فصل اول

شرح نظریه مغناطیسی مواد

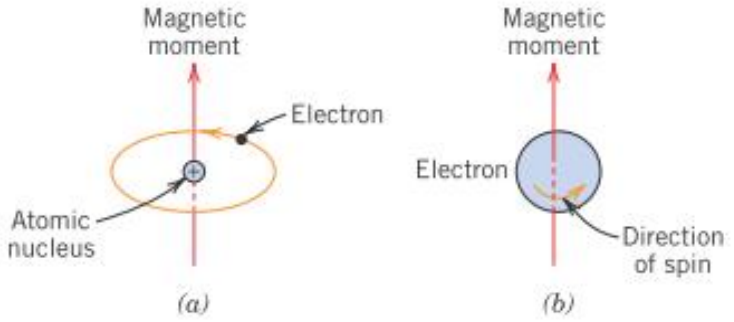
1-1 مقدمه

مغناطیس پدیده‌ای است که توسط آن مواد از خود، یک نیروی جاذبه یا دافعه را نشان می‌دهند یا بر روی مواد دیگر تاثیر می‌گذارند؛ این پدیده، هزاران سال است که شناخته شده است. با این وجود قوانین اصلی و مکانیزم‌هایی که پدیده مغناطیسی را توضیح می‌دهند پیچیده و دقیق می‌باشند. خواص مغناطیسی مواد، توجه فیزیک‌دان‌ها، شیمی‌دان‌ها و مهندسین را برای سالیان متمادی به خود معطوف داشته است. به خصوص در دوران اخیر این خواص از آن جهت مورد علاقه قرار گرفتند که اطلاعاتی راجع به اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی مواد و بر هم‌کنش بین آن‌ها را فراهم می‌کنند. مواد مغناطیسی کاربردهای تکنولوژیکی وسیعی دارند. این کاربردها شامل ژنراتورهای الکتریکی، ترانسفورماتورها، موتورهای الکتریکی، رادیو، تلویزیون، تلفن، کامپیوترها و اجزاء سیستم‌های تولید صدا و تصویر می‌باشند.

در این فصل، تشریح مختصری از منشاء مغناطیسی مواد فراهم می‌آید و بردارهای میدان مغناطیسی و سایر پارامترهای مغناطیسی مورد بحث قرار می‌گیرند و حالت‌های دیامغناطیسی، پارا مغناطیسی، فرو مغناطیسی و فری مغناطیسی توصیف خواهند شد[1و2].

2-1 منشا مغناطیس مواد

به طورکلی می‌توان منشاء خاصیت مغناطیسی را الکترون‌های متحرک دانست. خواص مغناطیسی ماکروسکوپی مواد درنتیجه گشتاورهای مغناطیسی الکترون‌ها است. هر الکترون در یک اتم، دارای گشتاورهای مغناطیسی است که از دو منشاء سرچشمه می‌گیرند. یکی ناشی از حرکت مداری الکترون به اطراف هسته و دیگری ناشی از اسپین الکترون حول محور خودش است. جهت گشتاور مغناطیسی کل، محور آسان ناهمسانگردی نامیده می‌شود و با ناهمسانگردی مغناطیسی تعریف می‌شود [3].



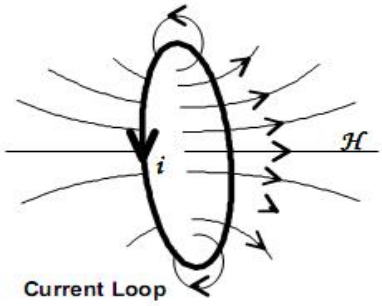
شکل(1-1): نمایش شماتیک از حرکت الکترون حول هسته اتم و حول خودش[2].

1-3 تعریف کمیتهای مغناطیسی

1-3-1 میدان مغناطیسی[1]($\vec{H}$)

حلقه ای به شعاع r و جریان i در نظر می‌گیریم. میدان مغناطیسی در مرکز حلقه از رابطه زیر به دست می آید: [12]

$$H = \frac{i}{2r} \qquad \left(\frac{A}{m}\right) \tag{1-1}$$



شکل (1-2): حلقه حامل جریان و نمایش خطوط میدان مغناطیسی[12].

[1]. Magnetic field

1-3-2 شدت القا مغناطیسی یا چگالی شار مغناطیسی[1] (B)

این کمیت بزرگی شدت میدان داخلی در داخل ماده، که در معرض یک میدان H قرار گرفته است را نمایش می‌دهد. واحد B، تسلا (یا وبر بر متر مربع $\frac{Wb}{m^2}$) می‌باشد. شدت میدان مغناطیسی و القا مغناطیسی بر اساس رابطه زیر با هم مرتبط می‌گردند:

$$\mathrm{B} = \mu H \qquad (2\text{-}1)$$

که در آن پارامتر μ تراوائی[2] نامیده می شود. این کمیت خاصیتی از محیط(ماده)خاص است که توسط میدان H عبوری از ماده و اندازه‌گیری B، مشخص می‌شود. تراوائی دارای دیمانسیون وبر بر آمپر-متر ($\frac{Wb}{\mathrm{A}-m}$)یا هنری بر متر ($\frac{\mathrm{H}}{m}$) است. در خلاء،

$$\mathrm{B} = \mu_0 H \qquad (3\text{-}1)$$

μ_0 تراوائی خلا نام دارد و یک ثابت جهانی است که مقدار آن برابر $4\pi \times 10^{-7}\ \frac{\mathrm{H}}{m}$ می‌باشد[3].

1-3-3 گشتاور مغناطیسی[3] (m)

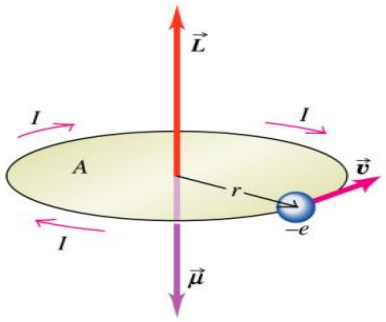
در الکترودینامیک به یک حلقه حامل جریان I ، گشتاور مغناطیسی m را نسبت می‌دهند که رابطه بین m و I به صورت زیر است:

$$m = \mathrm{I}\ \mathrm{A} \qquad (4\text{-}1)$$

---

1. Magnetic induction
2. Permeability
3. Magnetic moment

که A بردار مساحت سطح حلقه جریان بوده و بر سطح حلقه عمود است. جریان‌های الکتریکی در یک اتم ناشی از حرکت‌های اسپینی و مداری الکترون‌ها می‌باشند. این مدار الکتریکی یک دو قطبی مغناطیسی را تشکیل می‌دهد[1و4].



شکل(1-3). جریان الکتریکی ایجاد شده در اثر حرکت مداری

$$\mu = iA = -ve\pi r^2 = -\frac{w}{2\pi} e\pi r^2 = -\frac{wer^2}{2} \qquad (5\text{-}1)$$

این عبارت در نمادگذاری برداری به صورت زیر در می آید:

$$\mu = -\frac{e}{2} r \times v = -\frac{e}{2m} r \times p = -\frac{e\hbar}{2m} l = -l\mu_B \qquad (6\text{-}1)$$

که l یک عدد کوانتمی مداری جهتدار و μ_B مگنتون بوهر است. μ و l، به دلیل بار منفی الکترون، در خلاف جهت یکدیگرند.

در حالت کلی سه نوع گشتاور مغناطیسی مداری، اسپینی و زاویه‌ای کل داریم:

$$\begin{aligned} \mu_l &= \mu_B \sqrt{l(l+1)}\, g_l \\ \mu_s &= \mu_B \sqrt{s(s+1)}\, g_s \\ \mu_j &= \mu_B \sqrt{j(j+1)}\, g_j \end{aligned} \qquad (7\text{-}1)$$

که در آن $g_l = -1$، $|g_s| = 2$ و $g_l = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)}$ می‌باشد[5و6].

1-3-4 مغناطش[1] (M)

وقتی یک ماده مغناطیسی در میدان مغناطیسی قرار گیرد، ماده مغناطیده می‌شود. این مغناطیدگی با بردار مغناطش M، که گشتاور دوقطبی واحد حجم است، توصیف می‌شود.

رابطه این کمیت و القا مغناطیسی ماده، B به صورت زیر است:

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

پس القای مغناطیسی، بر خلاف میدان مغناطیسی خارجی، علاوه بر توزیع جریان، توسط ماده مغناطیسی نیز می تواند تولید شود و بنابراین B علاوه بر توزیع و شکل هندسی جریان به آن ماده مغناطیسی نیز وابسته است. M تمام خواص فیزیکی ماده را در خود دارد μ_0، نیز به جنس محیطی که ماده مغناطیسی در آن قرار دارد وابسته می باشد[7].

1-3-5 پذیرفتاری مغناطیسی[2]

پذیرفتاری ماده اثر میدان مغناطیسی اعمالی برای مغناطیس شدن ماده را تخمین می‌زند و به این صورت تعریف می‌شود:[8]

$$\chi = M/H \qquad \text{(بدون بعد)} \qquad (9\text{-}1)$$

یک رابطه خطی دیگر بین B و H وجود دارد:

$$\mathrm{B} = \mu_0 (1 + \chi)\mathrm{H} = \mu_0 \mu_r \mathrm{H} \qquad (10\text{-}1)$$

[1] . Magnetization
[2] . Susceptibility

که $\mu_r = 1 + \chi$ تراوایی نسبی است. تراوایی نسبی یک ماده، عبارتست از میزانی که یک ماده می‌تواند مغناطیسی شود، یا سهولتی که میدان B در حضور یک میدان H، می‌تواند در ماده القاءگردد. دارا بودن تراوایی نسبی بالا بدین معناست که، ماده اثر میدان مغناطیسی را تقویت می‌کند. به طور کلی در مواد $\mu_r > 1$ است ولی در خلاء مقدار $\mu_r = 1$ است، البته در برخی مواد ممکن است این تراوایی به 100000 هم برسد[3و9].

1-4 فازهای مغناطیسی

از آنجا که فعالیت ما در حوزه مواد مغناطیسی می‌باشند؛ بنابراین لازم است آشنایی هر چند مختصر با انواع مواد مغناطیسی و ویژگی‌های هر یک ارائه شود. طبیعی‌ترین روش برای دسته‌بندی خواص مغناطیسی مواد، توجه به پاسخگویی آنها به یک میدان مغناطیسی خارجی است. بر این اساس مواد مغناطیسی به فازهای دیامغناطیس ،پارامغناطیس ،فرومغناطیس، آنتی‌فرومغناطیس و فری‌مغناطیس تقسیم‌بندی می‌شوند[10].

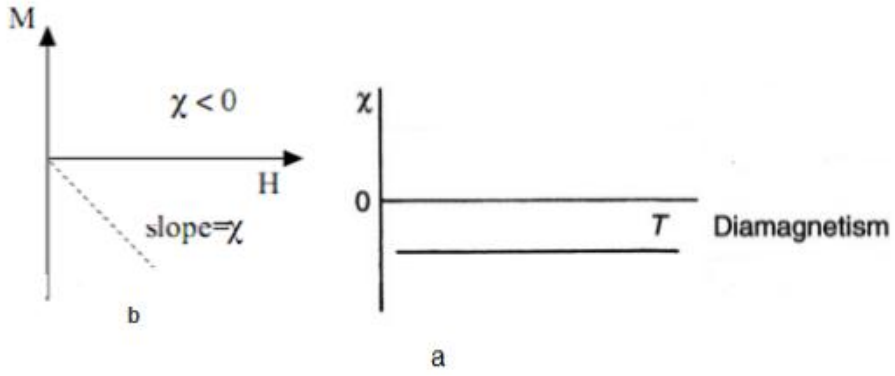
1-4-1 دیامغناطیس[1]

دیامغناطیس خاصیت همه‌ی مواد است. هر چند که این خاصیت بسیار ضعیف بوده و غالباً به خاطر آثار قویتر پارامغناطیسی یا فرومغناطیسی که می‌توانند با این خاصیت همراه باشند، دیده نمی‌شود. اتم-های دیامغناطیس دارای هیچ گشتاور مغناطیسی نمی‌باشند و در موادی که دارای پوسته کامل باشند، مثل گازهای نجیب وجود دارند. این مواد با قرارگرفتن در میدان مغناطیسی خارجی طبق قانون لنز، دارای ممان مغناطیسی القایی در خلاف جهت میدان خارجی می‌شوند و آن را تضعیف می‌کنند[4و11]. پذیرفتاری مغناطیس، χ، این مواد بسیارکوچک، منفی از مرتبه $\chi = -10^{-5}$ و مستقل از دما می‌باشد. مس،

[1] . Diamagnetism

نقره، طلا و کوارتز نمونه‌هایی از مواد دیامغناطیس می‌باشند. ابررساناها در زیر دمای گذار دیامغناطیس کامل می باشند، یعنی $\chi \cong 1$ [7].

شکل(4-1) نمودار $M-H$ و $\chi-T$ مواد دیا مغناطیسی را نشان می‌دهد.



شکل (4-1): (a) منحنی $\chi-T$ دیا مغناطیس (b)منحنی $M-H$ دیا مغناطیس[12].

1-4-2 پارا مغناطیس[1]

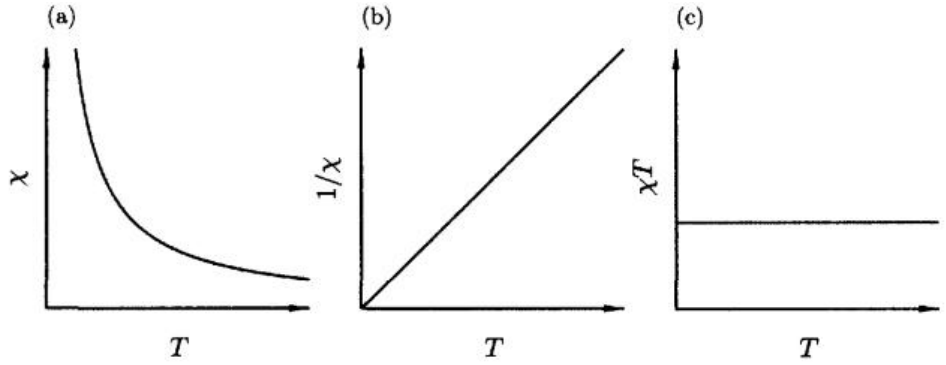
این جامد در غیاب میدان مغناطیسی خارجی، از تعدادی یون‌ها یا اتم‌هایی تشکیل شده است که دارای گشتاور مغناطیسی دائم هستند اما بصورت مجزا با جهت گیری تصادفی و بدون هیچ اندرکنش متقابلی بر روی یکدیگر عمل می‌کنند. این گشتاور مغناطیسی خالص به علت حضور الکترون‌های جفت نشده در اوربیتال‌هایی است که به طور جزئی پر شده‌اند. لذا هیچ مغناطش خالصی در ماده وجود ندارد. اعمال میدان مغناطیسی خارجی، سبب جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی القایی در جهت میدان و تقویت آن می‌شود. این همسویی با میدان که ناشی از بر هم کنش های تبادلی است توسط اثرات دمایی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. قانون کوری[2]این رفتار پارامغناطیس‌ها که پذیرفتاری تابعی از دماست را نشان می‌دهد[4].

شکل (5-1) نمودار $\chi-T$ ، $1/\chi-T$ و $\chi T-T$ را نشان می‌دهد.

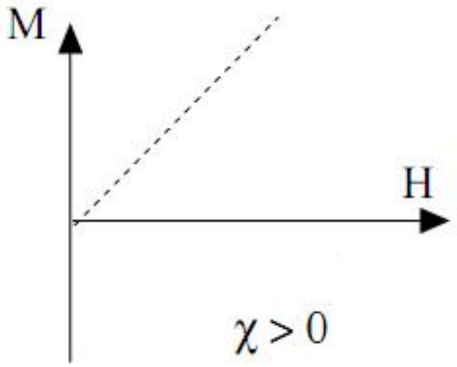
[1] . Paramagnetism
[2] . Curie Law

$\chi = C / T$ قانون کوری (11-1)

از آنجایی‌که این گشتاورها تمایل به همسو شدن با میدان دارند، مقدار پذیرفتاری مثبت وکوچک و در محدوده $10^{-5} < \chi < 10^{-3}$قرار دارد. آلومینیوم،پلاتین و منگنز نمونه‌هایی از مواد پارا مغناطیسی هستند[7].شکل(1-6) پذیرفتاری مواد پارامغناطیس را نشان می‌دهد.



شکل (1-5): (a) منحنی χ بر حسب T، (b) منحنی $\frac{1}{\chi}$بر حسب T، (c) منحنی χT بر حسب T مواد پارامغناطیس[13].



شکل (1-6) : منحنی M – H مواد پارامغناطیس[12].

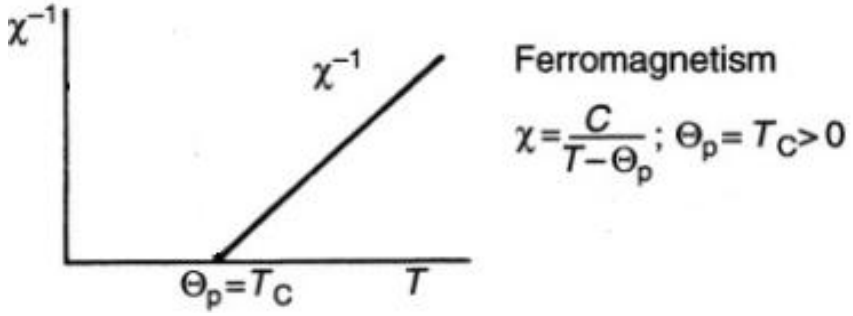
1-4-3 فرو مغناطیس[1]

فرومغناطیس به موادی گفته می‌شود، که در غیاب میدان مغناطیسی خارجی دارای گشتاور خود به خودی بوده و برخلاف پارامغناطیس، گشتاورهای مغناطیسی آن با هم اندرکنش می‌کنند. این اندرکنش از نوع تبادلی می‌باشد. رفتار مواد فرومغناطیس توسط قانون وایس-کوری[2] بیان می‌شود:

$$\chi = C/(T-\theta_P) \qquad (12\text{-}1)$$

که θ_P دمای کوری پارا مغناطیس است. این قانون وابستگی دمایی پذیرفتاری مغناطیسی را برای دمای بالای T_C نشان می‌دهد. نمودار عکس پذیرفتاری بر حسب دما مانند پارامغناطیس‌ها به صورت خط راست است، ولی با این تفاوت که خط راست در این مواد از مبدا نمی‌گذرد، بلکه محور دما را در $T = \theta_p$ قطع می‌کند.

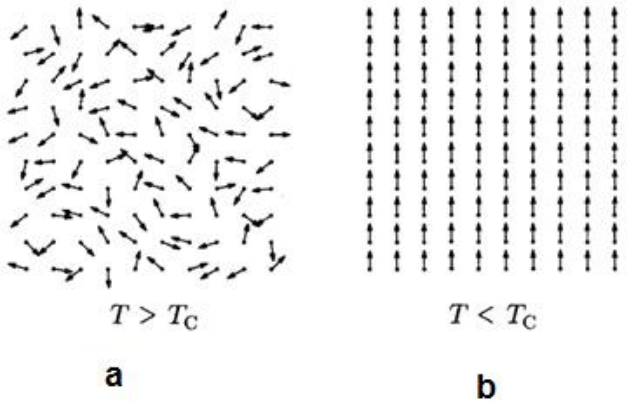
شکل (1-7) قانون وایس-کوری مواد فرومغناطیس را نشان می‌دهد.



شکل (1-7) : منحنی χ^{-1} بر حسب T مواد فرومغناطیسی[3].

پذیرفتاری این مواد مثبت و بزرگتر از 1 می‌باشد، یعنی در محدوده $50 < \chi < 10000$ است. این مواد در دماهای بالاتر از یک دمای بحرانی به نام دمای کوری(T_C) ، خواص فرومغناطیسی خود را از دست داده و به حالت پارامغناطیس گذار می‌کنند. شکل (1-8).

[1]. Ferromagnetism
[2]. Curie-Weiss Law



شکل (1-8) : تغییر فاز بین (a) حالت پارا مغناطیسی $T > T_C$ و (b) حالت فرو مغناطیسی برای $T < T_c$ [13].

آهن، نیکل، کبالت و عناصر خاکی کمیاب و آلیاژهای آنها مثال‌هایی از فرو مغناطیس‌ها هستند [7].

1-4-4 آنتی‌فرومغناطیس[1]

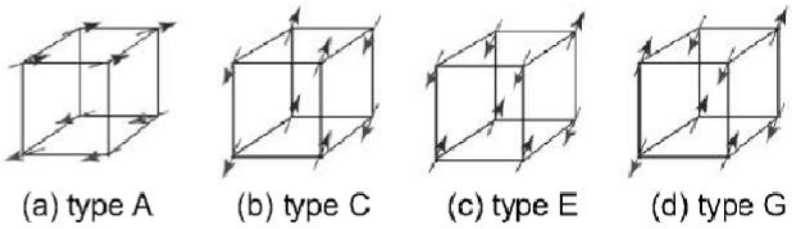
این مواد شبیه فرو مغناطیس‌ها هستند در این مواد، میدان مولکولی به‌گونه‌ای عمل کرده که نزدیکترین گشتاورهای مغناطیسی بصورت پادموازی با یکدیگر قرار گرفته، و در نتیجه مغناطش صفر است. اغلب شبکه بلوری آنتی‌فرو را می‌توان به‌صورت دو زیرشبکه‌ی درهم‌فرورفته‌ی A و B ، که جهت گشتاورهای مغناطیسی آنها در خلاف جهت یکدیگر بوده و میدان‌مولکولی روی هر زیرشبکه، متناسب با مغناطش زیرشبکه‌های دیگر است؛ تصور نمود[13] .پذیرفتاری مغناطیسی این مواد کوچک اما مثبت می‌باشد، و در دماهای بالاتر از دمای نیل T_N ، به فاز پارامغناطیس گذار انجام می‌دهند[4]. برای آنتی فرو مغناطیس‌ها پذیرفتاری مغناطیسی از رابطه وایس –کوری تبعیت می کند:

$$\chi \propto \frac{1}{\mathrm{T}-\theta} \qquad (13\text{-}1)$$

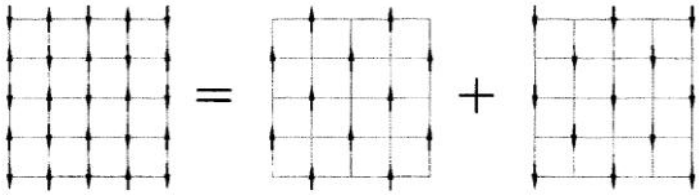
[1] . Antiferromagnetism

که به θدمای وایس می‌گویند. اگر $\theta = 0$باشد، ماده یک پارامغناطیس است، اگر $\theta > 0$ماده فرومغناطیس است و انتظار داریم که $\theta = \mathrm{T}_c$باشد. اگر $\theta < 0$ماده یک آنتی فرومغناطیس است و انتظار داریم $\theta = -\mathrm{T}_N$ شکل (1-11) [13].

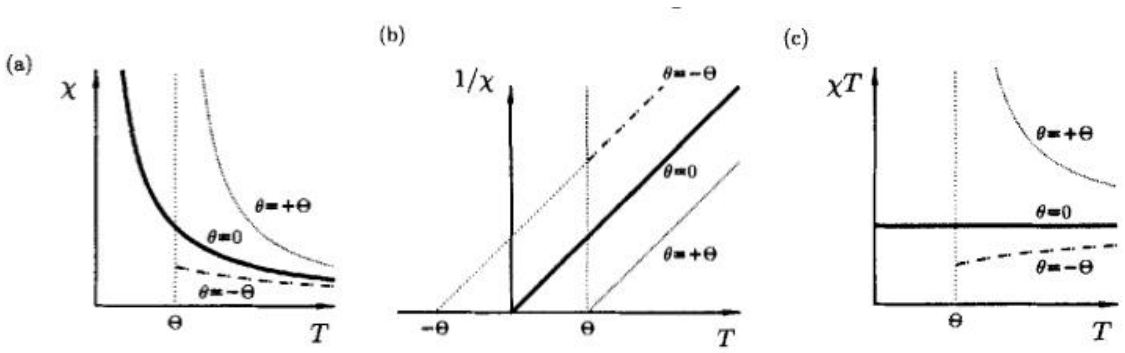
در جدول تناوبی،کروم Cr تنها عنصری است که در دمای اتاق در فاز آنتی فرومغناطیس می‌باشد. آنتی-فرومغناطیس درترکیباتی شامل عناصر واسطه، نیز یافت می‌شود. MnO، FeO وNiO نمونه‌هایی از مواد آنتی فرومغناطیس هستند [9].



شکل (1-9): انواع نظم آنتی‌فرومغناطیس در شبکه‌های مکعبی ساده [9].



شکل (1-10): تقسیم یک شبکه پاد فرومغناطیس به دو زیر شبکه فرومغناطیس[13].



شکل (1-11) تغییرات معکوس پذیرفتاری مغناطیسی با دما[13].

1-4-5 فری مغناطیس[1]

فری‌مغناطیس فقط در ترکیباتی که ساختار بلوری پیچیده‌تری نسبت به عناصر خالص دارند؛ مشاهده می‌شود و در عناصر خالص مشاهده نمی‌شود. این حالت در ترکیبات اکسیدهای مخلوط نیز مشاهده می-شود. هر چند در این مواد اندرکنش تبادلی سبب صف بندی موازی گشتاورهای مغناطیسی در برخی نواحی و صف بندی پادموازی در نواحی دیگر می‌شود؛ اما اندازه‌ی گشتاورهای مغناطیسی آنها در یک جهت بزرگتر از دیگری می‌باشد و در نتیجه مغناطش خالص ماده صفر نیست و مغناطیس اشباع این مواد کمتر از فرومغناطیس می‌باشد.

پذیرفتاری مغناطیسی این دسته از مواد بزرگ و مثبت می‌باشد و از قانون کوری –وایس پیروی نمی‌کند [8و13]. $MnFe_2O_4$، $NiFe_2O_4$ و Fe_3O_4 نمونه‌هایی از مواد فری‌مغناطیس هستند[7].

1-5 حوزه ها[2] و حلقه هیسترزیس[3]

در گذشته مشاهده شده بود که بعضی از مواد با اعمال میدان کوچک، گشتاور مغناطیسی بزرگی از خود بروز می‌دهند. برای این مسئله توجیهی نبود تا اینکه در سال 1907پیر ارنست وایس[4]پیش‌بینی کرد که این مواد از یکسری حوزه‌های مغناطیسی تشکیل شده‌اند، که اعمال میدان باعث جهت‌گیری این حوزه‌ها در جهت خاصی می‌شود[14]. مواد فرومغناطیس نیز از جمله موادی‌اند که از حوزه مغناطیسی تشکیل شده‌اند که این حوزه ها در اندازه میکروسکوپی هستند(حدود $50\ \mu m$ یا کوچکتر). هر یک از حوزه‌ها درحالت مغناطیسی اشباع خود می‌باشند. گشتاور مغناطیسی اتم‌های موجود در یک حوزه در جهت خاصی قرار دارند، و هر حوزه دارای گشتاور مغناطیسی است. اما جهت‌گیری گشتاور مغناطیسی در حوزه‌های مختلف از یکدیگر مستقل است، و جهت‌گیری‌ها بصورت کاتوره‌ای است به گونه‌ای که در حالت

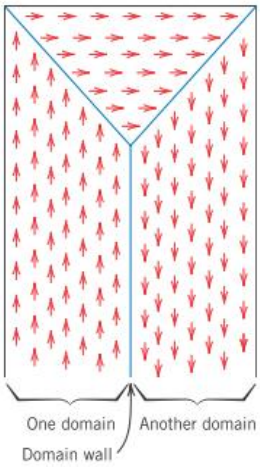
[1]. Ferrimagnetism

[2]. Domains

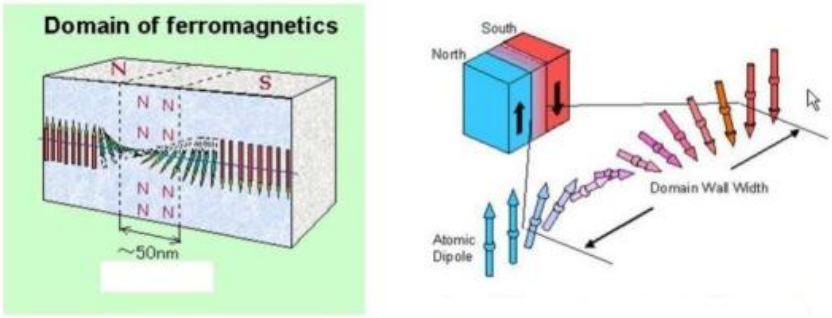
[3]. Hysteresis

[4]. Pierr-Ernest Weiss

کلی گشتاور مغناطیسی خالص ماده صفر است. شکل(1-12) این حالت را نشان می‌دهد. شکل حوزه‌ها، جهت‌یابی Mدر هر حوزه و اندازه حوزه‌ها، بوسیله انرژی‌های مگنتواستاتیک، ناهمسانگردی، مگنتوالاستیک و انرژی دیواره‌های حوزه تعیین می‌گردند. همه محاسبات ساختار حوزه‌ها در راستای کمینه کردن انرژی است. تغییر گشتاور از حوزه‌ای به حوزه دیگر آنی نیست و گشتاور به آرامی از حوزه‌ای به حوزه دیگر تغییر می‌کند. فضایی را که بین دو حوزه قرار گرفته است دیواره حوزه[1]می‌نامند. دیواره‌ها محل تغییر جهت گشتاورهای مغناطیسی از یک حوزه به حوزه دیگر می‌باشند و این چرخش باعث ذخیره شدن انرژی در این ناحیه می‌گردد[15]. شکل (1-13)



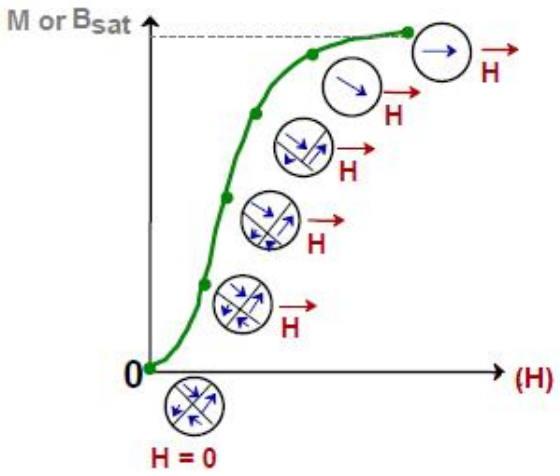
شکل(1-12): تصویری از حوزه ها در مواد فری مغناطیس یا فرو مغناطیس[2].



شکل (1-13): دیواره حوزه و نحوه تغییر گشتاور مغناطیسی از حوزه‌ای به حوزه دیگر [15].

[1] . Domain Wall

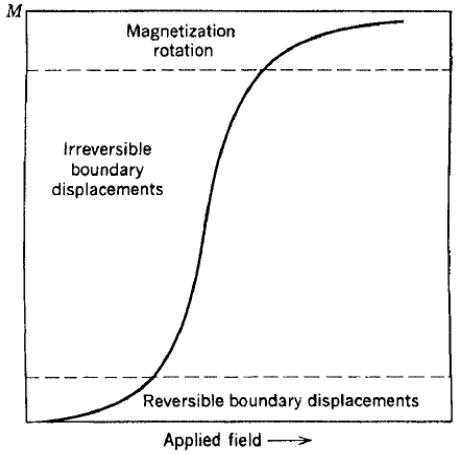
شدت القای مغناطیسی وشدت میدان مغناطیسی برای فرو مغناطیس‌ها و فری مغناطیس‌ها، با یکدیگر متناسب نمی‌باشند. وقتی که یک میدان H بر این نمونه‌ها اعمال می‌شود، شکل و اندازه حوزه‌ها توسط حرکت دیواره‌های حوزه ها تغییر می‌کند. ساختارهای حوزه ها به صورت دوایر در نقاط مختلف در امتداد منحنی $B-H$ در شکل(1-14) نشان داده شده است. در ابتدا، گشتاورهای حوزه ها به صورت تصادفی جهت یافته‌اند به گونه ای که هیچ میدان (مغناطش) خالص B (M)وجود ندارد. همانطور که میدان خارجی اعمال می‌شود، حوزه‌هایی که در جهات مساعد با (یا تقریبا در راستای) میدان اعمالی قرار گرفته-اند، رشد می‌نمایند ودیواره ها جابه جا می‌شوند. این فرایند با افزایش شدت میدان، ادامه می‌یابد تا اینکه نمونه ماکروسکوپی به صورت تک حوزه تبدیل می‌شود[3].



شکل (1-14) :منحنی مغناطش ماده فرومغناطیس[3].

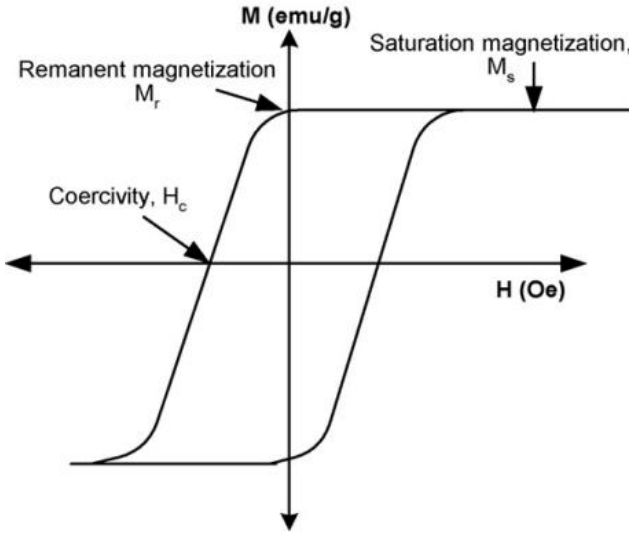
منحنی $B-H$ از سه قسمت اصلی تشکیل شده است. همان‌طور که در شکل (1-15) مشاهده می‌شود، در میدان‌های کوچک یعنی در پایین ترین قسمت منحنی، رشد حوزه ها برگشت پذیر است، یعنی اگر میدان به مقدار اولیه کاهش یابد، شرایط مغناطش اولیه برخواهد گشت. در دومین ناحیه، میدان اعمالی بیشتر شده و حرکت دیوار حوزه برگشت ناپذیر خواهد بود. ناحیه سوم منحنی شامل چرخش‌های برگشت

ناپذیر حوزه است. مغناطیس اشباع M_s و یا شار القای اشباع B_s زمانی اتفاق می‌افتد که کلیه حوزه ها به صورت مناسبی جهت یابند و این بیشترین میزان مغناطیسی شدن می‌باشد که ماده می‌تواند بدست آورد.



شکل (1-15) نواحی مختلف منحنی مغناطش نمونه [16].

همان طور که جهت میدان عکس می‌شود، B یا M کاهش می‌یابد، ولی منحنی، مسیر اولیه را دنبال نمی‌نماید بلکه یک اثر هیسترزیس ایجاد می‌شود که در آن Mبا سرعت پایین‌تری نسبت به Hکاهش می-یابد، که ناشی از وجود مقاومت در مقابل حرکت دیواره‌های حوزه‌ها است،که در پاسخ به افزایش میدان مغناطیسی در جهت عکس اتفاق می‌افتد[3]. با کاهش میدان به مقدار صفر، مغناطش به سمت صفر نمی رود ولی با رسیدن شدت میدان به یک مقدار منفی خواص مغناطیسی ماده کاملا از بین می‌رود، که این میدان معکوس یکی از مشخصه‌های هیسترزیس است. با کاهش بیشتر شدت میدان؛ القای مغناطیسی منفی می‌شود و در نهایت می‌تواند به مقادیر اشباع منفی خود برسد. افزایش مجدد شدت میدان به سمت مقادیر مثبت، حلقه پسماند را مطابق شکل (1-16) کامل می‌کند [17].



شکل(1-16) حلقه هیسترزیس [10].

1-6 کمیت‌های مهم حلقه هیسترزیس ماده فرومغناطیس

1-6-1مغناطش اشباع[1] (M_S)

بیشترین میزان مغناطیسی شدن که ماده می تواند کسب نماید را مغناطش اشباع می‌گویند. در این صورت همه گشتاورهای مغناطیسی تک حوزه در جهت میدان اعمال شده قرار گرفته‌اند.

1-6-2 مغناطش پسماند[2] (M_r)

مقدار مغناطش باقی مانده در میدان صفر را پسماند(M_r)گویند.

1-6-3 وادارندگی مغناطیسی یا نیروی ضد پسماند[3](H_c)

میدان مغناطیسی معکوسی که برای کاهش مغناطش به صفر نیاز است [3].

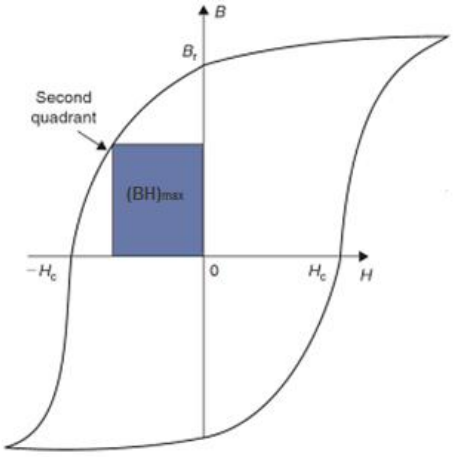
[1] . Saturation Magnetization

[2] . Saturation Remanece

[3]. Coercivity

1-6-4 انرژی ذخیره شده در ماده $(BH)_{\max}$

مقدار انرژی ذخیره شده در واحد حجم نمونه می‌باشد. این کمیت متناظر با مساحت بزرگترین مستطیل $B-H$ است که می‌تواند در داخل ربع دوم منحنی هیستریس بنا گردد. واحد آن kj/m^3 است. همچنین این کمیت انرژی مورد نیاز برای مغناطیس زدایی یک مغناطیس دائمی است[18و3].



شکل(1-17): انرژی ذخیره شده در ماده به صورت تابعی از القاء مغناطیسی[26].

اندازه و شکل منحنی پسماند برای مواد فرو مغناطیسی و فری مغناطیسی از لحاظ عملی دارای اهمیت قابل توجه است. هر دو نوع مواد فرو مغناطیسی و فری مغناطیسی بر اساس مشخصه‌های هیسترزیس آنها به صورت نرم و یا سخت دسته بندی می‌گردند.

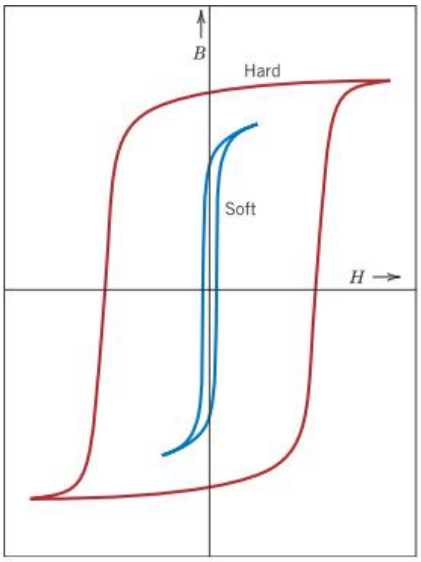
1-7 مغناطیس‌های نرم

مواد مغناطیسی نرم با اعمال میدان مغناطیسی کوچک به‌راحتی مغناطیده می‌شوند، (چون دیواره‌های حوزه‌ها خیلی راحت حرکت می‌کنند) و با قطع میدان سریعاً گشتاور مغناطیسی خود را از دست می‌دهند. به عبارتی این مواد دارای نیروی وادارندگی پایینی؛ درحدود $10\,Oe$ هستند. این مواد همچنین دارای اشباع مغناطیسی بالا M_S، مغناطش پسماند M_r پایین و تراوایی بزرگ‌اند. منحنی پسماند این مواد نازک و

باریک است. کاربردهای مغناطیس‌های نرم در هسته‌های الکترومگنت، موتورهای الکتریکی، ترانسفورماتورها، ژنراتورها و سایر تجهیزات الکتریکی می‌باشد.

1-8 مغناطیس‌های سخت

مواد مغناطیسی سخت موادی‌اند که به‌راحتی مواد مغناطیسی نرم مغناطیده نمی‌شوند و به میدان مغناطیسی اعمالی بزرگتری جهت مغناطیده کردن آنها نیاز است. این مواد گشتاور مغناطیسی را تا مدت‌ها پس از قطع میدان مغناطیسی در خود حفظ می‌کنند. مواد مغناطیسی سخت دارای اشباع مغناطیسی M_S،گشتاور پسماند M_rو نیروی وادارندگی H_c بالایی هستند.H_cدر این مواد از مرتبه $1000\,Oe$ است و حلقه هیسترزیس بزرگی دارند. این مواد در زمینه اصلی بسیاری از وسایل در حوزه‌های تکنولوژی مختلف مثل بلندگوها در سیستم های صوتی، لوازم جانبی کامپیوتر، در اتومبیل (بالابر شیشه، برف پاک کن، شیشه شورفن ها و.....)، ضبط کننده‌های صوت و تصویر و ... مورد استفاده قرار می-گیرند[3و19].در جدول(1-1) بعضی از خصوصیات مواد سخت و نرم نوشته و با هم مقایسه شده است.



شکل (1-18): حلقه پسماند در مواد فرومغناطیسی نرم و سخت[2]

جدول (1-1): مقایسه خصوصیات مواد مغناطیسی نرم و سخت[10].

مواد مغناطیسی سخت	مواد مغناطیسی نرم
مغناطش اشباع بالا (T 0/3-1/676)	مغناطش اشباع بالا (T 1-2)
نیروی وادارندگی بالا (H_C)	نیروی وادارندگی پایین (H_C)
مهم نیست، ولی کم است	تراوائی بالا
ناهمسانگردی بالا	ناهمسانگردی کم
دمای کوری بالا (T_C)	دمای کوری بالا (T_C)
تولید انرژی زیاد	اتلاف انرژی کم
مهم نیست	مقاومت الکتریکی بالا

1-9 ناهمسانگردی[1] مغناطیسی

وابستگی خواص مغناطیسی به یک جهت مرجع، ناهمسانگردی نامیده می‌شود. ناهمسانگردی مغناطیسی شدیدا روی شکل حلقه هیسترزیس تأثیر می‌گذارد و شار پسماند و وادارندگی را کنترل می‌کند[20]. ناهمسانگردی‌های مغناطیسی ناشی از عوامل مختلف است و به گونه‌های مختلف تقسیم بندی می‌شود. انواع ناهمسانگردی مغناطیسی عبارتند از:

1-ناهمسانگردی بلوری مغناطیسی

2-ناهمسانگردی شکلی

3-ناهمسانگردی تنشی

4- ناهمسانگردی القایی

5- ناهمسانگردی سطحی

[1] . Anisotropy