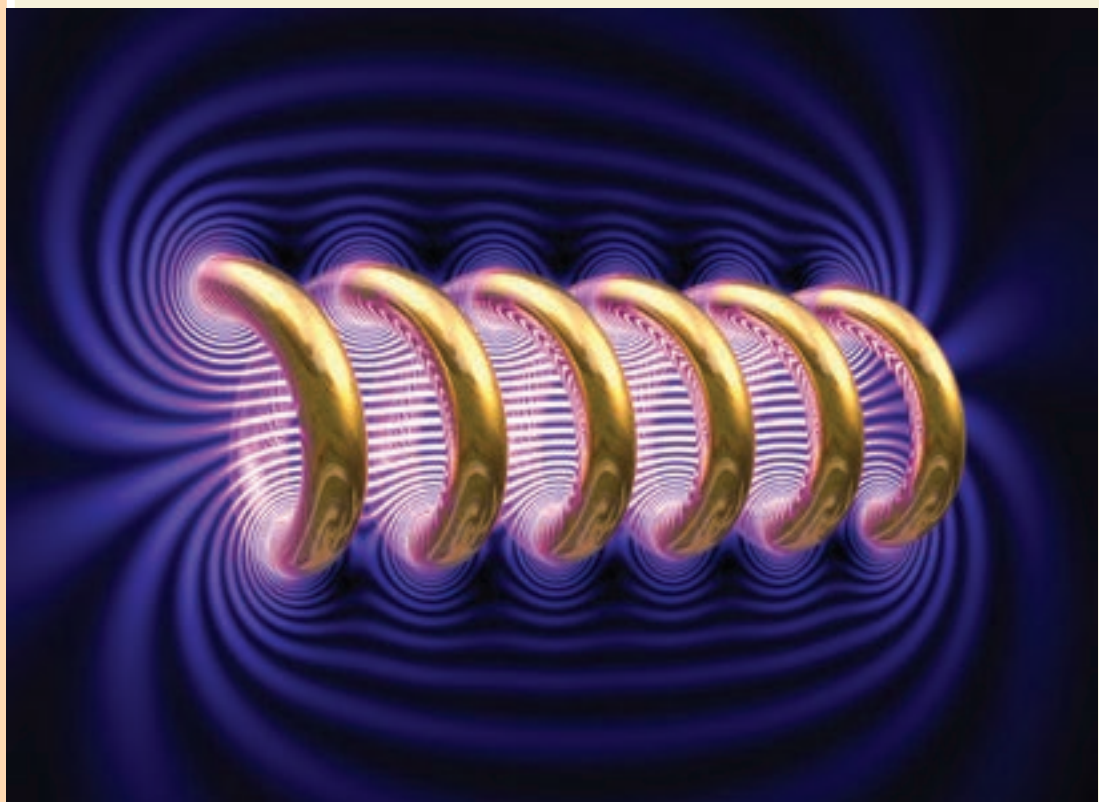


میدان مغناطیسی و نیروهای مغناطیسی



در فضای اطراف هر رسانای حامل جریان میدان مغناطیسی به وجود می‌آید.

اگر تاکنون یک اسباب بازی مغناطیسی یا یک قطب نما را به کار برده باشید، یا آهنربایی را برای نگهداشتن یک ورق کاغذ روی بدنه یخچال مورد استفاده قرار داده باشید، احتمالاً از مشاهده پدیده های مربوط به آن، شگفت زده شده اید! آهنرباها برای بسیاری از ما جذابیت خاصی دارند.

کاربردهای مغناطیس در جنبه های مختلف زندگی بشر رشدی روزافزون دارد. برای بیش از یک قرن ضبط صدا و تصویر روی صفحه ها و نوارهایی صورت می گرفت که مغناطیس نقش اصلی را در آنها ایفا می کرد. اگرچه فناوری دیجیتال به میزان زیادی جایگزین ضبط مغناطیسی به شیوه های سنتی شده است، با وجود این، ذخیره اطلاعات به صورت صفر و یک هنوز هم به محیط های مغناطیسی وابسته است.

مغناطیس و آهنرباها همچنین در بلندگوی گوشی ها، تلویزیون ها، رایانه ها و اغلب سامانه های هشدار ایمنی کاربرد دارد. پزشکی امروز نیز در تشخیص بیماری ها و جراحی های مختلف بهره فراوانی از مغناطیس و آثار آن می برد (شکل ۱-۴).

۱-۴- مغناطیس و قطب های مغناطیسی

یونانیان باستان، بیش از ۲۵۰۰ سال پیش با پدیده آهنربایی آشنا بودند. تالس که اغلب از او به عنوان پدر علم یونان یاد می شود، ماده کانی مگنتیت (Fe_3O_4) را که ویژگی آهنربایی دارد می شناخت (شکل ۲-۴). همان گونه که می دانید، ماده هایی که این ویژگی را دارند آهنربا می نامند. چینی های باستان نیز با ویژگی های مغناطیسی برخی از سنگ های آهنربا آشنایی داشتند و تکه هایی از این سنگ ها را به صورت قطب نماهای ساده در دریانوردی به کار می بردند.

در سال های گذشته دیدید که هرگاه آهنربایی را درون ظرف محتوی براده آهن فرو ببریم، براده های آهن به مقدار زیادی جذب ناحیه های خاصی از آهنربا می شوند. این ناحیه ها را **قطب های مغناطیسی** یا **قطب های آهنربا** می نامند (شکل ۳-۴).

هرگاه یک آهنربای میله ای را با ریسمان از مرکزش طوری بیاویزیم که بتواند آزادانه بچرخد، یک سر آن به سوی شمال قرار می گیرد (شکل ۴-۴). این سر را قطب شمال یا قطب N و سر دیگر را قطب جنوب یا قطب S می نامند.



شکل ۴-۴ آهنربا در این وضعیت مانند یک قطب نما رفتار می کند.



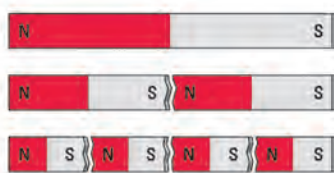
شکل ۱-۴ با بهره گیری از دستگاه های MRI^۱ می توان جزئیات بافت نرم (مانند تصویر پایی که در اینجا نشان داده شده است) را دید که در تصویربرداری پرتو X قابل مشاهده نیست.



شکل ۲-۴ پدیده های مغناطیسی حدود ۲۵۰۰ سال پیش در تکه هایی از سنگ آهن مغناطیده در نزدیکی شهر مگنسیا (که نام امروزی آن مانیسو و در غرب ترکیه واقع است) مشاهده شد. این تکه ها نمونه هایی هستند از چیزی که امروز آهنربای دائمی خوانده می شود.



شکل ۳-۴ در یک آهنربا، به هر شکلی که باشد، دو ناحیه وجود دارد که خاصیت مغناطیسی در آنها بیش از قسمت های دیگر است.

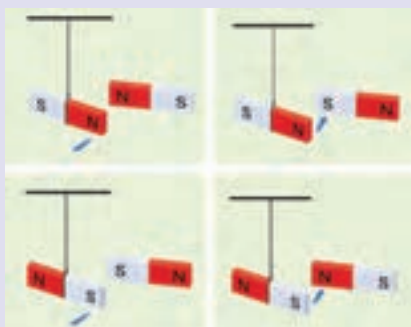


شکل ۴-۵ شکستن یک آهنربای

میله‌ای به دو بخش. هر بخش یک آهنربای کامل است که دو قطب دارد.

تمام آهنرباها هم قطب N دارند و هم قطب S. اگر یک آهنربای میله‌ای را دو قسمت کنید، هر بخش آن دوباره دارای دو قطب آهنربایی است (شکل ۴-۵). اگر باز هم آنها را به دو بخش تقسیم کنید، چهار آهنربای کامل خواهید داشت. می‌توانید تقسیم کردن را ادامه دهید، ولی هرگز یک قطب تنها یا به عبارتی دیگر **تک قطبی مغناطیسی** نخواهید داشت. حتی وقتی قطعه شما به اندازه یک اتم برسد، دو قطب دارد که نشان می‌دهد خود اتم نیز می‌تواند یک آهنربا باشد!

پرسش ۱-۴



با توجه به شکل روبه‌رو عبارت زیر را با کلمه‌های مناسب کامل کنید. وقتی قطب‌های همنام دو آهنربا را به یکدیگر نزدیک می‌کنیم، یکدیگر را اما اگر قطب‌های ناهمنام آنها را به یکدیگر نزدیک کنیم، یکدیگر را.....

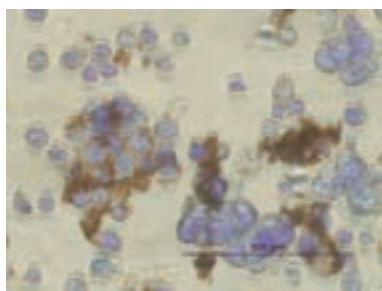
فعالیت ۱-۴



عقربه قطب‌نما آهنربای کوچکی است که می‌تواند آزادانه دور محور خود بچرخد.

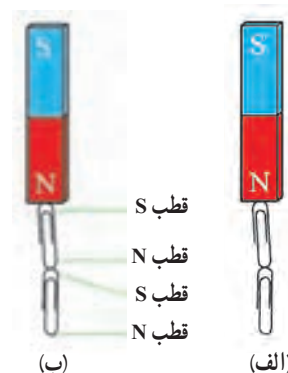
الف) چند آهنربا به شکل‌های مختلف انتخاب کنید. به کمک مقداری براده آهن یا تعدادی سوزن ته‌گرد، محل قطب‌های هر یک از آهنرباها را تعیین کنید.
ب) قطب‌نمایی که دریانوردان و کوهنوردان برای تعیین جهت به کار می‌برند، در واقع یک آهنربای میله‌ای نازک است که روی پایه‌ای سوار شده است و می‌تواند آزادانه بچرخد و جهت‌های تقریبی شمال و جنوب جغرافیایی را نشان دهد (شکل روبه‌رو). آزمایشی طراحی کنید و به کمک آن، یک قطب‌نمای ساده بسازید و جهت تقریبی شمال و جنوب مکانی را که در آن زندگی می‌کنید تعیین کنید.

نانو ذره‌های مغناطیسی برای درمان



لکه‌های تیره در تصویر میکروسکوپی روبه‌رو، باخته (سلول)‌های سرطانی هستند که از توموری جدا شده‌اند و خطر پخش آنها در سرتاسر بدن بیمار وجود دارد. در یک روش تجربی برای مبارزه با این باخته‌ها از ذره‌های یک ماده مغناطیسی استفاده می‌شود که به بدن تزریق می‌شوند. این ذره‌ها با ماده شیمیایی خاصی پوشیده شده‌اند که به‌طور ترجیحی به سلول‌های سرطانی متصل می‌شوند. سپس با استفاده از یک آهنربا در بیرون از بدن بیمار، این ذره‌ها بیرون «رانده» می‌شوند و سلول‌های سرطانی را با خود می‌برند.

القای مغناطیسی: شکل ۴-۶ الف آهنربایی را نشان می‌دهد که دو گیره آهنی کاغذ را جذب کرده است. این تجربه ساده نشان می‌دهد که ویژگی مغناطیسی درگیره‌های فلزی القا شده است و تا زمانی که گیره‌ها با آهنربا در تماس باشند، این ویژگی را در خود حفظ می‌کنند. این پدیده را **القای مغناطیسی** می‌نامند. ویژگی آهنربایی ناشی از القای مغناطیسی همواره به صورتی است که قطعه‌های آهنی جذب آهنربای اصلی می‌شوند (شکل ۴-۶ ب). القای مغناطیسی تنها در آهن، نیکل، کبالت و آلیاژهایی از این عناصر تولید می‌شود. در بخش پایانی همین فصل، با تفصیل بیشتری با مواد مغناطیسی و ویژگی‌های آنها آشنا خواهیم شد.



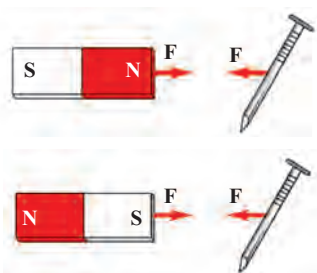
شکل ۴-۶ الف - وقتی آهنربایی در نزد یک گیره آهنی قرار می‌گیرد در آنها خاصیت مغناطیسی القا می‌کند. ب - در پدیده القای مغناطیسی همواره جذب وجود دارد. (به قطب‌های القا شده درگیره‌ها توجه کنید.)

پرسش ۲-۴

فرض کنید دو میله کاملاً مشابه، یکی از جنس آهن و دیگری آهنربا در اختیار دارید. با بحث در گروه خود، روشی را پیشنهاد کنید که با استفاده از آن و بدون استفاده از هیچ وسیله دیگر، بتوان میله‌ای را که از جنس آهنرباست مشخص کرد.

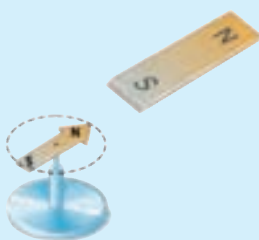
۲-۴ میدان مغناطیسی

با نزدیک کردن آهنربا به میخ آهنی مشاهده می‌کنید که میخ به طرف آهنربا حرکت می‌کند و پس از مدت کوتاهی جذب آن می‌شود (شکل ۴-۷). برای توجیه این پدیده، مشابه آنچه درباره اجسام باردار دیدید، می‌گوییم در فضای اطراف آهنربا **میدان مغناطیسی** وجود دارد. میدان مغناطیسی نیز مانند میدان الکتریکی که در فصل ۲ با آن آشنا شدید، کمیتی برداری است و آن را با نماد $\vec{B}$ نمایش می‌دهیم.



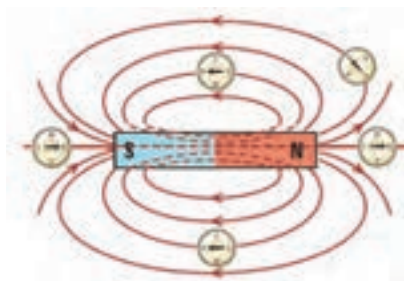
شکل ۴-۷ اطراف یک آهنربا میدان مغناطیسی وجود دارد به طوری که هر جسم آهنی مانند میخ را به سوی خود جذب می‌کند.

فعالیت ۲-۴



یکی از قطب‌های یک آهنربای میله‌ای را به یک عقربه مغناطیسی که روی پایه‌ای قرار دارد، نزدیک کنید (شکل روبه‌رو). آنچه را می‌بینید بیان کنید. با دور کردن آهنربا از عقربه مغناطیسی چه اتفاقی می‌افتد؟ چرا؟ (در صورتی که عقربه مغناطیسی در اختیار ندارید، سوزن ته‌گردی را از یک طرف، چند بار به آهنربایی مالش دهید و آن را روی سطح آب شناور سازید. به این ترتیب سوزن ته‌گرد مانند یک عقربه مغناطیسی رفتار می‌کند!)

میدان مغناطیسی مانند میدان الکتریکی، کمیتی برداری است و دارای بزرگی و جهت است. به کمک عقربه مغناطیسی می توان جهت میدان مغناطیسی را در هر نقطه از فضای اطراف یک آهنربا تعیین کرد (شکل ۴-۸).



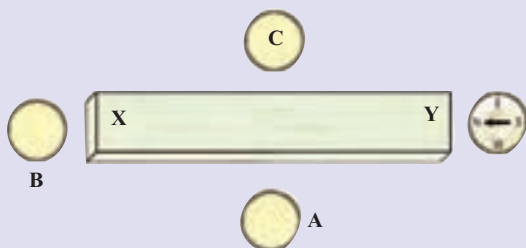
شکل ۴-۸ تعیین جهت میدان مغناطیسی به کمک عقربه مغناطیسی



شکل ۴-۹ خط های میدان مغناطیسی در هر نقطه در جهت عقربه مغناطیسی هستند و از قطب N خارج و به قطب S وارد می شوند.

بنابر تعریف، بردار میدان مغناطیسی در هر نقطه از فضای پیرامون یک آهنربا در جهتی است که وقتی قطب N عقربه مغناطیسی در آن نقطه قرار می گیرد، آن جهت را نشان می دهد. با تعیین جهت میدان مغناطیسی در هر نقطه از فضای اطراف آهنربا، می توان همان گونه که برای میدان الکتریکی انجام دادیم، خط های میدان مغناطیسی را رسم کنیم. شکل ۴-۹ خط های میدان مغناطیسی را در اطراف یک آهنربای میله ای نشان می دهد. این خط ها از آهنربا می گذرند و هر یک از آنها یک حلقه بسته را تشکیل می دهند. افزون بر اینها، خط های میدان مغناطیسی در نزدیکی قطب ها به یکدیگر نزدیک ترند.

پرسش ۳-۴



شکل روبه رو یک آهنربای میله ای و چهار عقربه مغناطیسی را نشان می دهد که جهت گیری یکی از آنها مشخص شده است. الف) کدام سر آهنربا قطب S و کدام سر قطب N است؟ ب) جهت گیری عقربه های مغناطیسی را در نقطه های A و B و C تعیین کنید.

آزمایش ۱-۴

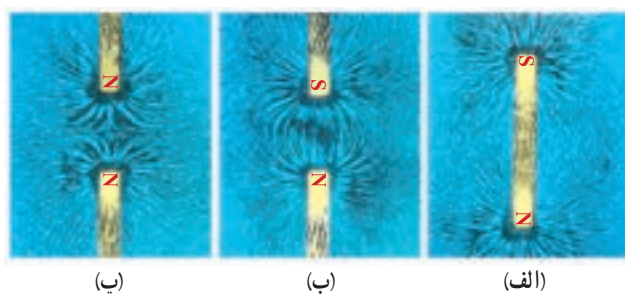
مشاهده طرح خطوط میدان مغناطیسی

هدف آزمایش: مشاهده طرح خط های میدان مغناطیسی با استفاده از براده آهن

وسایله های آزمایش: آهنربای میله ای (دو عدد)، براده آهن، یک ورقه شیشه ای یا مقوایی، نمک پاش (یا وسیله دیگری برای پاشیدن براده آهن)

شرح آزمایش:

- ۱- یکی از آهنرباهای میله ای را روی میز قرار دهید و صفحه شیشه ای (یا مقوایی) را روی آن بگذارید.
- ۲- به کمک نمک پاش براده آهن را به طور یکنواخت به ضخامت خیلی کم روی شیشه پاشید.



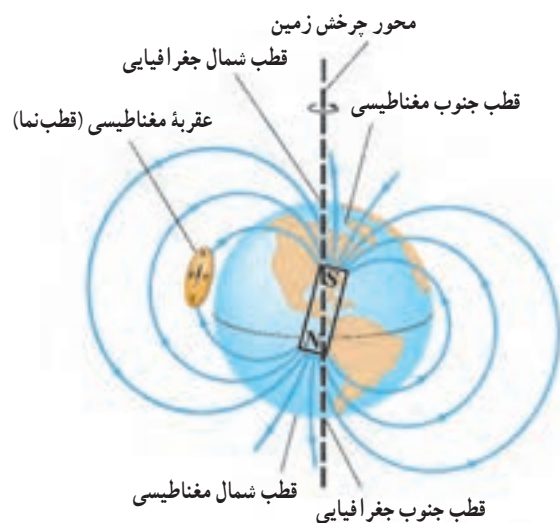
۳- چند ضربه آرام به صفحه شیشه‌ای بزنید تا براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی قرار گیرند. طرحی که روی صفحه شیشه‌ای پدیدار می‌شود، نقشه‌ای از خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربای میله‌ای است (شکل الف).

۴- مراحل بالا را برای دو آهنربای میله‌ای که به ترتیب: قطب‌های ناهمنام و قطب‌های همنام آنها به یکدیگر نزدیک‌اند انجام دهید (شکل‌های ب و پ).

پرسش ۴-۱۴

با استفاده از ویژگی القای مغناطیسی، توضیح دهید که چرا در آزمایش ۴-۱ براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند.

میدان مغناطیسی زمین: زمین یک آهنربای عظیم و طرح خط‌های میدان مغناطیسی آن مانند آهنربای میله‌ای بزرگی است که در نزدیکی مرکز زمین قرار دارد (شکل ۴-۱). قطب‌های مغناطیسی زمین بر قطب‌های جغرافیایی آن منطبق نیستند. در واقع، قطب‌های مغناطیسی و جغرافیایی زمین فاصله نسبتاً زیادی از یکدیگر دارند. مثلاً قطب جنوب مغناطیسی تقریباً در فاصله 180° کیلومتری قطب شمال جغرافیایی قرار دارد. این بدان معناست که عقربه مغناطیسی در جهت شمال واقعی جغرافیایی قرار نمی‌گیرد و تا حدودی از شمال جغرافیایی انحراف دارد. این انحراف وابسته به مکان را **میل مغناطیسی** می‌نامند.



شکل ۴-۱: طرح ساده‌ای از میدان مغناطیسی زمین. عقربه مغناطیسی در هر نقطه در امتداد این خط‌های میدان قرار می‌گیرد. نشان دادن خط‌های میدان مغناطیسی زمین به صورت خط‌های میدان یک آهنربای میله‌ای، تنها یک توجیه ساده از ساختار پیچیده و ناشناخته عوامل ایجاد میدان مغناطیسی زمین است. شواهد زمین شناسی نشان می‌دهند که جهت این میدان در بازه‌های زمانی نامنظم از 10^4 تا 10^6 سال به طور کامل وارون می‌شود.

مطالعه آزاد

خرچنگ خاردار کارائیب در برابر میدان‌های مغناطیسی بسیار حساس است. این جاندار یک «قطب نمای» مغناطیسی درونی دارد که تشخیص شمال، جنوب، شرق و غرب را برایش امکان‌پذیر می‌کند. این خرچنگ همچنین می‌تواند تفاوت اندک در میدان مغناطیسی زمین از مکانی به مکان دیگر را حس کند و از این تفاوت، در یافتن مسیر خود بهره بگیرد.



۳-۴ نیروی مغناطیسی وارد بر رسانای حامل جریان

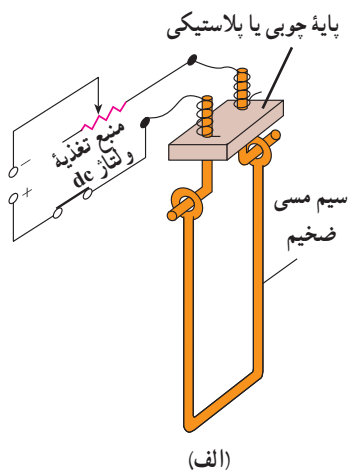
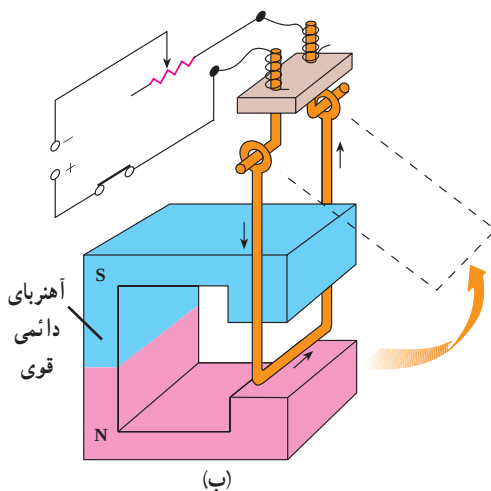
دیدیم که هرگاه یک عقربه مغناطیسی یا هر آهنربای دیگری در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، بر آن نیرو وارد می‌شود. در ادامه خواهیم دید که بر سیم‌های حامل جریان الکتریکی نیز در میدان مغناطیسی نیرو وارد می‌شود، اندازه میدان مغناطیسی و یکای آن را می‌توان با استفاده از این اثر تعریف کرد. برای مشاهده این نیرو، آزمایش زیر را انجام دهید.

آزمایش ۲-۴

بررسی اثر میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان

وسایلهای آزمایش: یک آهنربای نعلی شکل قوی، سیم مسی ضخیم، سیم رابط، رئوس‌تا و منبع تغذیه
شرح آزمایش:

- ۱- مدارى مطابق شکل الف ببندید.
- ۲- آهنربای نعلی شکل را مطابق شکل ب در اطراف سیم مسی قرار دهید.
- ۳- کلید را ببندید تا جریان از سیم مسی بگذرد. آنچه را که مشاهده می‌کنید، بنویسید.
- ۴- این آزمایش را چند بار تکرار کنید و هر بار آهنربا را در وضعیت جدیدی در اطراف سیم مسی قرار دهید و با بستن کلید، مشاهده‌های خود را یادداشت کنید.
- ۵- این آزمایش را با یک آهنربای دیگر تکرار کنید.
- ۶- اندازه و جهت جریان الکتریکی را تغییر دهید و آزمایش‌های بالا را تکرار کنید.
- ۷- نتیجه آزمایش را به کلاس گزارش دهید.

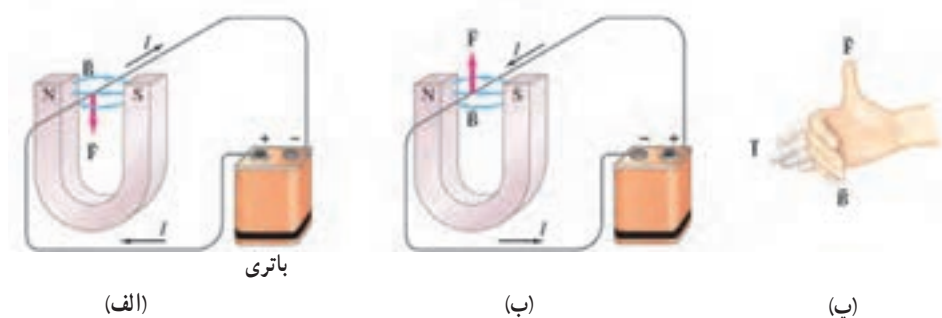


اورستد (فیزیکدان دانمارکی) با انجام آزمایش‌هایی شبیه آزمایش ۲-۴ و اندازه‌گیری دقیق نیرویی که بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی وارد می‌شود، نشان داد:

نیرویی که در میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود، بر راستای سیم و نیز بر راستای میدان مغناطیسی عمود است.

جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی را می‌توان با استفاده از قاعده دست راست به این صورت تعیین کرد:

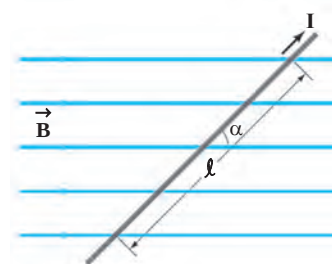
اگر دست راست خود را باز نگه دارید و چهار انگشت را مطابق شکل ۱۱-۴-۱ پ در جهت جریان بگیرید به طوری که اگر انگشتان خود را خم کنید، در جهت میدان مغناطیسی قرار گیرد در این صورت، انگشت شست شما جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان را نشان خواهد داد (شکل ۱۱-۴-۲ ب).



عامل‌های مؤثر بر نیروی مغناطیسی وارد بر رسانای حامل جریان: آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۲-۴ نشان می‌دهند که نیروی مغناطیسی وارد بر یک رسانای حامل جریان I در میدان مغناطیسی، به عامل‌های مختلفی بستگی دارد که این عامل‌ها در رابطه زیر بیان شده‌اند:

$$F = I\ell B \sin\alpha \quad (۱-۴)$$

در این رابطه ℓ طول بخشی از سیم رساناست که در میدان مغناطیسی $\vec{B}$ قرار دارد. زاویه داده‌ای را که جهت جریان با جهت بردار میدان مغناطیسی $\vec{B}$ می‌سازد را به α نشان داده‌ایم (شکل ۱۲-۴).



شکل ۱۲-۴: سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی. نیروی مغناطیسی وارد بر سیم عمود بر صفحه کتاب و به طرف داخل است.

پرسش ۱۳-۴

اگر در شکل ۱۲-۴ سیم حامل جریان در امتداد میدان مغناطیسی قرار گیرد، نیروی مغناطیسی وارد بر آن چقدر خواهد بود؟ در چه حالتی بزرگی این نیرو بیشینه می‌شود؟



نیکلا تسلا (۱۸۵۶-۱۹۴۳) در کرواسی به دنیا آمد. بعداً او به آمریکا مهاجرت و مدتی با ادیسون همکاری کرد. ادیسون همواره با جریان مستقیم (dc) کار می کرد، با این وجود وی کارکردن با جریان متناوب (ac) و با ولتاژهای بسیار بالا را عملی ساخت. تسلا از اینکه جریان متناوب برای اولین بار در صندلی الکتریکی به منظور اعدام مورد استفاده قرار گرفت شدیداً ناراحت بود. وی همچنین طراح تولید برق در آبشار نیاگارا بود. به پاس خدمات وی، یکای میدان مغناطیسی در SI را با تسلا نشان می دهند.

یکای میدان مغناطیسی: رابطه ۱-۴ نشان می دهد وقتی سیم حامل جریان عمود بر راستای

میدان مغناطیسی $\vec{B}$ قرار بگیرد ($\sin\alpha=1$) بزرگی نیروی مغناطیسی وارد بر سیم به طول ℓ و حامل جریان I ، بیشینه می شود. در این صورت داریم:

$$F_{\text{بیشینه}} = I\ell B \quad (۲-۴)$$

معمولاً از رابطه ۲-۴ که به صورت $B = \frac{F_{\text{بیشینه}}}{I\ell}$ بازنویسی می شود، برای تعریف یکای میدان مغناطیسی استفاده می شود. یکای میدان مغناطیسی در SI **تسلا** نام دارد و با نماد T نشان داده می شود.

بنا به تعریف، یک تسلا، بزرگی میدان مغناطیسی است که در آن، بر یک متر از سیمی که حامل جریان یک آمپر است و در راستای عمود بر بردار میدان قرار دارد نیرویی به بزرگی یک نیوتون وارد شود. در نتیجه می توانیم بنویسیم:

$$۱ \text{ تسلا} = \frac{۱ \text{ نیوتون}}{(۱ \text{ متر}) \times (۱ \text{ آمپر})}$$

تسلا یکای بزرگی است و در کاربردهای عملی از یکای کوچک تری به نام **گاوس** استفاده می کنند که با نماد G نمایش داده می شود.

$$۱ T = ۱۰^4 G \quad \text{یا} \quad ۱ G = ۱۰^{-4} T$$

مثال ۱-۴

یک سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی به بزرگی ۴ mT در راستایی قرار دارد که با جهت میدان زاویه ۳° می سازد. اگر جریان در سیم پنج آمپر باشد، نیروی مغناطیسی وارد بر یک متر از این سیم را محاسبه کنید.

پاسخ: با توجه به داده های مسئله داریم:

$$B = ۴ \text{ mT} = ۴ \times ۱۰^{-3} T = ۴ \times ۱۰^{-5} T$$

$$\alpha = ۳^\circ, \ell = ۱ \text{ m}, I = ۵ \text{ A}, F = ?$$

با قراردادن داده های بالا در رابطه ۱-۴ داریم:

$$\begin{aligned} F &= I\ell B \sin\alpha \\ &= (۵ \text{ A})(۱ \text{ m})(۴ \times ۱۰^{-5} T) \sin ۳^\circ \\ &= ۱ \times ۱۰^{-5} \text{ N} = ۰/۱ \text{ mN} \end{aligned}$$

این نیرو بسیار کوچک و مقدار آن تقریباً ده مرتبه از وزن یک سوزن ته گرد کمتر است.

پرسش ۴-۴

سیم افقی مستقیم حامل جریانی در یک میدان مغناطیسی یکنواخت افقی که جهت آن از شمال به جنوب است، قرار دارد. جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم را تعیین کنید؛
الف) اگر سیم در راستای شمال – جنوب و جریان آن از شمال به جنوب باشد.
ب) اگر سیم در راستای شرق – غرب و جریان آن از غرب به شرق باشد.



کارل فریدریش گاوس (۱۷۷۷-۱۸۵۵)، ریاضی‌دان، فیزیک‌دان و ستاره‌شناس آلمانی است که مدتی مدیر رصدخانه گوتینگن بوده است. گاوس یکی از ریاضی‌دان‌های بزرگ و برجسته‌ترین کارش در نظریه اعداد است. او به انجام محاسبه‌های بی‌اندازه بغرنج علاقه‌مند بود. وی همچنین روش‌های تازه‌ای برای محاسبه در مکانیک سماوی به‌دست آورد. گاوس روی پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی نیز فعالیت زیادی کرد و قانونی به نام وی در مبحث الکتریسته وجود دارد.

تمرین ۴-۴

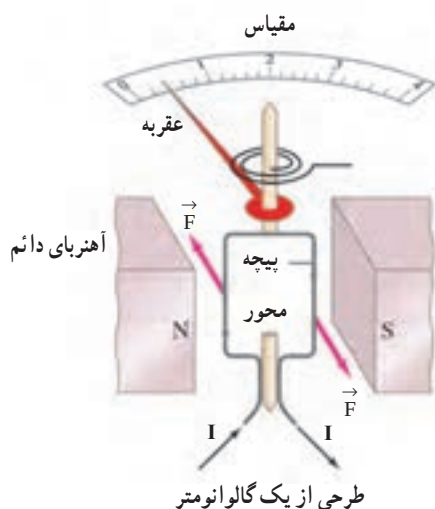
در قسمتی از دیوار خانه‌ای، یک سیم مستقیم $2/5$ متری قرار دارد که در لحظه‌های معینی، حامل جریان $1/5$ A از شرق به غرب است.
بزرگی میدان مغناطیسی زمین در محل این سیم $55/5^\circ$ گاوس و جهت آن از جنوب به شمال است. نیروی مغناطیسی وارد بر این سیم، با توجه به شرایط ذکر شده، چقدر است؟

فعالیت ۳-۴

آزمایشی را طراحی کنید که به کمک آن بتوان نیروی وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی را اندازه‌گیری کرد.

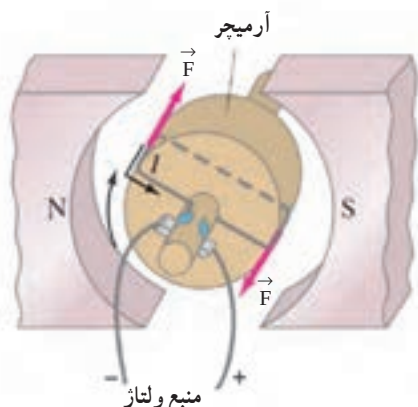
الف) طرز کار گالوانومتر: گالوانومتر وسیله‌ای است که با آن جریان‌های الکتریکی بسیار کوچک را اندازه می‌گیرند. امروزه وسیله‌های اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی (یعنی شدت جریان، اختلاف پتانسیل، مقاومت و ...) معمولاً عقربه‌ای یا رقمی (دیجیتالی) هستند. با استفاده از مطالبی که تاکنون فراگرفته‌ایم، می‌توان ساز و کار گالوانومتر عقربه‌ای را مورد بررسی قرار داد.

هر گالوانومتر قابی دارد که دور آن سیم پیچیده شده است. این قاب در یک میدان مغناطیسی دائمی قوی قرار دارد. وقتی جریان از این پیچه می‌گذرد، میدان مغناطیسی با وارد کردن نیرو به قاب، آن را می‌چرخاند (شکل روبه‌رو را ببینید) و عقربه متصل به قاب منحرف می‌شود. هر قدر جریان



بزرگ تر شود، چرخش پیچه و انحراف عقربه بیشتر خواهد شد.

اگر جهت جریان وارون شود، جهت چرخش پیچه و انحراف عقربه نیز وارون خواهد شد. با قطع جریان، فنر ظرفی که در پشت پیچه قرار دارد، پیچه و عقربه را به حالت اولیه خود برمی گرداند. صفحه گالوانومتر که عقربه در مقابل آن می چرخد را برحسب آمپر مدرج می کنند، به این ترتیب که در مقابل هر زاویه، اندازه جریانی که عقربه را به اندازه آن زاویه منحرف می کند، ثبت می کنند.



طرحی از یک موتور الکتریکی ساده. در این نوع از موتورها پیچه دور یک استوانه آهنی پیچیده می شود که به آن روتور می گویند.

(ب) موتور الکتریکی: موتورهای الکتریکی ابزارهایی هستند که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می کنند. این موتورها در انجام کارهای مختلف روزانه مورد استفاده قرار می گیرند، و اساس کار بسیاری از دستگاه ها نظیر جاروی برقی، مته برقی، آسیاب برقی، ماشین لباسشویی، پنکه و ... را تشکیل می دهند.

ساختمان برخی از موتورهای الکتریکی مانند ساختمان گالوانومتر است، از این نظر که در این نوع موتور الکتریکی نیز عبور جریان از یک قاب (به نام روتور) واقع در میدان مغناطیسی، باعث چرخش پیچه می شود (شکل روبه رو). چرخش قطعات در دستگاه های نام برده در بالا از این حرکت پیچه ناشی می شود.

(ب) میدان های مغناطیسی بدن: تمام یاخته های زنده بدن انسان به طور الکتریکی فعال اند. جریان های الکتریکی ضعیف در بدن، میدان های مغناطیسی ضعیف ولی قابل اندازه گیری تولید می کنند. اندازه میدان های حاصل از عضله های اسکلتی کوچک تر از $10^{-10} T$ ، یعنی در حدود یک میلیونیم میدان مغناطیسی زمین است. میدان های مغناطیسی حاصل از مغز بسیار ضعیف تر و در حدود $10^{-12} T$ هستند و برای اندازه گیری آنها باید مغناطیس سنج های بسیار حساس به کار برد. در حال حاضر، چنین مغناطیس سنج هایی به نام **اسکویید**^۱ ساخته شده اند. شکل روبه رو یک دستگاه اسکویید را نشان می دهد که در حال اندازه گیری میدان مغناطیسی تولید شده در مغز است.



۱- SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)

۴-۴- نیروی وارد بر ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی

در بخش پیش دیدیم که بر سیم حامل جریان الکتریکی در میدان مغناطیسی نیرو وارد می‌شود. اگر جریان صفر شود، نیروی وارد بر سیم نیز صفر می‌شود. در فصل ۳ دیدیم که جریان الکتریکی در واقع حرکت بارهای الکتریکی است و صفر شدن جریان در یک رسانا به طور متوسط به معنای توقف حرکت بارهای الکتریکی است. پس نتیجه می‌گیریم که نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی، در واقع بر بارهای متحرکی وارد می‌شود که در سیم جریان الکتریکی را به وجود می‌آورند.

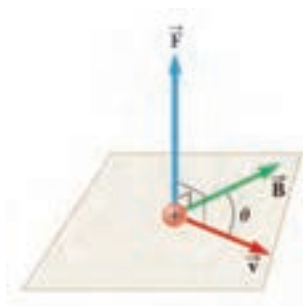
آزمایش نشان می‌دهد که اگر ذره باردار q با سرعت $\vec{v}$ در میدان مغناطیسی $\vec{B}$ حرکت کند، (به شرط آنکه جهت حرکت آن موازی با میدان نباشد) بر آن نیرویی وارد خواهد شد که مطابق شکل ۱۳-۴ بر راستای $\vec{v}$ و میدان مغناطیسی $\vec{B}$ عمود است. این نیرو را **نیروی مغناطیسی** می‌نامند و جهت آن مطابق شکل به کمک قاعده دست راست تعیین می‌شود. باید توجه کنیم که جهت نیروی وارد بر بار منفی همواره در خلاف جهت نیروی وارد بر بار مثبت است.

آزمایش نشان می‌دهد اندازه نیروی مغناطیسی وارد بر یک ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی مطابق رابطه زیر به چهار عامل بستگی دارد:

$$F = qvB \sin \theta$$

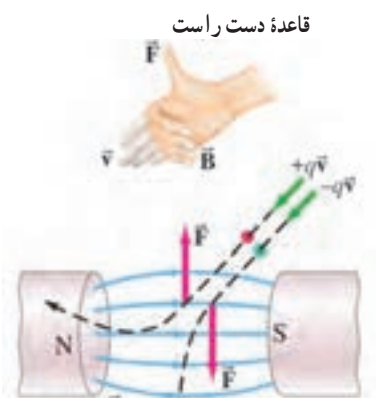
(۳-۴)

در این رابطه θ زاویه‌ای است که جهت حرکت بار الکتریکی (یعنی بردار $\vec{v}$) با جهت میدان مغناطیسی (یعنی بردار $\vec{B}$) می‌سازد (شکل ۱۴-۴).



شکل ۱۴-۴ نیروی $\vec{F}$ بر هر دو بردار $\vec{v}$ و $\vec{B}$

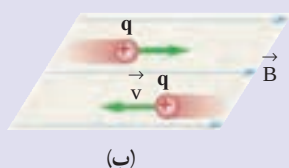
عمود است. به عبارت دیگر نیروی $\vec{F}$ بر صفحه‌ای که توسط $\vec{v}$ و $\vec{B}$ تشکیل می‌شود عمود است.



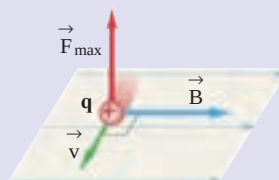
شکل ۱۳-۴ بر ذره باردار q یا $-q$ که با سرعت $\vec{v}$ در میدان مغناطیسی $\vec{B}$ حرکت می‌کند نیروی مغناطیسی $\vec{F}$ وارد می‌شود که جهت آن با قاعده دست راست تعیین می‌شود.

پرسش ۷-۴

با توجه به رابطه ۳-۴ دریافت خود را از هر یک از شکل‌های الف و ب به طور جداگانه بیان کنید.

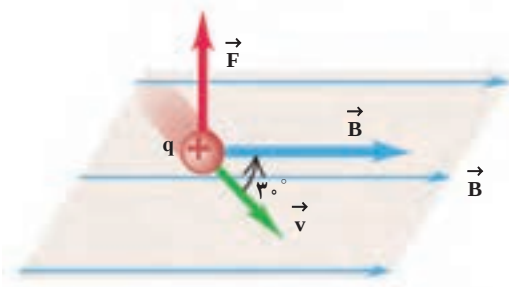


(ب)



(الف)

مثال ۲-۱۴



ذره‌ای با بار $+4$ میکروکولن و با سرعت $2 \times 10^2 \text{ m/s}$ در جهت حرکت می‌کند که با میدان مغناطیسی یکنواخت 100 G زاویه 3° می‌سازد (شکل روبه‌رو). بزرگی نیروی مغناطیسی وارد بر این ذره را محاسبه کنید.

پاسخ: با توجه به فرض‌های مسئله داریم:

$$q = +4 \mu\text{C} = +4 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$v = 2 \times 10^2 \text{ m/s}, B = 100 \text{ G} = 100 \times 10^{-4} \text{ T} = 10^{-2} \text{ T}$$

$$\theta = 3^\circ, F = ?$$

با قرار دادن داده‌های بالا در رابطه ۳-۴ داریم:

$$F = qvB \sin \theta$$

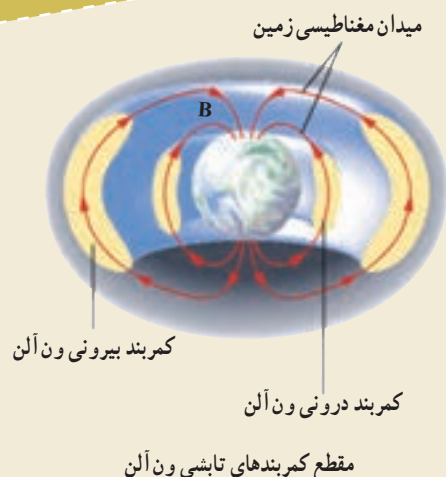
$$= (4 \times 10^{-6} \text{ C})(2 \times 10^2 \text{ m/s})(10^{-2} \text{ T}) \sin 3^\circ$$

$$= 4 \times 10^{-5} \text{ N}$$

تمرین ۲-۱۴

بر الکترونی ($q = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$) که با زاویه 6° نسبت به یک میدان مغناطیسی به بزرگی 35 G حرکت می‌کند، نیروی مغناطیسی به بزرگی $4/6 \times 10^{-15} \text{ N}$ وارد می‌شود. بزرگی سرعت این الکترون چقدر است؟

مطالعه آزاد



کمربندهای تابشی ون آلن

در بیرون از جو زمین، ذره‌های باردار بسیاری با سرعت‌های فوق‌العاده زیادی در حرکت‌اند. این ذره‌های سریع را که معمولاً از جنس پرتون، هسته اتم هلیوم (ذره آلفا) و الکترون هستند **پرتوهای کیهانی** می‌نامند. این پرتوها علاوه بر فضا نوردان، برای سامانه‌های الکترونیکی واقع در فضا نیز خطرناک‌اند. خوشبختانه بیشتر این پرتوهای باردار توسط میدان مغناطیسی زمین منحرف می‌شوند و مانع از آسیب‌رسانی به موجودات و سامانه‌های روی زمین می‌شود. ذرات بارداری که در میدان مغناطیسی زمین به دام می‌افتند،

کمرندهای تابشی ون آلن را تشکیل می‌دهند (شکل صفحه قبل). این کمرندها که دو حلقه کلوچه مانند میان تهی را در اطراف زمین تشکیل می‌دهند، ون آلن در سال ۱۹۵۸ میلادی از داده‌های گردآوری شده توسط ماهواره اکسپلورر I کشف



تصویری خیره کننده از شفق قطبی

کرد و به افتخار او نام گذاری شده‌اند. فضانوردان در فاصله‌های ایمن بسیار پایین‌تر از این کمرندهای تابشی دور زمین می‌گردند. توفان‌های خورشیدی، ذره‌های باردار را به صورت فواره‌های عظیمی پرتاب می‌کنند که بسیاری از آنها از نزدیکی زمین می‌گذرند و در میدان مغناطیسی آن به دام می‌افتند. **شفق قطبی (نورهای شمالی)** پدیده زیبایی است که بر اثر برخورد ذره‌های باردار موجود در کمرند ون آلن با مولکول‌های جو زمین به وجود می‌آید (شکل روبه‌رو). در نیمکره جنوبی این پدیده **شفق جنوبی** نامیده می‌شود.

۴-۵- آثار مغناطیسی جریان الکتریکی

تا اینجا نیروهایی را بررسی کردیم که بر بارهای متحرک و رساناهای حامل جریان در میدان مغناطیسی وارد می‌شوند. هر چند پی بردیم که در فضای اطراف آهنرباهای دائمی نیز میدان مغناطیسی وجود دارد. با وجود این، در ادامه این فصل با چشمه‌های دیگر میدان مغناطیسی آشنا خواهیم شد. اورستد دانشمند دانمارکی، در سال ۱۸۲۰ میلادی ضمن انجام برخی آزمایش‌های الکتریسیته، مشاهده کرد که عقربه مغناطیسی در کنار سیم حامل جریان الکتریکی منحرف می‌شود (شکل ۴-۱۵). او با انجام دادن آزمایش‌های بیشتر کشف کرد که عبور جریان الکتریکی از یک سیم رسانا، در اطراف آن یک میدان مغناطیسی به وجود می‌آورد. این کشف اورستد نخستین گام در راه درک رابطه بین الکتریسیته و مغناطیس بود که به گسترش مبحث الکترومغناطیس انجامید. در این بخش، به بررسی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم‌ها می‌پردازیم.



شکل ۴-۱۵ میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان را می‌توان با قرار دادن تعدادی عقربه مغناطیسی پیرامون آن نشان داد.



هانس کریستین اورستد (۱۷۷۷-۱۸۵۱)، فیزیک‌دان دانمارکی ابتدا به مطالعه فلسفه طبیعت رو آورد و سپس مطالب بسیاری درباره موضوع‌های فلسفی نوشت. اورستد در مقاله‌ای که به سال ۱۸۱۳ منتشر شد پیش‌بینی کرد که رابطه‌ای میان الکتریسیته و مغناطیس می‌توان یافت. او در سال ۱۸۲۰ قطب‌نمایی را زیر یک سیم حامل جریان گذاشت و کشف کرد که یک میدان مغناطیسی جریان الکتریکی را احاطه می‌کند. در سال‌های بعد او نظر دانشمندان دیگر مبنی بر اینکه کشف او درباره الکترومغناطیس تصادفی بوده است را به شدت انکار کرد.

آزمایش ۳-۴

بررسی میدان مغناطیسی در اطراف سیم حامل جریان (آزمایش اورستد)

وسایله های آزمایش: باتری، سیم مسی نسبتاً ضخیم، صفحه مقوایی، عقربه مغناطیسی (قطب نما) و سیم رابط

شرح آزمایش:



۱- سیم مسی را از صفحه مقوایی بگذرانید و با آن مداری مطابق شکل روبه رو تشکیل دهید.

۲- قبل از برقراری جریان الکتریکی، عقربه مغناطیسی را در مجاورت سیم، روی مقوا قرار دهید و به راستای قرار گرفتن آن توجه کنید.

۳- با وصل کردن مدار، جریان الکتریکی را از سیم مسی عبور دهید و به جهت گیری عقربه مغناطیسی توجه کنید.

۴- عقربه مغناطیسی را در نقطه های مختلف روی مقوا قرار دهید و جهت آن را بررسی کنید.

۵- با توجه به جهت گیری عقربه در نقاط مختلف صفحه مقوایی، چند خط میدان مغناطیسی را رسم کنید.

۶- این آزمایش را بار دیگر با جریانی در جهت مخالف تکرار کنید.

۷- به کمک چند باتری دیگر، تحقیق کنید که افزایش یا کاهش جریان چه تأثیری در نتیجه آزمایش دارد؟

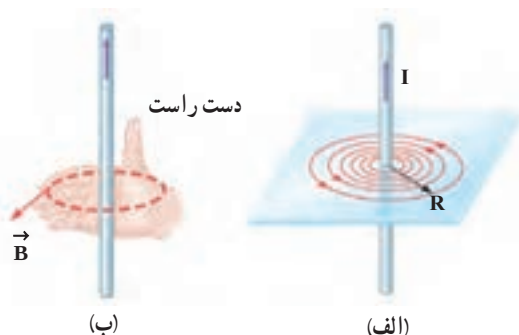
۸- نتیجه این آزمایش را در گروه خود بحث کنید و آن را به کلاس گزارش دهید.

با انجام این آزمایش می بینید که خط های میدان مغناطیسی حاصل از یک

سیم حامل جریان، مطابق شکل ۴-۱۶ الف به صورت دایره های هم مرکزی در اطراف سیم حامل جریان هستند. جهت خط های میدان مغناطیسی سیم حامل جریان را می توان به کمک عقربه مغناطیسی تعیین کرد. علاوه بر آن، با استفاده از قاعده دست راست می توان این جهت را تعیین کرد؛ بنابراین قاعده، اگر سیم را مطابق شکل ۴-۱۶ ب در دست راست خود بگیرید به گونه ای که انگشت شست در جهت جریان الکتریکی باشد، جهت خم شدن چهار انگشت دست شما جهت خط های میدان مغناطیسی را در اطراف سیم نشان می دهد.

آزمایش نشان می دهد که اندازه میدان مغناطیسی $\vec{B}$ در اطراف یک سیم نازک دراز مستقیم حامل جریان الکتریکی ای به شدت I در نقطه ای که فاصله عمودی آن از سیم برابر R است (شکل ۴-۱۶ الف) با I نسبت مستقیم و با R نسبت وارون دارد؛ یعنی:

$$B \propto \frac{I}{R}$$

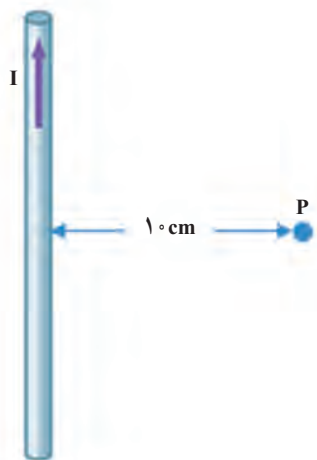


شکل ۴-۱۶ الف خط های میدان مغناطیسی در اطراف سیم بلند حامل جریان I . (ب) استفاده از قاعده دست راست برای تعیین جهت $\vec{B}$ در اطراف یک سیم بلند حامل جریان I .

ضریب تناسب در SI برابر $\frac{\mu_0}{2\pi}$ است که در آن μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر با $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T.m}{A}$ است؛ در نتیجه داریم:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (4-4)$$

مثال ۳-۳



اندازه میدان مغناطیسی ناشی از جریان ۲۰ آمپر را که از سیمی دراز و مستقیم می‌گذرد، در نقطه‌ای به فاصله ۱۰ cm از سیم حساب کنید (شکل روبه‌رو).
پاسخ: با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$I = 20 \text{ A}, \quad R = 10 \text{ cm} = 0.10 \text{ m}, \quad B = ?$$

با قرار دادن داده‌های بالا در رابطه ۴-۴ داریم:

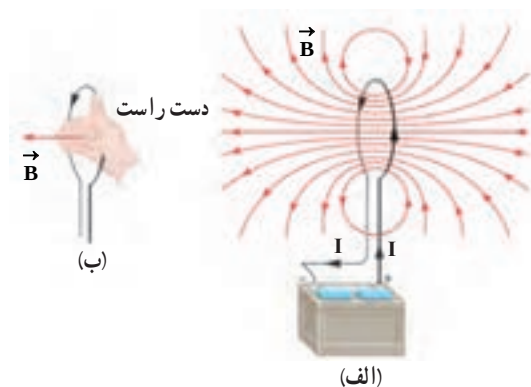
$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A})(20 \text{ A})}{2\pi(0.10 \text{ m})} \\ &= 4/0 \times 10^{-5} \text{ T} = 0.40 \text{ G} \end{aligned}$$

تمرین ۳-۴

سیم مستقیم بلندی حامل جریان ۱ A است. بزرگی میدان مغناطیسی حاصل از این جریان در چه فاصله‌ای از سیم برابر $B = 0.5 \text{ G}$ (حدود بزرگی میدان مغناطیسی زمین) می‌شود؟

میدان مغناطیسی ناشی از یک حلقه دایره‌ای حامل

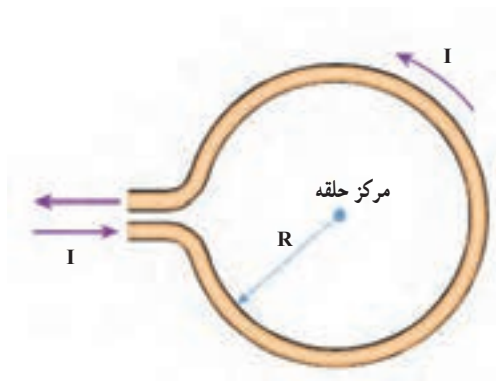
جریان: هرگاه سیم حامل جریانی را به صورت یک حلقه درآوریم، میدان مغناطیسی ناشی از آن در نقاط درون حلقه به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. در شکل ۴-۱۷ الف یک حلقه رسانای دایره‌ای به شعاع R که حامل جریان I است نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود خط‌های میدان مغناطیسی در ناحیه داخل حلقه به یکدیگر نزدیک‌ترند؛ یعنی، میدان در این ناحیه قوی‌تر است. افزون بر این، در نقطه‌های روی محور حلقه، میدان موازی محور است. جهت خط‌های میدان مغناطیسی حلقه را می‌توان با قاعده دست راست به روشی تعیین کرد که در شکل ۴-۱۷ ب نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۷ الف) خط‌های میدان مغناطیسی در اطراف یک حلقه حامل جریان. ب) استفاده از قاعده دست راست برای تعیین جهت خط‌های میدان مغناطیسی یک حلقه حامل جریان.

بزرگی میدان مغناطیسی حلقه‌ای به شعاع R و حامل جریان I در مرکز حلقه از رابطه زیر به دست می‌آید (شکل ۴-۱۸).

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (۴-۵)$$



شکل ۴-۱۸

اگر به یک موتور الکتریکی، آهنربای الکتریکی یا زنگ در بنگرید، پیچ‌هایی از سیم با تعداد زیادی دور را خواهید یافت که آن قدر به هم نزدیک‌اند که با تقریب خوبی می‌توان آن را یک حلقه دایره‌ای مسطح در نظر گرفت. از این پیچ‌ها که معمولاً به آنها **پیچ‌های مسطح** نیز گفته می‌شود، برای تولید میدان مغناطیسی در بسیاری از وسیله‌های برقی استفاده می‌شود.

بزرگی میدان مغناطیسی در مرکز پیچ مسطحی به شعاع R ، دارای N دور و حامل جریان I از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \quad (۴-۶)$$

مثال ۴-۱۴

از پیچ مسطحی به شعاع $۶/۳\text{cm}$ که از ۲۰۰۰ دور سیم نازک درست شده است، جریان ۲۰mA می‌گذرد. میدان مغناطیسی را در مرکز پیچ به دست آورید.

پاسخ: با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$R = ۶/۳\text{cm} = ۶/۳ \times ۱۰^{-۲}\text{m} \text{ و } N = ۲۰۰۰ \text{ و } I = ۲۰\text{mA} \text{ و } B = ?$$

با قرار دادن داده‌های بالا در رابطه ۴-۶ داریم:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 NI}{2R} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A})(2000)(20 \times 10^{-3} \text{ A})}{2 \times (6/3 \times 10^{-2} \text{ m})} \approx 4/0 \times 10^{-4} \text{ T} = 4/0 \text{ G} \end{aligned}$$

تمرین ۴-۱۴

بزرگی میدان مغناطیسی دور سر انسان به تقریب برابر $۳/۰ \times ۱۰^{-۸}\text{G}$ اندازه‌گیری شده است. اگرچه جریان‌هایی که این میدان به وجود می‌آورند بسیار پیچیده‌اند، ولی با در نظر گرفتن این جریان‌ها به صورت تک حلقه‌ای دایره‌ای به قطر ۱۶cm (پهنای یک سر نوعی) می‌توان اندازه آنها را تا حدودی تخمین زد. جریان لازم برای تولید این میدان در مرکز حلقه چقدر است؟

میدان مغناطیسی حاصل از سیملوله حامل جریان :

به شکل یک فنر پیچیده شده است (شکل ۱۹-۴ الف). اگر جریان الکتریکی از سیملوله ای عبور کند، در فضای اطراف سیملوله میدان مغناطیسی به وجود می آید.

طرح خط‌های میدان مغناطیسی یک سیملوله حامل جریان الکتریکی در داخل و خارج آن در شکل ۱۹-۴ ب نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل می بینید، خط‌های میدان داخل سیملوله بسیار متراکم تر از خط‌های میدان در خارج آن است و این نشانگر بزرگ تر بودن میدان در داخل سیملوله است. علاوه بر این خط‌های میدان در داخل سیملوله، به ویژه در نقطه‌های نسبتاً دور از لبه‌های آن تقریباً موازی و هم فاصله اند و این نشانگر یکنواخت بودن میدان مغناطیسی درون سیملوله است. همان طور که دیده می شود، جهت میدان مغناطیسی در داخل سیملوله خلاف جهت میدان مغناطیسی در خارج آن است و مشابه حلقه حامل جریان به کمک قاعده دست راست تعیین می شود.

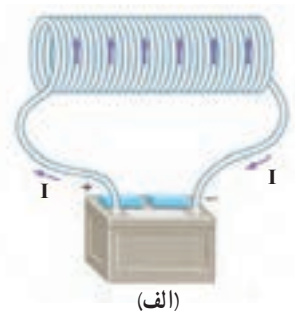
اگر شعاع سیملوله در مقایسه با طول آن، کوچک و حلقه‌های آن، خیلی به هم نزدیک باشند، میدان مغناطیسی داخل سیملوله در نقطه‌های دور از لبه‌ها یکنواخت است و اندازه آن از رابطه زیر به دست می آید :

$$B = \mu_0 n I \quad (۷-۴)$$

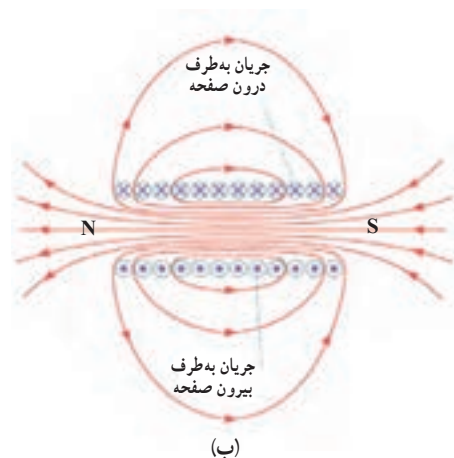
در این رابطه، I جریان و n تعداد دورهای سیملوله به ازای واحد طول است که از رابطه زیر به دست می آید :

$$n = \frac{N}{\ell} \quad (۸-۴)$$

که N تعداد کل دورهای سیملوله و ℓ طول سیملوله است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۹-۴ الف سیمی که به صورت پیچیده مارپیچی بلند پیچیده شده باشد یک سیملوله است. (ب) میدان مغناطیسی داخل سیملوله (کمی دورتر از لبه‌ها) تقریباً یکنواخت است.

مثال ۱۴-۵

سیملوله ای به طول ۱۵cm و شعاع ۷۵cm، دارای ۶۰۰ حلقه سیم نزدیک به هم است. اگر جریانی ۸۰۰mA از سیملوله بگذرد، بزرگی میدان مغناطیسی را در نقطه ای نزدیک به مرکز سیملوله پیدا کنید.

پاسخ : با توجه به داده‌های مسئله داریم :

$$I = ۸۰۰\text{mA} \text{ و } B = ? \text{ و } \ell = ۱۵\text{cm} = ۰/۱۵\text{m} \text{ و } R = ۰/۷۵\text{cm} \text{ و } N = ۶۰۰$$

چون شعاع سیملوله خیلی کوچک تر از طول سیملوله است (حدود)، می توان از رابطه ۷-۴ برای پیدا کردن میدان مغناطیسی درون سیملوله و دور از لبه‌ها، استفاده کرد. به این ترتیب داریم :

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \left(\frac{N}{\ell} \right) I \\ = (4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}) \frac{600 \times (800 \times 10^{-3} \text{ A})}{0/15\text{m}} = 4/0 \times 10^{-3} \text{ T} = 40/0 \text{ G}$$

سیملوله‌ای چنان طراحی شده است که میدان مغناطیسی در مرکز آن 27° گاوس باشد. شعاع این سیملوله $1/4\text{ cm}$ و طول آن 40 cm است. اگر بخواهیم جریان بیشینه‌ای که از آن می‌گذرد $1/2\text{ A}$ باشد کمترین تعداد دورهای آن در واحد طول چقدر باید باشد؟

فعالیت ۴-۴



آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان با استفاده از براده آهن طرح خط‌های میدان مغناطیسی در اطراف یک سیم بلند، یک حلقه دایره‌ای و یک سیملوله حامل جریان به‌وجود آورد (شکل‌های روبه‌رو).

سیملوله



شکل ۴-۲۰ سیملوله با هسته آهنی

سیملوله با هسته آهنی — آهنربای الکتریکی: در بخش ۴-۱ دیدید با قرار دادن یک میله آهنی در میدان مغناطیسی می‌توان ویژگی مغناطیسی در آن القا کرد. اگر میله آهنی در یک سیملوله حامل جریان که میدان در آنجا از هر جای دیگر در اطراف سیملوله قوی‌تر است قرار گیرد، آن را **هسته سیملوله** می‌نامند (شکل ۴-۲۰). پیش از آنکه جریانی از سیملوله عبور کند، سیملوله و هسته آهنی خاصیت مغناطیسی ندارند. اما وقتی جریانی در سیملوله برقرار شود، میدان مغناطیسی سیملوله، خاصیت مغناطیسی در هسته آهنی القا می‌کند و هسته آهنی، آهنربا می‌شود. این آهنربا را **آهنربای الکتریکی** می‌نامند (شکل ۴-۲۱).

هر چه تعداد دورهای سیملوله در واحد طول و جریانی که از آن می‌گذرد بیشتر باشد، آهنربای الکتریکی قوی‌تر خواهد بود.

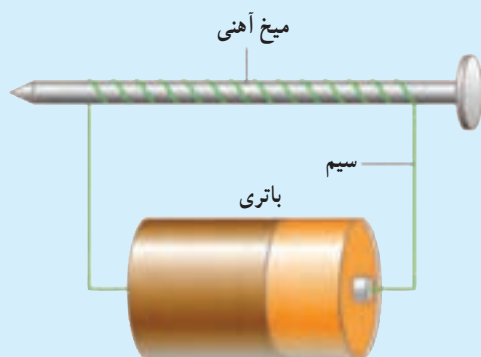
وجود هسته آهنی باعث تقویت میدان مغناطیسی سیملوله می‌شود. میدان مغناطیسی سیملوله بدون هسته آهنی به قدری ضعیف است که در عمل کاربردهای کمی دارد.



شکل ۴-۲۱ این آهنربای الکتریکی صنعتی

شامل پیچیده‌ای حامل جریان است که تعداد زیادی دور سیم دارد. میدان مغناطیسی حاصل از آن قادر است مقدار زیادی میله‌های فولادی و دیگر قراضه‌های آهن را بلند کند.

فعالیت ۱۴-۵



به کمک یک میخ آهنی، یک تکه سیم بلند و یک باتری، یک آهنربای الکتریکی بسازید (شکل روبه‌رو) و اثر آهنربایی آن را روی تعدادی سوزن ته‌گرد، گیره فلزی کاغذی یا مقداری براده آهن بررسی کنید. چه تغییراتی در آهنربای الکتریکی باعث زیاد شدن خاصیت آهنربایی آن می‌شود؟

۴-۶- نیروی بین سیم‌های موازی حامل جریان

در آزمایش اورستد، دیدیم که در فضای اطراف هر سیم حامل جریان، میدان مغناطیسی وجود دارد. همچنین در بخش ۴-۲ دیدیم که آهنربا بر سیم حامل جریان نیرو وارد می‌کند. حال فرض کنید برای تولید میدان مغناطیسی به جای آهنربا از یک سیم حامل جریان استفاده کنیم. اگر سیم حامل جریان دیگری را در نزدیکی این سیم قرار دهیم، آیا نیرویی بر آن وارد می‌شود؟ برای پاسخ دادن به این پرسش، آزمایش ۴-۴ را انجام دهید.

آزمایش ۴-۴

بررسی اثر دو سیم حامل جریان بر یکدیگر

وسایله‌های آزمایش: دو تکه سیم بلند نازک (با قطر کم)، باتری، کلید قطع و وصل، سیم رابط، دو عدد پایه

شرح آزمایش:

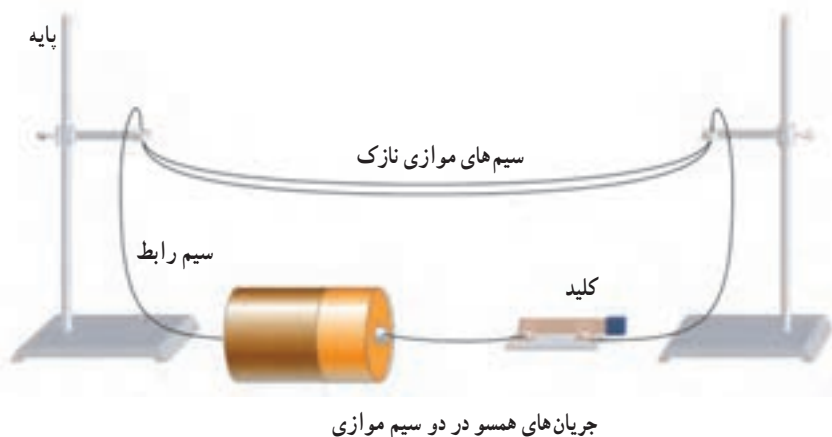
۱- مداری مطابق شکل زیر ببندید.

۲- با وصل کردن کلید، جریان را در مدار برقرار کنید. توجه کنید که جریان در دو سیم موازی، همسو است. مشاهده

خود را گزارش دهید.

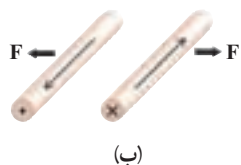
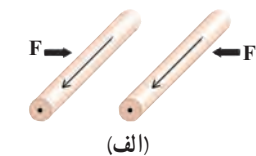
۳- مراحل ۱ و ۲ را برای

وضعیتی که جریان در دو سیم موازی در جهت‌های مخالف (ناهمسو) باشد انجام دهید و نتیجه آزمایش را گزارش دهید.



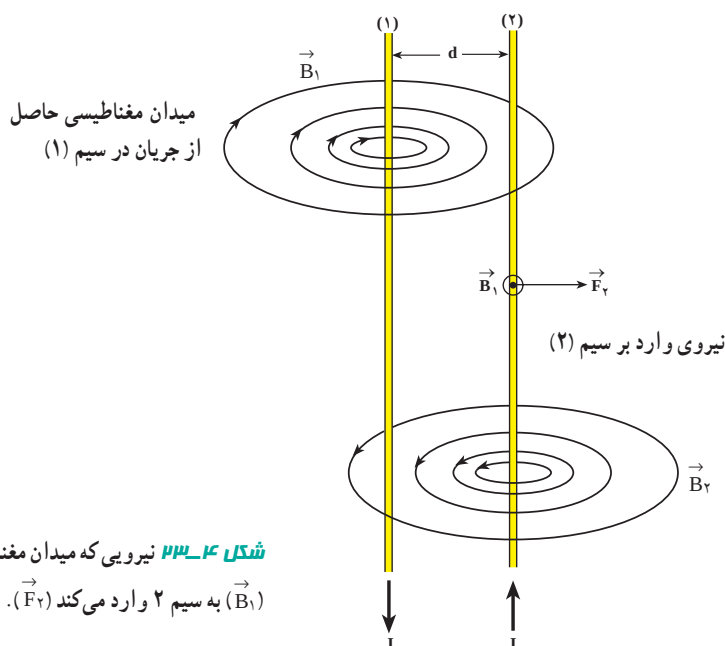
جریان‌های همسو در دو سیم موازی

آزمایش ۴-۴ نشان می‌دهد که سیم‌های حامل جریان الکتریکی بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند. هرگاه جریانی که از دو سیم می‌گذرد همسو باشد، دو سیم یکدیگر را می‌ربایند (شکل ۴-۲۲-الف) و اگر جریانی که از دو سیم می‌گذرد در جهت‌های مخالف باشد، دو سیم یکدیگر را می‌رانند (شکل ۴-۲۲-ب).



شکل ۴-۲۲ الف) دو سیم موازی حامل جریان همسو یکدیگر را می‌ربایند.
ب) دو سیم موازی حامل جریان ناهمسو، یکدیگر را می‌رانند.

نیروی وارده بر هر سیم را می‌توان برحسب میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم دیگر توضیح داد. برای این کار، دو سیم مستقیم و خیلی دراز موازی حامل جریان I و به فاصله d از یکدیگر را مطابق شکل ۴-۲۳ در نظر می‌گیریم. جریان الکتریکی در سیم شماره (۱) در فضای اطراف آن، میدان مغناطیسی $\vec{B}_1$ را به وجود می‌آورد. جهت میدان $\vec{B}_1$ در محل سیم شماره (۲) همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است برون‌سو است. چون سیم شماره (۲) نیز حامل جریان الکتریکی I است، میدان $\vec{B}_1$ بر آن نیرو وارد می‌کند. این نیرو را در شکل با $\vec{F}_1$ نشان داده‌ایم، جهت $\vec{F}_1$ با استفاده از قاعده دست راست تعیین می‌شود.



شکل ۴-۲۳ نیرویی که میدان مغناطیسی سیم ۱ ($\vec{B}_1$) به سیم ۲ وارد می‌کند ($\vec{F}_1$).

تمرین ۴-۷

- الف) جهت نیروی وارد بر سیم شماره (۱) در شکل ۴-۲۳ را با استدلالی مشابه تعیین کنید.
- ب) جهت نیروها و میدان‌های مغناطیسی مربوط به دو سیم موازی حامل جریان‌های همسو را با رسم شکل و استفاده از قاعده دست راست مشخص کنید.
- پ) از دو سیم بلند موازی که به فاصله d از یکدیگر قرار دارند، جریان‌های همسوی I می‌گذرد. نیرویی را که به یک متر از هریک از سیم‌ها وارد می‌شود به دست آورید.

دیدیم که در دو سیم مستقیم دراز و موازی حامل جریان، با توجه به جهت جریان برهم نیروهای ربایشی یا رانشی وارد می‌کنند، این واقعیت، اساس تعریف یکای جریان الکتریکی یعنی آمپر در SI است. مطابق این تعریف :

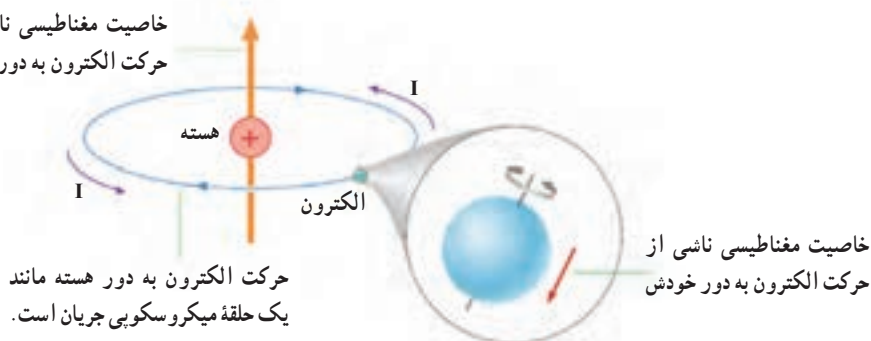
هرگاه از دو سیم نازک، موازی، مستقیم و بسیار دراز که به فاصله یک متر از یکدیگر در خلأ قرار دارند، جریان‌های مساوی به گونه‌ای عبور کند که بر یک متر از طول هریک از سیم‌ها نیرویی برابر 2×10^{-7} نیوتون وارد شود، جریانی که از هریک از سیم‌ها می‌گذرد، برابر یک آمپر است.

۴-۲- خواص مغناطیسی مواد

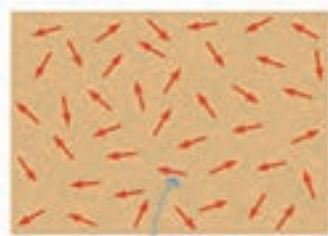
پیش از این دیدیم که برخی مواد خاصیت آهنربایی دارند، و در برخی مواد دیگر که در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند خاصیت آهنربایی القا می‌شود. برای نمونه، هسته آهنی یک آهنربای الکتریکی را به یاد بیاورید (شکل ۴-۲۰). اکنون این پرسش پیش می‌آید که منشأ این رفتار مواد چیست؟ در این بخش به بررسی این موضوع می‌پردازیم.

وقتی به بررسی ساختمان کوچک‌ترین جزء سازنده ماده، یعنی اتم می‌پردازیم متوجه می‌شویم که منشأ خاصیت مغناطیسی برخی از مواد ناشی از اتم‌های تشکیل دهنده آنهاست. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع به شکل ۴-۲۴ توجه کنید. در این شکل، اتمی با یک الکترون نشان داده شده است که علاوه بر چرخیدن به دور هسته، به دور خودش نیز می‌چرخد. در واقع منشأ خاصیت مغناطیسی اتم ناشی از این دو نوع حرکت است. به این ترتیب می‌توان گفت هر الکترون چرخان درون اتم، یک آهنربای بسیار ریز است. به طوری که اگر اتم، یک زوج الکترون داشته باشد که در یک جهت بچرخند، آهنربای قوی‌تری را به وجود می‌آورند. اما اگر این زوج الکترون در جهت‌های مخالف یکدیگر بچرخند، برخلاف هم عمل و خاصیت مغناطیسی یکدیگر را خنثی می‌کنند. به همین سبب است که برخی مواد خاصیت مغناطیسی دارند و برخی دیگر خواص مغناطیسی ندارند.

خاصیت مغناطیسی ناشی از حرکت الکترون به دور هسته



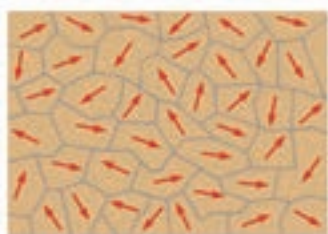
شکل ۴-۲۴ چرخش الکترون به دور هسته و به دور خودش، منشأ خاصیت مغناطیسی اتم است. همان‌طور که دیده می‌شود سهم خاصیت مغناطیسی ناشی از حرکت الکترون‌ها به دور هسته، بسیار بیشتر از سهم ناشی از حرکت الکترون‌ها به دور خودشان است.



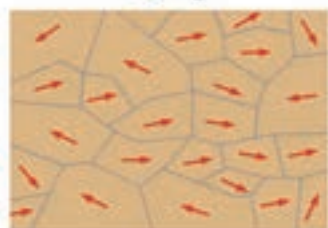
هر ذره سازنده مواد مغناطیسی، یک آهنربای بسیار ریز است که آن را دوقطبی مغناطیسی می نامند.

شکل ۱۴-۲۵ سمتگیری کاتوره ای دوقطبی های مغناطیسی در یک ماده پارامغناطیسی در نبود میدان مغناطیسی

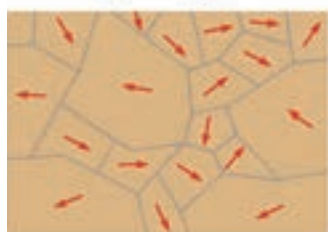
$$\vec{B} = 0$$



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۴-۲۶ الف) ماده فرومغناطیسی در نبود میدان مغناطیسی خارجی ($\vec{B} = 0$)، ب) ماده فرومغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی ضعیف، پ) ماده فرومغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی قوی.

موادی که اتم ها یا مولکول های سازنده آنها دارای خاصیت مغناطیسی باشند را **مواد مغناطیسی** می نامند. در واقع می توان گفت کوچک ترین ذره های تشکیل دهنده این مواد (اتم ها یا مولکول ها) هر کدام آهنرباهای بسیار ریزی هستند که به آنها **دوقطبی مغناطیسی** نیز گفته می شود. در این کتاب، دوقطبی های مغناطیسی را با یک پیکان کوچک نشان می دهیم که می تواند جهت گیری های متفاوتی داشته باشد و هر کدام از آنها وابسته به یک اتم یا مولکول اند. در ادامه به بررسی برخی از مواد مغناطیسی می پردازیم.

مواد پارامغناطیسی: دوقطبی های مغناطیسی در یک ماده پارامغناطیسی سمت گیری مشخص و منظمی ندارند و در جهت های کاتوره ای قرار دارند (شکل ۴-۲۵). در نتیجه این مواد خاصیت مغناطیسی ندارند. اگر آنها را درون یک میدان مغناطیسی (مثلاً نزدیک یک آهنربا) قرار دهیم، دوقطبی های کوچک مانند عقربه های مغناطیسی در نزدیکی آهنربا رفتار می کنند؛ یعنی در راستای خط های میدان مغناطیسی منظم می شوند. هرچه میدان مغناطیسی قوی تر باشد، تعداد بیشتری از این دوقطبی های مغناطیسی کوچک با میدان هم خط می شوند. در نتیجه، خاصیت مغناطیسی ماده بیشتر می شود.

اگر آهنربا را از این مواد دور کنیم، دوقطبی های مغناطیسی دوباره و به سرعت به وضعیت کاتوره ای در غیاب میدان برمی گردند.

به این ترتیب، مواد پارامغناطیسی در میدان های مغناطیسی قوی تا حدودی خاصیت مغناطیسی موقت پیدا می کنند. اورانیم، پلاتین، آلومینیم، سدیم، اکسیژن و اکسید نیتروژن از جمله مواد پارامغناطیسی اند.

مواد فرومغناطیسی: در برخی از مواد مغناطیسی، دوقطبی های مغناطیسی کوچک خود به خود با دوقطبی های مجاور خود هم خط می شوند. این گونه مواد را **فرومغناطیسی** می نامند. در عمل، همه بخش های مغناطیسی در یک ماده فرومغناطیسی در یک راستا قرار ندارند؛ بلکه این گونه مواد از بخش های بسیار کوچکی به نام **حوزه مغناطیسی** تشکیل شده اند که ابعاد آن در بیشتر مواد فرومغناطیسی حدود 10^{-6} تا 10^{-4} متر است. هر حوزه از تعداد بسیار زیادی اتم تشکیل شده است به طوری که دوقطبی های مغناطیسی آنها به طور کامل، هم خط اند. ولی سمتگیری دوقطبی های مغناطیسی هر حوزه با حوزه های مجاور آن تفاوت دارد (شکل ۴-۲۶-الف). این گونه مواد را می توان با قراردادن در یک میدان مغناطیسی، آهنربا کرد. اثر میدان مغناطیسی خارجی بر حوزه های مغناطیسی باعث می شود که دوقطبی های مغناطیسی هر حوزه تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گیرند و جهت آنها به جهت میدان خارجی متمایل شود. علاوه بر این، حوزه هایی که نسبت به میدان در وضع مناسبی قرار دارند (با میدان همسو هستند) رشد می کنند؛ یعنی حجمشان زیاد می شود و در نتیجه، حوزه هایی که سمتگیری آنها نسبت به میدان مناسب نیست، کوچک می شوند؛ یعنی مرز بین حوزه ها جابه جا می شود، و در نتیجه ماده در مجموع، خاصیت آهنربایی پیدا می کند.

در شکل ۴-۲۶ ب ماده فرومغناطیسی را در یک میدان مغناطیسی خارجی $\vec{B}$ قرار داده ایم؛ مرزهای حوزه ها جابه جا شده اند و در نتیجه، ماده در مجموع خاصیت مغناطیسی پیدا کرده است. در شکل ۴-۲۶ پ میدان مغناطیسی خارجی آن قدر قوی است که بیشتر حجم ماده را حوزه های با سمتگیری مناسب (همسو با میدان) اشغال کرده اند.

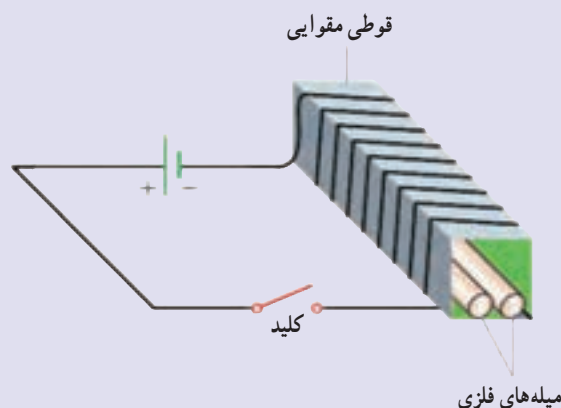
در برخی از مواد فرومغناطیسی مانند آهن، کبالت و نیکل در صورتی که خالص باشند، حجم حوزه‌ها به سهولت تغییر می‌کند و در نتیجه با این روش به آسانی آهن‌ریا می‌شوند و خاصیت آهن‌ریایی خود را نیز به راحتی از دست می‌دهند. این مواد را **فرومغناطیسی نرم** می‌نامند. از این گونه مواد در هسته سیملوله‌ها استفاده می‌شود. مواد فرومغناطیس نرم با حذف میدان مغناطیسی خارجی خاصیت آهن‌ریایی خود را از دست می‌دهند و به دلیل همین خاصیت، آنها برای ساختن آهن‌ریاهای الکتریکی (آهن‌ریاهای غیر دائم) مناسب‌اند.

برخی مواد دیگر مانند فولاد (آهن به اضافه دو درصد کربن)، آلیاژهای آهن، کبالت و نیکل به سختی آهن‌ریا می‌شوند؛ یعنی حجم حوزه‌ها در آنها به سختی تغییر می‌کند. این مواد را **فرومغناطیسی سخت** می‌نامند. در این گونه مواد برای افزایش حجم حوزه‌هایی که سمت‌گیری مناسب دارند (یعنی با میدان خارجی همسو هستند) به میدان‌های مغناطیسی خارجی قوی‌تری نیازمند است. در این مواد، سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی حوزه‌ها پس از حذف میدان خارجی به سهولت تغییر نمی‌کند. به عبارت دیگر، پس از برداشتن میدان مغناطیسی خارجی، ماده فرومغناطیسی سخت، خاصیت آهن‌ریایی خود را تا اندازه قابل توجهی حفظ می‌کند. به همین دلیل این مواد برای ساختن آهن‌ریاهای دائمی مناسب‌اند.

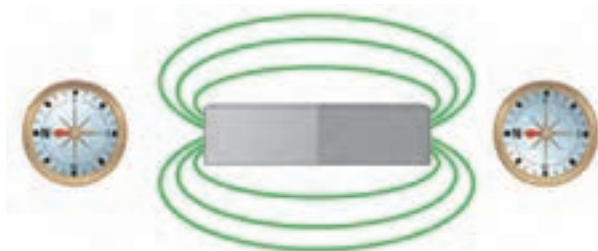
برای خاصیت آهن‌ریایی هر ماده فرومغناطیسی، مقدار اشباع یا پیشینه‌ای وجود دارد. این وضعیت هنگامی به وجود می‌آید که ماده فرومغناطیسی در یک میدان مغناطیسی بسیار قوی قرار گیرد؛ به طوری که درصد بالایی از دوقطبی‌های مغناطیسی اتمی به موازات یکدیگر هم‌خط شوند. به عبارت دیگر حجم حوزه‌هایی که با میدان مغناطیسی خارجی همسو هستند به بیشترین مقدار خود برسد.

پرسش ۸-۴

- دو میله فلزی بلند مطابق شکل زیر درون پیچه درازی قرار دارند. با بستن کلید و عبور جریان از این پیچه، مشاهده می‌شود دو میله از یکدیگر دور می‌شوند و هنگامی که کلید باز و جریان قطع می‌شود، میله‌ها به محل اولیه بازمی‌گردند.
- الف) چرا با عبور جریان از پیچه، میله‌ها از یکدیگر دور می‌شوند؟
- ب) با دلیل توضیح دهید میله‌های فلزی از نظر مغناطیسی چه نوعی هستند؟

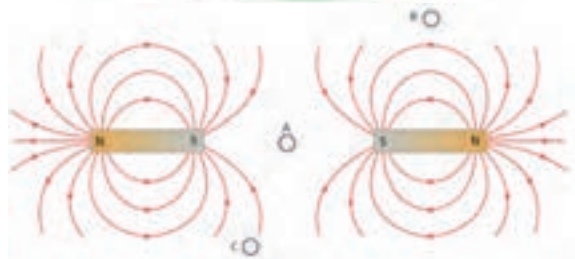


پرسش‌ها



۱ الف) با توجه به جهت‌گیری عقربه‌های مغناطیسی در شکل روبه‌رو، قطب‌های آهنربای میله‌ای و جهت خط‌های میدان مغناطیسی را تعیین کنید.

ب) آیا خط‌های میدان در داخل آهنربای میله‌ای نیز وجود دارند؟ در صورتی که پاسخ مثبت است، آنها را رسم کنید.

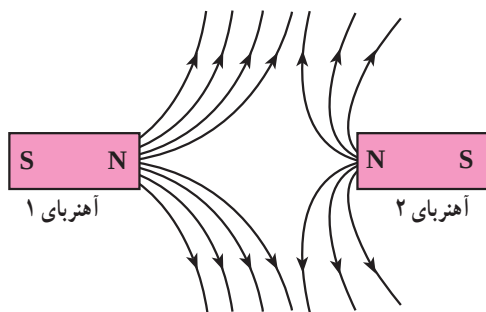


۲ شکل روبه‌رو، خط‌های میدان مغناطیسی را در نزدیکی دو آهنربای میله‌ای نشان می‌دهد.

الف) دربارهٔ میدان مغناطیسی در قسمت A چه می‌توان گفت؟

ب) با رسم شکل نشان دهید عقربهٔ قطب‌نما در قسمت‌های B و C به ترتیب در کدام جهت قرار می‌گیرد؟

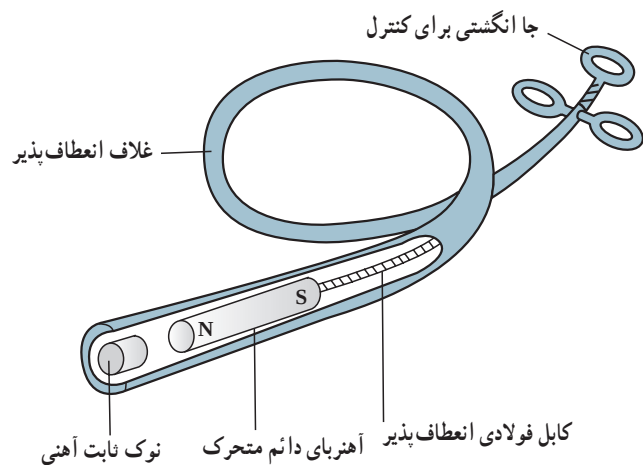
پ) اگر مانند شکل روبه‌رو یکی از آهنرباها را بچرخانیم تا جای قطب‌های آن عوض شود، خط‌های میدان مغناطیسی را در ناحیهٔ نقطه چین رسم کنید.



۳ الف) آهنربایی میله‌ای با قطب‌های نامشخص در اختیار داریم.

دست کم دو روش را برای تعیین قطب‌های این آهنربا بیان کنید.

ب) خط‌های میدان مغناطیسی بین دو آهنربا در شکل روبه‌رو نشان داده شده است؛ میدان مغناطیسی در نزدیکی قطب‌های کدام آهنربا ضعیف‌تر است؟



۴ یک قطعهٔ کوچک فلز در گلولی کودکی که آن را بلعیده است گیر کرده است. پزشک می‌خواهد آن را با دستگاه شکل روبه‌رو بیرون بیاورد.

الف) هنگامی که آهنربای دائمی به نوک ثابت آهنی نزدیک می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟

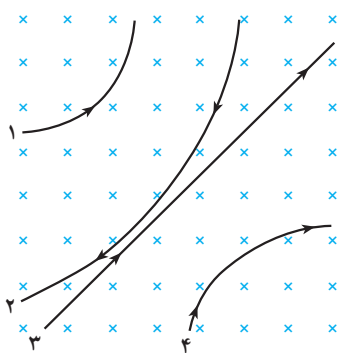
ب) ساختن نوک ثابت آهنی چه مزیتی دارد؟

پ) این وسیله را باید به درون گلولی کودک وارد و به سوی فلز بلعیده شده هدایت کرد؛ چرا غلاف باید انعطاف‌پذیر باشد؟

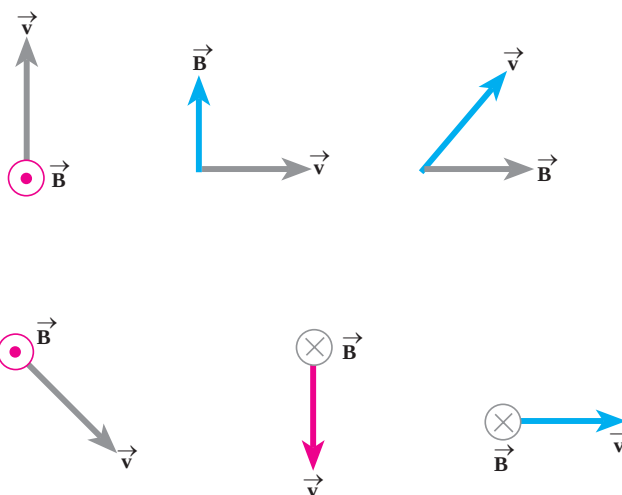
ت) پزشک می‌خواهد یک گیرهٔ آهنی کاغذ و یک واشر

آلمینیومی را از گلولی کودک بیرون بیاورد؛ کدام یک را می‌توان بیرون آورد؟ چرا؟

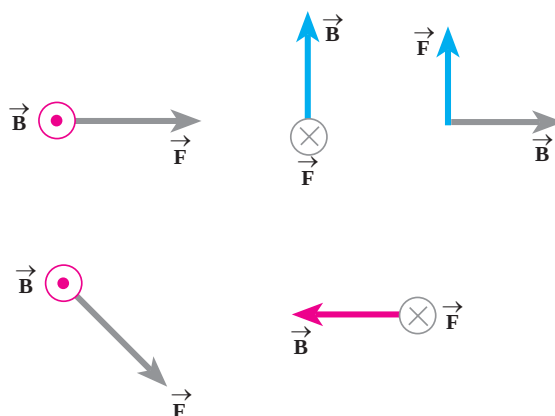
۵ چهار ذره هنگام عبور از میدان مغناطیسی درون سو مسیرهایی مطابق شکل روبه‌رو می‌پیمایند. درباره نوع بار هر ذره چه می‌توان گفت؟



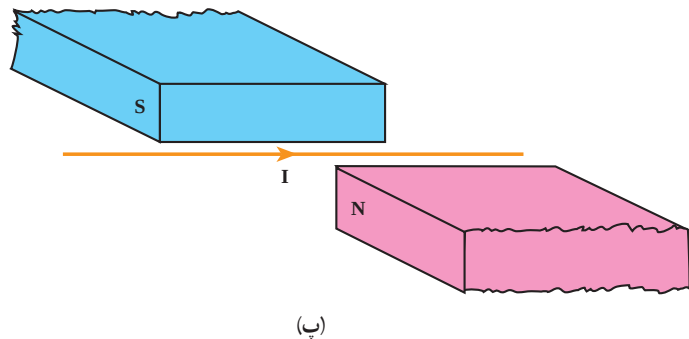
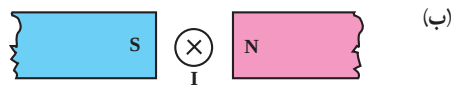
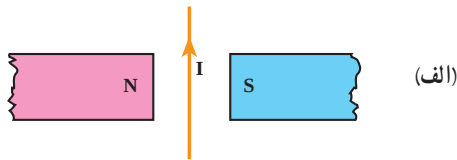
۶ جهت نیروی مغناطیسی وارد بر بار مثبت را در هریک از حالت‌های نشان داده در شکل زیر تعیین کنید.



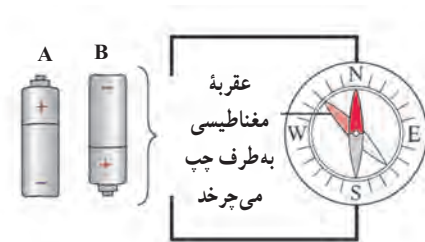
۷ نیروی مغناطیسی $\vec{F}$ وارد بر الکترونی که در میدان مغناطیسی $\vec{B}$ در حرکت است، در شکل زیر نشان داده شده است. فرض کنید راستای حرکت الکترون بر میدان مغناطیسی عمود است؛ در هریک از حالت‌های نشان داده شده جهت سرعت الکترون را تعیین کنید.



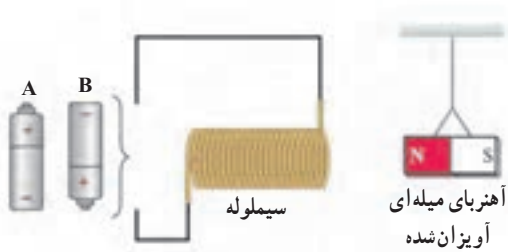
۸ جهت نیروی الکترومغناطیسی بر سیم حامل جریان را در هر یک از شکل‌های الف، ب و پ با استفاده از قاعده دست راست بیابید.



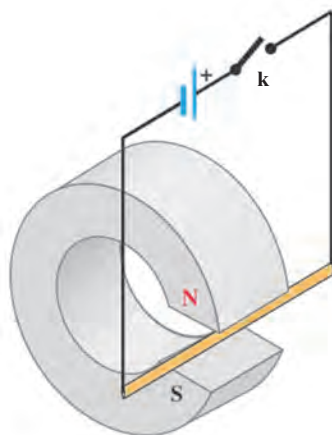
۹ کدام باتری را در مدار شکل روبه‌رو قرار دهیم تا عقربه قطب‌نما که روی سیم قرار دارد، در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت بچرخد؟ دلیل انتخاب خود را توضیح دهید.



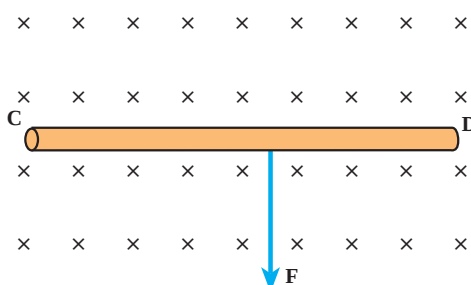
۱۰ کدام باتری را در مدار شکل روبه‌رو قرار دهیم تا آهنربای میله‌ای آویزان شده به طرف سیم‌لوله جذب شود؟ دلیل انتخاب خود را توضیح دهید.



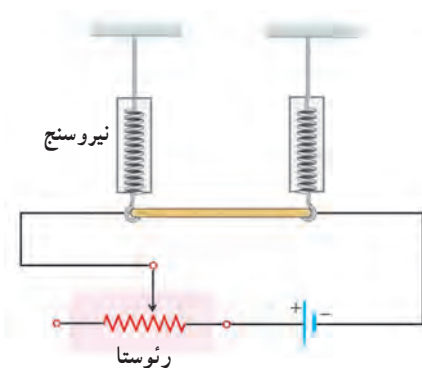
۱۱ یک میله رسانا به پایانه‌های یک باتری وصل شده و مطابق شکل در فضای بین قطب‌های یک آهنربای نعلی شکل آویزان شده است؛ با بستن کلید K، چه اتفاقی برای میله رسانا رخ می‌دهد؟ توضیح دهید.



مسئله‌ها



- ۱ سیم رسانای CD به طول ۲m مطابق شکل روبه‌رو عمود بر میدان مغناطیسی با اندازه 5 T قرار گرفته است؛ اگر نیروی الکترومغناطیسی وارد بر سیم برابر 1 N باشد، جهت و اندازه جریانی عبوری از سیم را تعیین کنید.



- ۲ یک سیم حامل جریان $1/6\text{ A}$ امپر مطابق شکل روبه‌رو با دو نیروسنج فنری که به دو انتهای آن بسته شده‌اند، به‌طور افقی و در راستای غرب به شرق قرار دارد. میدان مغناطیسی زمین را افقی و یکنواخت و درست به‌طرف شمال با بزرگی 5 mT بگیرد.

الف) نیروی مغناطیسی وارد بر هر متر این سیم را تعیین کنید.
ب) اگر بخواهیم نیروسنج‌ها عدد صفر را نشان دهند، چه جریانی و در چه جهتی باید از سیم عبور کند؟ جرم یک متر از طول این سیم 8 g است ($g = 10\text{ N/kg}$).

- ۳ پروتونی با سرعت 10^6 m/s تحت زاویه $4/4^\circ$ در میدان مغناطیسی 18 mT در حرکت است. الف) بزرگی نیروی وارد بر این پروتون را محاسبه کنید.

ب) اگر تنها این نیرو بر پروتون وارد شود، شتاب پروتون را حساب کنید. (بار الکتریکی پروتون $1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$ و جرم آن $1.7 \times 10^{-27}\text{ kg}$ است).

- ۴ از پیچه مسطحی به شعاع 5 cm که از 200 دور سیم نازک درست شده است، جریان $1/2\text{ A}$ می‌گذرد. میدان مغناطیسی را در مرکز پیچه حساب کنید.

- ۵ سیم‌لوله‌ای شامل 250 دور حلقه است که دور یک لوله پلاستیکی توخالی به طول 14 cm متر پیچیده شده است. اگر جریان گذرنده از سیم‌لوله 8 A باشد، بزرگی میدان مغناطیسی درون سیم‌لوله را حساب کنید.

- ۶ در (شکل روبه‌رو) دو سیم‌لوله P و Q هم‌محور، طول برابر و تعداد دور متفاوت دارند. تعداد دور سیم‌لوله P برابر 200 و تعداد دور سیم‌لوله Q برابر 300 است. اگر جریان 1 A از سیم‌لوله Q عبور کند، از سیم‌لوله P چه جریانی باید عبور کند تا برآیند میدان مغناطیسی ناشی از دو سیم‌لوله در نقطه M (روی محور دو سیم‌لوله) صفر شود؟

- ۷ الکترونی با سرعت 10^5 m/s در یک میدان مغناطیسی در حرکت است. نیرویی که از طرف میدان مغناطیسی بر این الکترون وارد می‌شود، هنگامی بیشینه است که الکترون به سمت جنوب حرکت کند. الف) اگر این نیروی بیشینه بالاسو و برابر $6/8 \times 10^{-14}\text{ N}$ باشد، بزرگی و جهت میدان مغناطیسی را تعیین کنید.

ب) چه میدان الکتریکی همین نیرو را ایجاد می‌کند؟ (بار الکتریکی الکترون $1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$ است).