



دیرینه مغناطیسی

(کارشناسی ارشد زمین شناسی)

دکتر مصطفی یوسفی راد

بسم الله الرحمن الرحيم

پیشگفتار ناشر

کتاب‌های دانشگاه پیام نور حسب مورد و با توجه به شرایط مختلف یک درس در یک یا چند رشته دانشگاهی، به صورت کتاب درسی، متن آزمایشگاهی، فرادرسی، و کمک‌درسی چاپ می‌شوند.

کتاب درسی ثمره کوشش‌های علمی صاحب اثر است که براساس نیازهای درسی دانشجویان و سرفصل‌های مصوب تهیه و پس از داوری علمی، طراحی آموزشی، و ویرایش علمی در گروه‌های علمی و آموزشی، به چاپ می‌رسد. پس از چاپ ویرایش اول اثر، با نظرخواهی‌ها و داوری علمی مجدد و با دریافت نظرهای اصلاحی و متناسب با پیشرفت علوم و فناوری، صاحب اثر در کتاب تجدیدنظر می‌کند و ویرایش جدید کتاب با اعمال ویرایش زبانی و صوری جدید چاپ می‌شود.

متن آزمایشگاهی (م) راهنمایی است که دانشجویان با استفاده از آن و کمک استاد، کارهای عملی و آزمایشگاهی را انجام می‌دهند.

کتاب‌های فرادرسی (ف) و کمک‌درسی (ک) به منظور غنی‌تر کردن منابع درسی دانشگاهی تهیه و بر روی لوح فشرده تکثیر می‌شوند و یا در وبگاه دانشگاه قرار می‌گیرند.

مدیریت تولید محتوا و تجهیزات آموزشی

فهرست

پیشگفتار.....	شش
فصل اول - مبانی زمین مغناطیسی.....	۱
فصل دوم - خواص مغناطیسی کانی‌های فرومغناطیس.....	۱۷
فصل سوم - منشا مغناطیس پسماند طبیعی.....	۳۷
فصل چهارم - نمونه گیری، اندازه گیری مغناطیس طبیعی پسماند.....	۸۷
فصل پنجم - پایداری مغناطیس دیرینه.....	۱۰۹
فصل ششم - بررسی آماری داده‌های دیرینه.....	۱۳۳
فصل هفتم - قطب‌های مغناطیس دیرینه.....	۱۵۱
فصل هشتم - موضوعات خاص در مغناطیس سنگ‌ها.....	۱۶۵
فصل نهم - کاربردهای ژئوکرونولوژی.....	۱۸۹
فصل دهم - استفاده در جغرافیای دیرینه و تکتونیک.....	۲۱۵

پیشگفتار

بازنویسی تاریخ و سرنوشت سیاره ای که بشر بر روی آن خلق شده و تمدن خویش را در بستر حیات دیروز و امروز آن بنا نهاده و توسعه بخشیده، توسط سنگ‌ها انجام می‌شود. هر آنچه که از سرگذشت زمین به دنبال هستیم در متن سنگ‌های موجود در پوسته زمین قرار دارد که مطالعه آن در حوزه علم دیرینه و در شاخه دیرینه مغناطیسی است.

کتاب حاضر نیز به‌عنوان یک کتاب درسی جهت دانشجویان مقطع کارشناسی ارشد زمین‌شناسی، گرایش چینه‌شناسی و فسیل‌شناسی و جهت آزمون و یاددهی روش بررسی و تجزیه و تحلیل و استفاده از این ویژگی در لایه‌ها و طبقات زمین نگارش شده است.

در فصل اول این کتاب به تعریف اصطلاحات رایج به کار رفته در زمین مغناطیس و مغناطیس دیرینه پرداخته شده است.

فصل دوم به‌طور مختصر به معرفی اختصاصات مغناطیسی جامدات می‌پردازد ولی قسمت اصلی این فصل در مورد اختصاصات کانی‌شناسی مغناطیسی کانی‌های فرومغناطیسی مانند اکسیدهای آهن - تیتانیوم و سولفیدهای آهن است.

در فصل سوم با موضوع مغناطیس طبیعی پسماند در مورد اصول فیزیکی پایه و اصلی هر نوع از مغناطیس طبیعی پسماند بحث می‌شود و مکانیزم‌های اساسی را که مغناطیس طبیعی پسماند با آن شکل گرفته است بیان می‌کند.

فصل چهارم مراحل کسب اطلاعات را با ارائه روش‌های جمع‌آوری نمونه و سنجش و نمایش مغناطیس طبیعی پسماند، معرفی می‌کند و همچنین به‌طور مختصر به بحث در مورد روش‌هایی برای شناسایی کانی‌های فرومغناطیس در نمونه‌های مغناطیس دیرینه می‌پردازد.

در فصل پنجم با تئوری و کاربرد آزمون‌های پایداری خاصیت مغناطیسی سنگ‌ها آشنا می‌شوید همچنین روش‌ها و آزمایش‌های مغناطیس‌زدایی جزئی که برای جدا کردن chRM و معمولاً در آزمایشگاه انجام می‌شوند به اختصار ارائه می‌گردند.

از آنجایی که نیاز به تجزیه تحلیل آماری روی داده های مغناطیس دیرینه وجود دارد در فصل ششم روش های آماری اساسی برای تجزیه تحلیل داده های جهت دار مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در فصل هفتم روش های پایه ای برای محاسبه موقعیت قطب های مغناطیسی ارائه می شود.

در فصل هشتم به بحث در مورد انواع موضوعات ویژه در خاصیت مغناطیسی سنگ در ارتباط با چینه شناسی پرداخته شده است. فصل نهم بر وسیع ترین کاربردهای مغناطیس دیرینه در ژئوکرونولوژی یا مطالعه زمان زمین شناسی تمرکز دارد.

فصل دهم با عنوان شناخت جغرافیای دیرینه توسط مغناطیس دیرینه، اصول به کارگیری مغناطیس دیرینه در جغرافیای دیرینه را مورد بررسی قرار می دهد و نقاط قوت و ضعف به کارگیری مغناطیس دیرینه را در جهت بازسازی مجدد جغرافیای دیرینه قاره ای بیان می کند.

تدوین این کتاب ماحصل زحمات همکاران بی شماری است که بر خود وظیفه می داند از تلاش ها و مساعدت های عزیزانی همچون آقای دکتر فریدون قدیمی که زحمت ویراستاری علمی این کتاب را به عهده گرفته اند و آقای دکتر صادقی مدیرکل دفتر تدوین دانشگاه پیام نور که امکان انتشار این کتاب را فراهم نمودند و همچنین از زحمات بی دریغ و پیگیری های مستمر سرکار خانم فریده قطبی در دفتر تدوین دانشگاه پیام نور و سرکار خانم منیژه فامرینی که زحمت تایپ و صفحه آرایی کتاب را به عهده داشته اند کمال تشکر و قدردانی را اعلام نمایم.

بدیهی است کتاب حاضر به عنوان یکی از اولین کتب مرتبط با دیرینه مغناطیس حاوی نقایص و نقاط ضعف خاص خود است، که امید است با کنکاش و ارائه نقطه نظرات خوانندگان گرامی در کارهای آینده و ویرایش های جدید فاقد ضعف های احتمالی باشد.

مصطفی یوسفی راد

فصل اول

مبانی زمین مغناطیسی

مقدمه

یکی از ویژگی‌های مهم کره زمین وجود خاصیت آهنربایی آن است به نحوی که گویی درون کره زمین آهنربایی قرار داده شده است و تاکنون نظریه‌های گوناگونی برای علت آن ارائه شده است.

از سوی دیگر میدان مغناطیسی زمین به‌طور دوره‌ای قطبیت آن تغییر می‌کند. محور دو قطبی در جای خود باقی می‌ماند و تغییر نمی‌کند اما قطب شمال به سمت قطب جنوب و قطب جنوب به سمت قطب شمال تغییر جهت می‌دهد.

اولین هدف تحقیقات مغناطیس دیرینه^۱ ثبت وضعیت و حالت‌های گذشته میدان مغناطیس زمین^۲ می‌باشد. به عبارت بهتر مطالعه‌ی مغناطیس گذشته‌ی زمین است که در سنگ‌های با قدمت‌های متفاوت ثبت و ضبط شده است. برای درک بهتر مفهوم مغناطیس دیرینه (مغناطیس دیرینه) به اطلاعات اساسی درباره‌ی میدان مغناطیسی زمین نیاز است. ما در این فصل کار خود را با تعریف اصطلاحات رایج به کار رفته در زمین مغناطیس و مغناطیس دیرینه آغاز می‌کنیم.

تعاریف اساسی و مهم

این بخش شامل ارائه مفاهیم کلی و عمومی از مغناطیس و میدان مغناطیسی می‌باشد. در ابتدا می‌بایست گشتاور مغناطیسی (M)، مغناطیدگی یا مغناطش (J)، میدان مغناطیسی

1. Paleomagnetism
2. Geomagnetism

(H) و مغناطیس‌پذیری (χ) را تعریف کنیم.

گشتاور مغناطیسی^۱ یک ماده مغناطیسی معیاری از تمایل آن به هم‌خط شدن با یک میدان مغناطیسی است (دیانی و همکاران ۱۳۸۶). هم میدان مغناطیسی و هم گشتاور مغناطیسی را می‌توان بردارهایی در نظر گرفت که دارای اندازه و جهت هستند. جهت گشتاور مغناطیسی از قطب جنوب آهن ربا به قطب شمال آن است. میدان مغناطیسی تولید شده به وسیله یک آهن ربا با گشتاور مغناطیسی آن متناسب است

گشتاور دوقطبی مغناطیسی^۲ یا به صورت ساده‌تر، گشتاور یا ممان مغناطیسی (M) را می‌توان با اشاره به هر یک از جفت شارهای مغناطیسی (شکل ۱-۱a) و یا حلقه‌ای از جریان الکتریکی (شکل ۱-۱b) تعریف نمود. واژه شار که در مورد شار مغناطیسی^۳ نیز کاربرد دارد، به معنی جریان یا سیال می‌باشد و هرگاه در مقابل جریان یک کمیت سطحی قرار داده شود، مقدار جریان گذرنده از سطح را شار آن کمیت یا جریان می‌گویند. مثلاً در مورد میدان الکتریکی خطوط میدان که از سطح عمود بر مسیر خطوط عبور می‌کنند را شار الکتریکی و در مورد جریان آب، مقدار آبی را که از داخل سطح عبور می‌کند، شار آب می‌گویند و به همین صورت در مورد هر ماده سیال و جاری شونده‌ای می‌توان شار مربوطه به آن را تعریف کرد. واحد شار در سیستم متریک وبر و در سیستم انگلیسی ماکسول می‌باشد. به طوری که هر وبر برابر ۱۰ ماکسول است. میدان مغناطیسی نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشد. چون میدان مغناطیسی را به وسیله خطوط میدان نشان می‌دهیم، به طوری که چگالی خطوط بیانگر مقیاسی از قدرت میدان است، لذا می‌توان در مورد میدان مغناطیسی نیز سطحی در محل میدان در نظر گرفت و خطوط میدان گذرنده از آن را به عنوان شار مغناطیسی تعریف کرد.

تسلا (T) واحد چگالی شار مغناطیسی (B) است و برابر است با ۱۰,۰۰۰

گاوس. در واحد SI تسلا برابر است با (کولن × متر) / (نیوتن × ثانیه).

خواص مغناطیسی مواد نتیجه ممان‌های مغناطیسی حاصل از الکترون‌هاست. هر الکترون در یک اتم دارای ممان مغناطیسی است، که از دو منبع ایجاد می‌شود. یکی مربوط به حرکت اوربیتالی الکترون حول هسته است و دیگری ناشی از چرخش الکترون به دور محور خودش، که حرکت اسپینی نامیده می‌شود. بنابراین هر الکترون

1. Magnetic moment

2. Magnetic dipole moment

3. Magnetic charge

۳ مبانی زمین مغناطیسی

در یک اتم یا ممان‌های اوربیتالی و اسپینی می‌تواند به‌طور دائم مانند آهنربای کوچکی عمل نماید.

اگر اندازه شار m و بردار فاصله را (I) در نظر بگیریم گشتاور مغناطیسی (M) عبارت است از:

$$M = ml \quad (۱-۱)$$

و در مورد مداری با سطح A که جریان الکتریکی I از آن می‌گذرد این گشتاور مغناطیسی عبارت است از:

$$M = I A n \quad (۱-۲)$$

که در آن n برداری با طول واحد و عمود بر سطح مدار است که جهت جریان را نشان می‌دهد. جهت n (و بنابراین M) توسط قانون دست راست تعیین می‌شود. (طبق قانون دست راست، انگشت شست در جهت جریان، جهت بسته شدن چهار انگشت جهت میدان را نشان می‌دهد).

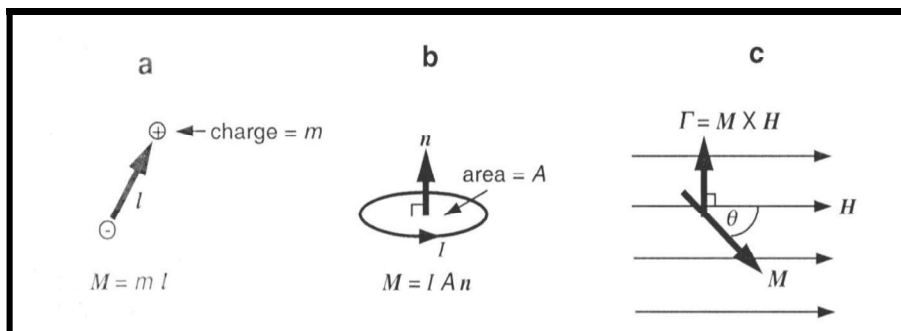
در سیستم استاندارد بین‌المللی یکاها، بعد گشتاور دو قطبی مغناطیسی برابر مساحت $\times$ جریان، IL ، است. این پایه‌ای برای تعریف گشتاور دو قطبی مغناطیسی است.

یکی دیگر از اساسی‌ترین مفاهیم در مغناطیس، میدان مغناطیسی (H) می‌باشد. میدان مغناطیسی میدانی است که توسط یک جسم مغناطیسی یا ذرات، و یا با تغییر میدان الکتریکی، تولید شده است. به عبارت دیگر اثراتی که یک آهنربا در فضای اطراف خود ایجاد می‌کند، را میدان مغناطیسی می‌گویند.

آزمایشی که می‌توانید انجام بدهید، مشاهده گشتاور روی یک گشتاور دو قطبی مغناطیسی است که در یک میدان مغناطیسی قرار گرفته است (شکل c ۱-۱). این گشتاور Γ طبق معادله زیر به دست می‌آید:

$$\Gamma = M \times H = MH \sin \theta \quad (۱-۳)$$

که در آن θ ، زاویه بین M و H می‌باشد که در شکل C ۱-۱ نشان داده شده است و Γ هم بردار واحد موازی با Γ در شکل c ۱-۱ است.



شکل ۱-۱ (a) یک دوقطبی مغناطیسی ساخته شده از یک جفت شار مغناطیسی، بردار فاصله از شار منفی تا شار مثبت I می باشد. (b) یک دو قطبی مغناطیسی ساخته شده از یک مدار دایره ای شکل جریان الکتریکی، جریان الکتریکی در مدار دایره ای (I) می باشد. بردار نرمال n عمود بر سطح مدار می باشد. (c) گشتاور Γ روی گشتاور مغناطیسی M که درون میدان مغناطیسی H قرار گرفته است (Butler 1992).

انرژی پتانسیل حاصل را می توان با یک بردار به صورت زیر نشان داد:

$$E = -M \cdot H = -MH \cos \theta \quad (1-4)$$

علامت منفی در این معادله، حالت و وضعیت حداقل انرژی وقتی که M با H موازی است را نشان می دهد.

میدان مغناطیسی^۱ کمیتی برداری است و مانند هر کمیت برداری دیگری دارای جهت و بزرگی است و آن را با نماد H نمایش می دهند. واحد میدان مغناطیسی در سیستم SI، آمپر بر متر (A/m) و در سیستم cgs اورستد (Oe) می باشد.

مغناطش^۲ یا مغناطیدگی (J) یک ماده، تعداد گشتاورهای مغناطیسی (دوقطبی های مغناطیسی) موجود در واحد حجم جسم را می گویند که معیار سنجش میزان مغناطیس شدن یک جسم می باشد و توسط رابطه زیر بیان می گردد:

$$J = \frac{\sum M_j}{\text{volume}} \quad (1-5)$$

که در آن M_j ، گشتاور مغناطیسی می باشد.

مغناطیدگی به طور اساسی دو نوع مغناطیدگی مغناطیس شدگی وجود

1. Magnetic field
2. Magnetization

۵ مبانی زمین مغناطیسی

دارد: مغناطیدگی یا مغناطیس شدگی القایی^۱ و مغناطیس شدگی پسماند یا پسماند مغناطیسی^۲ یا:

$$J = J_i + J_r \quad (۱-۶)$$

وقتی که ماده ای در یک میدان مغناطیسی (H) پراکنده می شود یک مغناطیدگی القایی (J) را به دست می آورد. این مقادیر به مغناطیس پذیری یا اصطلاحاً به پذیرفتاری مغناطیسی^۳ ماده یا (χ) بستگی دارد.

$$J_i = \chi H \quad (۱-۷)$$

پذیرفتاری مغناطیسی خاصیت بنیادی در مواد است که اندازه گیری آن متضمن اطلاعات زیادی از ساختار الکترونی و وجود حالت های مغناطیسی منظم در ماده است (Crick et, al., 2001, Ellwood et, al, 2006a,b). اگر M مغناطش و H میدان مغناطیسی اعمال شده به ماده باشد، پذیرفتاری مغناطیسی از رابطه زیر به دست می آید:

$$\chi = J_i/H \quad (۱-۸)$$

مثبت یا منفی بودن مقادیر X، به ترتیب به نشان دهنده خاصیت های پارامغناطیسی و دیامغناطیسی است که در فصل دوم در خصوص این نوع مواد بحث خواهد شد. گاهی پذیرفتاری را به صورت دیفرانسیلی dM/dH نیز تعریف می کنند.

وقتی ماده فرو و فری مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی قرار گیرد، گشتاورهای آن در جهت میدان قرار می گیرند. وقتی که همه گشتاورهای آن ماده هم سو با میدان شدند، مغناطش به حالت اشباع می رسد که به آن مغناطش اشباع می گویند. چنانچه میدان معکوس اعمال شود، تا نقطه عطف مغناطش برگشت پذیر است، ولی بعد از آن تعدادی از گشتاورها از جهت میدان اعمالی منحرف می شوند و تعدادی از آن ها نیز در جهت میدان باقی می مانند که به آن پسماند مغناطیسی (J_r) می گویند و نشان دهنده ی مقدار القاء مغناطیسی است که در جسم باقی می ماند (Butler 1992).

در بیشتر نقاط سطح زمین، میدان مغناطیسی کل در راستایی قرار می گیرد که نه موازی و نه عمود بر نصف النهارات مغناطیسی می باشد، در چنین حالتی مطابق شکل

1. Induced magnetism
2. Remanent magnetism
3. Susceptibility

۱-۲ میدان مغناطیسی زمین را می‌توان به دو مؤلفه افقی (H_h) و قائم (H_v) تجزیه نمود. زاویه بین بردارهای شمال مغناطیسی و H را زاویه میل مغناطیسی^۱ یا I و زاویه بین H و شمال جغرافیایی را زاویه انحراف مغناطیسی^۲ یا D گویند. زاویه میل از صفر درجه در استوا تا ۹۰ درجه در قطب متغیر می‌باشد. یعنی اندازه این عنصر مغناطیسی با عرض‌های مغناطیسی تغییر می‌کند.

در این حالت طبق شکل ۱-۲:

$$H_v = H \sin I \quad (۱-۹)$$

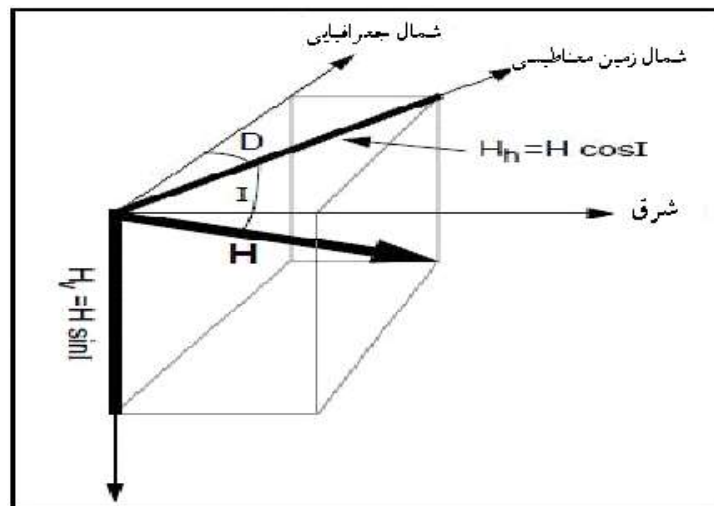
و

$$H_h = H \cos I \quad (۱-۱۰)$$

و بخش‌های شمال و شرق جغرافیایی هم به ترتیب، عبارتند از:

$$H_N = H \cos I \cos D \quad (۱-۱۱)$$

$$H_E = H \cos I \sin D \quad (۱-۱۲)$$



شکل ۱-۲ شرح و توضیح جهت میدان مغناطیسی. بردار میدان مغناطیسی کلی H به دو قسمت شکسته می‌شود (۱) بخش عمودی ($H_v = H \sin I$) و (۲) بخش افقی ($H_h = H \cos I$). (McElhinny 1973) I

۷ مبانی زمین مغناطیسی

تعیین I و D کاملاً جهت میدان زمین مغناطیس را شرح می‌دهد اگر این بخش‌ها، شناخته شده باشد تراکم و شدت کلی این میدان به صورت زیر داده می‌شود:

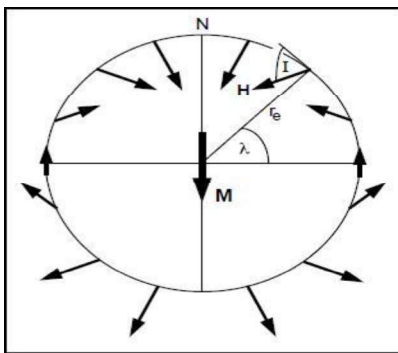
$$H = \sqrt{H_N^2 + H_E^2 + H_V^2} \quad (1-13)$$

مدل محور دو قطبی زمین مرکز

مفهوم محور دو قطبی زمین مرکز^۱ یا GAD در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. در این مدل فرض می‌شود میدان مغناطیسی توسط یک دوقطبی مغناطیسی که در مرکز زمین و در امتداد محور چرخشی زمین قرار گرفته تولید می‌شود. میدان GAD خواص زیر را دارا می‌باشد:

$$H_h = \frac{M \cos \lambda}{r_e^3} \quad (1-14)$$

$$H_v = \frac{2M \sin \lambda}{r_e^3} \quad (1-15)$$



شکل ۱-۳ مدل محور دو قطبی زمین مرکز. طبق این مدل، دو قطبی مغناطیسی M در مرکز زمین قرار دارد و با محور چرخشی هم‌راستا است (McElhinny 1973).

در این حالت میدان مغناطیسی از طریق معادله زیر به دست می‌آید:

$$H = \frac{M}{r_e^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \lambda} \quad (1-16)$$

که در آن M ، گشتاور دو قطبی، دوقطبی محوری زمین مرکز؛ λ عرض جغرافیایی از 90° در قطب جنوب جغرافیایی تا 90° در قطب شمال جغرافیایی می‌باشد و r_e شعاع زمین است. برای مدل GAD در هر نقطه $D=0$ و از سوی دیگر مقدار زاویه میل مغناطیسی از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\tan I = \left(\frac{H_v}{H_h} \right) = \left(\frac{2 \sin \lambda}{\cos \lambda} \right) = 2 \tan \lambda \quad (1-17)$$

I از 90° در قطب جنوب جغرافیایی تا 90° در قطب شمال جغرافیایی افزایش می‌یابد.

خطوط برابر I با خطوط عرض جغرافیایی موازی هستند و به آسانی به معادله (1-15) مربوط می‌شوند که پایه و اساس بسیاری از روش‌های مغناطیس دیرینه می‌باشند و به عنوان یک معادله دوقطبی شناخته شده است. رابطه بین I و λ برای درک بسیاری از کاربردهای جغرافیای دیرینه^۱ و زمین ساختی^۲ ضروری می‌باشد.

میدان مغناطیسی کنونی زمین

پیرامون زمین را میدان مغناطیسی که مغناطوکره^۳ نامیده می‌شود احاطه نموده است. همچنین قطب‌های مغناطیسی زمین با قطب‌های جغرافیایی آن منطبق نیستند. محور میدان مغناطیسی زمین، یعنی خط مستقیمی که از هر دو قطب مغناطیسی می‌گذرد، از مرکز زمین نمی‌گذرد و از این‌رو قطر زمین نیست. مغناطوکره توسط دو عامل مشخص می‌شود: انحراف مغناطیسی و شیب مغناطیسی (Butler 1992).

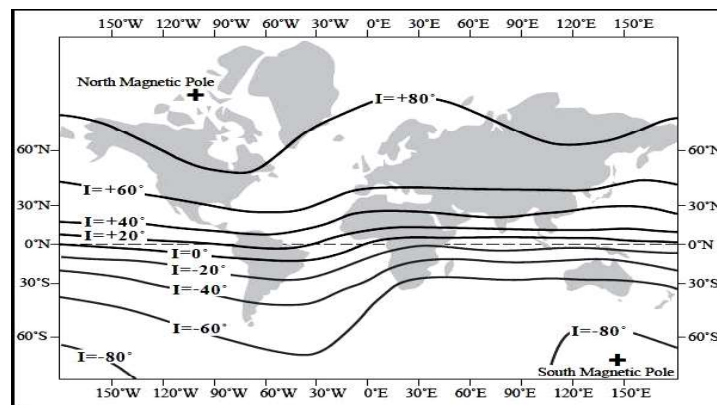
انحراف مغناطیسی عبارت است از زاویه انحراف عقربه مغناطیسی از نصف النهار جغرافیایی مورد نظر. خطوط واصل نقاط دارای انحراف مغناطیسی مساوی که خطوط هم گوشه نام دارند، در جنوب و شمال قطبین مغناطیسی که مخالف قطبین جغرافیایی است، همگرا می‌شود. برخی از محققان، عدم تطابق قطب‌های مغناطیسی و جغرافیایی را به توزیع نایک‌نواخت خشکی و آب در زمین توجیه می‌نمایند. شیب مغناطیسی عبارت است از زاویه میان عقربه مغناطیسی نسبت به افق (در نیمکره شمالی سر شمالی

1. Paleogeographic
2. Tectonic
3. Magnetosphere

۹ مبانی زمین مغناطیسی

عقربه و در نیمکره جنوبی عقربه به افق متمایل می‌شود). ضمن حرکت از استوا به سوی قطبین، شیب مغناطیس افزایش می‌یابد. خط واصل نقاط دارای شیب صفر استوای مغناطیسی نام دارد. استوای مغناطیسی، استوای جغرافیایی را در دو نقطه، یکی با 169° طول شرقی و دیگری با 23° طول غربی به جنوب و در نیمکره شرقی به شمال قطع می‌کند. در قطبین مغناطیسی شیب به 90° می‌رسد.

شکل ۴-۱ یک نقشه هم مغناطیس^۱ است که در آن نقاط هم شیب^۲ میدان مغناطیسی زمین نشان داده شده است. استوای زمین مغناطیسی^۳ (خط $I=0$) به استوای جغرافیایی نزدیک است و شیب‌ها هم در نیمکره شمالی، مثبت و در نیمکره جنوبی منفی می‌باشند.



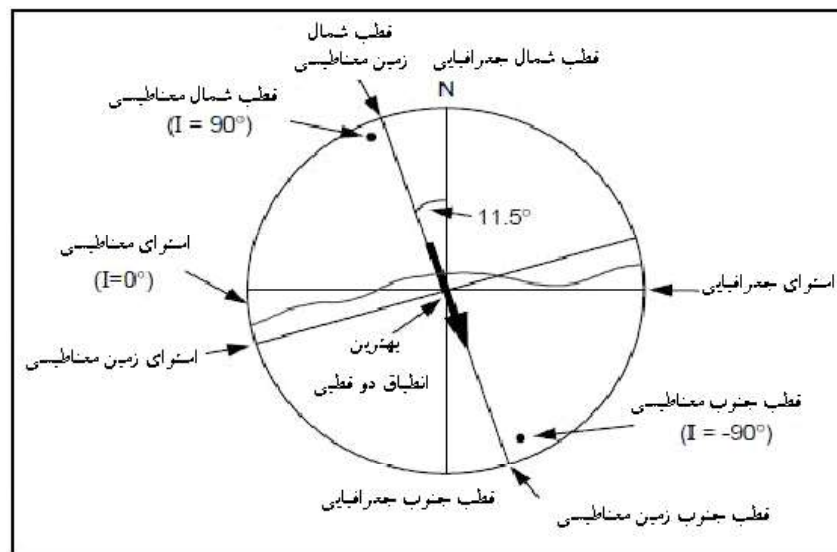
شکل ۴-۱ نقشه هم شیب میدان مغناطیس زمین در سال ۱۹۴۵. اعداد واقع بر روی خطوط هم شیب برابر میدان مغناطیسی هستند، محل‌های قطب مغناطیسی توسط علامت‌های مثبت نشان داده شده‌اند (McElhinny 1973).

قطب‌های مغناطیسی شامل محل‌هایی که $I = \pm 90^\circ$ است که قطب‌های دوتایی^۴ هم نامیده می‌شوند. همان‌طور که برای میدان GAD انتظار می‌رود در قطب‌های جغرافیایی قرار ندارند و نوسانات استوای مغناطیسی درباره استوای جغرافیایی وجود ندارد. میدان مغناطیسی زمین کنونی به‌طور واضح، پیچیده‌تر از یک میدان GAD است و مدل GAD هم باید به‌صورتی اصلاح شود که بتواند تعریف بهتری از میدان زمین داشته باشد.

-
1. Isomagnetic map
 2. Isoclinic
 3. Geomagnetic equator
 4. Dip poles

(Butler 1992).

همان‌طور که در شکل ۵-۱ نشان داده شده است یک دو قطبی شیب‌دار مرکز زمین به بهترین صورت میدان مغناطیسی زمین کنونی را شرح می‌دهد. میدان ژئومغناطیس کنونی زاویه‌ای در حدود 11.5° با محور چرخشی به‌وجود می‌آورد. در این شکل استوای مغناطیسی^۱ مکانی است که بر روی سطح زمین قرار داشته و در آنجا زاویه میل صفر می‌باشد و یا به عبارتی بردار میدان مغناطیسی در صفحه افق قرار دارد. این مکان با استوای جغرافیایی ارتباطی ندارد. قطب مغناطیسی^۲ نیز مکانی است بر روی سطح زمین که در آنجا زاویه میل 90° درجه بوده و به عبارتی بردار میدان مغناطیسی زمین عمود می‌باشد. استوای مغناطیسی، دایره عظیمه خیالی است که از تقاطع یک صفحه با محور شمال و جنوب مغناطیسی در مرکز زمین ایجاد می‌شود. اگر میدان مغناطیسی زمین دقیقاً یک دو قطبی زمین مرکزی باشد، پس قطب های زمین مغناطیسی دقیقاً با دو قطبی ها همپوشی دارند. این واقعیت که این قطب ها منطبق نیستند نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی زمین نسبت به دو قطبی زمین مرکزی، از وضعیت پیچیده‌تری برخوردار است.

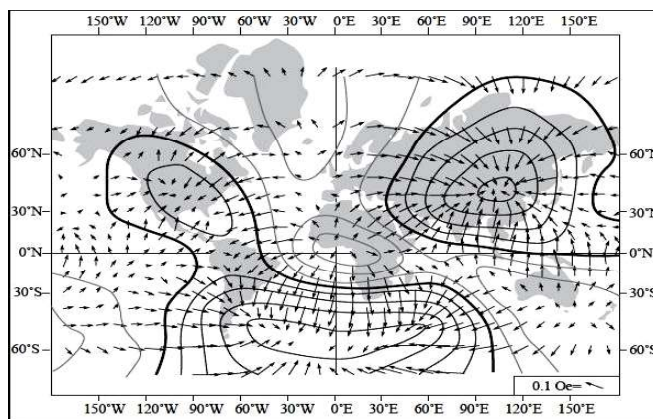


شکل ۵-۱ مدل دو قطبی زمین مرکز (McElhinny 1973).

1. Magnetic equator
2. Magnetic pole

در مورد میدان زمین مغناطیس کنونی، دوقطبی گریز از مرکز تنظیم شده حدود ۵۰۰ کیلو متری (۸٪ از شعاع زمین) مرکز زمین به سمت شمالی‌ترین بخش حوضه اقیانوس آرام قرار دارد. ثابت شده که توانایی دوقطبی گریز از مرکز برای شرح و توضیح میدان زمین مغناطیسی، به محل روی سطح زمین بستگی دارد. در بعضی از مکان‌ها، دوقطبی گریز از مرکز ثابت، به طور کامل، میدان زمین مغناطیسی را شرح می‌دهد. اما در مکان‌های دیگر، بیش از ۲۰٪ از میدان مغناطیسی زمین سطح را نمی‌توان حتی با دو قطبی ثابت هم شرح داد. این اختلاف، وجود بخش بالاتری از میدان دوقطبی زمین مغناطیس که میدان بدون دوقطبی^۱ نامیده می‌شود را نشان می‌دهد. طرحی از میدان بدون دوقطبی (برای سال ۱۹۴۵) در شکل ۱-۶ نشان داده شده است که شماره گرهای، بخش عمودی میدان بدون دوقطبی را نشان می‌دهند و فلش‌ها هم وضعیت و جهت بخش افقی میدان بدون دوقطبی را نشان می‌دهند.

همان‌طور که در شکل ۱-۶ مشاهده می‌شود، شش یا هفت ساختار با مقیاس قاره‌ای وجود دارد که روی میدان غیردوقطبی قرار دارند. بعضی از این ساختارها، میدان عمودی به سمت بالا هستند و بخش‌های افقی که از مرکز این ساختار دور می‌شوند. خطوط میدان مغناطیسی از زمین نشأت می‌گیرند و از این ساختارها دور می‌شوند. ساختارهای غیردوقطبی دیگر، نمونه مثبتي را به همراه خطوط میدان مغناطیسی به سمت پایین و بالای مرکز ساختار نشان می‌دهند.



شکل ۱-۶ میدان مغناطیسی زمین بدون دوقطبی در سال ۱۹۴۵. فلش‌ها، حالت و جهت بخش افقی روی میدان غیر دوقطبی را نشان می‌دهند. (Bullard و همکاران ۱۹۵۰).

این دو قطبی‌های شعاعی درون هسته خارجی مایع، نزدیک مرز جبهه قرار دارند. علامت‌های مخالف این دوقطبی‌های شعاعی را می‌توان برای نمونه‌های میدان مخالف ساختارهای غیردوقطبی به کار برد. این ریخت‌شناسی و الگو برداری میدان غیردوقطبی، ناحیه‌ای را در جریانات مایع در هسته خارجی نزدیک جبهه جامد نشان می‌دهد، در واقع ساختارهای غیردوقطبی، دینامیک هستند.

تغییرات دوره‌ای میدان مغناطیسی زمین

جهت و وضعیت میدان مغناطیسی زمین با زمان تغییر می‌کند. تغییرات همراه با دوره‌های بین یک تا 10^5 سال تغییرات دوره‌ای زمین مغناطیسی را تشکیل می‌دهند. حتی پیش از زمانی که میدان زمین مغناطیسی ثبت شود، تغییرات میدان مغناطیسی زمین را می‌توان به چهار دسته زیر تقسیم کرد:

تغییرات با زمان تناوب طولانی

زمان آن قابل مقایسه با دوره‌های زمین‌شناسی است (چندین ده میلیون سال). مثل تغییر مکان قطب‌های مغناطیسی و حتی معکوس شدن آنها. این تغییرات را می‌شود با خواص مغناطیسی سنگ‌های قدیمی زمین مطالعه کرد. مطالعات سنگ‌های آذرین و رسوبی نشان داده که قطبین مغناطیسی زمین چندین بار تغییر مکان داده و جهت آنها نیز عوض شده است. مطالعاتی که در زمینه مغناطیسی گذشته زمین انجام گرفته نشان داده است که تعویض قطبین مغناطیسی زمین در دوران سنوزوئیک بیش از همه بوده و در دوران پالئوزوئیک اصلاً دیده نشده است. تعویض قطبین زمین را به دو صورت می‌توان تغییر کرد. یا اینکه جای قطبین زمین واقعاً عوض شده و یا اینکه وجود یک میدان مغناطیسی محلی معکوس، باعث شده است که کانی‌های مغناطیسی در جهت عکس میدان مغناطیسی اصلی زمین قرار گیرند.

تغییرات قرنی

این تغییرات دوره تناوبی در حدود قرن دارند. براساس این تغییرات، علاوه بر تغییر شدت میدان مغناطیسی در یک محل زوایای انحراف و میل آن منطقه هم عوض می‌شود.

تغییرات روزانه

میدان مغناطیسی زمین در یک نقطه حتی در طول یک روز ثابت نیست و به میزان قابل توجهی تغییر می‌کند به طوری که مقدار متوسط تغییرات روزانه را می‌توان ۳۰ گاما در نظر گرفت. اندازه تغییرات روزانه تا حدود زیادی به عرض جغرافیایی محل بستگی دارد و از آنجا که دوره تناوب آن با گردش زمین مطابقت می‌کند، تصور می‌شود که عامل اصلی این دسته تغییرات خورشید است.

تغییرات ناگهانی

این تغییرات به طور ناگهانی و اتفاقی انجام می‌گیرد که از معروف‌ترین آنها طوفان‌های مغناطیسی است. برای این‌گونه تغییرات نمی‌توان دوره تناوب مشخصی در نظر بگیریم ولی تقریباً هر ۲۷ روز یکبار تغییرات مشابهی نشان می‌دهند و از آنجا که این مدت با زمان گردش وضعی خورشید برابر است، لذا می‌توان گفت که قسمتی از سطح خورشید که لکه‌های فراوانی دارد در ایجاد این تغییرات نقش مهمی ایفا می‌کند.

منشاء میدان مغناطیسی زمین

میدان مغناطیسی زمین و تفاوت‌های مکانی و زمانی آن یکی از قدیمی‌ترین مباحث زمین‌شناسی است. به هر حال توانایی ما برای شرح میدان باعث درک و فهم ما از منشاء آن می‌شود. تمام تئوری‌های قابل تأمل، شامل تولید میدان زمین مغناطیسی در هسته خارجی مایع زمین توسط بعضی از دیناموهای هیدرودینامیک مغناطیسی^۱ می‌باشند. در قلب سیاره ما گلوله سخت و یکپارچه‌ای از آهن وجود دارد که به اندازه سطح خورشید داغ است و به آن هسته زمین می‌گوییم که پهنای آن هفتاد درصد کره ماه است و به اندازه ۰/۲ طول جغرافیایی در سال سریعتر از زمین می‌چرخد. اقیانوسی از آهن مایع دور هسته درونی وجود دارد که به آن هسته خارجی گویند و شعاعش نصف شعاع زمین است.

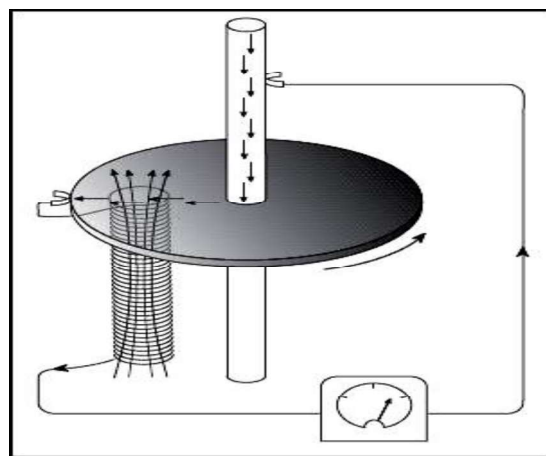
محققان منشاء میدان مغناطیسی را هسته خارجی می‌دانند که لایه عمیقی از آهن مایع است و بدور هسته می‌گردد. در واقع هسته خارجی مانند آب روی اجاق بر روی هسته داخلی در جوش و خروش است. و از طرفی اثر نیروی کریولیس دوران زمین

1. magnetohydrodynamic dynamo

درون هسته خارجی ایجاد طوفان و گرداب میکند.

تلاش‌هایی برای حل ریاضی این مسئله از بعد هیدرودینامیک مغناطیسی توسط زمین‌شناسان انجام شده اما هنوز به مطالعات بیشتری نیاز است. در واقع مدل‌های کامل دینامیکی وجود ندارند. اکنون به آسان‌ترین و آشناترین پدیده‌ای که توسط آن همه روزه میدان مغناطیسی تولید می‌کنیم، برمی‌گردیم که همان استفاده از جریان‌های الکتریکی است. یک جریان الکتریکی وقتی از میله‌ای آهنی عبور کند، در اطراف میله آهنی میدان مغناطیسی تولید می‌گردد و هیچ لزومی ندارد که جسم آهن‌ریا شده، جامد باشد زیرا می‌دانیم که جریان الکتریسیته می‌تواند در گازها و مایعات نیز میدان مغناطیسی ایجاد کند. این پدیده‌ها سرانجام به‌طور کامل تحت عنوان «ماگنتویدرودینامیک» یا ئیدرودینامیک مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفت. حرکت سیال هادی الکتریسیته به شرط آنکه در میدان مغناطیسی قرار داشته باشد، جریان الکتریکی تولید می‌کند (اصل دینامو). بنابراین منشا میدان مغناطیسی زمین ممکن است مربوط به حرکات هسته باشد.

به نظر می‌رسد اولین قدم در این خصوص تشریح مدل دیناموی خود جوش است. یک مدل ساده دینامودیسک الکترومکانیکی^۱ شامل عوامل ضروری دیناموی خود جوش می‌باشد (شکل ۱۰-۱).



شکل ۱۰-۱ دیناموی خودجوش. جریان الکتریکی توسط فلش‌های پرننگ نشان داده شده است (Elsasser 1958).

این مدل از یک دیسک مسی ساخته شده که به طور الکتریکی روی یک محور رسانا می‌چرخد. یک میدان مغناطیسی اولیه به نام B ، در یک جهت رو به بالا و عمود بر صفحه مسی می‌باشد. الکترون‌ها، در این دیسک مسی، نیروی لورنز F_L را در هنگام عبور از این میدان بوجود می‌آورند. نیروی لورنز به شکل زیر داده شده است (معادله ۱۶-۱).

$$F_L = qv \times B \quad (1-16)$$

در حالی که q ، شار الکتریکی الکترون‌ها و v هم شتاب الکترون‌ها می‌باشد. این نیروی لورنز روی الکترون‌ها به سمت محور دیسک جهت دارد و جریان الکتریکی به دست آمده به سمت خارج دیسک است.

با این مدل ساده ما با عوامل ضروری هر دیناموی خودجوش مواجه می‌شویم که این عوامل در بخش زیر آمده اند:

(۱) به یک رسانای الکتریکی متحرک نیاز است و این مورد توسط یک دیسک مسی چرخنده نشان داده می‌شود.

(۲) به یک میدان مغناطیسی اولیه نیاز است.

(۳) می‌بایست واکنشی بین میدان مغناطیسی و رسانا صورت بگیرد تا میدان مغناطیسی اولیه تقویت شود. در این مدل، این واکنش نیروی لورنز با حلقه‌ای است که به عنوان یک مدار بازتاب مثبت عمل می‌کند.

(۴) انرژی می‌بایست تأمین شود تا بر کمبودهای مقاومت الکتریکی فائق آید. در این مدل، این انرژی می‌بایست برای چرخش دیسک تأمین شود.

به طور آشکار حرکات سیال در مرکز زمین برای تولید دوباره میدان کافی هستند. بنابراین بخش غالب میدان مغناطیسی زمین شکل دوقطبی با ساختارهای غیردوقطبی است که احتمالاً حاصل جریانات سیال درون هسته نزدیک مرز جبه می‌باشد.

ماهیت میدان مغناطیسی زمین، خود قوی‌ترین استدلال برای نظریه دینام است. چندین سال است که ژئوفیزیک‌دانان دریافته‌اند که میدان مغناطیسی زمین نامنظم است و دائماً در حال تغییر می‌باشد. عقربه قطب‌نما دقیقاً در امتداد شمال قرار نمی‌گیرد و به مقداری متنوع در نقاط مختلف جهان، از شمال حقیقی انحراف دارد. انحراف‌های گردابی کوچک مغناطیسی متعددی که بیان‌گر ناهمگونی‌هایی در میدان مغناطیسی است،

وجود دارد. این انحرافات جدی و محسوس بود، زیرا با گذشت زمان تغییر می‌یافت. دریانوردان و هوانوردانی که نقشه‌های مغناطیسی برای مسافرت به کار می‌برند به‌خوبی می‌دانند که نقشه‌های موجود هرچند سال یک بار تجدید و تصحیح می‌گردد. میدان مغناطیسی زمین، نه تنها حرکات رفت و برگشتی (غربی-شرقی) دارد، بلکه شدت تغییرات آن نیز از زمانی تا زمان دیگر فرق می‌کند (Butler 1992).

به عبارت دیگر، اگرچه شدت میدان مغناطیسی زمین به‌صورت یک کل مطرح است، اما مقدار آن همیشه یکسان نیست. در قرن حاضر که دقیق‌ترین وسایل اندازه‌گیری شدت مغناطیسی ساخته شده است، شدت میدان مغناطیسی زمین حدود ۵ درصد کاهش یافته است. نیازی نیست که به فکر سال ۴۰۰۰ میلادی باشیم که گفته می‌شود در آن مردم برای مدت طولانی قادر نخواهد بود در امور دریانوردی و هواپیمایی از قطب‌نما استفاده کنند. مدارک زنده‌ای وجود دارد که از چند سال گذشته شدت میدان مغناطیسی زمین کاهش یافته است و در آینده ممکن است دوباره صعودی شود و شدت یابد.

فصل دوم

خواص مغناطیسی کانی‌های فرومغناطیس

مقدمه

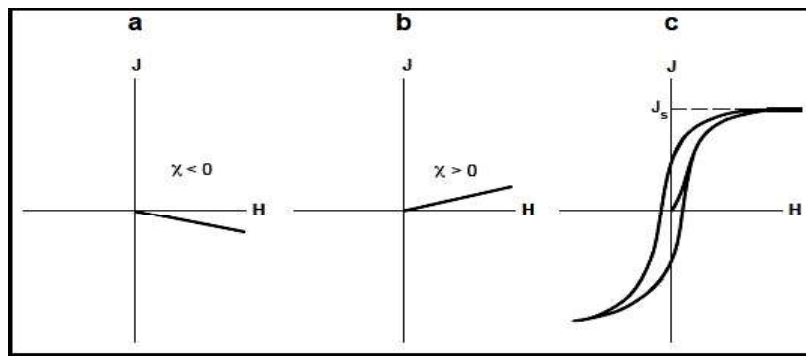
این فصل با خلاصه‌ای از معرفی اختصاصات مغناطیسی جامدات شروع می‌شود. قسمت اصلی این فصل در مورد اختصاصات کانی‌شناسی مغناطیسی کانی‌های فرومغناطیسی مانند اکسیدهای آهن - تیتانیوم و سولفیدهای آهن است. کانی‌شناسی فرومغناطیسی به عنوان یک بخش مهم برای دستیابی به مشخصات مغناطیس دیرینه‌ای در سنگ‌ها ضروری است، اثرات دماهای ارزیابی شده و تغییرات شیمیایی نیز در آنها نشان داده شده است.

خواص مغناطیسی جامدات

بروز خصلت مغناطیسی در عناصر و ترکیبات مختلف و کانیها ارتباط تنگاتنگی با آرایش الکترونی عنصر و یا عناصر موجود در ساختار آن ترکیب دارد. در این حالت ترکیباتی که واجد عناصر واسطه جدول تناوبی باشند، می‌توانند خاصیت مغناطیسی را با شدت وصف متفاوتی بروز دهند. در این دسته از عناصر اوربیتال 3d در حال پر شدن است. این اوربیتال دارای ۵ اوربیتال فرعی است که هر کدام با دو الکترون پر می‌شوند. وجود الکترون‌های جفت نشده و تعداد اوربیتال‌های فرعی نیمه پر، شدت بروز خاصیت مغناطیسی و حساسیت مغناطیسی عناصر و ترکیبات را تعیین می‌کنند. به‌طور کلی خاصیت مغناطیسی عبارت است از قدرت جذب عناصر، کانی‌ها و سنگ‌ها توسط میدان‌های مغناطیسی. به عنوان مثال عناصری مانند آهن و نیکل به‌خوبی جذب

میدان‌های مغناطیسی می‌گردند.

شکل ۱-۲ سه نوع اساسی اختصاصات مغناطیسی مشاهده شده در آزمایشات را نشان می‌دهد، حالت مغناطیسی J در پاسخ به استفاده از میدان مغناطیسی به دست می‌آید و H حالت کنترل شده است. در این بخش، این رفتارهای مختلف مغناطیسی به صورت خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرد. بعضی از اتم‌ها دارای گشتاورهای مغناطیسی اتمی هستند و حرکت‌های الکترونی در آنها انجام می‌شود.



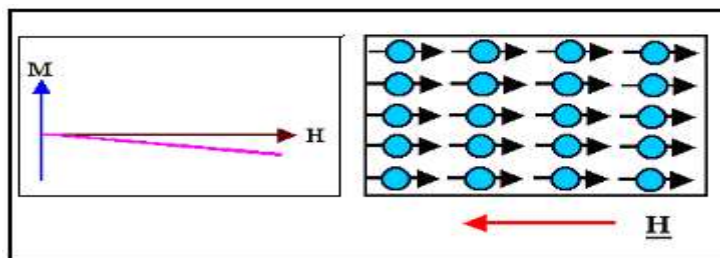
شکل ۱-۲ (a): مغناطیس شدگی (J) در مقابل میدان مغناطیسی (H) در دیامغناطیس‌ها. مغناطیس پذیری (χ) یک ثابت منفی است. (b): J در مقابل H برای اجسام پارامغناطیسی می‌باشد. مغناطیس پذیری (χ) یک ثابت مثبت می‌باشد. (c): J در مقابل H برای فرومغناطیس‌ها می‌باشد و مسیر خاصیت آهنربایی ناشی از آثار مغناطیسی را نمایش می‌دهد و مغناطیس پذیری (χ) یک ثابت ساده نیست.

مواد دیامغناطیس

این مواد که دارای حساسیت مغناطیسی صفر و یا منفی هستند به هیچ وجه خاصیت مغناطیسی در آنها به وجود نمی‌آید. مواد دیا مغناطیس باعث تضعیف شار مغناطیسی می‌گردند. به بیان دیگر، جهت جریان‌های بنیادی در دیا مغناطیس واقع در میدان مغناطیسی خارجی چنان است که میدان مغناطیسی آنها مخالف میدان خارجی است. در نتیجه اثر میدان مغناطیسی خارجی روی دیا مغناطیس‌ها مخالف اثر آنها روی مواد فرو مغناطیس و پارا مغناطیس است، یعنی مواد دیا مغناطیسی با آهنربا دفع می‌شوند. پاسخ مواد دیامغناطیس در مقابل استفاده از یک میدان مغناطیسی (شکل ۱-۲) به دست آوردن یک حالت مغناطیسی القایی است (J_i) که در مقابل آن میدان (H) استفاده شده است.

حالت مغناطیسی به صورت خطی بستگی به میدان استفاده شده دارد و ممکن است کاهش یافته به صفر برسد و این با توجه به حرکت میدان اصلی است. استفاده از میدان مغناطیسی حرکت اوربیتالی الکترون‌ها را تغییر می‌دهد تا بتواند با توجه به میدان مغناطیسی یک وضعیت نامساوی مغناطیسی کوچک را ایجاد کند. این پاسخ مغناطیسی یک اختصاص برای تمام مواد است، اما برای موادی که اتم‌های آن، گشتاورهای مغناطیسی اتم‌ها را دارا می‌باشد (شکل ۲-۲).

قدیمی‌ترین مشاهده مربوط به الکترواستاتیک این است که خرده‌های کاغذ بدون بار قرار داده شده در میدان الکتریکی غیریکنواخت نزدیک سر یک میله باردار توسط میله جذب می‌شوند. مولکول‌های کاغذ گشتاور دو قطبی الکتریکی ذاتی ندارند و این خاصیت جذب شدن ناشی از گشتاور دو قطبی القا شده در کاغذ، بر اثر میدان الکتریکی خارجی است.



شکل ۲-۲ آرایش مغناطیسی مواد دیامغناطیس

اختلاف رفتار در حالت‌های الکتریکی و مغناطیسی از این واقعیت ناشی می‌شود که دو قطبی‌های الکتریکی القایی و میدان الکتریکی خارجی هم جهت هستند، اما دو قطب‌های مغناطیسی القایی در خلاف جهت میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرند. خاصیت دیا مغناطیسی نمودی از قانون القای فاراده روی الکترون‌های اتم است. این واقعیت که گشتاور میدان مغناطیسی القا شده در خلاف جهت میدان مغناطیسی القاکننده است، نتیجه‌ای از اثر قانون لنز (قانون لنز که در مورد جریان‌های القایی بکار می‌رود چنین بیان می‌شود که جریان القایی در مدارهای بسته در جهتی است که با عامل بوجود آورنده خود مخالفت می‌کند) در مقیاس اتمی است. دیامغناطیس توسط اثرات