بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشکده فیزیک**

**پایان‌نامه برای دریافت مدرک کارشناسی ارشد**

**رشته فیزیک**

**گروه علوم‌پایه**

# بررسی خواص مغناطیسی و ساختاری نانوذرات فریت منگنز ساخته‌شده به روش مایکروویو

**فاطمه کاظمی نجف‌آبادی**

**استاد راهنما** :

**دکترمهین اشراقی**

**استاد مشاور** :

**دکتر پرویز کاملی**

**دی** 1391

**کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج عملی ناشی از این پایان‌نامه، متعلق به دانشگاه پیام‌نور است.**

اینجانب **فاطمه کاظمی نجف‌آبادی** دانشجوی ورودی سال 89 مقطع کارشناسی ارشد رشته **فیزیک** گواهی می‌نمایم چنانچه در پایان‌نامه خود از فکر، ایده و نوشته دیگری بهره گرفته‌ام با نقل قول مستقیم یا غیرمستقیم منبع و مأخذ آن را نیز در جای مناسب ذکر کرده‌ام. بدیهی است مسئولیت تمامی مطالبی که نقل‌قول دیگران نباشد بر عهده خویش می‌دانم و جوابگوی آن خواهم بود.

نام و نام خانوادگی دانشجو

تاریخ و امضاء

اینجانب **فاطمه کاظمی نجف‌آبادی** دانشجوی ورودی سال 89 مقطع کارشناسی ارشد رشته **فیزیک** گواهی می‌نماییم چنانچه براساس مطالب پایان‌نامه خود اقدام به انتشار مقاله، کتاب و... نمایم ضمن مطلع نمودن استاد راهنما، با نظر ایشان نسبت به نشر مقاله، کتاب و ... به‌صورت مشترک و با ذکر نام استاد راهنما مبادرت نمایم.

نام و نام خانوادگی دانشجو :

تاریخ و امضاء

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه پیام‌نور می‌باشد.

دی 1391

**سطر به سطر این پایان‌نامه را اگر چه ناچیز است تقدیم می‌کنم به دو فرشته آسمانی زندگیم که در لحظه لحظه حضورشان گرمابخش وجودم و روشن‌کننده‌ی راهم بودند. پدر و مادر عزیزتر از جانی که یاریگر من در این راه شدند و قلبشان هر دم برای موفقیت روزافزونم تپید.**

**به‌رسم ادب و با عشق به سخن باری‌تعالی " من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق " از تمامی دوستان و عزیزانی که در این راه یاریگرم بودند تشکر می‌کنم. از استاد راهنمای عزیز و گرانقدرم سرکار خانم دکتر مهین اشراقی که با کمک‌های صادقانه و صمیمیشان پیمودن این راه را بر من هموار کردند تشکر می‌کنم. از استاد مشاور گرامی و ارجمندم جناب آقای دکتر پرویز کاملی که بی‌دریغ وقت گرانبهایشان را در اختیارم گذاشتند و با تجربه‌های خود رهنمودهای ارزنده ای در اختیارم نهادند سپاسگذارم. قدردان زحمات خواهر و برادر عزیزم هستم که مایه دلگرمی من در تمامی مراحل بودند. از سرکار خانم فردوس خلیلی به خاطر الطاف و زحمات بی‌دریغشان کمال قدردانی را دارم. از تمامی دوستان خود در دانشگاه صنعتی اصفهان به‌خصوص خانم صرامی ممنونم. از سرکار خانم رحیمی که در مراحل مختلف پروژه به من کمک کردند تشکر می‌کنم. از دوست عزیزم سرکارخانم ولایتی به‌دلیل زحماتشان سپاس بسیار دارم. هم‌چنین از آقایان رحیمی به‌خاطر زحمات بسیارشان تشکر فراوان دارم.**

## چکیده:

در مرحله اول این پژوهش نانو ذرات فریت منگنز آلایش یافته با کادمیوم ($MnFe_{2-x}Cd_xO_4$ ( x=0, 0.1, 0.2) به‌روش سل‌ژل و به‌کمک مایکروویو تهیه و مورد بررسی قرار گرفته است. از پودرهای اولیه‌ی نیترات‌منگنز، نیترات‌آهن، نیترات‌کادمیوم و اسیدسیتریک برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. ویژگی‌های مغناطیسی و ساختاری نمونه‌ها با آزمایش‌های پراش اشعه ایکس (XRD)، مغناطش‌سنج ارتعاشی (VSM)، طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه آنالیز XRD نشان می‌دهد که نمونه‌های ساخته شده ساختار فریت اسپینلی دارند. هم‌چنین طیف FT-IR تشکیل فاز فریت منگنز-کادمیوم را تأیید می کند. اندازه بلورک‌ها با استفاده از معادله شرر بین13تا 28 نانومتر به دست آمده است. تصاویر FESEM اندازه ذرات را در حدود 30 نانومتر نشان می‌دهد. هم‌چنین اندازه‌گیری مغناطش نمونه‌ها نشان می‌دهد که با آلایش کادمیوم به جای آهن، مغناطش افزایش پیدا می‌کند.

در مرحله دوم نانوذرات فریت منگنز آلایش یافته با کادمیوم ($MnFe_{2-x}Cd_xO_4$ ( x=0, 0.1, 0.2) به‌روش سل‌ژل و با حرارات‌دهی به‌کمک کوره الکتریکی نیز تهیه شد. اندازه بلورک‌ها با استفاده از معادله شرر در حدود 3 نانومتر به دست آمد. تصاویر FESEM اندازه ذرات را در حدود 40 نانومتر نشان می‌دهد. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی متناوب نشان می‌دهد که نمونه‌ها ابرشیشه‌اسپینی با برهم‌کنش زیاد هستند.



**کلمات کلیدی : نانوذرات، فریت منگنز-کادمیوم، روش سل‌ژل به‌کمک مایکروویو.**

# فهرست:

**مقدمه** ..... 1

**فصل اول** : **مقدمه‌ای بر مواد مغناطیسی** ..... 2

1-1-گشتاور دوقطبی مغناطیسی ..... 3

1-2- مغناطش ..... 4

1-3- انواع مواد مغناطیسی ..... 4

1-4-پذیرفتاری مغناطیسی ..... 7

1-5-بررسی مواد از منظر پذیرفتاری ..... 9

1-6-ناهمسانگردی مغناطیسی ..... 10

1-7-روابط کوری و کوری وایس ..... 10

1-8-حوزه مغناطیسی ..... 12

1-9-حلقه هیسترزیس ..... 14

1-10-دمای کوری و دمای نیل ..... 16

1-11-فریت‌های اسپینلی ..... 18

1-12-نانومواد ..... 21

1-13-انواع برهم‌کنش‌ها ..... 22

1-13-1-برهم کنش دوقطبی-دوقطبی ..... 22

1-13-2-برهم کنش تبادلی ..... 22

1-13-3-برهم کنش ابرتبادلی ..... 25

1-14- ابرپارامغناطیس .....26
1-15-دمای قفل شدگی .....27
1-16-شیشه اسپینی .....28
1-17-ابرشیشه‌اسپینی .....29
**فصل 2 : بررسی مقالات مرتبط با نانوذرات فریت منگنز** .....31
2-1-روش‌های ساخت نانومواد .....32
2-1-1-قوس پلاسما .....33
2-1-2-رسوب گذاری شیمیایی فاز بخار .....33
2-1-3-سایش ازطریق آسیاب‌های گلوله ای، ساچمه‌ای یا فلزی .....33
2 -1-4-سل ژل .....34
2-2-کاربردهای نانومواد .....36
2-3-پراش اشعه ایکس .....38
2-4-روش های تجربی پراش .....39
2-4-1-روش پودری .....39
2-4-2-روش بلور چرخان .....40
2-5-ساخت وآلایش نانومواد فریت منگنز .....42
2-5-1-ساخت نانوذرات فریت منگنز با 5 روش متفاوت (احمد، 2008 : 5-1).....42
2-5-1-1-روش استاندارد سرامیک.....42
2-5-1-2-روش احتراق تشعشعی.....43
2-5-1-3-روش هم‌رسوبی.....43

2-5-1-4-روش سل‌ژل.....43

2-5-1-5-روش سیترات.....43

2-5-1-6- پراش اشعه‌ی ایکس نانوذرات فریت منگنز ساخته‌شده با 5 روش.....45

2-5-1-7- بررسی خواص مغناطیسی نانوذرات فریت منگنز ساخته‌شده با 5 روش.....47

2-5-2- ساخت نانوذرات فریت منگنز$MnFe_2O_4$ با استفاده از روش سل‌ژل و به‌کمک مایکروویو: (ونگ، 2008 : 231-227 ).....50

2-5-3- ساخت نانوذرات فریت منگنز با روش گرمایی(ناصری، 2011 : 1749-1745) .....52

2-5-3-1-آنالیزXRD نانوذرات فریت منگنز ساخته‌شده به روش گرمایی.....53

2-5-3-2- آنالیز TEM نانوذرات فریت منگنز ساخته‌شده به روش گرمایی.....54

2-5-3-3- آنالیز VSM نانوذرات فریت منگنز ساخته‌شده به روش گرمایی .....55

2-5-4-ساخت نانوذرات فریت منگنز به روش خوداحتراقی(دراز، 2009 : 179-173).....56

2-6-آلایش نانوفریت‌های منگنز .....58

2-6-1- فریت منگنز-روی آلایش شده با کادمیوم با فرمول$Mn_{0.5}Zn_{0.5-x}Cd_xFe_2O_4$ .....58

2-6-1-1-تحلیل پراش اشعه ایکس نانوذرات $Mn_{0.5}Zn_{0.5-x}Cd_xFe_2O_4$ .....59

2-6-1-2- آنالیز SEM نانوذرات $Mn_{0.5}Zn_{0.5-x}Cd_xFe_2O_4$ .....61

2-6-1-3-تغییرات ساختاری مغناطش بیشینه نمونه $Mn_{0.5}Zn_{0.5-x}Cd_xFe_2O_4$.....62

2-6-2- فریت منگنز آلایش شده با کادمیوم$Mn_{1-x}Cd_xFe_2O_4$ .....63

2-6-2-1- تحلیل پراش اشعه ایکس نانوذرات $Mn_{1-x}Cd_xFe_2O_4$..... 64

2-6-2-2-آنالیز FT-IR نانوذرات $Mn_{1-x}Cd_xFe_2O_4$..... 66

**فصل سوم : ساخت نانوذرات فریت منگنز $MnFe_{2-x}Cd_xO_4$** ..... 68

3- 1- ساخت نانوذرات فریت منگنز با ترکیب $MnFe_{2-x}Cd_xO_4$ ..... 69

3-1-1-ساخت نمونه‌های $MnFe_{2-x}Cd_xO_4$ با کمک مکانیسم سل‌ژل و استفاده ازمایکروویو ..... 71

3-1-2-ساخت نمونه‌های $MnFe_{2-x}Cd_xO_4$ با کمک مکانیسم سل‌ژل‌واستفاده از کوره الکتریکی 72

3-2-تجهیزات و وسایل مورد نیاز ..... 74

3-2-1-پراش پرتو ایکس ..... 74

3-2-2 : طیف سنج مادون قرمز ..... 75

3-2-3 : مغناطش سنج ارتعاشی ..... 76

3-2-4- پذیرفتاری مغناطیسی متناوب ..... 76

3-2-5- میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی ..... 77

3-2-6-دستگاه مایکروویو ..... 78

**فصل چهارم : نتایج اندازه‌گیری و آنالیزها** ..... 79

4-1-تحلیل نتایج نمونه‌های ساخته شده به روش سل‌ژل و حرارت‌دهی با استفاده از مایکروویو... 80

4-1-1-آنالیز پراش اشعه ایکس ..... 80

4-1-2-بررسی اندازه ذرات با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی(FESEM) ..... 83

4-1-3-آنالیز طیف مادون قرمز (FT-IR) ..... 84

4-1-4-اندازه‌گیری مغناطش اشباع و رسم حلقه هیسترزیس با آنالیز VSM ..... 85

4-2- تحلیل نتایج نمونه‌های ساخته شده با مکانیسم سل‌ژل وحرارت‌دهی با استفاده از کوره الکتریکی ..... 87

4-2-1-آنالیز به وسیله پراش اشعه ایکس و محاسبه اندازه دانه‌ها و ثابت شبکه .....87

4-2-2-بررسی اندازه ذرات با تصاویرمیکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی(FESEM) .....91

4-2-3-آنالیز طیف مادون‌قرمز (FT-IR) .....91

4-2-4-اندازه‌گیری مغناطش‌اشباع و رسم حلقه هیسترزیس با آنالیز VSM .....92

4-2-5-پذیرفتاری مغناطیسی .....93

**فصل پنجم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات**.....101

5-1-نتیجه‌گیری .....101

5-2-پیشنهادات .....104

**مراجع** .....105

**abstract**.....108

## مقدمه:

نانوذرات حیطه‌ی وسیعی از علم روز را به‌خود اختصاص داده‌اند. کاربردهای هر چه بیشتر نانوذرات، روزبه‌روز در زمینه‌های مختلف مانند پزشکی، ابزارهای ذخیره و ضبط مغناطیسی، علوم صنعتی و ... آشکارتر می‌شود. نانوذرات فریت منگنز به‌دلیل ساختار شبکه‌ای اسپینلی نسبتاً معکوس، در این میان اهمیت زیادی دارند. با بررسی مقالات مختلف درمی‌یابیم ساخت نانوذرات فریت منگنز به روش‌های مختلف مانند سل‌ژل،سیترات، هم‌رسوبی و ... صورت گرفته است. هم‌چنین در مقالات، نانوذرات فریت منگنز با جای‌نشینی یون‌های مختلف مانند مس، روی، نیکل، کادمیوم و ... به‌جای یون منگنز آلایش یافته‌اند. اما پژوهشی که در این پایان‌نامه صورت گرفته است بر اساس دو مبنای زیر بوده است :

1- ساخت نمونه با روش سل‌ژل و با استفاده از مایکروویو انجام شده است. این روش ایده‌ای نسبتاً نو بوده و از لحاظ مصرف انرژی و زمان لازم برای تهیه‌ی نمونه مورد توجه است. برای مقایسه‌ی دو روش، ساخت نمونه‌ها با روش سل‌ژل و با استفاده از کوره الکتریکی نیز انجام شده است.
2- در این پژوهش آلایش نانوذرات فریت منگنز، با جای‌نشینی یون کادمیوم به‌جای یون آهن انجام شده که ایده‌ای جدید است.

هدف این پژوهش ساخت نانوذرات $MnFe_{2-x}Cd_xO_4$ ($x=0, 0.1, 0.2$) وبررسی خواص ساختاری و مغناطیسی آن‌ها می‌باشد. برای این منظور از آنالیزهای پراش اشعه ایکس، مغناطش‌سنج ارتعاشی، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی، طیف‌سنجی مادون قرمز و اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی متناوب بهره گرفتیم.

# فصل اول : مقدمه‌ای بر مواد مغناطیسی

به‌دلیل پیشرفت علم وتنوع فراوان گرایش‌های متفاوت علوم، مطالعات تحقیقاتی عموماً برروی موضوع خاصی انجام می‌گردد . هدف ما ساخت و بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی نانوذرات فریت منگنز است. قبل از شروع این مبحث ابتدا پاره‌ای از مفاهیم فیزیکی مرتبط بیان می‌گردد. در این فصل ابتدا مفاهیمی مانند گشتاور دوقطبی مغناطیسی، تئوری مختصری از مغناطش، پذیرفتاری مغناطیسی، حوزه‌های مغناطیسی، ساختارهای اسپینلی، قوانین کوری و کوری-وایس توضیح داده می‌شود. سپس با بیان انواع مواد مغناطیسی و برهم‌کنش‌هایی که بین نانوذرات رخ می‌دهند، دمای قفل‌شدگی حالات ابرپارامغناطیسی، شیشه‌اسپینی و ابرشیشه‌اسپینی بررسی می‌گردند.

## 1 - 1 - **گشتاور دوقطبی مغناطیسی** :

الکترون دارای یک تکانه زاویه‌ای است و پیوسته گرد محورش می‌چرخد. این ویژگی را اسپین می‌نامند. اسپین الکترون پدیده‌ای کوانتومی است. این تکانه ذاتی به یک گشتاورمغناطیسی وابسته است که مانند اسپین بدون تغییر است. بردار گشتاور مغناطیسی با بردار تکانه زاویه‌ای اسپین، پادموازی است.

دو بار مغناطیسی $q_m$ و $q_m -$ که مساوی و مخالف یکدیگرند تشکیل یک دوقطبی می‌دهند. گشتاور این دوقطبی ($\mu_m$) با رابطه 1-1 داده می‌شود. d برداری است که دو بار را به‌هم متصل می‌کند:

$$\boldsymbol{\mu_m} = q_m \mathbf{d} \qquad (1\text{-}1)$$

اگر این دوقطبی در میدان مغناطیسی با شدت B قرار بگیرد گشتاور زیر بر دوقطبی مغناطیسی اثر می‌کند :

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu}_m \times \mathbf{B} \qquad (2\text{-}1)$$

تأثیر این گشتاور چرخاندن دوقطبی و هم‌جهت کردن آن با میدان مغناطیسی است. می‌دانیم یک حلقه جریان الکتریکی مانند یک گشتاور دوقطبی الکتریکی عمل می‌کند.

$$\mu_m = \mathbf{I}\,\mathbf{A} \qquad (3\text{-}1)$$

در رابطه 1-3، I جریان الکتریکی و A مساحت حلقه است. جهت $\boldsymbol{\mu_m}$ عمود بر صفحه حلقه و به گونه‌ای است که جریان الکتریکی در جهت ساعتگرد باشد. حلقه‌های جریان در یک اتم، از الکترون‌های چرخان تشکیل شده‌اند. پس می‌توان رابطه‌ای ساده بین $\boldsymbol{\mu_m}$ و اندازه‌حرکت زاویه‌ای الکترون **L**، به‌صورت زیر برقرار نمود. در این روابط ω سرعت زاویه‌ای است.

$$\mathbf{I} = e\left(\frac{\boldsymbol{\omega}}{2\pi}\right) \qquad A = \pi r^2 \qquad \mathbf{L} = m r^2 \boldsymbol{\omega} \qquad (4\text{-}1)$$

$$\boldsymbol{\mu_m} = \left(\frac{-e}{2m}\right)\mathbf{L} \qquad (5\text{-}1)$$

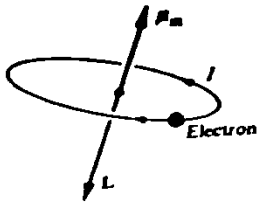
ضریب $\left(\frac{-e}{2m}\right)$ نسبت ژیرومغناطیسی نامیده می‌شود (عمر، 1381 : 253).

واحد گشتاور مغناطیسی، می‌تواند بر حسب گشتاور اسپینی یا مداری الکترون محاسبه شود .این واحد مگنتون بوهر $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ نام دارد و مقدارش $9.27 \times 10^{-24}$ است (اعلایی، 1389 : 7).

اگر یک دوقطبی کلاسیک در میدان مغناطیسی قرار گیرد، حرکت تقدیمی با فرکانس $\omega_L$ انجام می‌دهد. $\omega_L$ فرکانس لارمور نامیده می‌شود. حرکت تقدیمی این دوقطبی به دور میدان، با فرکانس زیر انجام می‌شود :

$$\boldsymbol{\omega_L} = \frac{eB}{2m} \qquad (6\text{-}1)$$

شکل 1-1 : گشتاور دوقطبی مغناطیسی $\mu_m$ مربوط به یک حلقه جریان.




(عمر، 1381 : 253)

## 1 - 2 - مغناطش :

گشتاور دو قطبی مغناطیسی در واحد حجم، مغناطش نام دارد و به‌صورت رابطه‌ی 1-7 بیان می‌شود. $\boldsymbol{m_i}$گشتاور دو قطبی مغناطیسی در واحد حجم است (ریتس، 1381).

$$\boldsymbol{M} = \lim_{DV \to 0} \frac{1}{DV} \sum_i \mathbf{m_i} \qquad (7\text{-}1)$$

## 1 - 3 - انواع مواد مغناطیسی :

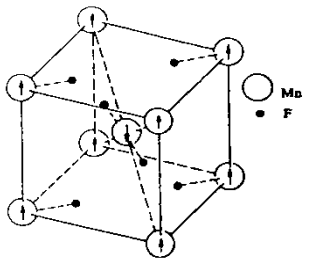
با توجه به چگونگی واکنش و پاسخ دادن مواد نسبت به میدان، مواد مغناطیسی به پنج گروه تقسیم می‌گردند. دیامغناطیس، پارامغناطیس، فرومغناطیس، پادفرومغناطیس و فری‌مغناطیس. مواد **دیامغناطیس** از اتمهایی ساخته شده‌اند که دارای هیچ ممان مغناطیسی خالصی نیستند. در این مواد تمام پوسته‌های اوربیتالی پر شده‌اند و الکترون‌ها به‌صورت جفت‌شده هستند. تمام مواد غیرمغناطیسی جزء این گروه هستند.

مواد **پارامغناطیس** از اتم‌ها، مولکول‌ها و نواقص شبکه‌ای ناشی می‌شوند. در این مواد تعداد فردی از الکترون‌های جفت‌نشده وجود دارند که یک اسپین کل غیرصفر را ایجاد می‌کنند. دراصل اتم‌ها و مولکول‌ها دارای گشتاور مغناطیسی متوسط خالصی هستند. یون‌های عناصر واسطه و یون‌های عناصر خاکی نادر، بهترین مثال برای این مواد هستند.

مواد **فرومغناطیس** از اتمهایی منظم در یک شبکه تشکیل شده‌اند، به‌گونه‌ای که ممان‌های مغناطیسی اتمی می‌توانند با هم برهم‌کنش کنند تا در حالت موازی قرار گیرند. در این مواد یک ممان مغناطیسی زوج و غیرصفر در میدان اعمالی صفر وجود دارد که ممان مغناطیسی خودبه‌خودی نامیده می‌شود. در اصل در این مواد تمام یون‌های مغناطیسی به‌گونه‌ای منظم شده‌اند که سهمی مثبت به مغناطش خالص اضافه کنند.

مواد **پادفرومغناطیس** از زیرشبکه‌ها (حوزه‌ها) تشکیل شده‌اند که ابعاد خطی آن‌ها از چند میکرون تا یک میلی‌متر تغییر می‌کند. هر یک از این حوزه‌ها دارای $10^{15}$ یا $10^{16}$ اتم می‌باشند. ممان‌های زاویه‌ای در این زیرشبکه‌ها به‌طور پادموازی قرار می‌گیرند تا مغناطش خالص صفر شود. (مارکوس[1]،2009 : 794-793). پادفرومغناطیس در بسیاری از ترکیباتی که شامل فلزات واسطه‌اند بروز می‌کند. شکل 2-1 بلور یونی $MnF_2$ را نشان می‌دهد که الکترون‌هایی از اتم منگنز به اتم فلوئور منتقل شده‌اند. یون‌های منگنز مغناطیسی هستند، زیرا لایه 3d آنها ناکامل است و این یون‌ها در یک ساختار bcc توزیع شده‌اند. ماده مدنظر پادفرومغناطیس است، زیرا تمام یون‌هایی که در گوشه‌های مکعب هستند در یک جهت قرارگرفته‌اند. در حالی‌که یون‌هایی که در مرکز مکعبند در خلاف جهت واقع شده‌اند. (عمر،1381 : 0 29)(چنگ، 1375 : 309-314)

شکل 2-1 : ساختار اسپینی $MnF_2$.

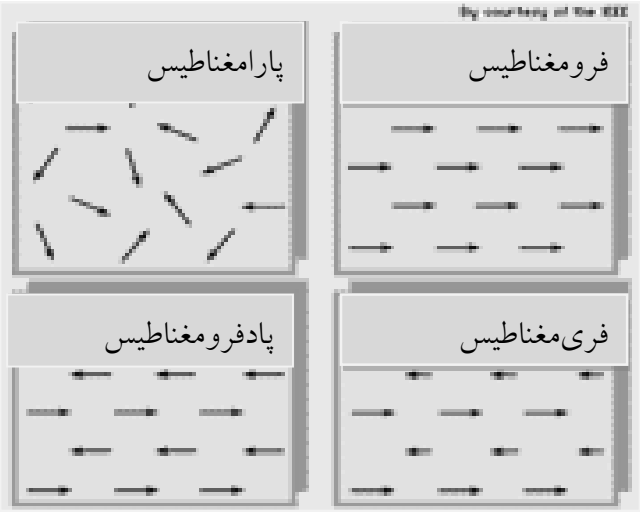



(عمر،1381 : 290)

[1]. Morkoc

مواد **فری‌مغناطیس** هم از حوزه‌های مغناطیسی تشکیل شده‌اند. در این مواد یون‌های مغناطیسی به‌صورت پادموازی منظم شده‌اند ولی گشتاورهای مغناطیسی مساوی نیستند، درنتیجه از مغناطش خالص کم می‌کنند. در این مواد برهم‌کنش‌ها به‌گونه‌ای است که اتم‌ها در تعدادی از جایگاه‌های کریستالی زیرشبکه A، موازی و در جایگاه‌های زیرشبکه B، به‌صورت پادموازی واقع شده‌اند. در این مواد، تمامی ممان‌ها حتی در دمای صفر کلوین هم به‌طور موازی منظم نمی‌شوند. از این‌رو مغناطش خودبه‌خودی به نظم نسبی ممان‌ها و دما وابسته است. این مواد فقط در ترکیباتی با ساختار کریستالی پیچیده مشاهده می‌شوند. برای مثال در فریت باریم ($BaO.6Fe_2O_3$) سلول واحد شامل 64 یون است که یون‌های باریوم و اکسیژن ممان مغناطیسی ندارند. 16 عدد از یون‌های $Fe^{+3}$ ممان‌های موازی دارند و 8 یون $Fe^{+3}$ به‌طور پادموازی منظم شده‌اند. درنتیجه یک مغناطش خالص موازی با میدان اعمالی ایجاد می‌شود. درنتیجه مقدار این مغناطش خالص به‌طور نسبی کم است و فقط یک هشتم یون‌ها در مغناطش ماده مشارکت می‌کنند. در شکل 1-3 نحوه جهت‌گیری ممان‌ها در انواع مواد مغناطیسی مشاهده می‌شود. **اصلی‌ترین تفاوت بین مواد فری‌مغناطیس و پادفرومغناطیس**آن است که در فری مغناطیس‌ها ممان‌های مغناطیسی وابسته به اتم‌های زیرشبکه A، بزرگتر از اتم‌های زیرشبکهB هستند. پس همدیگر را خنثی نمی‌کنند و مغناطش اشباع کمتری دارند. در نتیجه مقدار مغناطش خودبه‌خودی به‌میزان منظم شدن ممان‌های مغناطیسی مرتبط است، همان‌گونه که ارتعاشات گرمایی اتم‌ها، باعث بی‌نظمی ممان‌ها و کاهش در مغناطش می‌گردند (مارکوس، 2009 : 793-794).

شکل 1-3 : نحوه جهت‌گیری ممان‌ها در انواع مواد مغناطیسی.




(کیتل، 1380)

## 1 - 4 - **پذیرفتاری مغناطیسی** :

در مواد دیامغناطیس و پارامغناطیس یک گشتاور مغناطیسی متناسب با میدان اعمال شده ایجاد می‌گردد. در دماهای بسیار کم و میدان‌های بسیار شدید، گشتاور مغناطیسی القایی با افزایش شدت میدان، به یک مقدار حدی میل می‌کند. با کنار گذاشتن این خاصیت اشباعی، رابطه بین گشتاور و میدان اعمال شده خطی است. به طوری که ویژگی‌های مغناطیسی یک ماده را می‌توان از نسبت گشتاور القا شده به میدان اعمال شده مشخص کرد. این نسبت **پذیرفتاری مغناطیسی** نامیده می‌شود (پورسل، 1381 : 516).

میدان مغناطیسی به‌وسیله دو بردار شدت مغناطیسی B و یا شدت میدان مغناطیسی H توصیف می‌شود. این دو بردار به‌صورت زیر به‌هم مربوطند :

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \qquad (8\text{-}1)$$

که $\mu_0$ تراوایی مغناطیسی خلاء است و مقدار آن $4\pi\times10^{-7}$ است. وقتی یک ماده مغناطیسی در میدان مغناطیسی قرار گیرد مغناطیده می‌شود. این مغناطیدگی با بردار مغناطش M (گشتاور دوقطبی در واحد حجم) توصیف می‌شود. در مواد دیامغناطیس و پارامغناطیس میدان‌های مغناطیسی اعمال شده کوچک منجر به القای یک مغناطش داخلی می‌شود. با تخمین زدن، میدان مغناطیسی داخلی $H_{int}$ با میدان مغناطیسی خارجی H جایگزین می‌شود :

$$\mathbf{B_{int}} = \mathbf{B} + \mu_0\mathbf{M} = \mu_0 (\mathbf{H}+\mathbf{M}) \qquad (9\text{-}1)$$

شدت مغناطیسی متشکل از دو جزء است : $\mu_0 H$ توسط چشمه‌های خارجی تولید می‌شود و $\mu_0 M$ مربوط به مغناطیدگی ماده است. در مواد فرومغناطیس میدان داخلی $H_{int}$ نمی‌تواند با میدان خارجی Hتخمین زده شود. درنتیجه رابطه فوق با جایگزینی میدان خارجی B به‌صورت زیر تصحیح می‌گردد (مارکوس، 2009 : 796).

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H}+\mathbf{M}) \quad (SI) \qquad (10\text{-}1) \qquad \text{یا} \qquad \mathbf{B} = \mathbf{H}+4\pi\mathbf{M} \quad (CGS) \qquad (11\text{-}1)$$

چون مغناطش توسط میدان، القا می‌شود می‌توان فرض کرد که M متناسب با H است :

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \qquad (12\text{-}1)$$

ثابت تناسب $\chi$ **پذیرفتاری مغناطیسی محیط** نامیده می‌شود. این ثابت نسبت مغناطش M به میدان ماکروسکوپیک H است (عمر، 1381 : 258).

در حالت کلی پذیرفتاری به دو نوع، پذیرفتاری مغناطیسی با اعمال میدان متناوب (ac) و پذیرفتاری مغناطیسی با اعمال میدان مستقیم (dc) تقسیم می‌شود. روابط به این شرح است :

$$\chi_{ac} = \frac{dM}{dH_{ac}} \qquad (13\text{-}1)$$

$$\chi_{dc} = \frac{M}{H_{dc}} \qquad (14\text{-}1)$$

اگر میدان مغناطیسی اعمالی به‌صورت زیر باشد :

$$\mathbf{H(t)} = \mathbf{H_{ac}} \cos(\omega t) \qquad (15\text{-}1)$$

در این صورت مغناطش وابسته به زمان به‌صورت زیر نشان داده می‌شود. در این رابطه $\chi_n = \chi'_n + i\chi''_n$ امین هارمونیک پذیرفتاری است .

$$\mathbf{M(t)} = \mathbf{H_{ac}} \sum_{n=1}^{inf} [\boldsymbol{\chi'_n} \cos(\omega t) + \boldsymbol{\chi''_n} \sin(\omega t)] \qquad (16\text{-}1)$$

با استفاده از رابطه بالا، مقادیر پذیرفتاری حقیقی و موهومی از روابط زیر به‌دست می‌آیند :

(17-1)

$$\boldsymbol{\chi'_n} = \frac{1}{\pi} \mathbf{H_{ac}} \int_0^{\pi} \mathbf{M(t)} \cos(n\omega t)\, d(\omega t)$$

(18-1)

$$\boldsymbol{\chi''_n} = \frac{1}{\pi} \mathbf{H_{ac}} \int_0^{\pi} \mathbf{M(t)} \sin(n\omega t) d(\omega t)$$

$\chi'$ بیانگر پذیرفتاری مغناطیسی بنیادی و $\chi''_n$ معرف اتلاف انرژی ناشی از پسماند در نمونه است. در حد فرکانس‌های خیلی پایین، مقادیر ضرایب $\chi''_n$ به صفر میل می‌کند. پذیرفتاری مغناطیسی یکی از خصوصیات مهم مواد مغناطیسی و ابزاری قدرتمند برای تعیین نوع فاز مغناطیسی مواد است که با توجه به آن مواد مغناطیسی به پنج گروه تقسیم می‌شوند ( اعلایی، 1389 : 8).