

«مقاله پژوهشی»

## شناسایی تأثیر پارامترهای فیزیکی مدل جایلز-آرتون بر روی حلقه هیستریزیس به روش اجزاء محدود

مریم روزبهی<sup>1\*</sup>، علی کاظم پور<sup>2</sup>، سمیه پیری<sup>3</sup>

1. استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

2. دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

3. دانشجوی ارشد، فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: 1401/08/05 تاریخ پذیرش: 1401/09/15

## Identifying the Effect of the Physical Parameters of the Jiles-Atherton Model on the Hysteresis Loop Using the Finite Element Method

M. Rouzbehi<sup>\*1</sup>, A. Kazempour<sup>2</sup>, S. Piri<sup>3</sup>

1. Assistant Professor, Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

3. MSc Student, Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

Received: 2022/10/27 Accepted: 2022/12/06

### Abstract

Jiles-Atherton model equations was used in many ways to describe the hysteresis loops of ferromagnetic, ferroelectric and piezoelectric materials. The main advantage of this model is establishing a connection between the hysteresis loop and the physical parameters of magnetic materials. In this study, the magnetic hysteresis curve was presented by using the finite element method and the COMSOL code. The Jiles-Atherton model equations was used to simulate the hysteresis loop, magnetic flux density and magnetic field components in the software. The purpose of this study, while examining the Jiles-Atherton model equations, is to know the effect of changes in the physical parameters of the magnetic material on the magnetic hysteresis curve. The obtained results indicate the changes in the area of the hysteresis loop, the characteristic values of this loop, the changes in the magnetic flux density and the components of the magnetic field by increasing or decreasing the parameters of the Jiles-Atherton model. The decrease in the area of the hysteresis loop and the decrease in the characteristic values of this loop is a reason for changing the behavior of the ferromagnetic material towards soft magnetization and reducing the interaction of the magnetic domains of the ferromagnetic material and vice versa.

### Keywords

Jiles-Atherton Model, Ferromagnetic, Hysteresis Loop, Comsol

### چکیده

معادلات مدل جایلز-آرتون به طور گسترده‌ای در توصیف حلقه‌های هیستریزیس مواد فرومغناطیس، فروالکتریک و پیزوالکتریک استفاده شده است. مزیت اصلی این مدل ایجاد ارتباط بین حلقه هیستریزیس با پارامترهای فیزیکی مواد مغناطیسی است. در این مطالعه منحنی پسماند مغناطیسی با استفاده از روش المان محدود و توسط کد کامسول ارائه شده است. معادلات مدل جایلز-آرتون برای شبیه‌سازی حلقه پسماند، چگالی شار مغناطیسی و مؤلفه‌های میدان مغناطیسی در نرم‌افزار به کار رفته است. هدف از این مطالعه ضمن بررسی معادلات مدل جایلز-آرتون، شناخت اثر تغییرات پارامترهای فیزیکی ماده مغناطیسی بر روی منحنی پسماند مغناطیسی است. نتایج به‌دست آمده، حاکی از تغییرات مساحت حلقه هیستریزیس، مقادیر مشخصه این حلقه، تغییرات چگالی شار مغناطیسی و مؤلفه‌های میدان مغناطیسی با افزایش یا کاهش پارامترهای مدل جایلز-آرتون است. کاهش مساحت حلقه پسماند و کاهش مقادیر مشخصه این حلقه، دلیلی بر تغییر رفتار ماده فرومغناطیس به سمت مغناطیس شدگی نرم و کاهش برهم‌کنش حوزه‌های مغناطیسی ماده فرومغناطیس و بلعکس است.

### واژه‌های کلیدی

مدل جایلز-آرتون، فرومغناطیس، حلقه پسماند، کامسول

**مقدمه**

امروزه مهندسی رفتار حلقه پسماند مواد فرومغناطیس در حضور میدان مغناطیسی، از آنجا که می‌تواند سبب ایجاد تغییر خواص مواد شود، بسیار حائز اهمیت است. پدیده‌های هیستریزس در حوزه‌های مختلف فناوری رایج هستند و در نتیجه علاقه فزاینده‌ای به مدل‌سازی فرآیندهای مغناطیسی ایجاد می‌کنند. جایلز و آرتون در سال 1984 مدلی را برای توصیف مغناطش مواد مغناطیسی نرم پیشنهاد کردند [1]. بین مدل‌های توصیف کننده حلقه‌های هیستریزس، مزیت اصلی این مدل، تفسیر ارتباط پارامترهای فیزیکی مواد فرومغناطیس با حلقه پسماند است و برای محاسبه حلقه‌های پسماند جزئی و بزرگ نیز قابل استفاده است. مدل اصلی جایلز-آرتون فقط برای مواد همسانگرد مناسب است ولیکن بسطی از این مدل ارائه شده است که قادر به مدل‌سازی مواد ناهمسانگرد هم هست [2].

**معادلات مدل جایلز-آرتون**

دو مکانیزم در تشریح پدیده هیستریزس در مواد فرومغناطیس ارائه می‌شوند: 1. دوران و چرخش مغناطش در مواد تک حوزه‌ای یا چند حوزه‌ای مغناطیسی در جهت میدان اعمال شده. 2. تغییر اندازه یا تعداد حوزه‌های مغناطیسی با حرکت دیواره‌های مغناطیسی بسیار نازکی که در فاصله بین حوزه‌ها قرار دارند، تحت تأثیر اعمال میدان مغناطیسی. بنا به این مفهوم، مغناطیس کنندگی در مدل هیستریزس جایلز-آرتون از دو قسمت معکوس‌پذیر و معکوس‌ناپذیر تشکیل می‌شود. حرکت دیواره‌های حوزه‌های مغناطیسی از محل‌های اولیه خود نمایانگر یک جابه‌جایی معکوس‌ناپذیر است و حرکت این دیواره‌ها بین دو مرز متوالی یا چرخش ممان‌های مغناطیسی که منجر به کاهش مغناطش (یا تغییر جهت میدان اعمالی پس از نقطه اشباع) می‌شود، نشان دهنده پدیده معکوس‌پذیر است. بنابراین مغناطش کل  $M$  برابر است با:

$$M = M_{rev} + M_{irr} \tag{1}$$

که در آن  $M_{rev}$  جمله معکوس‌پذیر و  $M_{irr}$  جمله معکوس‌ناپذیر را نمایش می‌دهد. مؤلفه معکوس‌ناپذیر مغناطش با استفاده از معادله دیفرانسیلی زیر به دست می‌آید:

$$dM_{irr} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k_d - a(M_{an} - M_{irr})} dH \tag{2}$$

در این رابطه  $M_{an}$  مغناطش آنهیسترتیک<sup>1</sup> است و  $k$  ضریبی است که به عنوان عامل تناسب بین انرژی تلف شده در هنگام عبور دیوار دامنه از محل اولیه خود و تغییر مغناطش نمونه، به عنوان اثر این حرکت ظاهر می‌شود. همچنین

$$d = \begin{cases} i + 1 \rightarrow \frac{dH}{dt} > 0 \\ i - 1 \rightarrow \frac{dH}{dt} < 0 \end{cases} \tag{3}$$

مغناطش آنهیسترتیک، مغناطیس یک فرومغناطیس ایده‌آل است که مرزهای اتصال حوزه‌های مغناطیسی را ندارد و بنابراین منحنی مغناطیسی آن پسماند را نشان نمی‌دهد و مغناطش فقط از طریق مکانیسم چرخشی ممان‌های مغناطیسی انجام می‌شود. تابع لانگوین که مخصوص مواد پارامغناطیس است، در مدل جایلز-آرتون برای مغناطش آنهیسترتیک استفاده می‌شود، در این صورت یک میدان موثر  $H_e$  در داخل نمونه جایگزین میدان مغناطیسی،  $H$  خارجی می‌شود. معادله مغناطش آنهیسترتیک در ادامه آمده است:

$$M_{an} = M_s \frac{\coth \frac{H_e}{a} - \frac{a}{H_e}}{\coth \frac{H_e}{a} + \frac{a}{H_e}} \tag{4}$$

به طوری که  $a = k_b T / (m_0 m)$  یکی از پارامترهای اصلی مدل جایلز-آرتون است.  $m$  ممان مغناطیسی یک حوزه مغناطیسی نوعی است و در رابطه میدان موثر،  $H_e = H + aM$  جمله  $\alpha M$  بیانگر تعامل بین ممان‌های مغناطیسی مجاور در هر یک از حوزه‌های ماده فرومغناطیس است (در واقع ماده فرومغناطیس پلی کریستال، مانند یک آنسامبل کانونیک، به صورت مجموعه‌ای از حوزه‌های مغناطیسی در تقابل با یکدیگر رفتار می‌کند که هر یک دارای گشتاور مغناطیسی  $m$  هستند [1]) در مقالات گزارش شده [3]، ضریب  $M_s = mn$  تعریف شده است و  $M_s$  مغناطش اشباع و  $n$  چگالی حوزه‌های مغناطیسی در نمونه ماده فرومغناطیس است. بنابراین  $n = \frac{m_0 M_s a}{k_b T}$  و  $n \gg a M_s$ . ضریب  $a$  شیب تابع لانگوین است و به عنوان معیاری از جفت شدگی بین حوزه‌های مغناطیسی مجاور می‌تواند تفسیر شود. مؤلفه معکوس‌پذیر مغناطش کسر  $C$  از تفاوت مؤلفه‌های مغناطش آنهیسترتیک و مغناطش معکوس‌ناپذیر است.

1. An hysteretic

در شکل (1) با نماد  $H_c$  نیروی مغناطیس زدا یا نیروی اجباری در مقالات گزارش می‌شود،  $B_R$  چگالی شار باقیمانده یا پسماند،  $B_{max}$  یا  $B_s$  و  $H_s$  مقدار نوک مختصات حلقه هیستریزس و به عنوان مقادیر اشباع شناخته می‌شوند. مشتق‌گیری در هر یک از این نقاط، یک نوع مغناطیس‌پذیری دیفرانسیلی را به دست می‌دهد. برای بررسی شیب تابع لانگوین، به دلیل اینکه این پارامتر مستقیماً با مقدار تابع آنهیسترتیک در معادله (4) در ارتباط است، از این معادله دیفرانسیل‌گیری در مبداء حلقه هیستریزس انجام می‌شود و مغناطیس‌پذیری آنهیسترتیک به دست می‌آید.

پارامترهای فیزیکی مدل با روش مشابه از مشتق‌گیری رابطه (12) به دست می‌آیند. به عنوان نمونه، برای بررسی شیب تابع لانگوین، به دلیل اینکه این پارامتر مستقیماً با مقدار تابع آنهیسترتیک در معادله (4) در ارتباط است، از این معادله دیفرانسیل‌گیری در مبداء حلقه هیستریزس انجام می‌شود و مغناطیس‌پذیری آنهیسترتیک به دست می‌آید. در این مقاله حل معادلات جایلز-آرتون توسط کد کامپول در مقادیر مختلف پارامتر (شیب تابع لانگوین)  $a$ ، (مغناطیس‌کنندگی اشباع)  $M_s$ ، (اثر متقابل حوزه‌ها - کوپلینگ)  $\alpha$ ، (ضریب معکوس‌پذیری)  $C$  و (ضریب مرتبط با تلفات هیستریزس)  $K$  بررسی می‌شود و تغییر نقاط مشخصه حلقه هیستریزس گزارش می‌گردد.

### حل معادلات با کد کامپول

در این بخش شبیه‌سازی یک هسته آهنی هیستریتیک در معرض یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان، توسط کد کامپول و در ماژول AC/DC انجام شده است. این نرم‌افزار بر مبنای روش اجزای محدود عمل می‌کند. میدان متغیر به وسیله دو سیم پیچ تولید می‌گردد و از مواد مدل جایلز-آرتون برای تعریف پارامترهای ساختاری هسته آهنی استفاده شده است. جریان سیم‌پیچ‌ها توسط منابع ولتاژ AC که نسبت به یکدیگر 90 درجه اختلاف فاز دارند، تأمین می‌شود و با توجه به قانون القای فارادی با تغییر شار مغناطیسی یک میدان القایی در هسته ایجاد می‌شود، با تغییر جنس هسته (تغییر تأمین می‌شود و با توجه به قانون القای فارادی با تغییر شار مغناطیسی یک میدان القایی در هسته ایجاد می‌شود، با تغییر جنس هسته (تغییر نفوذپذیری ماده)، تغییر فرکانس یا تعداد دوره‌های سیم پیچ می‌توان شار میدان مغناطیسی القایی را

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad (5)$$

نهایتاً مقدار مغناطیس کل با رابطه زیر داده می‌شود:

$$M = cM_{an} + (1-c)M_{irr} \quad (6)$$

از رابطه (6) نتیجه می‌شود که

$$\frac{dM}{dH} = c \frac{dM_{an}}{dH} + (1-c) \frac{dM_{irr}}{dH} \quad (7)$$

$$M_{irr} = \frac{M - cM_{an}}{1-c} \quad (8)$$

حال با جایگذاری معادله (8) در معادله (2) به دست می‌آوریم:

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M}{kd(1-c) - a(M_{an} - M)} \quad (9)$$

از مشتق‌گیری رابطه (4) به دست می‌آید:

$$\frac{dM_{an}}{dH} = \frac{M_s}{a} \frac{\partial}{\partial H} \left[ \frac{C \coth \frac{H_c \cdot \dot{\theta}}{a} + \frac{\dot{\theta}}{C} \frac{\partial}{\partial H} \left( \frac{H_c \cdot \dot{\theta}}{a} + \frac{\dot{\theta}}{C} \right)}{H_c \cdot \dot{\theta} + \frac{\dot{\theta}}{C}} \right] \quad (10)$$

$$\frac{dH_c}{dH} = 1 + a \frac{dM}{dH} \quad (11)$$

با جایگذاری روابط (9)، (10) و (11) در رابطه (7) داریم:

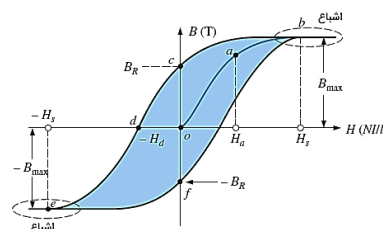
$$c = \frac{dM}{dH} = \quad (12)$$

$$\frac{\frac{M_s}{a} \frac{\partial}{\partial H} \left[ \frac{C \coth \frac{H_c \cdot \dot{\theta}}{a} + \frac{\dot{\theta}}{C} \frac{\partial}{\partial H} \left( \frac{H_c \cdot \dot{\theta}}{a} + \frac{\dot{\theta}}{C} \right)}{H_c \cdot \dot{\theta} + \frac{\dot{\theta}}{C}} \right]}{kd(1-c) - a(M_{an} - M)} \frac{M_{an} - M}{kd(1-c) - a(M_{an} - M)}$$

معادله (12) آخرین معادله دیفرانسیلی است که توسط مدل جایلز-آرتون به دست می‌آید و رابطه بین مغناطیس یک ماده مغناطیسی و میدان مغناطیسی را به ما می‌دهد. جایلز و همکارانش [5 و 4] معادلات مربوط به ضرایب  $a$ ،  $\alpha$ ،  $k$  و  $c$  را که پارامترهای اصلی این مدل هستند و در معادلات بالا دیده می‌شوند با مشتق‌گیری رابطه (12) در نقاط مشخصه حلقه هیستریزس به دست آوردند.

نقاط مشخصه حلقه هیستریزس طبق شکل (1) عبارتند

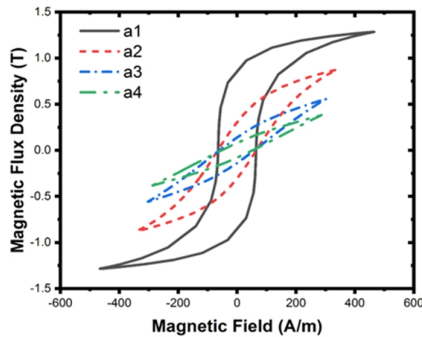
از:



شکل 1. منحنی B-H یک ماده فرومغناطیس

مغناطیسی نوعی ماده  $m$ ، کاهش می‌یابد، از طرفی کاهش مقدار  $H_c$  یا نیروی وادارنده، بیانگر تبدیل شدن ماده به یک مغناطیس نرم (یعنی ماده‌ای با ممان مغناطیسی کوچک) است و این دو با هم همخوانی دارند. به این معنا که پس از تغییر جهت

میدان مغناطیسی در ماده، دوقطبی‌های ماده فرومغناطیس، خیلی سریع‌تر با میدان برعکس شده، سازگار می‌شوند و این مورد برای استفاده در ترانسفورماتورها بسیار ضروری است. در اینجا با افزایش مقدار  $a$ ، کاهش مقدار  $B_s$  و در نتیجه کاهش  $M_s = mn$  را شاهد هستیم. کاهش  $M_s$



شکل 3. اثر پارامتر  $a$  (شیب لانگوین) بر روی حلقه‌های هیستریزس

بیانگر این مفهوم است که برهمکنش بین حوزه‌های مغناطیسی کاهش پیدا کرده است. همچنین شکل (5) کاهش چگالی شار مغناطیسی را برای دو مقدار  $a_1$  و  $a_2$  طبق جدول (1)، در یک زمان انتخابی  $t=275$  ms نشان می‌دهد که با کاهش مساحت سطح زیر منحنی هیستریزس همخوانی دارد. در شکل (6) نیز پاسخ متفاوت ماده ناهمسانگرد در دو جهت  $x$  و  $y$  به میدان مغناطیسی دیده می‌شود. این منحنی لیسازو با افزایش مقدار پارامتر  $a$  به سمت تقارن بیشتر پیش می‌رود و سطح دربرگیرنده آن بزرگتر می‌شود و به شکل بیضی نزدیک‌تر می‌شود.

### پارامتر کوپلینگ<sup>1</sup> (اثر متقابل حوزه‌ها) $\alpha$

جدول 2. تغییرات پارامتر کوپلینگ

پارامتر	مقادیر روی ماتریس
$1\alpha$	$562 e^{-6}, 417 e^{-6}, 562 e^{-6}$
$2\alpha$	$500 e^{-6}, 355 e^{-6}, 500 e^{-6}$
$3\alpha$	$440 e^{-6}, 295 e^{-6}, 440 e^{-6}$

### 1. Coupling Parameter

تغییر داد. سیستم شبیه‌سازی شده در شکل (2) از یک هسته مغناطیسی سه شاخه، با دو سیم پیچ بر روی دو شاخه خارجی آن تشکیل شده است. یک فرکانس ثابت 10 هرتز برای جریان AC در نظر گرفته شده و قابی روی هسته وجود دارد که از اثرات تماسی روی هسته جلوگیری می‌کند. میدان مغناطیسی اعمال شده در صفحه XY جهت گیری شده و به دلیل اینکه ماده ناهمسانگرد انتخاب شده، در نتیجه به میدان اعمالی در جهت X یا Y واکنش‌های متفاوتی نشان می‌دهد. مقادیر بهینه‌ای برای این محاسبات از مقاله [6] گرفته شده است  $(c_1, k_1, M_{s1}, \alpha_1, a_1)$ . در هر بخش تغییرات یکی از این پارامترها بررسی می‌شود در حالی که بقیه آنها ثابت در نظر گرفته می‌شوند.

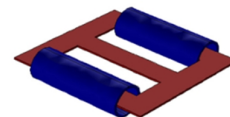
### پارامتر شیب تابع لانگوین $a$

برای بررسی اثر تغییرات شیب لانگوین  $a$ ، بر روی حلقه هیستریزس، مقادیر این پارامتر طبق جدول (1) تغییر داده شده‌اند. به دلیل اینکه ماده ناهمسانگرد است مقادیر پارامترها به صورت یک ماتریس قطری است و مؤلفه‌های ماتریس همه با هم برابر نیستند.

جدول 1. تغییرات پارامتر شیب لانگوین

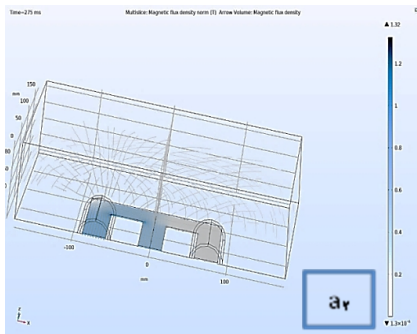
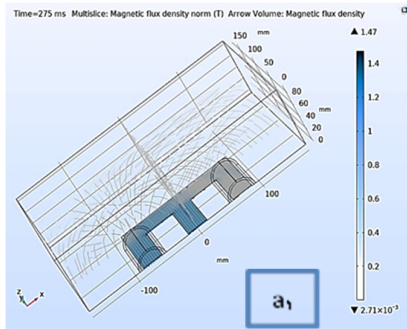
پارامتر	مقادیر روی ماتریس (A/m)
$a_1$	233.78A/M 172.856 A/M 233.78A/M
$a_2$	333.78A/M 272.856 A/M 333.78A/M
$a_3$	433.78A/M 372.856 A/M 433.78A/M
$a_4$	533.78A/M 472.856 A/M 533.78A/M

با استفاده از مقادیر مختلف پارامتر  $a$ ، حلقه هیستریزس و نمودار تغییرات نقاط مشخصه حلقه یعنی نیروی وادارنده ( $H_c$ )، پسماند ( $B_r$ ) و مقدار اشباع چگالی شار ( $B_s$ ) طبق شکل (3) و (4) به دست آمده‌اند. با توجه به شکل، مقایسه حلقه‌های هیستریزس نشان می‌دهد که با افزایش  $a$ ، شکل حلقه تغییر کرده و مساحت سطح حلقه هیستریزس کاهش پیدا کرده است و مقادیر همه نقاط مشخصه حلقه نیز روند

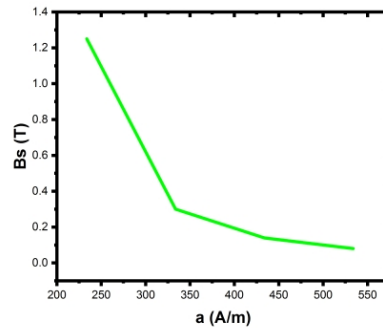
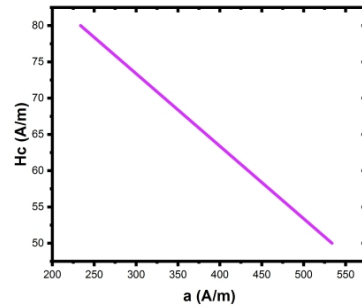
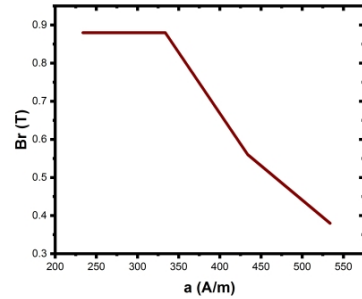


شکل 2. هندسه شبیه‌سازی

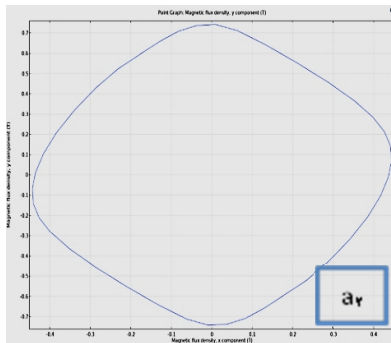
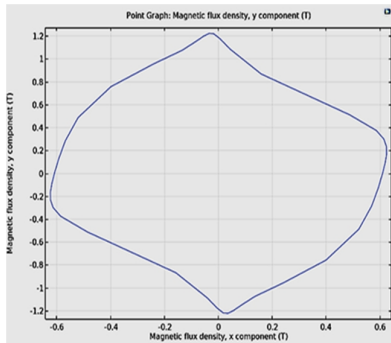
کاهشی را نشان می‌دهند. همان طور که در ادامه توضیحات معادله (4) آمد، با افزایش  $a$  مقدار ممان مغناطیسی یک حوزه



شکل 5. اثر پارامتر  $a$  (شیب لانگوین) در دو مقدار  $a_1$  و  $a_2$  بر روی چگالی شار مغناطیسی در زمان  $t=275\text{ms}$



شکل 4. اثر پارامتر  $a$  (شیب لانگوین) بر روی نقاط مشخصه حلقه هیستریزس



شکل 6. اثر پارامتر  $a$  (شیب لانگوین) بر روی مولفه‌های میدان مغناطیسی

برای بررسی اثر تغییرات پارامتر کوپلینگ، بر روی مشخصات حلقه هیستریزس، مقادیر این پارامتر طبق جدول (2) تغییر داده شده‌اند. شکل (7) حلقه‌های هیستریزس به دست آمده را نشان می‌دهد. طبق شکل (7) مشاهده می‌شود که با کاهش مقادیر پارامتر  $\alpha$ ، مساحت حلقه هیستریزس کاهش می‌یابد و مشخصه‌های حلقه ( $H_c$  و  $B_r$ ,  $B_s$ ) نیز کاهش پیدا می‌کنند. پارامتر کوپلینگ به نوعی بیانگر برهم‌کنش بین ممان‌های مغناطیسی مجاور در هر یک از حوزه‌های ماده فرومغناطیس است و با کاهش آن در حقیقت عکس‌العمل ماده فرومغناطیس به تغییر جهت میدان سریع‌تر صورت می‌گیرد و رفتار ماده به فرومغناطیس نرم نزدیک‌تر می‌شود.

جدول 3. تغییرات پارامتر مغناطیس کنندگی اشباع

پارامتر	مقادیر روی ماتریس
$M_{s1}$	$1/31 e^6, 1/33 e^6, 1/31 e^6$
$M_{s2}$	$1/00 e^6, 1/03 e^6, 1/00 e^6$
$M_{s3}$	$0/70 e^6, 0/73 e^6, 0/70 e^6$

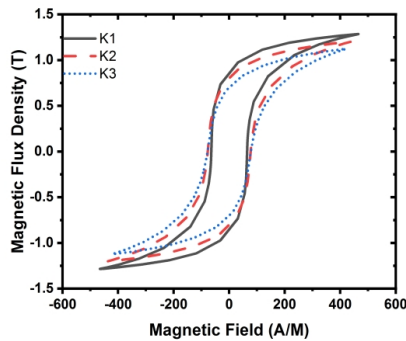
**پارامتر متناسب با تلفات هیستریزیس  $k$**

با توجه به مقادیر تلفات هیستریزیس  $k$  در جدول (4) حلقه‌های هیستریزیس شکل (9) رسم شده‌اند. پارامتر  $k$  با توجه به معادله (2) در مؤلفه معکوس‌ناپذیر مغناطیس تعریف شده است و به نوعی عامل تناسب بین انرژی تلف شده در هنگام جابجایی دیوار حوزه مغناطیسی از محل اولیه خود و تغییر مغناطیس ماده است.

جدول 4. تغییرات پارامتر تلفات هیستریزیس  $k$

پارامتر	مقادیر روی ماتریس
$k_1$	$374/975, 232/652, 374/975$
$k_2$	$474/975, 332/652, 474/975$
$k_3$	$574/975, 432/652, 574/975$

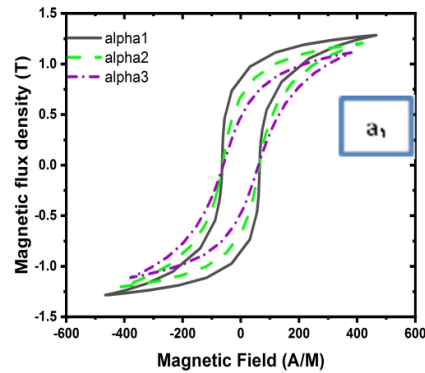
با افزایش پارامتر  $k$  مساحت حلقه کاهش و مشخصه‌های  $B_r$  و  $B_s$  کاهش می‌یابند اما  $H_c$  افزایش می‌یابد. افزایش انرژی تلف شده سبب کاهش سرعت سازگاری فرومغناطیس با میدان خارجی می‌شود و در نتیجه مشخصه وادارندگی افزایش می‌یابد.



شکل 9. اثر پارامتر تلفات هیستریزیس  $k$  بر روی حلقه‌های هیستریزیس

**پارامتر ضریب معکوس‌پذیری مغناطیسی  $c$**

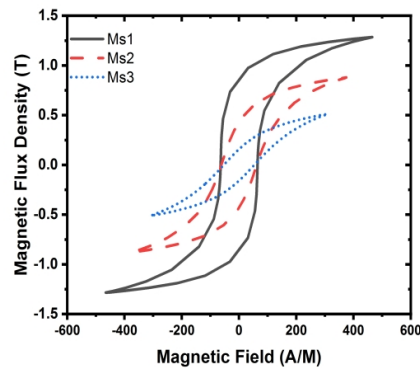
با توجه به جدول (5) حلقه‌های هیستریزیس برای مقادیر مختلف پارامتر ضریب معکوس‌پذیری  $c$  نیز در شکل (10) رسم شده‌اند.



شکل 7. اثر پارامتر کوپلینگ  $\alpha$  بر روی حلقه‌های هیستریزیس

**پارامتر مغناطیس کنندگی اشباع  $M_s$**

تغییرات پارامتر مغناطیس کنندگی اشباع  $M_s$  در جدول (3) نشان داده شده است. کاهش مساحت حلقه و نقاط مشخصه حلقه هیستریزیس در شکل (8) مشهود است. با توجه به معادلات ذکر شده در توضیح معادله (4)، پارامتر مغناطیس اشباع در صورت ثابت بودن شیب تابع لانگوین  $a$ ، با چگالی حوزه‌های مغناطیسی در ماده متناسب است و با کاهش این



شکل 8. اثر مغناطیس کنندگی اشباع  $M_s$  بر روی حلقه‌های هیستریزیس

ضریب در واقع تعداد حوزه‌های مغناطیسی کاهش و در نتیجه ممان‌های مغناطیسی که می‌توانند با هم برهم‌کنش انجام دهند نیز کاهش می‌یابد و مجدداً با توجه به معادلات مطرح شده در توضیح معادله (4)، سرعت سازگاری با میدان خارجی برای ماده بالا می‌رود.

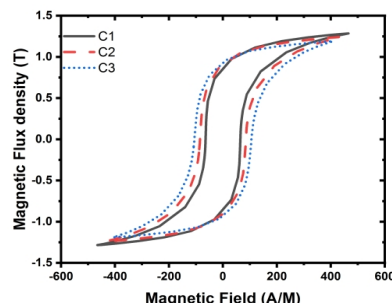
### بحث و نتیجه گیری

رفتارسنجی حلقه هیستریزس مواد فرومغناطیس در معرض میدان‌های مغناطیسی، از آنجا که می‌تواند پدیده‌های مختلف ایجاد شده در علم و تکنولوژی را توضیح دهد، بسیار حائز اهمیت است. مدل جایلز-آرتون نیز به دلیل ارتباط دهی مشخصات فیزیکی ماده به شکل حلقه هیستریزس بسیار در توضیح این رفتار کاربردی است. در این مطالعه، با توجه به اهمیت مدل جایلز-آرتون در توصیف دقیق حلقه هیستریزس مواد فرومغناطیس، با تغییر پارامترهای اصلی این مدل، تغییرات مساحت و مشخصه‌های حلقه هیستریزس به تفکیک بررسی شد. بدیهی است که نسبت به هر نوع کاربرد این مواد، می‌بایست با توجه به تأثیر هر یک از این پارامترها در تبدیل ماده به یک مغناطیس نرم یا سخت، ترکیب بهینه‌ای از این پارامترها انتخاب شود. مؤلفه‌های مغناطیس ماده در این مدل به دو بخش معکوس‌پذیر (وابسته به دوران و چرخش ممان‌های مغناطیسی) و معکوس‌ناپذیر (وابسته به حرکت دیوار حوزه‌های مغناطیسی) تقسیم می‌شوند و تغییر پارامترهای اصلی این مدل در راستای تغییر در یکی از این دو مؤلفه است. نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج گزارش شده در مطالعه [7] مطابقت دارد.

جدول 5. تغییرات پارامتر ضریب معکوس‌پذیری

پارامتر	مقادیر روی ماتریس
$c_1$	$736 e^{-3}$ , $652 e^{-3}$ , $736 e^{-3}$
$c_2$	$636 e^{-3}$ , $552 e^{-3}$ , $636 e^{-3}$
$c_3$	$536 e^{-3}$ , $452 e^{-3}$ , $536 e^{-3}$

مشاهده می‌شود با کاهش مقادیر پارامتر C مساحت حلقه و مشخصه‌های  $B_r$  و  $B_s$  کاهش و مقدار  $H_c$  افزایش می‌یابد. با توجه به معادله (5)، C ضریبی است که به مؤلفه معکوس‌پذیر مغناطیس مرتبط است و در نتیجه با آزادی حرکت ممان‌های مغناطیسی تناسب دارد. هر چقدر پارامتر C کوچک‌تر باشد به این معناست که دوران و چرخش ممان‌ها با تغییر میدان خارجی سخت‌تر انجام می‌شود و در نتیجه رفتار ماده به رفتار یک مغناطیس سخت نزدیک‌تر است و ضریب وادارندگی  $H_c$  بزرگتر می‌شود.



شکل 10. اثر پارامتر معکوس‌پذیری C بر روی حلقه های هیستریزس

### منابع

- [1] D.C. Jiles and D.L. Atherton, Theory of ferromagnetic hysteresis. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 61(1986) 48-60.
- [2] D. Jokido and D. Atherdon, Ferromagnetic Hysteresis. International Journal for Applied Research in Electrical Engineering, 19(2015) 183-185.
- [3] M.J. Sablic and D.C. Jiles, Coupled magnetoelastic theory of magnetic and magnetostrictive hysteresis. IEEE Transactions on magnetic, 29(1993). 2113-2123.
- [4] D.C. Jiles and J. Thoeke, Theory of ferromagnetic hysteresis: determination of model parameters from experimental hysteresis loops. IEEE Transactions on magnetics, 25(1989) 3928-3930.
- [5] D.C. Jiles and J.B. Thoeke, Numerical determination of hysteresis parameters for the modeling of magnetic properties using the theory of ferromagnetic hysteresis. IEEE Transactions on magnetic. 28(1992) 27-35.
- [6] S. Yan and JM. Jin, Theoretical formulation of a time-domain finite element method for nonlinear magnetic problems in three dimensions. Progress In Electromagnetics Research 153 (2015)33-55.
- [7] Sh. Karbasi and B. Rezaeealam, Hysteresis machine simulation by Jiles Atherton method. 2nd International Conference on Electrical Engineering (1396).

### COPYRIGHTS



© 2022 by the authors Licensee PNU, Tehran, Iran This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4 0 International (CC BY4 0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)