خواص آن‌ها برای کاربردهای مختلف انجام می‌شود.

۱-۲- معادله لانگوین

برای توصیف کمی حساسیت پارامغناطیس؛ از نظریه‌ی کلاسیک اصلاح‌شده‌ی لانگوین استفاده می‌شود [۴] که به دلیل انرژی برهمکنش یک گشتاور مغناطیسی با یک میدان مغناطیسی اعمال شده است. هر گشتاور دوقطبی اتمی منفرد دارای انرژی پتانسیل است که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید: [۵]

$$U_P = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu B \cos\theta \quad (1-2)$$

در مواد پارامغناطیس گشتاورها از طریق نیروهای مغناطیسی دو قطبی-دو قطبی با یکدیگر برهم کنش ندارند زیرا لحظات انقدر نزدیک نیستند که آن تعامل ضعیف قابل توجه باشد. بنابراین در همه‌ی دماها؛ ممان‌ها به صورت تصادفی در غیاب میدان مغناطیسی جهت گیری می‌شوند و مغناطش در جهت میدان قرار دارد. بنابراین؛ حساسیت $\chi = \vec{M}/\vec{H}$ مثبت است.

برای تعیین $X(T)$ برای یک پارامغناطیس انرژی کل مجموعه‌ای از گشتاورهای دوقطبی مغناطیسی اتمی را در واحد SI بیان می‌کنیم:

$$U_P^{TOT} = \sum_{atoms,i} -\mu_{atom}(\mu_0 H) \cos\theta_i \quad (2-2)$$

احتمال اشغال شدن هر حالت انرژی پتانسیل خاص توسط آمار بولتزمن به صورت:

$$P = C \exp\left(\frac{U_P}{KBT}\right) = C \exp\left(\frac{\mu_{atom}(\mu_0 H) \cos\theta}{KBT}\right) \quad (3-2)$$

ما فرض می‌کنیم که بزرگی اندازه گشتاور مغناطیسی یک لحظه ثابت است و فقط جهت آن تغییر می‌کند بنابراین؛ انتهای هر ممنتوم می‌تواند در هر نقطه از سطح کره‌ای قرار گیرد که شعاع آن برابر با بزرگی ممنتوم است. تعداد لحظاتی که گشتاور بین دو لحظه θ و $d\theta$ می‌سازد متناسب با مساحت یک حلقه به ضخامت rdr است که r برابر با شعاع کره است. این منطقه‌ای است که:

$$dA = 2\pi r \sin\theta (rdr) = \quad (4-2)$$

$$2\pi r^2 \sin\theta d\theta$$

در جایی که $P = P(u_p) = P(\theta)$ است. تعداد دوقطبی‌ها در $T=0K$ و $h=0$ برابر با

$$dn = 2\pi \sin\theta d\theta \quad (5-2)$$

از آنجایی که تمام زوایا به یک اندازه محتمل هستند، در T و H محدود:

$$dn = C \exp\left(\frac{\mu_{atom}(\mu_0 H) \cos\theta}{KBT}\right) 2\pi \sin\theta d\theta \quad (6-2)$$

تعداد دوقطبی‌ها از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$N = \int_0^{2\pi} dn \quad (7-2)$$

میانگین گشتاورهای مغناطیسی اندازه گیری شده از رابطه‌ی: [۶]

$$\begin{aligned} \langle \mu_{atom} \rangle &= \frac{\int_0^{2\pi} \mu \cos\theta d\theta}{\int_0^{2\pi} dn} \\ &= \frac{\int_0^{2\pi} C \exp\left(\frac{\mu_{atom}(\mu_0 H) \cos\theta}{KBT}\right) \mu \cos\theta 2\pi \sin\theta d\theta}{\int_0^{2\pi} C \exp\left(\frac{\mu_{atom}(\mu_0 H) \cos\theta}{KBT}\right) 2\pi \sin\theta d\theta} \end{aligned} \quad (8-2)$$

با جایگزینی $X = \frac{\mu_{atom}(\mu_0 H)}{KBT}$ در رابطه‌ی بالا داریم:



در دماهای بالا و میدان‌های مغناطیسی ضعیف،
تابع لانگوین را می‌توان به صورت تقریبی
به شکل زیر ساده کرد:

$$M = \frac{N\mu\chi}{3} = \frac{N\mu^2B}{3k_B T} \quad (15-2)$$

این تقریب، وابستگی خطی مغناطش به میدان مغناطیسی
و معکوس دما را نشان می‌دهد.

برای نانوذرات سوپرپارامغناطیس، رفتار مغناطیسی با
معادله لانگوین به خوبی توصیف می‌شود. در این مواد،
با اعمال میدان مغناطیسی، ممان‌های مغناطیسی نانوذرات
در جهت میدان هم‌راستا می‌شوند و مغناطش ایجاد
می‌شود. با حذف میدان، ممان‌ها به دلیل انرژی حرارتی،
به حالت تصادفی برمی‌گردند و مغناطش از بین می‌رود.

۳- تأثیر اندازه و دما بر خواص مغناطیسی

۳-۱- بررسی وابستگی مغناطش به دما در نانو ذرات
اکسید آهن

در معادله لانگوین وابستگی مغناطش (M) به دما از
فرمول زیر به دست می‌آید:

$$M = \frac{N\mu^2B}{3k_B T} \quad (1-3)$$

که μ ممتوم مغناطش بوده و از رابطه‌ی:

$$\mu = M_{Sat}V \quad (2-3)$$

M_{Sat} مغناطش اشباع ماده فرو مغناطیس است [۹] و
رابطه آن:

$$M_{Sat} = \frac{g\mu_B N_s}{V} \quad (3-3)$$

و

$$g = 2.00231930436$$

ثابت ژیرومغناطیس μ_B مگنتون بور بوده و مقدار آن از رابطه‌ی زیر به دست
می‌آید:

$$\begin{aligned} \langle \mu_{atom} \rangle &= \frac{\mu_{atom}}{\int_0^{2\pi} \exp(\cos\theta) \cos\theta \pi \sin\theta d\theta} \\ &= \frac{\mu_{atom}}{\int_0^{2\pi} \exp(\chi \cos\theta) \pi \sin\theta d\theta} \end{aligned} \quad (9-2)$$

$$\langle \mu_{atom} \rangle = \frac{1}{\coth(x)} = L(x)$$

که در آن $L(X)$ تابع لانگوین است. تابع لانگوین
دارای دو ویژگی جالب است که در شکل نشان داده
شده است: [۷و۸]

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{dL(x)}{dx} = \frac{1}{3} \quad \text{و} \quad \lim_{x \rightarrow \infty} L(x) = 1$$

تابع لانگوین را می‌توان به صورت یک سری تیلور
گسترش داد:

$$M = L(\chi) = \frac{\chi}{3} - \frac{\chi^3}{45} + \dots \quad (10-2)$$

$$N\mu \frac{\int_0^\pi e^{\mu B \cos \theta / k_B T} \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_0^\pi e^{\mu B \cos \theta / k_B T} \sin \theta d\theta}$$

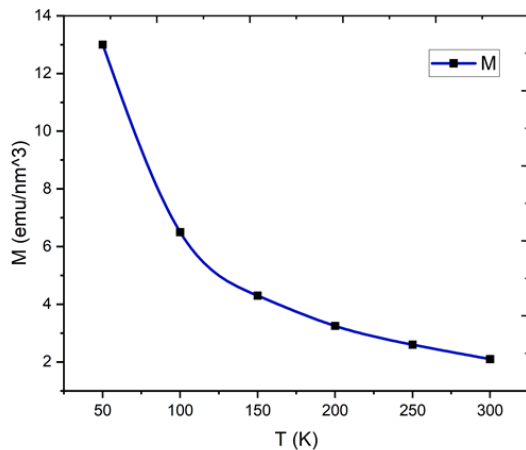
$$\begin{aligned} M &= N\mu \left[\coth\left(\frac{\mu B}{k_B T}\right) - \frac{k_B T}{\mu B} \right] \\ &= N\mu L(x) \end{aligned} \quad (11-2)$$

$$M_s = N_m \mu_{atom} \quad (12-2)$$

$$\frac{M}{M_s} = L(x) \quad (13-2)$$

$$M = M_s \left(\frac{\mu_0 \mu_{atom}}{3k_B T} \right) \frac{H}{T} \quad (14-2)$$

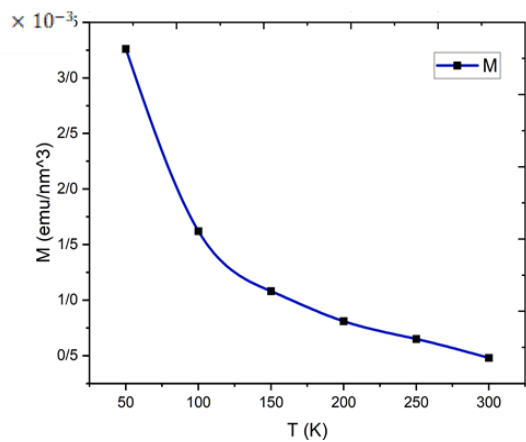
معادله لانگوین به عنوان یک مدل ریاضی برای توصیف
رفتار مغناطیسی نانوذرات سوپرپارامغناطیس استفاده
می‌شود. این معادله رابطه بین مغناطش، میدان مغناطیسی،
دما و ممان مغناطیسی ذرات را بیان می‌کند.



نمودار (۳-۱): نمودار مغناطش برحسب دما برای

نانو ذرات اکسید آهن با $N=50$

و نمودار مغناطش برای $N=100$ اذره به صورت زیر به دست می آید:



نمودار (۳-۲): مغناطش برحسب دما برای نانو ذرات

اکسید آهن با $N=100$

× 10⁻³

با توجه به نمودارهای فوق درمی یابیم که مغناطش نانو ذرات اکسید آهن با افزایش دما کاهش می یابد. اگرچه با افزایش تعداد نانو ذرات مغناطش اشباع افزایش می یابد. با این حال روند رو به کاهش مغناطش با افزایش دما همچنان ادامه پیدا می کند. نمودارهای تئوری رسم شده با نمودارهای تجربی که از انجام آزمایش بر روی مواد

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2me} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 0.685 \times 10^{-15}}{2 \times 9.1 \times 10^{-31}} =$$

$$5.78 \times 10^{-5} \frac{ev}{T} = 5.78 \times 10^{-2} emu$$

(۳-۴)

در نتیجه:

$$M_{Sat} = \frac{2.0023 \times 5.78 \times 10^{-2} \times N \times 1}{V} = 11.57 \times 10^{-2} \frac{N}{V} \left(\frac{emu}{nm^3} \right) \quad (۳-۵)$$

با جایگذاری مقادیر بالا در معادله (۳-۱) داریم:

$$M(T) = \frac{(11.57 \times 10^{-2} \frac{N}{V})^2 \times V^2 B}{3 \times 8.617 \times 10^{-5} T} \quad (۳-۶)$$

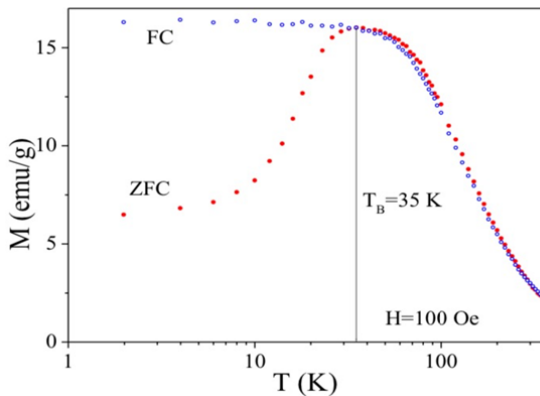
با جایگذاری $B = \mu_0 H$ در معادله بالا که در آن μ_0 ثابت گذردهی مغناطیسی خلأ بوده رابطهی مغناطش با دما برای نانو ذرات اکسید آهن به صورت زیر به دست می آید:

$$M(T) = \frac{6.50 \times 10^{-5} N^2 H}{T} \quad (۳-۷)$$

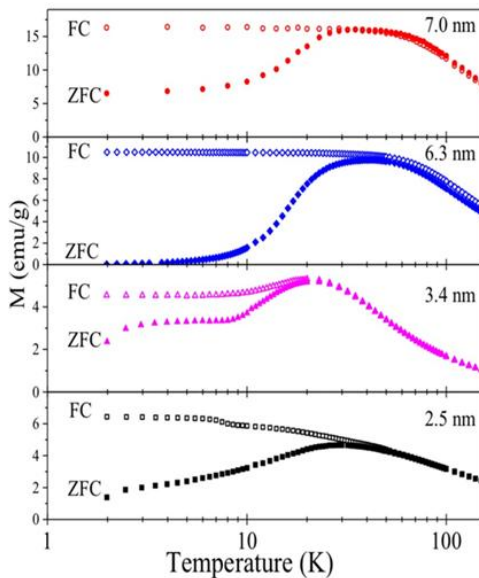
اگر تعداد ذرات را به طور مثال ۵۰ نانو ذره فرض شود ($N=50$) رابطهی مغناطش برحسب دما به صورت زیر به دست می آید:

$$M(T) = \frac{16.25 \times 10^{-2} H}{T} \quad (۳-۸)$$

نمودار مغناطش برحسب دما مطابق شکل زیر می شود:



نمودار تجربی (۳-۲): نمودار مغناطش برحسب دما برای نانوذره ماگنیت با اندازه 7nm [۱۱]



نمودار تجربی (۳-۳): نمودار مغناطش برحسب دما برای

سایز مختلف ذرات نانو اکسید آهن [۱۲]

در نمودار شکل های (۳-۲) و (۳-۳) واحد مغناطش (emu/g) است زیرا مقدار ماده مورد آزمایش در آزمایشگاه قابل اندازه گیری است.

همان طور که مشاهده کردیم مغناطش اشباع برای تعداد ۵۰ نانوذره برابر با $0/032 \text{ (emu/nm}^{-3}\text{)}$ می باشد و با تعداد ۱۰۰۰ نانوذره مقدار مغناطش اشباع $0.4 \text{ (emu/nm}^{-3}\text{)}$ می باشد.

در نمودار (۴-۶) که منحنی M-T نانو ذرات اکسید آهن با اندازه های متفاوت را نشان می دهد. با توجه به

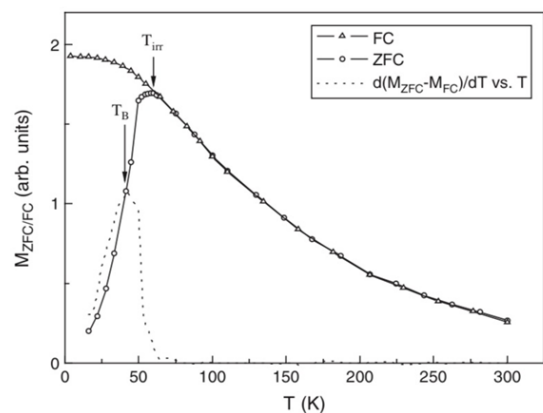
پارامغناطیس مختلف صورت گرفته است؛ به خوبی مطابقت دارند. این رفتار را می توان به دلایل زیر توجیه کرد:

لرزش گرمایی اتم ها: با افزایش دما، اتم های تشکیل دهنده نانوذره انرژی جنبشی بیشتری پیدا کرده و شروع به لرزش می کنند. این لرزش ها باعث می شود که گشتاورهای مغناطیسی اتم ها از حالت آرایش منظم خارج شده و در نتیجه مغناطش کاهش می یابد.

کاهش انرژی تبدیلی: انرژی تبدیلی، نیرویی است که باعث می شود گشتاورهای مغناطیسی اتم ها در یک جهت قرار گیرند. با افزایش دما، این انرژی کاهش می یابد و در نتیجه گشتاورهای مغناطیسی تمایل بیشتری به بی نظمی پیدا می کنند.

ایجاد گشتاورهای مغناطیسی القایی خلاف جهت: افزایش دما باعث ایجاد گشتاورهای مغناطیسی القایی در جهت مخالف گشتاورهای مغناطیسی اصلی می شود. این گشتاورهای القایی مغناطیسی، مغناطش کلی ماده را کاهش می دهند.

نمونه ای از نمودارهای تجربی به دست آمده توسط آزمایش مطابق شکل زیر است:

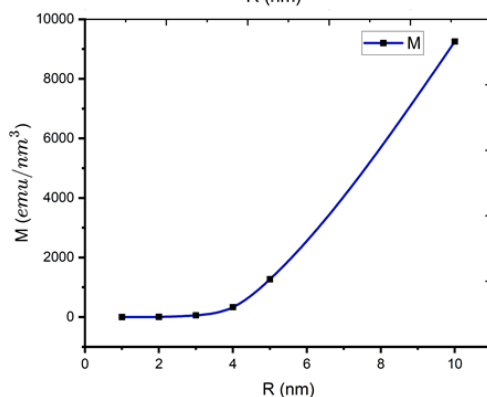
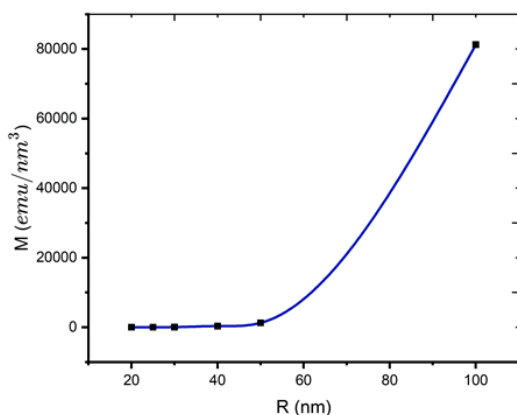


نمودار تجربی (۳-۱): نمودار مغناطش برحسب دما برای نمونه ای از ذرات نیکل و کبالت که به صورت تجربی به دست آمده است [۱۰]

برای دمای $T=200K$ و $R'=0.126nm$ رابطه‌ی
فوق را به صورت زیر داریم:

$$M = 8.125 \times 10^{-2} R^6 H \quad (10-3)$$

سپس نمودار مغناطش برحسب سایز (شعاع) نانو ذرات
اکسید آهن به صورت زیر درمی آید:



نمودار تئوری (۳-۳): نمودار مغناطش برحسب سایز نانو
ذرات اکسید آهن در دمای 200k

با توجه به نمودارهای شکل (۳-۳) کاهش اندازه
نانوذرات به ابعاد نانومتری باعث افزایش نسبت سطح به
حجم می شود که می تواند منجر به تغییر در خواص
مغناطیسی شود. به عنوان مثال، مغناطش اشباع نانوذرات
با افزایش اندازه افزایش می یابد، زیرا اثرات سطحی
کاهش می یابد و تعاملات مبادله‌ای بین اسپین‌های
مغناطیسی افزایش می یابد. همچنین، اندازه ذرات بر
دمای بلوکه شدن (Blocking Temperature) تأثیر

نمودار می توان دمای مسدودکننده T_B مواد پارامغناطیس
را از تقاطع میدان افقی با منحنی به دست آورد. بنابراین؛
مقادیر T_B به ترتیب ۲۹،۲۱،۴۲،۳۵ به ترتیب برای نانو
ذرات اکسید آهن با اندازه‌های ۲.۵؛۳.۴؛۶.۳؛۷ نانومتر
مشاهده می شود. در نهایت نشان داده شده است که
میانگین گشتاورهای مغناطیس به ازای هر ذره تعیین شده
با استفاده از تابع لانگوین اصلاح شده که توزیع در
گشتاور مغناطیسی ذره را نادیده می گیرد؛ نتایجی را به
دست می دهد که با در نظر گرفتن توزیع گشتاورهای
مغناطیسی به دست می آید.

۳-۲- بررسی وابستگی مغناطش به سایز در نانو ذرات
اکسید آهن

در این بخش وابستگی مغناطش به اندازه و سایز نانو
ذرات اکسید آهن بررسی می شود و همچنین نمودار
مغناطش برحسب اندازه نانو ذرات به صورت تئوری رسم
و مورد بررسی قرار می گیرد.

بدین منظور در فرمول مغناطش به جای N از سایز نانو
ذرات استفاده می شود.

در صورتی که نانو ذرات اکسید آهن کروی فرض شوند
و شعاع یک نانوذره R و نانوذره اکسید آهن دارای N
اتم با شعاع R' باشد. آنگاه تعداد اکسید آهن از رابطه‌ی
زیر به دست می آید:

$$N = \frac{R^3}{R'^3} \quad (8-3)$$

و برای اتم اکسید شعاع به صورت زیر است:

$$R' = 126pm = 0.126nm$$

رابطه مغناطش و شعاع به صورت زیر است:

$$M = \frac{6.50 \times 10^{-5} \left(\frac{R^3}{R'^3}\right)^2 H \text{ emu}}{T \text{ nm}^3} \quad (9-3)$$

نمودار (۳-۵): نمودار تجربی شدت میدان مغناطیسی بر حسب سایز در دمای ۳۰۰ کلوین [۱۴] با بررسی نمودارهای فوق مشاهده می‌شود مقدار مغناطش از روی نمودار با محاسبات انجام شده از روی معادله لانگوین برابر است و نمودارها وابستگی مغناطش به سایز و دما را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودارهای تئوری و تجربی مشاهده شد مغناطش نانو ذرات اکسید آهن در دماهای مختلف با افزایش سایز افزایش و با کاهش سایز کاهش می‌یابد.

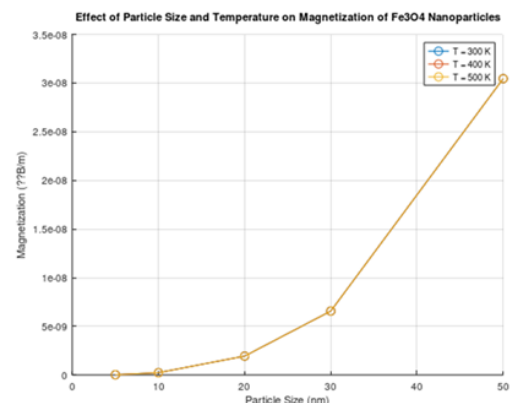
۴- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، تأثیر اندازه و دما بر خواص مغناطیسی نانو ذرات اکسید آهن با استفاده از معادله لانگوین مورد بررسی دقیق قرار گرفت. نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده وابستگی‌های پیچیده‌ای است که بین اندازه نانو ذرات، دما و خواص مغناطیسی این مواد وجود دارد. تأثیر اندازه: مشاهده شد که با کاهش اندازه نانو ذرات، مغناطش اشباع کاهش می‌یابد. این رفتار به دلیل افزایش اثرات سطحی، کاهش تعداد اتم‌های مرتب شده مغناطیسی در هسته و افزایش عدم نظم اسپینی در نانو ذرات کوچک‌تر است. این یافته‌ها با مدل‌سازی مبتنی بر معادله لانگوین همخوانی داشته و بر اهمیت کنترل دقیق اندازه ذرات در کاربردهای مغناطیسی تأکید دارد. تأثیر دما: افزایش دما منجر به کاهش مغناطش اشباع شد. این پدیده به علت افزایش انرژی حرارتی و اختلال در آرایش مغناطیسی اتم‌ها رخ می‌دهد، که در نهایت منجر به کاهش ممان‌های مغناطیسی می‌شود. این نتایج برای کاربردهایی که نانو ذرات در شرایط دمایی متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرند، اهمیت ویژه‌ای دارد.

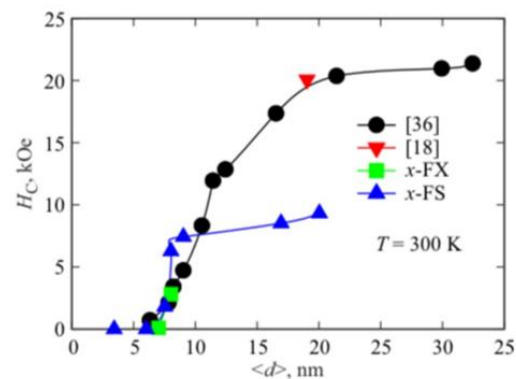
مدل لانگوین: معادله لانگوین به عنوان یک ابزار مدل‌سازی مناسب، رفتار مغناطیسی نانو ذرات اکسید

می‌گذارد. دمای بلوکه شدن دمایی است که در آن نانو ذرات از حالت سوپرپارامغناطیس به حالت فرومغناطیس تبدیل می‌شوند. همچنین درمی‌یابیم که با افزایش سایز نانو ذرات اکسید آهن در دماهای مختلف مغناطش نیز افزایش می‌یابد. در ابتدا با افزایش شعاع، مغناطش نیز افزایش می‌یابد اما با سرعت کمتر. فراتر از یک شعاع بحرانی خاص، مغناطش با سرعت بیشتری شروع به افزایش می‌کند. این نشان می‌دهد که با افزایش اندازه، ماده دچار یک انتقال فاز یا تغییر قابل توجهی در خواص مغناطیسی خود می‌شود.

نمودارهای تجربی مغناطش بر حسب سایز نانو ذرات به دست آمده به شرح زیر است:



نمودار (۳-۴): نمودار تجربی مغناطش بر حسب سایز نانو ذرات اکسید آهن [۱۳]



[6] Kittel, C., & McEuen, P. (2018). *Introduction to solid state physics*. John Wiley & Sons.

[7] Engelmann, U. M., Shalaby, A., Shasha, C., Krishnan, K. M., & Krause, H. J. (2021). Comparative modeling of frequency mixing measurements of magnetic nanoparticles using micromagnetic simulations and Langevin theory. *Nanomaterials*, 11(5), 1257.

[8] Gossuin, Y., Gillis, P., Hocq, A., Vuong, Q. L., & Roch, A. (2009). Magnetic resonance relaxation properties of superparamagnetic particles. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 1(3), 299-310.

[9] Pisane, K. (2015). *Effects of size and size distribution on the magnetic properties of maghemite nanoparticles and iron-platinum core-shell nanoparticles*. West Virginia University.

[10] Knobel, M., Nunes, W. C., Winnischofer, H., Rocha, T. C. R., Socolovsky, L. M., Mayorga, C. L., & Zanchet, D. (2007). Effects of magnetic interparticle coupling on the blocking temperature of ferromagnetic nanoparticle arrays. *Journal of non-crystalline solids*, 353(8-10), 743-747.

[11] Chantrell, R. W., El-Hilo, M., & O'Grady, K. (1991). Spin-glass behavior in a fine particle system. *IEEE transactions on magnetics*, 27(4), 3570-3578.

[12] Pisane, K. (2015). *Effects of size and size distribution on the magnetic properties of maghemite nanoparticles and iron-*

آهن را به خوبی توصیف کرد. این مدل امکان پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار مغناطیسی نانوذرات در شرایط مختلف را فراهم می‌کند.

کاربردهای آتی: این تحقیق می‌تواند به بهینه‌سازی نانوذرات اکسید آهن برای کاربردهایی مانند دارورسانی، هایپرترمی درمانی، سنسورها و ذخیره‌سازی داده‌ها کمک کند. تحقیقات آتی باید بر بررسی ترکیب شیمیایی، ساختار نانوذرات و همچنین بررسی اثرات محیطی بر خواص مغناطیسی متمرکز شوند.

به طور کلی، این پژوهش، درک ما از رفتار مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن را ارتقا داده و زمینه‌ساز توسعه فناوری‌های نوین در این حوزه شده است.

۵. منابع

[1] Gupta, A. K., & Gupta, M. (2005). Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. *biomaterials*, 26(18), 3995-4021.

[2] Roco, M. C. (2003). Nanotechnology: convergence with modern biology and medicine. *Current opinion in biotechnology*, 14(3), 337-346.

[3] Bai, Y., et al. (2014). Iron oxide nanoparticles: Synthesis, characterization, and applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 2(32), 5103-5112.

[4] Langevin, P. (1908). On the theory of brownian motion. *CR Acad Sci (Paris)*, 146, 530.

[5] Knobel, M., Nunes, W. C., Socolovsky, L. M., De Biasi, E., Vargas, J. M., & Denardin, J. C. (2008). Superparamagnetism and other magnetic features in granular materials: a review on ideal and real systems. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 8(6), 2836-2857.



Investigation of the Effect of Size and Temperature on the Magnetic Properties of Iron Oxide Nanoparticles Using the Langevin Equation

Mahshid Salari, Kazem Naqvi*

Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Islamic Azad University, Kerman, Iran.

*kazem.naghavi@gmail.com

Abstract

This study investigates the effect of particle size and temperature on the magnetic properties of iron oxide nanoparticles. Iron oxide nanoparticles have attracted significant attention due to their unique properties and wide applications in various fields, including medicine, electronics, and environmental technologies. In this research, the Langevin model was used to analyze the paramagnetic behavior of nanoparticles at different sizes and temperatures. The results of numerical simulations show that increasing temperature leads to a decrease in the saturation magnetization of the nanoparticles. This phenomenon is attributed to the increase in thermal fluctuations of spins. In contrast, increasing particle size results in an increase in saturation magnetization, which is mainly due to the reduction of surface effects and the strengthening of exchange interactions between spins. These findings can be useful for the design and optimization of iron oxide nanoparticles for various applications, particularly in emerging technologies.

Keywords: Nanoparticle; Iron Oxide; Saturation Magnetization; Langevin Equation; Paramagnetism.