آموزشی

میدان مغناطیسی زمین

محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر
کارشناس گروه فیزیک دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی

چکیده
در مقاله حاضر به تفصیل به میدان مغناطیسی زمین و دلیل وجود آن که در کتاب علوم زمین دورهٔ پیش‌دانشگاهی به‌گونه‌ای مبهم به آن اشاره شده است، می‌پردازیم. سپس ویژگی‌های مغناطیس زمین و آثار مغناطو باستان‌شناسی آن مطرح می‌شود و در پایان به مبحث وارونگی مغناطیسی می‌پردازیم که ظاهراً، بنا به مهم‌ترین مرجعی که در این زمینه وجود دارد، هم کتاب درسی و هم تمام مراجع فارسی اینترنتی در توضیح دلیل احتمالی آن به خطا رفته‌اند.

کلیدواژه‌ها: میدان مغناطیسی، زمین، نظریه دینامو، رسانای الکتریکی، چرخش زمین، قانون کوری

نظریه دینامو

کرهٔ زمین یک آهن‌ربای عظیم است و میدان مغناطیسی آن را می‌توان به‌صورت میدان مغناطیسی حاصل از یک آهن‌ربای میله‌ای عظیم تقریب زد که در مرکز این سیاره قرار گرفته است. امّا نکتهٔ بسیار جالب آن است که این میدان مغناطیسی نمی‌تواند بر اثر مغناطیس دائمی یک آهن‌ربای میله‌ای عظیم پدید آمده باشد، زیرا میزان مغناطیسی شدن مواد مغناطیسی طبق قانونی موسوم به قانون کوری با دما نسبت معکوس دارد. با افزایش دما، همسویی گشتاورهای دوقطبی مغناطیسی اتم‌های نمونه بر اثر اغتشاش گرمایی به هم می‌خورد و نمونه، خاصیّت مغناطیسی خود را از دست می‌دهد. بنابراین چون دما درون زمین بسیار زیاد است، میدان مغناطیسی زمین یقیناً نیاز به سازوکاری دارد که مستلزم وجود جریان‌های الکتریکی در درون زمین است. اولین بار شخصی به نام والتر السایسر[1] در سال ۱۹۴۶ به این موضوع اشاره کرد. البته همان طور که در کتاب درسی نیز اشاره شده است، مشاهدات تجربی در تأیید این پیشگویی مؤثر بوده است، زیرا اگر زمین دارای یک کانون مغناطیسی پایدار و دائمی بود، توجیه تغییرات وابسته به زمان میدان مغناطیسی زمین امکان نداشت.

در توضیح میدان مغناطیسی زمین، نظریه‌ای موسوم به نظریهٔ دینامو مطرح شده که البته در کتاب درسی بسیار گذرا و ناقص به آن پرداخته شده است. نظریهٔ دینامو از دو بخش تشکیل شده است که هر دو بخش معطوف به هستهٔ خارجی زمین هستند که از این هسته فلز مذاب تشکیل شده است.

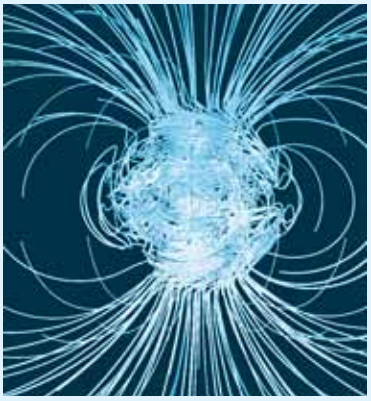
۱. یکی از ویژگی‌های رساناهای خوب این است که میدان مغناطیسی در آن‌ها به دام می‌افتد و چون آهنِ مذابِ هستهٔ خارجی زمین رسانای الکتریکی خوبی است، بخشی از خطوط میدان ژئومغناطیسی زمین در این هسته

حبس می‌شـود. با چرخش زمین، و در نتیجه چرخش هستهٔ خارجی، خطوط میدان کشیده می‌شوند و میدان شمالی- جنوبی (دو قطبی) ۰/۵ گوسی زمین به شکل میدان مغناطیسی شرقی- غربی (سمتی) درمی‌آید. این تغییر شـکل ناشی از نیروهای کوریولیس حاصل از چرخش زمین بر شارهٔ فلزی هستهٔ خارجی است.

کرهٔ زمین یک آهن‌ربای عظیم است و میدان مغناطیسی آن را می‌توان به‌صورت میدان مغناطیسی حاصل از یک آهن‌ربای میله‌ای عظیم تقریب زد که در مرکز این سیاره قرار گرفته است

۲. همرفـت در شـارهٔ فلـزی مذاب، ایـن میدان شـرقی- غربی را وامی‌پیچانـد. همرفت ممکن اسـت ناشـی از گرمای نهان مربـوط به تغییر حالت‌ها در مرز میان بخش‌های جامد و مایع هسـته یا نتیجهٔ شناوری عنصرهای سبکی مانند اکسیژن باشد که در هستهٔ مذاب حل می‌شوند و بر اثر چگالش بخش فلزی در مرز هستهٔ جامد داخلی آزاد می‌شوند. برخی این فرایند را مشابه پخش شدن قطرهٔ جوهری در آب دانسته‌اند و در مشابهت با آن استدلال می‌کنند که خطوط میدان مغناطیسی بر اثر پدیدهٔ همرفت تمایل دارند در هستهٔ خارجی زمین پخش شوند.

بنابراین اگر توجه کنید ما دو فرایند متضاد داریم که یکی تمایل دارد خطوط مغناطیسی زمین را به‌طور سمتی بکشد و دیگری تمایل دارد این خطوط را در هستهٔ خارجی حفظ کند. در تحقیقات بسـیار نشان داده شده اسـت که حاصل این دو فرایند تبدیل میدان‌های شرقی- غربی به شـکل حلقه‌های نصف‌النهّاری اسـت که در زمان‌هایی حول و حوش 10^3 سـال به هم ملحق می‌شـوند و میدان مغناطیسی شمالی- جنوبی زمین را تقویت می‌کنند. پس در عمل این دو فرایند نظریهٔ دینامو هستند که می‌توانند تغییرات وابسته به زمان میدان مغناطیسی زمین را توجیه کنند. در همین زمینه گری گلاتزمایر[۲] و پاول رابرتز[۳] مقالهٔ بسـیار مهم و کلاسیکی را در سال ۱۹۹۵ در مجلهٔ Nature به چاپ رساندند که در منابع این مقاله موجود است.



شکل ۱. خطوط میدان مغناطیسی

شکل ۲. قطب‌های مغناطیسی و جغرافیایی زمین

توجه کنید که تغییرات زمانی میدان مغناطیسی غیر از تغییرات محلی میدان‌های مغناطیسـی هسـتند که از اختلاف خواص مغناطیسـی سنگ‌های تشـکیل‌دهندهٔ پوسـتهٔ زمیـن حاصل می‌شوند.

ویژگی‌های مغناطیسی زمین

در پی تحقیقات فراوان ثابت شده است که میدان مغناطیسی زمین مانند میدان مغناطیسی یک دو قطبی مغناطیسی عمل می‌کند و بنابراین به آن یک گشتاور دوقطبی $\vec{\mu}$ وابسته است. برای چنین میدان آرمانی، بزرگی $\vec{\mu}$ برابر $8/0 \times 10^{22}$ J/T است و جهت $\vec{\mu}$ با محور چرخش زمین زاویهٔ $11/5^\circ$ می‌سازد. محور دو قطبی در راستای $\vec{\mu}$ قرار دارد و سطح زمین را در قطب شمال ژئومغناطیسی واقع در شمال گرینلند و قطب جنوب مغناطیسی را در جنوبگان قطع می‌کند. خطوط میدان مغناطیسی $\vec{B}$ عموماً از نیمکرهٔ جنوبی خارج می‌شوند و دوباره از نیمکرهٔ شمالی وارد زمین می‌شوند.

بنابراین، قطب مغناطیسی واقع در نیمکرهٔ شمالی کرهٔ زمین که به‌عنوان «قطب شمال مغناطیسی» شناخته می‌شود، «قطب جنوب دو قطبی مغناطیسی کرهٔ زمین» است.

جهت میدان مغناطیسی در هر مکان بر روی سطح کرهٔ زمین معمولاً بر حسب دو زاویه مشخص می‌شود. میل میدان (سمت چپ یا سمت راست) زاویهٔ بین شمال جغرافیایی (که در جهت عرض جغرافیایی 90° است) و مؤلفهٔ افقی میدان است. شیب میدان زاویهٔ (رو به بالا یا رو به پایین) بین یک صفحهٔ افقی و جهت میدان است. سنجه‌های مغناطیسی این زاویه‌ها را اندازه می‌گیرند، ولی شما می‌توانید این کار را خودتان نیز با استفاده از یک قطب‌نما و یک شیب‌سنج انجام دهید. قطب‌نما تنها یک آهن‌ربای سوزنی شکل است و به‌گونه‌ای سوار شده است که می‌تواند آزادانه حول یک محور قائم بچرخد. وقتی این آهن‌ربا در صفحهٔ افقی نگه داشته شود، انتهای قطب شمال سوزن معمولاً رو به سمت قطب شمال ژئومغناطیسی قرار می‌گیرد (که اگر به‌خاطر داشته باشید، در واقع قطب جنوب مغناطیسی است). زاویهٔ میان سوزن و شمال جغرافیایی همان میل میدان است. یک شیب‌سنج، مشابه آهن‌ربایی است که می‌تواند آزادانه حول یک محور افقی بچرخد. وقتی صفحهٔ قائم چرخش آن هم‌سو با جهت قطب‌نما شود، زاویهٔ میان سوزن سنجه و امتداد افق، همان شیب میدان است.

در نقطه‌ای روی سطح زمین، میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده ممکن است به میزان قابل توجهی، هم از نظر بزرگی و هم از نظر جهت، نسبت به میدان دو قطبی آرمانی متفاوت باشد و همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، میدان مشاهده شده در هر نقطه روی سطح زمین در طول چندین سال با زمان تغییر می‌کند. برای مثال در خلال سال‌های ۱۵۸۰ تا ۱۸۲۰ میلادی، جهتی که عقربهٔ قطب‌نما در لندن نشان می‌داد به اندازهٔ 35° تغییر کرد. این تغییر به شاخهٔ جدیدی در علم باستان‌شناسی موسوم به باستانومغناطیسی انجامیده است. مثلاً با استفاده از نقاشی‌های دیواری در واتیکان موسوم به Bibliotheca Apostolica که در سال ۱۷۴۰ رسم شده‌اند، توانسته‌اند جهت شمال مغناطیسی را در آن زمان کشف کنند.

اساس کار به این ترتیب است؛ رنگ‌هایی که در نقاشی‌های دیواری به کار گرفته می‌شوند اغلب شامل رنگ‌دانه‌های قرمز رنگ اکسید آهن هستند. هر رنگ‌دانه دارای گشتاور دو قطبی مغناطیسی مربوط به خود است. وقتی دیوار رنگ‌آمیزی می‌شود، هر رنگ‌دانه آن‌قدر می‌چرخد تا گشتاور دو قطبی آن در جهت میدان مغناطیسی زمین قرار گیرد. وقتی رنگ خشک شود، این گشتاورها در مکان خود ثابت شده‌اند و در نتیجه جهت میدان مغناطیسی کرهٔ زمین را در لحظهٔ رنگ‌آمیزی ثبت می‌کنند. پژوهشگران می‌توانند جهت میدان مغناطیسی کرهٔ زمین در زمان رنگ‌آمیزی را با تعیین سمت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی در آن نقاشی دیواری مشخص کنند. یک تکه نوارچسب کوتاه به بخشی از نقاشی دیواری چسبانده می‌شود. وقتی نوار از دیوار کنده شود شامل لایهٔ نازکی از رنگ است. در آزمایشگاه این تکه نوار روی دستگاهی نصب می‌شود تا سمت‌گیری گشتاورهای دو قطبی در آن لایهٔ رنگ تعیین شود. باوجود این تغییرات موضعی، میدان

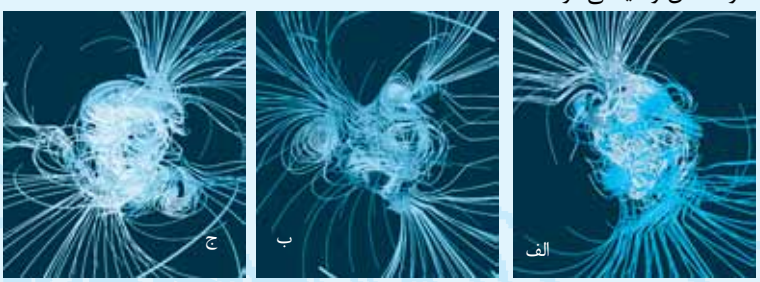
نظریهٔ دینامو از دو بخش تشکیل شده است که هر دو بخش معطوف به هستهٔ خارجی زمین هستند که از این هسته فلز مذاب تشکیل شده است

متوسط دو قطبی فقط به آرامی تغییر کرده است و شواهد برآمده از نقاشی‌های دیواری نیز این موضوع را تأیید می‌کنند. تغییرات در دوره‌های زمانی طولانی‌تر را می‌توان با اندازه‌گیری مغناطیس ضعیف کف اقیانوس در هر طرف شیار میانی اقیانوس اطلس مطالعه کرد. این کف با شارهٔ مذابی درست شده که از قسمت داخلی زمین به شیار تراوش کرده، سفت شده و از شیار (به کمک رانش صفحه‌های زمین ساختی[4]) با آهنگ چند سانتی‌متر در سال بیرون آمده است. با سفت شدن شارهٔ مذاب، این شاره به‌گونه‌ای ضعیف مغناطیسی شده که جهت میدان مغناطیسی آن در سوی میدان مغناطیسی زمین در لحظهٔ سفت شدن است. مطالعهٔ این شارهٔ مذاب سفت‌شده در کف اقیانوس آشکار می‌سازد که جهت‌های شمال- جنوب میدان زمین مغناطیسی زمین تقریباً در هر چند میلیون سال معکوس شده‌اند.

ما دو فرایند متضاد داریم که یکی تمایل دارد خطوط مغناطیسی زمین را به‌طور سمتی بکشد و دیگری تمایل دارد این خطوط را در هستهٔ خارجی حفظ کند

وارونگی مغناطیسی زمین

تاکنون دلیل متقنی برای معکوس شدن قطب‌های مغناطیسی زمین ارائه نشده و سازوکار آن همچنان مبهم است. با این حال شاید بتوان مقالهٔ مشهور گری گلاتزمایر و پاول رابرتز در مجلهٔ Nature را محتمل‌ترین نظریه پنداشت که به‌نظر می‌رسد تحلیل کتاب و کلیهٔ منابع فارسی موجود در اینترنت (از جمله ویکی‌پدیای فارسی) ترجمهٔ ناقص و مغلوطی از آن باشند. گلاتز مایر و رابرتز با تحلیل رایانه‌ای خود نشان دادند که عملاً این هستهٔ صلب مرکزی بوده که مانع از وارونگی‌های متعدد میدان مغناطیسی شده است، زیرا آشفتگی‌های کاتوره‌ای در جریان‌های همرفتی هستهٔ خارجی همواره ممکن بود میدان مغناطیسی زمین را تضعیف یا تقویت کنند و به وارونگی‌های مغناطیسی بینجامند ولی این هستهٔ صلب داخلی بوده که مانع چنین امری شده است، زیرا خطوط میدان مغناطیسی نمی‌توانند به همان سرعتی که در هستهٔ خارجی نفوذ می‌کنند (مثل قطره‌ای جوهر در آب) در هستهٔ صلب داخلی نفوذ کنند. تنها در موارد بسیار نادری که میدان مغناطیسی توانسته است در طی فرایند ناشناخته‌ای در هستهٔ صلب داخلی نیز نفوذ کند، آشفتگی‌ها در جریان‌های همرفتی توانسته‌اند موجب وارونگی مغناطیسی شوند. در هر حال رجوع به منبع ۴ این مقاله به کلیهٔ خوانندگان توصیه می‌شود.



شکل ۴. تغییر میدان مغناطیسی

پی‌نوشت

1. Walter M. Elsasser (1904-1991) 2. Gary Glatzmaier
3. Paul Roberts 4. Tectonic Plates

منابع

۱. دانشنامهٔ فیزیک، بنیاد دانشنامه‌نگاری ایران، ۱۳۸۷.
۲. هالیدی، رزینک، واکر؛ مبانی فیزیک (جلد دوم)، ویرایش نهم، ترجمهٔ محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، انتشارات آراکس، ۱۳۹۰.
۳. یرل واکر؛ نمایش هیجان‌انگیز فیزیک، ویرایش دوم، ترجمهٔ محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، انتشارات آراکس، ۱۳۹۰.
4. Gary Glatzmaier and Paul Roberts, A "Three dimensional self-consistence computer simulation of geomagnetics field reversals", Nature 377 (1995) 203- 2092.