

می‌دانیم آهنرباهای دائم در فضای اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد می‌کنند. در این فصل خواهیم دید جریان الکتریکی نیز می‌تواند میدان مغناطیسی تولید کند. شکل بالا یک سیم‌لوله‌ی حامل جریان را نشان می‌دهد که در فضای اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد کرده است و این میدان باعث جهت‌گیری براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی شده است.

## مغناطیس

اگر تاکنون با یک اسباب بازی مغناطیسی بازی کرده باشید، یا یک قطب‌نما را به کار برده باشید و با آهنربایی را مثلاً برای نگه داشتن یک برگه‌ی کاغذ روی بدنه‌ی یخچال مورد استفاده قرار داده باشید، احتمالاً از مشاهده‌ی پدیده‌های مربوط به شگفت آمده‌اید. آهنرباها برای بسیاری از ما جذابیت خاصی دارند.

آهنربایی را در دست خود نگه دارید و نزدیک یک جسم آهنی یا فولادی بایستید، آیا احساس نمی‌کنید که دست شما به طرف آن جسم کشیده می‌شود. در هر یک از دستان خود یک آهنربا نگه دارید، حتی وقتی هم که دو آهنربا با هم در تماس نیستند، وجود نیروی مغناطیسی را احساس می‌کنید. اگر یک ماده‌ی غیر مغناطیسی مثل شیشه نیز بین دو آهنربا باشد، باز هم این نیرو وجود دارد. دو آهنربا حتی در خلأ هم به یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. زمین نیز خود یک آهنربای عظیم است، که اثرهای ناشی از آن در پدیده‌های متفاوت دیده می‌شود.



شب هنگام، نور شمالگان (شفق قطبی) در نیم‌کره‌ی شمالی به صورت پرده‌ای نورانی در آسمان دیده می‌شود، ضخامت این پرده‌ی خمیده می‌تواند به ارتفاع چند کیلومتر و به طول چندین هزار کیلومتر باشد.

در این فصل خواهیم دید که جریان‌های الکتریکی نیز اثرهای مغناطیسی دارند. از اثرهای مغناطیسی سیم‌های حامل جریان و مواد مغناطیسی در بسیاری از ماشین‌ها و دستگاه‌هایی که زندگی روزانه‌ی ما را ساده‌تر می‌کنند، استفاده می‌شود.

## ۴-۱- آهنربا

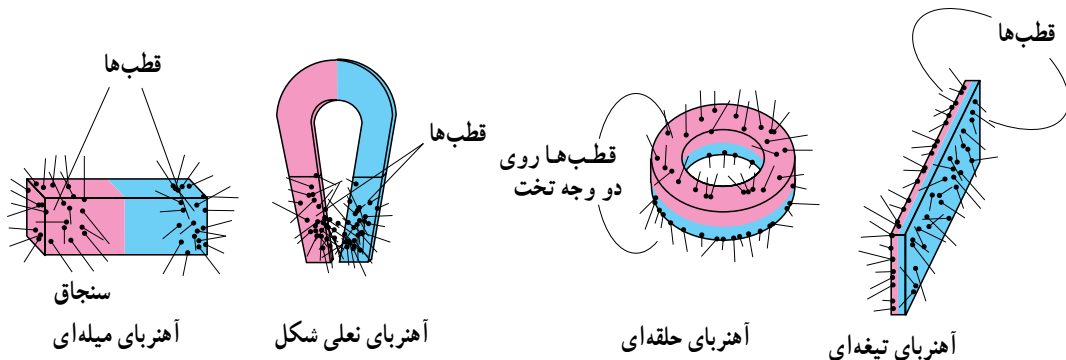
یونانیان باستان، بیش از ۲۵۰۰ سال پیش با پدیده‌ی آهنربایی آشنا بودند. تالس که اغلب از او به‌عنوان پدر علم یونان یاد می‌شود، ماده‌ی کانی مگنتیت ( $Fe_3O_4$ ) را که آهن را می‌رباید می‌شناخت. همان‌گونه که می‌دانید، ماده‌های دارای این ویژگی را آهنربا می‌نامند. چینی‌های باستان نیز با ویژگی‌های مغناطیسی برخی از سنگ‌های آهنربا آشنایی داشتند و تکه‌هایی از این سنگ‌ها را به‌صورت قطب‌نماهای ساده در دریانوردی به‌کار می‌بردند.

### فعالیت ۱-۴

در گروه خود آنچه را که درباره‌ی آهنرباها و کاربردهای آن‌ها می‌دانید، به‌بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

آهنرباها را با توجه به نوع کاربردی که دارند، به شکل‌های مختلف (میله‌ای، نعلی شکل، تیغه‌ای و ...) می‌سازند.

**قطب‌های آهنربا:** در آهنربا - به هر شکلی که باشد - دو ناحیه وجود دارد که خاصیت آهنربایی در آن‌ها بیش از قسمت‌های دیگر است. این ناحیه‌ها را قطب‌های آهنربا می‌نامند. قطب‌های آهنرباها را به شکل‌های مختلف در شکل ۱-۴ مشاهده می‌کنید. تجمع سنجاها در کوچک مکان قطب‌های آهنربا را نشان می‌دهد.



## فعالیت ۲-۴

به کمک براده‌های آهن یا چند سنجاق، قطب‌های هریک از آهنرباهایی را که در اختیار دارید، تعیین کنید.

پیش از این دیده‌اید که عقربه‌ی مغناطیسی همواره در جهت معینی می‌ایستد، به گونه‌ای که یک قطب معین آن مطابق شکل ۲-۴ تقریباً به طرف شمال و قطب دیگر آن به طرف جنوب قرار می‌گیرد. قطبی را که به سوی شمال تمایل دارد (یا به عبارت دیگر شمال‌گرا است) قطب N و قطب جنوب‌گرا را قطب S می‌نامند (شکل ۲-۴). قطب‌های همنام آهنرباها یک‌دیگر را می‌رانند و قطب‌های غیرهمنام یک‌دیگر را می‌ربایند.

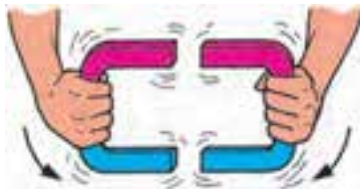


شکل ۲-۴ قطب‌نماهایی که ملاحان در دریا و کوهنوردان به هنگام مه‌غلیظ برای تعیین جهت حرکت به کار می‌برند، در واقع یک آهنربای میله‌ای نازک است که بر روی پایه‌ای سوار است و می‌تواند آزادانه بر روی آن بچرخد، و جهت تقریبی شمال را نشان دهد. قطب‌نما را عقربه‌ی مغناطیسی هم می‌نامند.

## فعالیت ۳-۴

آزمایشی که اثر قطب‌های آهنربا را بر یک‌دیگر نشان دهد طراحی کنید و انجام دهید.

اگر دو آهنربای نعلی شکل را مطابق شکل ۳-۴ در دو دست خود نگه دارید و سعی کنید آن‌ها را طوری به هم نزدیک کنید که قطب‌های همنام به یک‌دیگر نزدیک شوند، به خوبی می‌توانید نیروی رانش بین قطب‌های همنام را احساس کنید.



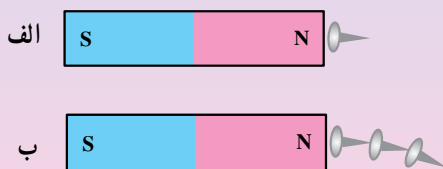
شکل ۳-۴

لقای خاصیت مغناطیسی: دیدیم که آهنرباها قطعه‌هایی از جنس آهن را می‌ربایند. علاوه بر آهن، ماده‌هایی نظیر نیکل، کبالت و آلیاژهایی که از این سه فلز تشکیل شده‌اند نیز جذب آهنربا می‌شوند. با انجام دادن آزمایش ۱-۴ در می‌یابید که قطعه‌ی آهنی ربوده شده توسط آهنربا، خود خاصیت آهنربایی پیدا کرده است.

## آزمایش ۱-۴

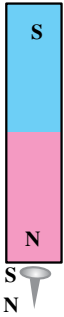
وسایله‌های آزمایش: یک آهنربای میله‌ای، تعدادی میخ آهنی، مقداری براده‌ی آهن (یا سنجاق کوچک).

- ۱- به کمک براده‌های آهن تحقیق کنید که میخ‌ها خاصیت آهنربایی ندارد.
- ۲- آهنربا را مطابق شکل ۴-۴ الف به یک انتهای میخ نزدیک کنید. بار دیگر خاصیت آهنربایی میخ را به کمک براده‌های آهن تحقیق کنید.
- ۳- مانند شکل ۴-۴ ب میخ‌های دیگری را با استفاده از ربایش مغناطیسی ایجاد شده پشت سر یک‌دیگر قرار دهید و هر بار وجود یا نبود خاصیت آهنربایی در آخرین میخ را بررسی کنید.
- ۴- آهنربای میله‌ای را از میخ‌ها دور کنید و بار دیگر خاصیت آهنربایی میخ‌ها را بررسی کنید.



شکل ۴-۴

نتیجه‌ی آزمایش ۱-۴ را می‌توانیم به شرح زیر توجیه کنیم: وقتی که آهنربا در نزدیکی میخ قرار می‌گیرد، در میخ خاصیت مغناطیسی القا می‌شود. اگر قطب N آهنربا را نزدیک به یک سر میخ بیاوریم، مطابق شکل ۴-۵ خاصیت آهنربایی طوری القا می‌شود که آن سر، قطب S و سر دورتر قطب N شود. ربایش بین دو قطب غیرهمنام (N در آهنربا و S در میخ) سبب ربوده شدن میخ به سمت آهنربا می‌شود.



شکل ۴-۵

این پدیده را القای خاصیت مغناطیسی می‌نامند. همان‌طور که با انجام دادن آزمایش ۴-۱ نشان داده‌اید، با دور کردن آهنربای اصلی، خاصیت آهنربایی القا شده نیز از بین می‌رود. علاوه بر این، خاصیت آهنربایی که در اثر القا در یک قطعه آهن، نیکل یا کبالت ایجاد می‌شود، همواره به‌صورتی است که قطعه‌ی یاد شده جذب آهنربای اصلی می‌شود.

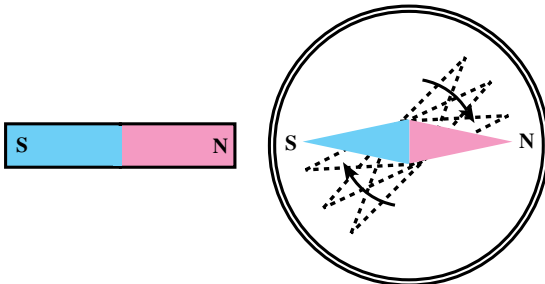
### فعالیت ۴-۴

فرض کنید دو میله‌ی 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 بتوانید بدون استفاده از هیچ وسیله‌ی دیگری، میله‌ای را که از جنس آهنرباست مشخص کنید.

### ۴-۲- میدان مغناطیسی

در فصل دوم با مفهوم میدان الکتریکی آشنا شدید. در آنجا دیدید که در فضای اطراف هر جسمی که بار الکتریکی دارد خاصیتی ایجاد می‌شود که می‌تواند بر هر جسم باردار دیگری که در آن فضا قرارگیرد نیرو وارد کند. هم‌چنین دیدیم که برای توصیف این خاصیت از یک کمیت برداری به نام میدان الکتریکی با نماد  $\vec{E}$  استفاده می‌شود.

در فضای اطراف یک آهنربا نیز خاصیتی وجود دارد که در اثر آن در قطعه‌های آهنی خاصیت آهنربایی القا می‌شود و بر قطب‌های آهنرباهای دیگر نیرویی وارد می‌شود. برای مثال هرگاه یکی از قطب‌های آهنربای میله‌ای را به یک عقربه‌ی مغناطیسی که در راستای تقریبی شمال و جنوب جغرافیایی بر روی پایه‌ای قرار دارد، نزدیک کنیم، می‌بینیم که عقربه‌ی مغناطیسی می‌چرخد (شکل ۴-۶).



شکل ۴-۶- اثر آهنربا بر عقربه‌ی مغناطیسی‌ای که در نزدیکی آن قرار دارد.

در این وضع اگر آهنربا را دور کنیم، عقربه دوباره در راستای تقریبی شمال و جنوب محل قرار می‌گیرد. این آزمایش وجود خاصیتی را در محیط اطراف یک آهنربا نشان می‌دهد. خاصیتی را که در اطراف آهنربا ایجاد می‌شود و به موجب آن به عقربه‌ی مغناطیسی نیرو وارد می‌شود میدان مغناطیسی می‌نامند. میدان مغناطیسی را با نماد  $\vec{B}$  نمایش می‌دهند.

میدان مغناطیسی کمیتی برداری است و مانند هر کمیت برداری دیگری دارای جهت و بزرگی است. در ادامه‌ی بحث، نخست جهت این بردار و سپس بزرگی و یکای آن را تعریف می‌کنیم.

**جهت میدان مغناطیسی:** دیدیم هنگامی که یک عقربه‌ی مغناطیسی را در میدان مغناطیسی یک آهنربا قرار می‌دهیم، عقربه می‌چرخد و در جهت معینی می‌ایستد. اگر آهنربا را در امتداد جدیدی قرار دهیم، عقربه‌ی مغناطیسی نیز خواهد چرخید و در جهت دیگری قرار خواهد گرفت. میدان مغناطیسی در هر نقطه بنا به تعریف هم‌راستای عقربه‌ی مغناطیسی است که در آن نقطه به حال تعادل درآمده باشد و سوی آن از S عقربه به N آن است. به این ترتیب، می‌توانیم بگوییم:

هنگامی که آهنربا در نزدیکی عقربه‌ی مغناطیسی قرار می‌گیرد، عقربه می‌چرخد تا در امتداد میدان مغناطیسی آهنربا قرار گیرد و قطب N آن سوی میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. **خط‌های میدان مغناطیسی:** در فصل ۲ دیدیم که میدان الکتریکی را با خط‌های میدان الکتریکی نمایش می‌دهند. میدان مغناطیسی را نیز می‌توان توسط خط‌های میدان مغناطیسی نمایش داد. این خط‌ها طوری رسم می‌شوند که راستای میدان مغناطیسی در هر نقطه مماس بر خط میدان در آن نقطه باشد. خط میدان مغناطیسی در هر نقطه همسو با میدان مغناطیسی در آن نقطه است. علاوه بر این تراکم این خط‌ها در هر ناحیه از فضا نشانگر بزرگی میدان مغناطیسی در آن ناحیه است.

## آزمایش ۴-۲

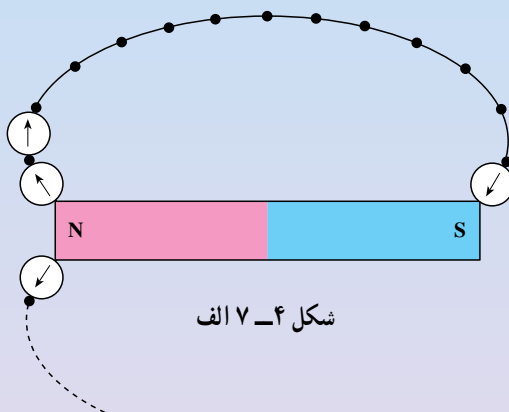
وسایله‌های آزمایش: یک آهنربای میله‌ای، یک عقربه‌ی مغناطیسی، مداد و کاغذ.

۱- آهنربای میله‌ای را روی کاغذ قرار دهید.

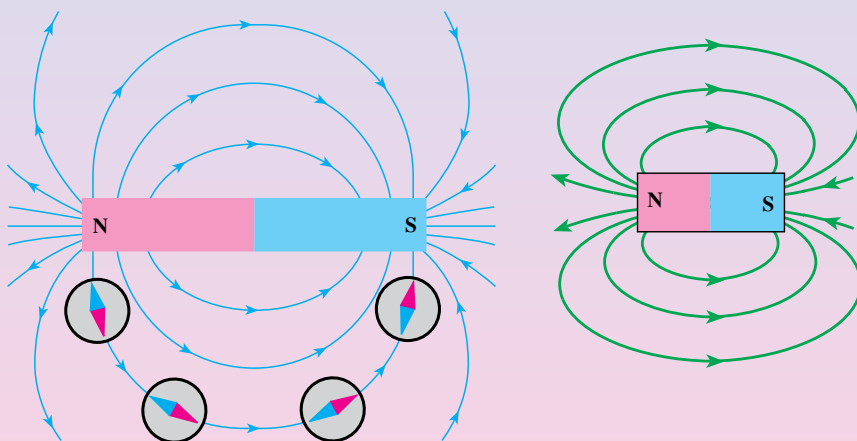
۲- عقربه‌ی مغناطیسی را مطابق شکل ۴-۷ الف نزدیک قطب N آهنربا قرار دهید و با مداد در نقطه‌ای که قطب N عقربه به آن سمت ایستاده یک نقطه بگذارید.

۳- عقربه را جابه‌جا کنید به طوری که قطب S آن روی نقطه‌ای که علامت

- زده‌اید قرار گیرد. بار دیگر با مداد در مکان قطب N عقربه نقطه‌ای بگذارید.
- ۴- این کار را آن قدر ادامه دهید تا بار دیگر عقربه به آهنربای میله‌ای برسد.
- ۵- این نقطه‌ها را به هم وصل کنید. روی منحنی حاصل، جهتی را که قطب N عقربه در آن می‌ایستد، با رسم پیکان مشخص کنید.
- ۶- مرحله‌های ۲ تا ۴ را چند بار تکرار کنید. هر بار از نقطه‌ای نزدیک نقطه‌ی شروع قبلی آغاز کنید تا آنکه شکلی مانند شکل ۴-۷ ب به دست آورید.



شکل ۴-۷ الف



شکل ۴-۷ ب

با استفاده از مقداری براده‌ی آهن می‌توان طرحی از خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربا تهیه کرد. برای این کار آزمایش ۴-۳ را انجام دهید.



## آزمایش ۳-۴

وسيله‌های آزمایش: آهنربای میله‌ای، آهنربای نعلی شکل، براده‌ی آهن، یک صفحه‌ی شیشه‌ای یا مقوایی، یک نمک پاش (یا وسیله‌ی دیگری برای پاشیدن براده‌ی آهن).

۱- آهنربای میله‌ای را روی میز قرار دهید و صفحه‌ی شیشه‌ای (یا مقوایی) را روی آن بگذارید.

۲- به کمک نمک پاش براده‌های آهن را به طور یکنواخت به ضخامت خیلی کم روی شیشه بپاشید.

۳- چند ضربه‌ی آرام به صفحه‌ی شیشه‌ای بزنید تا براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی قرار گیرند. طرحتی که روی صفحه‌ی شیشه‌ای پدیدار می‌شود، نقشه‌ای از خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربای میله‌ای است.

## پرسش ۱-۴

با استفاده از خاصیت القای مغناطیسی، توضیح دهید که چرا براده‌های آهن در آزمایش ۳-۴ در راستای خط‌های میدان مغناطیسی می‌ایستند.

میدان مغناطیسی یکنواخت: اگر خط‌های میدان مغناطیسی در ناحیه‌ای از فضا با یک‌دیگر موازی و هم‌فاصله باشند، بردار میدان مغناطیسی در همه‌ی نقطه‌های آن ناحیه، بزرگی و جهت ثابتی دارد. یک چنین میدان مغناطیسی‌ای را میدان مغناطیسی یکنواخت می‌نامند.

خط‌های میدان مغناطیسی مربوط به آهنرباها را که در وضعیت‌های مختلف به کمک براده‌های آهن به دست آمده است، در شکل ۴-۸ مشاهده می‌کنید.



(پ) دو آهنربای میله‌ای که قطب‌های غیرهمنامشان نزدیک یک‌دیگر است.



(ب) دو آهنربای میله‌ای که قطب‌های همنامشان نزدیک یک‌دیگر است.



(الف) آهنربای میله‌ای

## ۳-۴- تعریف میدان مغناطیسی با استفاده از نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی

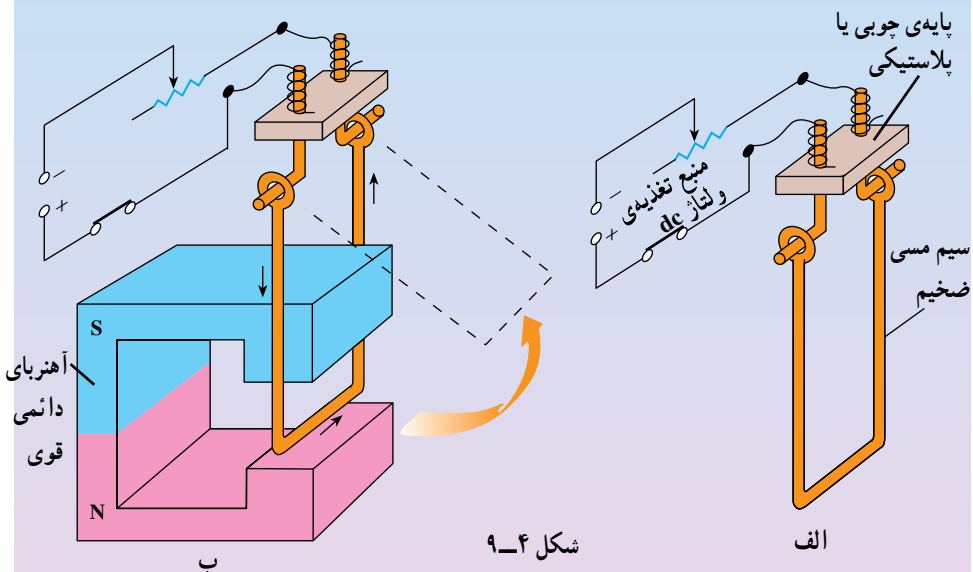
دیدیم که هرگاه یک عقربه‌ی مغناطیسی یا هر آهنربای دیگری در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، بر آن نیرو وارد می‌شود. در ادامه خواهیم دید که بر سیم‌های حامل جریان الکتریکی نیز در میدان مغناطیسی نیرو وارد می‌شود، بزرگی میدان مغناطیسی و یکای آن را می‌توان با استفاده از این اثر تعریف کرد. برای مشاهده‌ی این نیرو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

### آزمایش ۴-۴

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

۱- مداری مطابق شکل ۹-۴ الف ببندید.

۲- آهنربای نعلی شکل را مطابق شکل ۹-۴ 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- نتیجه‌ی آزمایش را به کلاس گزارش دهید.

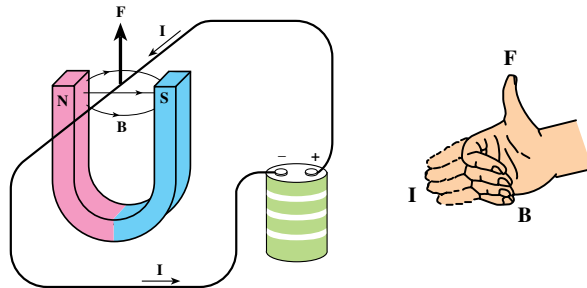
۶- این آزمایش را با یک آهنربای دیگر تکرار کنید.

۷- جهت و بزرگی شدت جریان را تغییر دهید و آزمایش‌های بالا را تکرار کنید.

اورستد (فیزیکدان دانمارکی) با انجام آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۴-۴ و اندازه‌گیری دقیق نیرویی که بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی وارد می‌شود، نشان داد که: نیرویی که در میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود، بر راستای جریان و نیز بر میدان مغناطیسی عمود است.

جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی را می‌توان از قاعده‌ای به نام قاعده‌ی دست راست به این صورت پیش‌بینی کرد:

اگر دست راست خود را باز نگه دارید و چهار انگشت را مطابق شکل ۴-۱۰ 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 ۴-۱۰- قاعده‌ی دست راست برای تعیین جهت نیروی  $\vec{F}$  وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی  $I$  در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$

عامل‌های مؤثر بر نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی: بزرگی نیروی

$\vec{F}$  که در میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود، به عامل‌های زیر بستگی دارد:

۱- جریانی که از سیم می‌گذرد ( $I$ )؛ هرچه جریان بیش‌تر باشد، نیروی وارد بر سیم از سوی میدان مغناطیسی بیش‌تر خواهد بود.

$$F \propto I$$

۲- طول قسمتی از سیم که در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد ( $l$ )؛ هرچه طول

بیش‌تری از سیم در میدان قرار گیرد، نیروی وارد بر آن بزرگ‌تر خواهد بود.

$$F \propto l$$

۳- میدان مغناطیسی ( $\vec{B}$ )؛ نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان‌های مغناطیسی مختلف یکسان نیست. نیرویی که در میدان مغناطیسی یک آهنربای قوی‌تر بر سیم حامل جریان وارد می‌شود، بزرگ‌تر است. با استفاده از این واقعیت، می‌توانیم بزرگی میدان مغناطیسی را تعریف کنیم. اندازه‌ی میدان مغناطیسی را با  $B$  نمایش می‌دهند:

$$F \propto B$$

۴- سینوس زاویه‌ای که جریان با میدان مغناطیسی می‌سازد ( $\sin \alpha$ )؛ نیروی وارد بر سیم حامل جریان در یک میدان مغناطیسی با سینوس زاویه‌ی بین راستای میدان و راستای جریان متناسب است.

$$F \propto \sin \alpha$$

تناسب‌های بالا را می‌توان با استفاده از ضریب تناسب  $k$ ، به صورت زیر خلاصه کرد.

$$F = kBI \sin \alpha \quad (1-4)$$

با انتخاب یکای مناسب برای میدان مغناطیسی، می‌توان ضریب تناسب  $k$  را برابر یک گرفت. در نتیجه داریم

$$F = BI \sin \alpha \quad (2-4)$$

اگر جریان  $I$  و میدان  $B$  بر هم عمود باشند، داریم:

$$\sin \alpha = 1$$

در نتیجه، نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی عمود بر آن به قرار زیر است:

$$F = BI \quad (3-4)$$

این بیش‌ترین نیرویی است که میدان مغناطیسی  $B$  می‌تواند بر طول  $I$  از سیم حامل جریان  $I$  وارد کند. بنابراین، می‌توانیم اندازه‌ی میدان مغناطیسی  $B$  را با رابطه‌ی زیر تعریف کنیم.

$$B = \frac{F}{I} \quad (4-4)$$

یعنی بزرگی میدان مغناطیسی در هر نقطه، برابر است با نیرویی که بر یک متر از طول سیم حامل جریانی به شدت یک آمپر که در راستای عمود بر میدان قرار گرفته باشد وارد می‌شود.

یکای میدان مغناطیسی، تسلا: رابطه‌ی ۴-۴ را برای تعریف یکای میدان مغناطیسی به کار می‌بریم. یکای میدان مغناطیسی در SI تسلا نام دارد و با نماد  $T$  نشان داده می‌شود.

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

$$1 \text{ تسلا} = \frac{1 \text{ نیوتون}}{(1 \text{ متر}) \times (1 \text{ آمپر})} = 1 \text{ تسلا} \quad 149$$

تسلا یکای بزرگی است. در کاربردهای عملی از یکای کوچکتری استفاده می کنند که گاوس نام دارد و با نماد G نمایش داده می شود.

$$1T = 10^4 G$$

### مثال ۱-۴

یک سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی به بزرگی  $4 \text{ mT}$  در راستایی که با جهت میدان زاویه  $3^\circ$  می سازد، قرار دارد. اگر شدت جریانی که از سیم می گذرد  $5$  آمپر باشد، نیروی مغناطیسی وارد بر یک متر از این سیم را محاسبه کنید.  
حل: بزرگی نیروی مغناطیسی برابر است با:

$$F = I l B \sin \alpha$$

$$F = 5 \times 1 \times 4 \times 10^{-5} \sin 3^\circ$$

$$F = 10 \times 10^{-5} \text{ N} = 0.1 \text{ mN}$$

### تمرین ۱-۴

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.

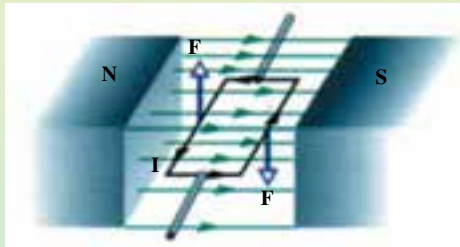
### فعالیت ۵-۴

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

## فناوری

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. تشریح سازوکار وسیله‌های رقمی به مطالب موجود در این کتاب مربوط نمی‌شود. ولی با استفاده از مطالبی که فراگرفته‌ایم، می‌توانیم سازوکار گالوانومتر عقربه‌ای را مورد بررسی قرار دهیم. برای این کار، ابتدا بینیم اگر یک سیم حامل جریان به شکل یک قاب مطابق شکل ۴-۱۱ در یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار گیرد، چه نیروهایی بر آن وارد می‌شود. چنین سیمی را یک پیچه می‌نامند.

محور پیچه



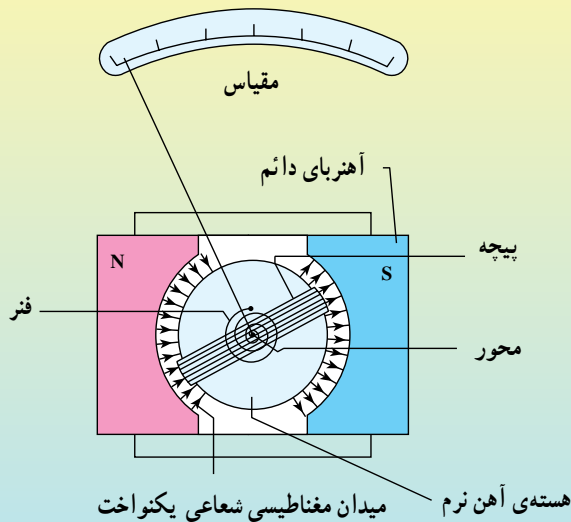
شکل ۴-۱۱- پیچه‌ی حامل جریان در میدان مغناطیسی

هنگامی که جریان از پیچه می‌گذرد، از طرف میدان بر اضلاع آن نیرو وارد می‌شود و در نتیجه پیچه مطابق شکل ۴-۱۱ حول محورش می‌چرخد.

هر گالوانومتر دارای یک قاب است که به دور آن سیم پیچیده شده است، این قاب در یک میدان مغناطیسی دائم و قوی قرار گرفته است. وقتی جریان از این پیچه می‌گذرد، از سوی میدان مغناطیسی به قاب نیرو وارد می‌شود و آن را می‌چرخاند (شکل ۴-۱۲ را ببینید) و عقربه‌ی متصل به قاب را منحرف می‌کند. هر قدر اندازه‌ی شدت جریان بیش‌تر باشد، میزان چرخش پیچه و انحراف عقربه بیش‌تر خواهد شد.

اگر جریانی در جهت وارون شارش کند، جهت چرخش پیچه و انحراف وارون خواهد شد. با قطع جریان، فنر ظریفی که در پشت پیچه قرار دارد، پیچه و عقربه را به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گرداند. صفحه‌ی گالوانومتر که عقربه در مقابل آن می‌چرخد را بر حسب آمپر مدرج می‌کنند، به این ترتیب که در مقابل هر زاویه، بزرگی شدت

جریانی که عقربه را به اندازه‌ی آن زاویه منحرف می‌کند، ثبت می‌کنند.



شکل ۴-۱۲

## فناوری

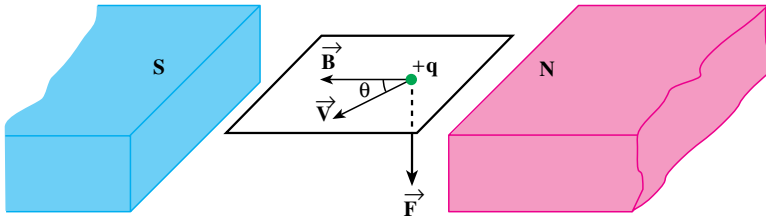
**موتور الکتریکی:** موتورهای الکتریکی ابزارهایی هستند که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. این موتورها در انجام کارهای مختلف روزانه مورد استفاده قرار می‌گیرند، و اساس کار بسیاری از دستگاه‌ها نظیر جاروی برقی، مته‌ی برقی، آسیاب برقی، ماشین لباس‌شویی، پنکه و ... را تشکیل می‌دهند.

ساختمان موتور الکتریکی مانند ساختمان گالوانومتر است، از این نظر که در موتور الکتریکی نیز عبور جریان از یک قاب (به نام روتور) واقع در میدان مغناطیسی، باعث چرخش بیچه می‌شود. چرخش قطعات در دستگاه‌های بالا از این حرکت بیچه ناشی می‌شود.

## ۴-۴- نیروی وارد بر ذره‌ی باردار متحرک در میدان مغناطیسی

در بخش گذشته دیدیم که در میدان مغناطیسی، نیرویی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود. هرگاه جریان صفر شود، نیروی وارد بر سیم نیز صفر می‌شود. در فصل ۳ دیدیم که جریان الکتریکی در واقع شارش بارهای الکتریکی است و صفر شدن جریان در یک رسانا به‌طور متوسط به معنای توقف شارش بارهای الکتریکی است. پس نتیجه می‌گیریم که نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی، در واقع بر بارهایی وارد می‌شود که در سیم در حال حرکت‌اند.

آزمایش نشان می‌دهد که اگر ذره‌ی 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 ۴-۱۳ بر راستای  $\vec{v}$  و میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  عمود است. این نیرو را نیروی الکترومغناطیسی می‌نامند.



شکل ۴-۱۳- ذره‌ی بار مثبت  $q$  که در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  با سرعت  $\vec{v}$  حرکت می‌کند.

آزمایش نشان می‌دهد که بزرگی نیرویی که در میدان مغناطیسی بر بار الکتریکی  $q$  که با سرعت  $\vec{v}$  در حرکت است وارد می‌شود، به عامل‌های زیر بستگی دارد.

۱- بار الکتریکی ( $q$ ): هرچه بار الکتریکی  $q$  بزرگ‌تر باشد، نیروی وارد بر آن از سوی میدان مغناطیسی بزرگ‌تر خواهد بود.

$$F \propto q$$

۲- سرعت حرکت بار الکتریکی ( $\vec{v}$ ): هرچه سرعت حرکت بار الکتریکی در میدان مغناطیسی بیش‌تر باشد، نیرویی که از سوی میدان مغناطیسی بر آن وارد می‌شود، بزرگ‌تر خواهد بود.

$$F \propto v$$

۳- میدان مغناطیسی ( $\vec{B}$ ): هرچه میدان مغناطیسی قوی‌تر باشد، نیرویی که بر بار وارد



می‌شود، بیش‌تر خواهد بود.

$$F \propto B$$

۴- سینوس زاویه‌ی  $\theta$  که جهت حرکت بار الکتریکی (یعنی بردار  $\vec{v}$ ) با میدان مغناطیسی می‌سازد؛ نیروی وارد بر بار الکتریکی متحرک در میدان مغناطیسی با سینوس این زاویه متناسب است (شکل ۴-۱۳).

$$F \propto \sin \theta$$

تناسب‌های بالا را می‌توان در رابطه‌ی زیر خلاصه کرد.

$$F = kq v B \sin \theta \quad (۵-۴)$$

که در آن  $k$  ضریب تناسب است. اگر  $F$  بر حسب نیوتون و  $q$  بر حسب کولن و  $v$  بر حسب  $m/s$  و  $B$  بر حسب تسلا باشد، ضریب تناسب یک خواهد شد. در نتیجه، داریم:

$$F = qvB \sin \theta \quad (۶-۴)$$

جهت نیروی وارد بر بار متحرک: سوی نیروی مغناطیسی وارد بر بار الکتریکی مثبت که در میدان

مغناطیسی  $\vec{B}$  با سرعت  $\vec{v}$  حرکت می‌کند نیز توسط قاعده‌ی دست راست به ترتیب زیر تعیین می‌شود.

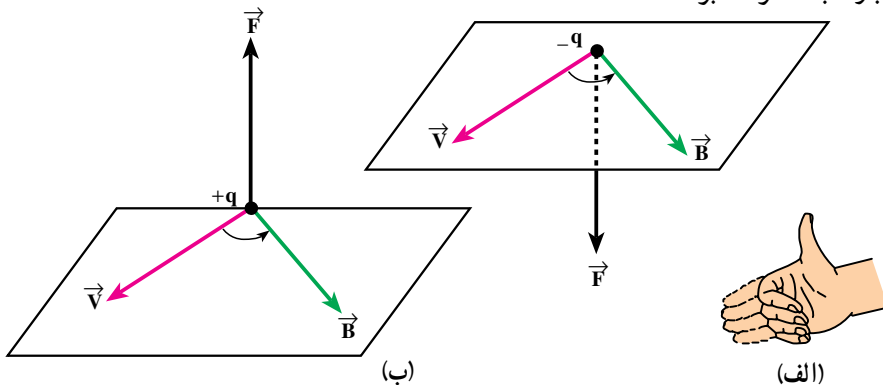
اگر دست راست خود را طوری نگه داریم که انگشتان باز شده‌ی ما در راستای  $\vec{v}$  (یعنی

در جهت حرکت بار الکتریکی) باشد - به گونه‌ای که وقتی آن‌ها را روی زاویه‌ی کوچک‌تری که  $\vec{v}$  با

$\vec{B}$  می‌سازد مطابق شکل ۴-۱۴ الف خم کنیم در جهت  $B$  قرار گیرد - انگشت شست ما در جهت

نیروی وارد بر بار خواهد بود. نیروی وارد بر بار منفی مانند شکل ۴-۱۴ ب در خلاف جهت نیروی

وارد بر بار مثبت خواهد بود.



شکل ۴-۱۴- الف) قاعده‌ی دست راست برای تعیین جهت نیروی وارد بر بار متحرک در میدان مغناطیسی،

ب) جهت نیروی وارد بر بار الکتریکی متحرک مثبت و منفی، در میدان مغناطیسی

## پرسش ۲-۴

اگر بار الکتریکی موازی با  $\vec{B}$  حرکت کند، نیروی مغناطیسی وارد بر آن چه قدر است؟

### مثال ۲-۴

ذره‌ای با بار ۴ میکروکولن و با سرعت  $2 \times 10^3 \text{ m/s}$  در راستایی که با میدان مغناطیسی یکنواخت  $10^2 \text{ G}$  زاویه‌ی  $30^\circ$  می‌سازد، در حرکت است. بزرگی نیروی وارد بر این ذره را محاسبه کنید.

حل: نیروی وارد بر بار متحرک در میدان مغناطیسی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} F &= qvB \sin \theta \\ &= 4 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^3 \times 10^{-2} \sin 30^\circ \\ &= 4 \times 10^{-5} \text{ N} \end{aligned}$$

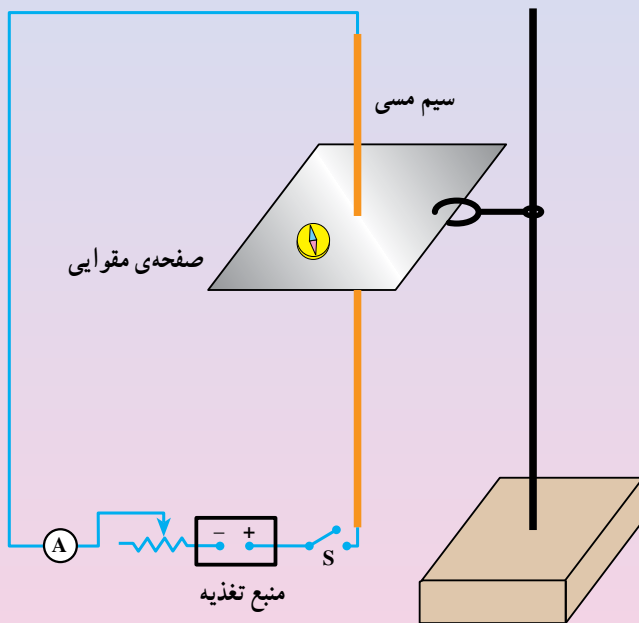
## ۴-۵- آثار مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی

اورستد ضمن انجام دادن برخی آزمایش‌های الکتریسیته برای جمع‌ی از دانشجویان خود، مشاهده کرد که عقربه‌ی مغناطیسی موجود در کنار سیم حامل جریان الکتریکی منحرف می‌شود. او با انجام دادن آزمایش‌های بیش‌تر کشف کرد که عبور جریان الکتریکی از یک سیم، در اطراف آن یک میدان مغناطیسی به وجود می‌آورد. این کشف اورستد نخستین گام در راه درک رابطه‌ی 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.

### آزمایش ۴-۵ (آزمایش اورستد)

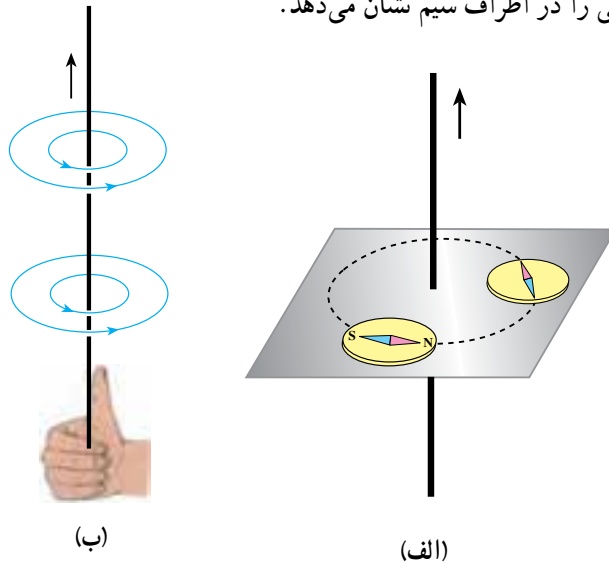
وسایله‌های آزمایش: منبع تغذیه، سیم مسی نسبتاً ضخیم، رئوستا، آمپرسنج، صفحه‌ی مقوایی، عقربه‌ی مغناطیسی، کلید قطع و وصل و سیم رابط.

- ۱- سیم مسی را از صفحه‌ی مقوایی عبور دهید و با آن مداري مطابق شکل ۱۵-۴ ترتیب دهید.
- ۲- قبل از بستن کلید و برقراری جریان الکتریکی، عقربه‌ی مغناطیسی را در مجاورت سیم، روی مقوا قرار دهید و به راستای قرارگرفتن آن توجه کنید.
- ۳- با وصل کردن کلید و تنظیم رئوستا، جریان مناسبی را از مدار عبور دهید. آنگاه به سمت‌گیری عقربه‌ی مغناطیسی توجه کنید.
- ۴- عقربه‌ی مغناطیسی را در نقطه‌های مختلف روی مقوا قرار دهید و سمت‌گیری آن را بررسی کنید.
- ۵- چند خط میدان مغناطیسی را به روش آزمایش ۴-۲ رسم کنید.
- ۶- نتیجه‌ی این آزمایش را در گروه خود بحث کنید و به کلاس گزارش دهید.
- ۷- این آزمایش را بار دیگر با جریانی در جهت مخالف تکرار کنید.
- ۸- تحقیق کنید که افزایش شدت جریان چه تأثیری در نتیجه‌ی آزمایش دارد؟



شکل ۱۵-۴

با انجام دادن این آزمایش می‌بینید که خط‌های میدان مغناطیسی حاصل از یک سیم حامل جریان، مطابق شکل ۴-۱۶ الف به صورت دایره‌های هم‌مرکزی در اطراف سیم حامل جریان خواهند بود. جهت خط‌های میدان مغناطیسی سیم حامل جریان را می‌توان به کمک عقربه‌ی مغناطیسی تعیین کرد. علاوه بر آن با استفاده از قاعده‌ی دست راست نیز می‌شود این جهت را تعیین کرد؛ بنابراین قاعده، اگر سیم را مطابق شکل ۴-۱۶ ب در دست راست خود بگیرید - به گونه‌ای که انگشت شست در جهت جریان الکتریکی باشد - جهت خم شدن چهار انگشت دست شما جهت خط‌های میدان مغناطیسی را در اطراف سیم نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۶

آزمایش نشان می‌دهد که بزرگی میدان مغناطیسی  $B$  در اطراف یک سیم نازک دراز مستقیم حامل جریان الکتریکی  $I$  به شدت  $I$  در نقطه‌ای که فاصله‌ی عمودی آن از سیم برابر  $R$  است با  $I$  نسبت مستقیم و با  $R$  نسبت وارون دارد، یعنی

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

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

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (7-4)$$

### مثال ۳-۴

بزرگی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی ای به شدت ۲ آمپر را که از سیمی نازک، دراز و مستقیم می‌گذرد، در نقطه‌ای به فاصله‌ی الف) ۲ متر، ب) ۲ میلی‌متر از سیم حساب کنید.  
حل: داریم

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

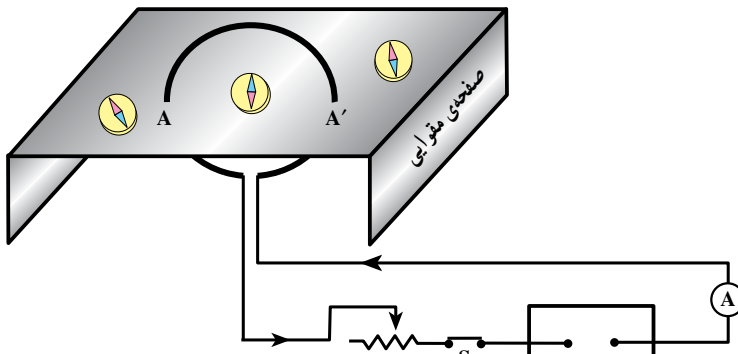
$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2}{2\pi \times 2} = 2 \times 10^{-7} \text{ T} \quad \text{الف)}$$

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2}{2\pi \times 2 \times 10^{-3}} = 2 \times 10^{-4} \text{ T} \quad \text{ب)}$$

میدان مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی در یک پیچه‌ی مسطح: پیچه‌ی مسطح از چند دور سیم نازک به شکل حلقه تشکیل شده که به هم فشرده شده‌اند و به صورت یک حلقه‌ی مسطح درآمده‌اند. خطی که از مرکز این حلقه می‌گذرد و عمود بر سطح آن است، محور پیچه نامیده می‌شود. پیچه‌ها در بسیاری از وسیله‌های برقی برای ایجاد میدان مغناطیسی به کار می‌روند.

### فعالیت ۶-۴

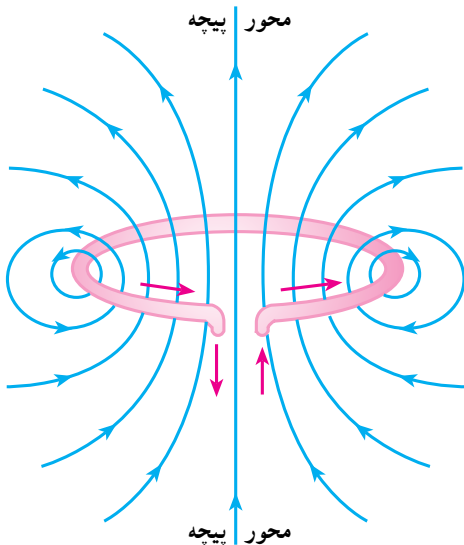
با استفاده از عقربه‌ی مغناطیسی و براده‌ی آهن خط‌های میدان مغناطیسی ناشی از عبور جریان الکتریکی از یک پیچه را تعیین کنید. برای این کار، می‌توانید از مداری مطابق شکل ۱۷-۴ استفاده کنید.



شکل ۱۷-۴

منبع تغذیه‌ی ۶ تا ۱۲ ولتی

خط‌های میدان مغناطیسی پیچه روی صفحه‌ای که از محور پیچه می‌گذرد، در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، خط‌های میدان در ناحیه‌ی داخل پیچه به یک‌دیگر نزدیک‌ترند؛ یعنی، میدان در این ناحیه قوی‌تر است.



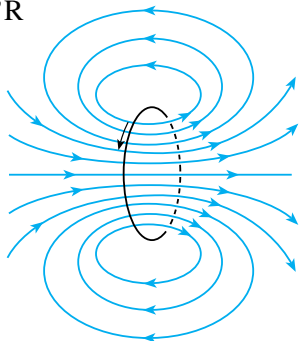
شکل ۴-۱۸ - نقشه‌ی خط‌های میدان مغناطیسی در صفحه‌ی عمود بر سطح پیچه که از محور پیچه می‌گذرد.

هم‌چنین در شکل ۴-۱۸ دیده می‌شود که در نقطه‌هایی که بر محور پیچه قرار دارند، میدان موازی با محور پیچه است.

جهت میدان مغناطیسی پیچه را در هر نقطه می‌توان با قاعده‌ی دست راست - به روشی که قبلاً توضیح داده شد - تعیین کرد (شکل ۴-۱۹).

بزرگی میدان مغناطیسی پیچه‌ی مسطحی به شعاع  $R$  که  $N$  دور دارد و جریان الکتریکی‌ای به شدت  $I$  آمپر از آن می‌گذرد، در مرکز پیچه از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \quad (۴-۸)$$



شکل ۴-۱۹ - استفاده از قاعده‌ی دست راست برای تعیین جهت میدان مغناطیسی پیچه