

دو میله فلزی بلند مطابق شکل روبه‌رو درون سیم‌لوله‌ای که دور یک لوله مقوایی پیچیده شده است قرار دارند. با بستن کلید و عبور جریان از این سیم‌لوله، مشاهده می‌شود که دو میله از یکدیگر دور می‌شوند. وقتی کلید باز و جریان در مدار 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 در کدام دسته قرار می‌گیرند.

### ۳-۷ پدیده القای الکترومغناطیسی

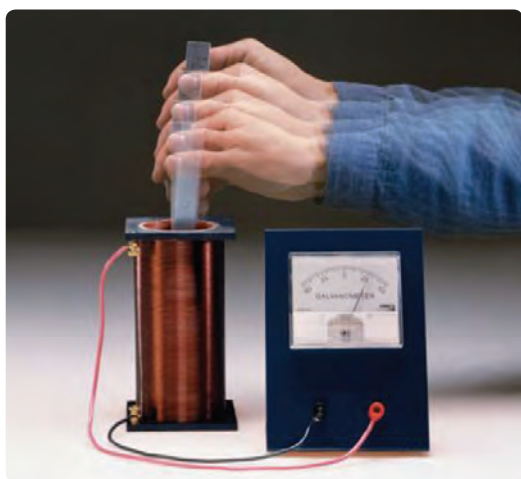
تا اینجا، با آثار مغناطیسی جریان الکتریکی آشنا شدید که در سال ۱۸۲۰ میلادی توسط اورستد کشف شد. در سال ۱۸۳۱ فاراده پس از آزمایش‌های فراوان، مشاهده کرد که عبور آهنربا از یک پیچه، سبب برقراری جریان الکتریکی در پیچه می‌شود. این اثر که امروزه به قانون القای الکترومغناطیسی فاراده شناخته می‌شود، اساس کار مولدها برای تولید جریان الکتریکی است. در این بخش، به بررسی القای نیروی محرکه الکتریکی در یک مدار بسته خواهیم پرداخت. این پدیده را القای الکترومغناطیسی می‌نامند. با انجام آزمایش زیر با این پدیده بیشتر آشنا می‌شوید.

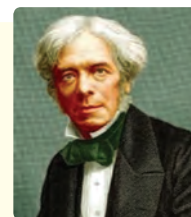
### آزمایش ۳-۴

#### هدف: بررسی پدیده القای الکترومغناطیسی

وسایله‌های مورد نیاز: گالوانومتر، آهنربای میله‌ای، سیم‌لوله یا پیچه و سیم رابط  
شرح آزمایش:

- دو سر سیم‌لوله را به گالوانومتر ببندید.
- یکی از قطب‌های آهنربا را وارد سیم‌لوله کنید (شکل روبه‌رو).
- مشاهدات خود را هنگام انجام این کار، یادداشت کنید.
- اکنون آهنربا را از سیم‌لوله خارج کنید. مشاهدات خود را هنگام انجام این کار، دوباره یادداشت کنید.
- مراحل بالا را برای قطب دیگر آهنربا تکرار کنید.
- آزمایش را در حالی انجام دهید که آهنربا ثابت باشد و سیم‌لوله به آن نزدیک یا از آن دور شود. آیا نتیجه آزمایش تغییری می‌کند؟ توضیح دهید.

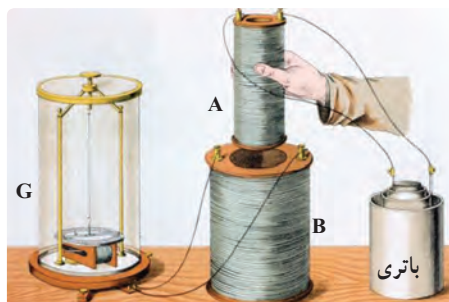




مایکل فاراده (۱۷۹۱-۱۸۶۷)

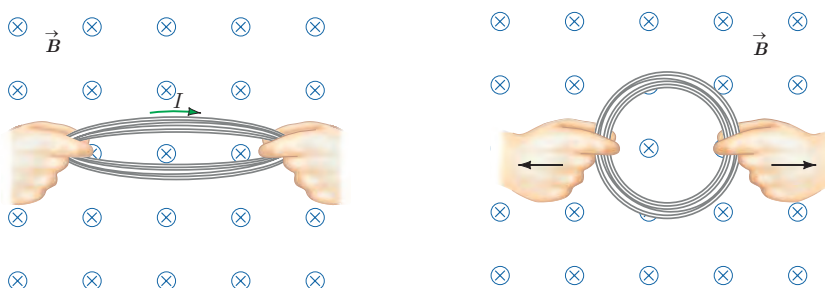
مایکل فاراده، پسر یک آهنگر انگلیسی بود. به گفته خود او: «تحصیلات من بسیار معمولی بود. خواندن را کمی بیشتر از حد مقدماتی و نوشتن و ریاضیات را در حد شاگرد یک مدرسه روزانه می‌دانستم. ساعت‌های خارج از مدرسه من در خانه و خیابان‌ها می‌گذشت.» وی در سن ۱۲ سالگی به عنوان شاگرد در یک کتاب‌فروشی مشغول به کار شد. فاراده ۱۹ ساله بود که به او اجازه داده شد تا در جلسه سخنرانی سرهمفری دیوی، شیمی‌دان مشهور (۱۸۲۹-۱۷۷۸)، که در مؤسسه سلطنتی لندن برگزار می‌شد، حضور یابد. مؤسسه سلطنتی یک مرکز مهم پژوهش و آموزش علوم بود. فاراده به شدت علاقه‌مند علوم شد و پیش خود به تحصیل علم شیمی پرداخت. در سال ۱۸۱۳ تقاضای شغلی در مؤسسه سلطنتی کرد و دیوی او را به عنوان یک همکار در امور پژوهشی استخدام کرد. فاراده به زودی نبوغ خود را به عنوان یک آزمایشگر نشان داد. وی مقاله‌های مهمی در شیمی، خواص مغناطیسی، الکتریسیته و نور نوشت و سرانجام به عنوان رئیس مؤسسه سلطنتی برگزیده شد. فاراده را به سبب کشف‌های بسیارش یکی از بزرگ‌ترین دانشمندان تجربی عصر خود می‌دانند.

در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فاراده دانشمند انگلیسی و تقریباً هم‌زمان با او جوزف هانری دانشمند آمریکایی، با انجام آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۳-۴ دریافتند که هنگام دور و نزدیک کردن آهنربا به پیچه، عقربه گالوانومتر منحرف می‌شود و عبور جریانی را از مدار نشان می‌دهد؛ درست مانند وقتی که در مدار، باتری وجود دارد (شکل ۳-۲۴). این پدیده را القای الکترومغناطیسی و جریان تولید شده را جریان الکتریکی القایی می‌نامند.

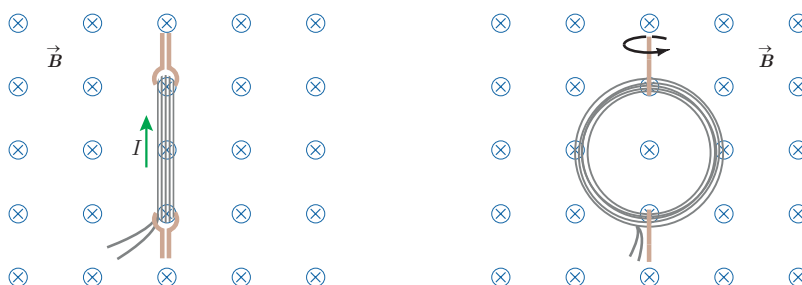


**شکل ۳-۲۴** فاراده برای پی بردن به پدیده القای الکترومغناطیسی، به جای آهنربای دائمی، از آهنربای الکتریکی (سیملوله A که به باتری وصل شده است) استفاده کرد. فاراده مشاهده کرد که با عبور آهنربا از درون سیملوله B و تغییر میدان مغناطیسی در محل این سیملوله، عقربه گالوانومتر منحرف می‌شود.

پیش از این دیدیم که با تغییر اندازه میدان در محل سیملوله، جریان در آن القا می‌شود. به جز این روش، به روش‌های دیگری نیز می‌توان در پیچه یا سیملوله، جریان الکتریکی القا کرد. اگر مساحت پیچه‌ای انعطاف‌پذیر را درون میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  تغییر دهیم (شکل ۳-۲۵) یا پیچه‌ای را درون میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  بچرخانیم (شکل ۳-۲۶)، مشاهده می‌شود که در هنگام انجام این کارها، جریانی در پیچه القا می‌شود.

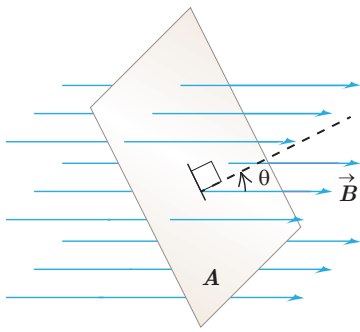


**شکل ۳-۲۵** تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$ ، جریانی در پیچه القا می‌کند.



**شکل ۳-۲۶** با چرخاندن پیچه درون میدان مغناطیسی  $\vec{B}$ ، زاویه بین میدان مغناطیسی و سطح پیچه تغییر می‌کند. این تغییر زاویه سبب القای جریان در پیچه می‌شود.

## ۳-۸ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده



شکل ۳-۲۷ نیم خط عمود بر سطح، با میدان یکنواخت  $\vec{B}$  زاویه  $\theta$  می‌سازد.

پیش از این دیدیم که به دلایلی مانند تغییر میدان مغناطیسی در محل یک پیچه، تغییر مساحت پیچه در حضور میدان مغناطیسی یا چرخش پیچه درون میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در آن القا می‌شود. عامل اساسی و مشترک در ایجاد جریان القایی در همه این آزمایش‌ها، **تغییر شار مغناطیسی** عبوری از پیچه است.

شار مغناطیسی، کمیتی نرده‌ای است و برای میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  که از پیچه‌ای با مساحت معین  $A$  می‌گذرد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (۵-۳)$$

همان‌طور که در شکل ۳-۲۷ دیده می‌شود:  $\theta$  زاویه بین بردار میدان مغناطیسی و نیم خط عمود بر سطح حلقه است (این نیم خط را به طور خط چین روی شکل نشان داده‌ایم).

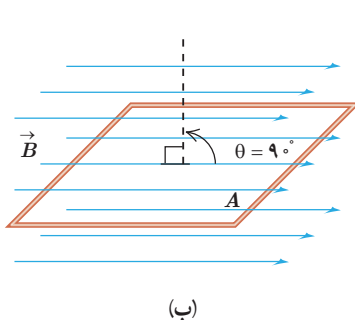
یکای SI شار مغناطیسی، وبر (Wb) است که با توجه به رابطه ۳-۵ داریم:  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \times 1 \text{ m}^2$ . **توجه:** همواره دو جهت برای رسم نیم خط عمود بر یک سطح معین وجود دارد. علامت شار مغناطیسی عبوری از این سطح نیز به انتخاب این جهت بستگی دارد. برای مثال، در شکل ۳-۲۷، نیم خط عمود را در طرفی از سطح رسم کرده‌ایم که زاویه بین آن و جهت میدان  $\vec{B}$  کمتر از  $90^\circ$  است و در نتیجه شار عبوری از سطح مثبت می‌شود. اگر نیم خط عمود را در طرف دیگر سطح انتخاب کنیم، در این صورت، زاویه آن با جهت میدان  $\vec{B}$  بیشتر از  $90^\circ$  خواهد شد و شار عبوری از سطح منفی می‌شود. هر دو انتخاب به یک اندازه مفیدند، ولی در حل یک مسئله، همواره باید یکی را انتخاب کنیم و تا پایان آن را تغییر ندهیم.

## مثال ۳-۴

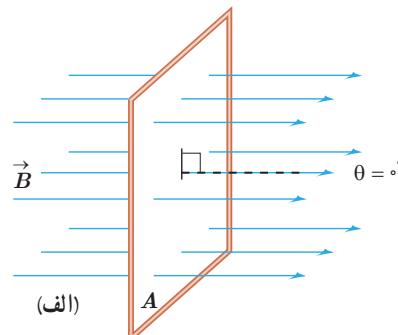
الف) مطابق شکل الف، سطح حلقهٔ رسانایی، به شکل مربع با ضلع  $2 \text{ cm}$ ، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی به بزرگی  $25^\circ \text{ G}$  قرار دارد. شار عبوری از این حلقه را به دست آورید.

ب) اگر حلقه را بچرخانیم به طوری که سطح حلقه موازی با خط‌های میدان مغناطیسی شود، شار مغناطیسی عبوری از آن چقدر می‌شود؟

پ) تغییر شار مغناطیسی عبوری از حلقه را وقتی از موقعیت شکل الف به موقعیت شکل ب می‌چرخد به دست آورید. (ت) اگر این تغییر شار مغناطیسی در بازهٔ زمانی  $\Delta t = 0.1 \text{ s}$  رخ داده باشد، آهنگ تغییر شار  $(\Delta \Phi / \Delta t)$  را پیدا کنید.



(ب)



(الف)

**پاسخ:** الف) وقتی مطابق شکل الف، سطح حلقه عمود بر خط‌های میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، زاویه بین میدان  $\vec{B}$  و نیم خط عمود بر سطح حلقه برابر صفر می‌شود. به این ترتیب، شار عبوری از سطح حلقه برابر است با

$$A = 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} = 0.04 \text{ m}^2, \quad B = 250 \text{ G} = 2/50 \times 10^{-2} \text{ T}, \quad \theta = 0^\circ$$

$$\Phi = BA \cos \theta = (2/50 \times 10^{-2} \text{ T})(0.04 \text{ m}^2)(\cos 0^\circ) = 1 \times 10^{-3} \text{ Wb} = 1 \text{ mWb}$$

ب) وقتی مطابق شکل ب، حلقه می‌چرخد و سطح آن موازی با خط‌های میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، زاویه بین میدان  $\vec{B}$  و نیم خط عمود بر سطح حلقه برابر  $90^\circ$  می‌شود. از آنجا که  $\cos 90^\circ = 0$  است، در این شرایط، هیچ شاری از سطح حلقه عبور نمی‌کند.

پ) همان‌طور که دیدید شار عبوری از سطح حلقه در وضعیت شکل الف و وضعیت شکل ب، به ترتیب، برابر  $\Phi_1 = 1 \text{ mWb}$  و  $\Phi_2 = 0$  است. به این ترتیب، تغییر شار عبوری از سطح حلقه برابر  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = -1 \text{ mWb}$  می‌شود. علامت منفی نشان می‌دهد در حین چرخش حلقه از وضعیت شکل الف به وضعیت شکل ب، شار مغناطیسی عبوری از سطح آن کاهش یافته است.

ت) با توجه به نتیجه قسمت پ، آهنگ تغییر شار  $(\Delta\Phi/\Delta t)$  برابر است با

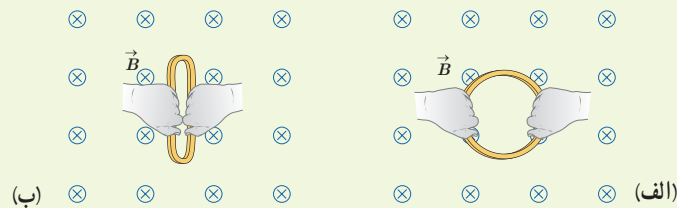
$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{-1 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{0.1 \text{ s}} = -0.01 \text{ Wb/s}$$

### تمرین ۳-۲

الف) حلقه‌ای به مساحت  $25 \text{ cm}^2$  درون میدان مغناطیسی یکنواخت درون سویی به اندازه  $3 \text{ T}$  قرار دارد (شکل الف). شار مغناطیسی عبوری از حلقه را به دست آورید.

ب) اگر مطابق شکل ب و بدون تغییر  $\vec{B}$ ، مساحت سطح حلقه را به  $1 \text{ cm}^2$  برسانیم، شار مغناطیسی عبوری از حلقه را در این وضعیت به دست آورید.

پ) اگر این تغییر شار در بازه زمانی  $\Delta t = 0.2 \text{ s}$  رخ داده باشد، آهنگ تغییر شار  $(\Delta\Phi/\Delta t)$  را پیدا کنید.



### پرسش ۳-۱۱

کدام یک از یکاهای زیر معادل یکای وبر بر ثانیه (Wb/s) است؟

☐  $\Omega$ 
☐ A

☐ V

☐ V/A

اکنون که با تعریف و مفهوم شار مغناطیسی آشنا شدید دوباره نگاهی می‌کنیم به پدیده القای الکترومغناطیسی که در بخش قبل بررسی کردیم. همان‌طور که گفتیم عامل مشترک در تمامی پدیده‌هایی که منجر به تولید جریان القایی در مدار می‌شود، تغییر شار مغناطیسی عبوری از پیکه یا سیملوله است. بنابر قانون فاراده، هرگاه شار مغناطیسی‌ای که از مدار بسته‌ای می‌گذرد تغییر کند، نیروی محرکه‌ای در آن القا می‌شود که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار مغناطیسی متناسب است؛ یعنی هرچه آهنگ تغییر

شار مغناطیسی بیشتر باشد، نیروی محرکه القایی و در نتیجه جریان القایی تولید شده در مدار بیشتر خواهد بود. مثلاً در آزمایش‌های بخش ۳-۷، هرچه حرکتی که سبب تغییر شار مغناطیسی می‌شود سریع‌تر انجام شود، عقربه گالوانومتر بیشتر منحرف می‌شود، و این نشان می‌دهد که جریان القایی بزرگ‌تری به وجود آمده است.

قانون فاراده برای پیچه یا سیم‌لوله‌ای که از  $N$  دور مشابه تشکیل شده باشد با رابطه زیر بیان می‌شود:

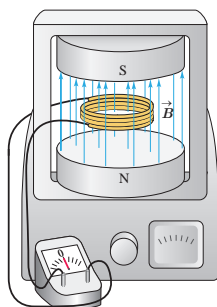
$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (۶-۳)$$

در این رابطه  $\bar{\mathcal{E}}$  نیروی محرکه القایی متوسط بر حسب ولت و  $\Delta\Phi/\Delta t$  آهنگ تغییر شار مغناطیسی بر حسب وبر بر ثانیه (Wb/s) است. اگر مقاومت پیچه یا سیم‌لوله برابر  $R$  باشد، جریان القایی متوسط در آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{I} = \frac{\bar{\mathcal{E}}}{R} \quad (۷-۳)$$

همان‌طور که از رابطه ۳-۷ دیده می‌شود، هرچه مقاومت پیچه یا مداری که در آن شار مغناطیسی تغییر می‌کند، بیشتر باشد، جریان کوچک‌تری در آن القا می‌شود.

### مثال ۳-۵



پیچه‌ای شامل ۲۰۰ دور که مساحت هر حلقه آن  $۲۵\text{cm}^2$  است، مطابق شکل روبه‌رو بین قطب‌های یک آهنربای الکتریکی قرار گرفته است که میدان مغناطیسی یکنواخت تولید می‌کند. خط‌های میدان بر سطح پیچه عمودند. اگر اندازه میدان در بازه زمانی  $۲/\text{ms}$  از  $۰/۱۸\text{T}$  به  $۰/۲۲\text{T}$  افزایش یابد،

الف) نیروی محرکه القایی متوسط ایجاد شده در پیچه چقدر است؟

ب) اگر مقاومت پیچه  $۱\Omega$  باشد، جریان القایی متوسط که از پیچه می‌گذرد چقدر است؟

پاسخ: الف) نیم خط عمود بر سطح حلقه‌های پیچه را همسو با  $\vec{B}$  می‌گیریم. با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$N = 200 \quad \text{دور} \quad A = 25\text{cm}^2 \quad \theta = 0^\circ \quad \Delta t = 2/\text{ms}$$

$$B_1 = 0/18\text{T} \quad B_2 = 0/22\text{T} \quad \bar{\mathcal{E}} = ?$$

$$\Phi_1 = B_1 A \cos\theta = (0/18\text{T})(2/5 \times 10^{-3}\text{m}^2)(\cos 0^\circ) = 4/5 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

$$\Phi_2 = B_2 A \cos\theta = (0/22\text{T})(2/5 \times 10^{-3}\text{m}^2)(\cos 0^\circ) = 5/5 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

به این ترتیب، تغییر شار مغناطیسی برابر است با:

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = (5/5 \times 10^{-4}\text{Wb}) - (4/5 \times 10^{-4}\text{Wb}) = 1/5 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

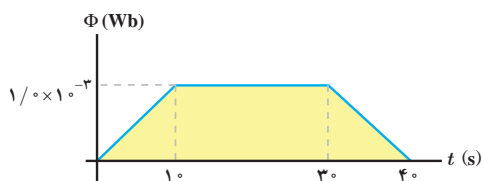
با قرار دادن این مقدار و داده‌های بالا در رابطه ۳-۶ داریم:

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -(200) \frac{1/5 \times 10^{-4}\text{Wb}}{2/5 \times 10^{-3}\text{s}} = -10\text{V}$$

ب) با توجه به رابطه ۳-۷، جریان القایی متوسط در پیچه برابر است با:

$$\bar{I} = \frac{\bar{\mathcal{E}}}{R} = \frac{-10\text{V}}{1\Omega} = -10\text{A}$$

## مثال ۳-۶



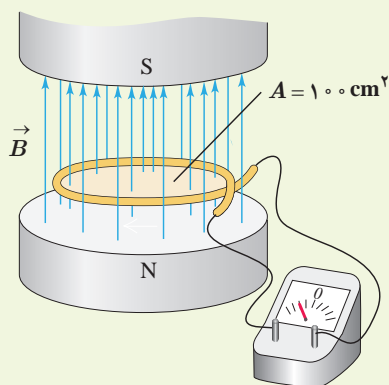
تغییرات شار مغناطیسی که از یک حلقه می‌گذرد برحسب زمان در نمودار شکل روبه‌رو نشان داده شده است. نیروی محرکه القایی متوسط در حلقه را در هریک از بازه‌های زمانی  $(0, 1\text{ s})$ ،  $(1\text{ s}, 3\text{ s})$  و  $(3\text{ s}, 4\text{ s})$  محاسبه کنید.

**پاسخ:** در بازه زمانی  $0$  تا  $1\text{ s}$ ، نیروی محرکه القایی متوسط برابر است با:

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -(1) \frac{(1/0 \times 10^{-3} \text{ Wb} - 0)}{1\text{ s}} = -1/0 \times 10^{-4} \text{ V}$$

در بازه زمانی  $1\text{ s}$  تا  $3\text{ s}$  شار ثابت مانده است. در نتیجه نیروی محرکه القایی متوسط برابر صفر است. در بازه زمانی  $3\text{ s}$  تا  $4\text{ s}$  شبیه آنچه در مورد بازه زمانی صفر تا  $1\text{ s}$  گفتیم، نیروی محرکه القایی متوسط برابر  $1/0 \times 10^{-4} \text{ V}$  است.

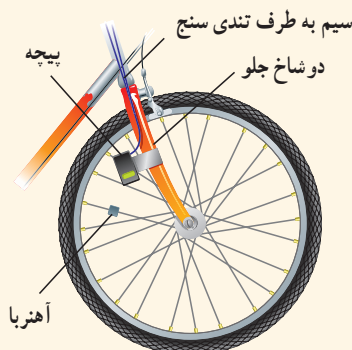
## تمرین ۳-۵



- ۱- میدان مغناطیسی بین قطب‌های آهنربای الکتریکی شکل روبه‌رو که بر سطح حلقه عمود است با زمان تغییر می‌کند و در مدت  $45^\circ/\text{s}$  از  $28\text{ T}$ ، رو به بالا، به  $17\text{ T}$ ، رو به پایین می‌رسد. در این مدت، الف) نیروی محرکه القایی متوسط در حلقه را به دست آورید. ب) اگر مقاومت حلقه  $1\ \Omega$  باشد، جریان القایی متوسط در حلقه را پیدا کنید.

- ۲- مساحت هر حلقه پیچه‌ای  $3\text{ cm}^2$  و پیچه متشکل از  $1000$  حلقه است. در ابتدا سطح حلقه‌ها بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت  $2^\circ/\text{s}$  پیچه بچرخد و سطح حلقه‌ها موازی میدان مغناطیسی زمین شود، نیروی محرکه القایی متوسط در آن چقدر است؟ اندازه میدان زمین را  $5^\circ/\text{G}$  در نظر بگیرید.

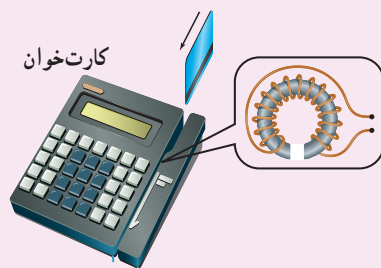
## پروژه ۳-۱۲



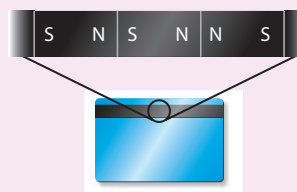
تندی سنج دوچرخه‌های مسابقه‌ای شامل یک آهنربای کوچک و یک پیچه است. آهنربا به یکی از پره‌های چرخ جلو و پیچه به دو شاخ فرمان متصل است (شکل روبه‌رو). دو سر پیچه با سیم‌های رسانا به نمایشگر تندی سنج (که در واقع نوعی رایانه کوچک است) وصل شده است. به نظر شما تندی سنج دوچرخه چگونه کار می‌کند؟ این موضوع را در گروه خود به گفت‌وگو بگذارید و نتیجه را به کلاس درس ارائه دهید.

### فناوری و کاربرد: کارت‌های اعتباری و دستگاه‌های کارت خوان

نوار مغناطیسی پشت کارت‌های اعتباری حاوی تعداد بسیار زیادی ذره فرومغناطیسی است که نوعی چسب خاص آنها را به هم متصل می‌کند. داده‌ها را که به صورت دودویی، یا صفر و یک به رمز درآورده‌اند، در نوار مغناطیسی پشت کارت ذخیره می‌کنند (شکل الف). وقتی کارت اعتباری درون دستگاه کارت خوان کشیده می‌شود، میدان مغناطیسی ناشی از نوار مغناطیسی، روی پیچه قرار داده شده در دستگاه کارت خوان اثر می‌گذارد و جریان اندکی را در پیچه القا می‌کند (شکل ب). این جریان بسیار کوچک توسط دستگاه دیگری تقویت و داده‌های ذخیره شده در نوار مغناطیسی پشت کارت، رمزگشایی می‌شود. پس از رمزگشایی داده‌ها، دستور مورد نظر انجام می‌شود.



(ب) کشیدن کارت، جریان اندکی در پیچه دستگاه کارت خوان القا می‌کند.



(الف) داده‌ها را به صورت صفر و یک در نوار مغناطیسی پشت کارت ذخیره می‌کنند.

### خوب است بدانید: معاینه مغز با نیروهای محرکه القایی



برانگیزش (تحریک) مغناطیسی فرا جمجمه‌ای<sup>۱</sup> (TMS) روشی برای بررسی عملکرد بخش‌های مختلف مغز است. در این روش، پیچه‌ای روی سر شخص بیمار قرار داده می‌شود که جریان الکتریکی متغیری از آن می‌گذرد و در نتیجه میدان مغناطیسی متغیری تولید می‌کند. این میدان متغیر، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی و جریان القایی در ناحیه‌ای از مغز می‌شود که در زیر پیچه قرار دارد. پزشک با مشاهده واکنش مغز (مثلاً اینکه کدام عضله‌ها به علت برانگیزش بخش خاصی از مغز حرکت می‌کنند) می‌تواند شرایط عصب شناختی مختلفی را بیازماید.

### ۳-۹ قانون لنز

مدت کوتاهی پس از آنکه فاراده قانون القای الکترومغناطیسی را ارائه کرد، هاینریش لنز، دانشمند روس تبار، در سال ۱۸۳۴ میلادی روشی را برای تعیین جهت جریان القایی در یک پیچه یا در هر مدار بسته دیگری پیشنهاد کرد. این روش که بعدها به قانون لنز شهرت یافت، حاکی از آن است که:

**جریان حاصل از نیروی محرکه القایی در یک مدار یا پیچه در جهتی است که آثار مغناطیسی ناشی از آن، با عامل به وجود آورنده جریان القایی، یعنی تغییر شار مغناطیسی، مخالفت می‌کند.**

علامت منفی در رابطه ۳-۶ نشان دهنده همین مخالفت است. توضیح دقیق‌تر این مطلب فراتر از سطح این کتاب است. در اینجا تنها به ذکر مثال‌هایی از چگونگی استفاده از قانون لنز برای تعیین جهت جریان القایی اکتفا می‌کنیم.

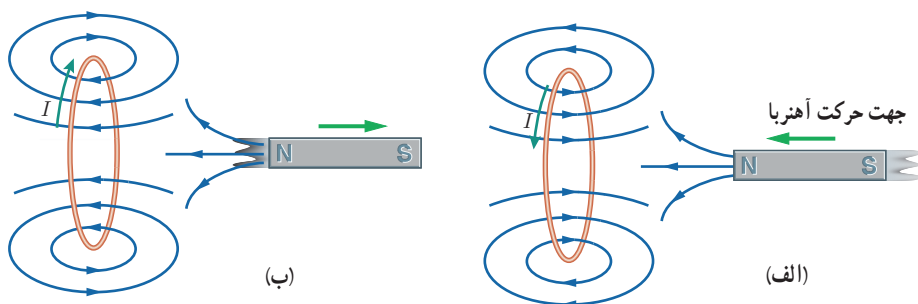
<sup>۱</sup> Transcranial Magnetic Stimulation (TMS)





**هاینریش فردریش امیل لِنز** (۱۸۰۴-۱۸۶۵) از فیزیک‌دانان مشهور آلمانی و دارای تبار روس بود. وی در استونی که در آن دوران تحت امپراتوری روسیه بود به دنیا آمد. پس از اتمام دوره دبیرستان در سال ۱۸۲۰ وارد دانشگاه دُرپِت شد و به تحصیل در زمینه فیزیک و شیمی پرداخت. لنز طی سال‌های ۱۸۲۳ تا ۱۸۲۶ میلادی، در ضمن یک سفر دریایی به دور دنیا، به مطالعه شرایط آب و هوایی و همچنین ویژگی‌های فیزیک دریا پرداخت و نتایج آن را در سال ۱۸۳۱ منتشر کرد. پس از این سفر، در دانشگاه سن پترزبورگ آغاز به کار نمود. لنز مطالعه الکترومغناطیس را در سال ۱۸۳۱ شروع کرد و بیشتر شهرتش برای فرمول‌بندی قانون لنز در الکترومغناطیس در سال ۱۸۳۴ است.

شکل ۳-۲۸ الف، آهنربایی را نشان می‌دهد که قطب  $N$  آن در حال نزدیک شدن به یک حلقهٔ رساناست. در این وضعیت اندازهٔ  $\vec{B}$  در محل حلقه افزایش می‌یابد و در نتیجه شار گذرنده از حلقه زیاد می‌شود. بنا به قانون لنز، جهت جریان القایی ایجاد شده در حلقه چنان است که میدان مغناطیسی ناشی از آن با افزایش شار مخالفت کند. بنابراین، میدان مغناطیسی حلقه در خلاف سوی میدان مغناطیسی آهنربا می‌شود. با توجه به قاعدهٔ دست راست و از روی جهت میدان مغناطیسی حلقه، جهت جریان در حلقه تعیین می‌شود. همچنین اگر مطابق شکل ۳-۲۸ ب، قطب  $N$  آهنربا را از حلقهٔ رسانا دور کنیم، جریان القایی در جهتی خواهد بود که میدان مغناطیسی تولید شده توسط حلقه، همسو با میدان آهنربا می‌شود و به این ترتیب با کاهش شار عبوری از حلقه، مخالفت می‌کند.



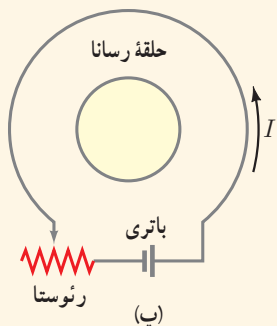
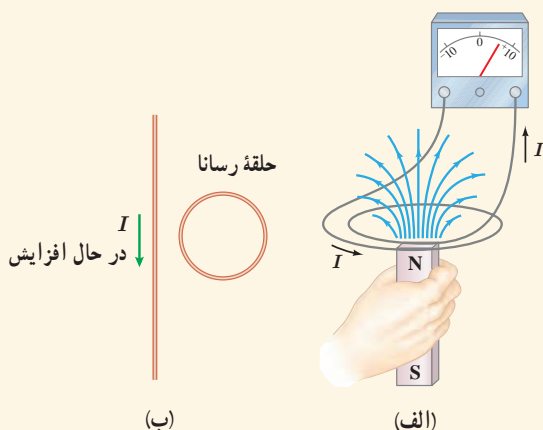
**شکل ۳-۲۸ الف)** وقتی آهنربا به حلقهٔ رسانا نزدیک می‌شود جریان در جهتی در حلقه القا می‌شود که میدان مغناطیسی ناشی از آن با افزایش شار مغناطیسی حلقه مخالفت کند. (ب) با دور شدن آهنربا از حلقهٔ رسانا، جریان در جهتی در حلقه القا می‌شود که میدان مغناطیسی ناشی از آن با کاهش شار مغناطیسی حلقه مخالفت کند.

### پرسش ۳-۱۳

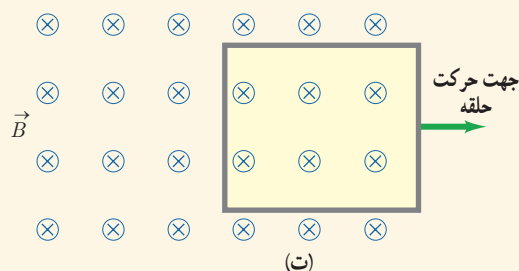
۱- با توجه به جهت جریان القایی در مدار شکل الف، توضیح دهید که آیا آهنربا رو به بالا حرکت می‌کند یا رو به پایین.

۲- شکل ب سیم بلند و مستقیمی را نشان می‌دهد که جریان عبوری از آن در حال افزایش است. جهت جریان القایی را در حلقهٔ رسانای مجاور سیم تعیین کنید.

۳- اگر در مدار شکل پ مقاومت رئوستا افزایش یابد، جریان القایی در حلقهٔ رسانای داخلی در چه جهتی ایجاد می‌شود؟








۴- حلقهٔ رسانای مستطیل شکلی را مطابق شکل ت به طرف راست می کشیم و از میدان مغناطیسی درون سویی خارج می کنیم. جهت جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟

### خوب است بدانید: اثر دیامغناطیس

چرخش هر الکترون به دور هستهٔ اتم را می توان به صورت یک حلقهٔ میکروسکوپی جریان مدل سازی کرد. هرگاه ماده ای در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد، شار مغناطیسی گذرنده از هر یک از این حلقه های میکروسکوپی افزایش می یابد و در نتیجه بنابر قانون لنز، در این حلقه ها، یک میدان مغناطیسی در خلاف جهت میدان مغناطیس خارجی القا می شود. به این ویژگی که در اتم های همهٔ مواد در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی رخ می دهد، پدیده یا اثر دیامغناطیس گفته می شود. اثر دیامغناطیسی در موادی نظیر بیسموت، جیوه، نقره، سرب، مس و کربن (الماس) بهتر نمایان می شود، زیرا اتم های آنها، فاقد دو قطبی های مغناطیسی دائمی اند. از آنجا که اثر دو قطبی های مغناطیسی دائمی در مواد فرومغناطیسی و پارامغناطیسی بسیار بیشتر از اثر دو قطبی های القایی است، اثر دیامغناطیس در این گونه مواد نمود کمتری دارد.

### ۱۰-۳ القاگرها

در فصل ۲ دیدیم که در فضای بین صفحه های یک خازن باردار، میدان الکتریکی ایجاد می شود و انرژی الکتریکی در این میدان ذخیره می شود. به همین ترتیب، می توان از القاگر (سیم پیچ) برای تولید میدان مغناطیسی دلخواه و همچنین ذخیرهٔ انرژی در این میدان استفاده کرد. القاگر مانند مقاومت و خازن یکی از اجزای ضروری مدارهای الکترونیکی است.

شکل ۳-۲۹ تصویر چند القاگر را در اندازه ها و شکل های متفاوت نشان می دهد. نماد مداری القاگر،  است. ویژگی های فیزیکی هر القاگر، توسط **ضریب القاوری** آن تعیین می شود. ضریب القاوری که با نماد  $L$  نمایش داده می شود به عواملی همچون تعداد دور، طول و سطح مقطع القاگر و جنس هسته ای که داخل آن قرار می گیرد بستگی دارد. یکای SI ضریب القاوری، هانری (H) نام دارد.

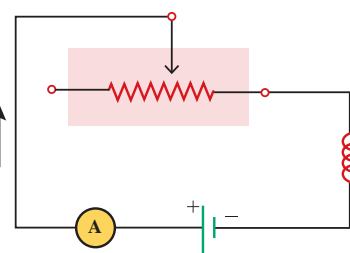


شکل ۳-۲۹ تصویری از چند القاگر در اندازه ها و شکل های متفاوت



**جوزف هانری (۱۸۷۸-۱۷۹۷):** یکی از فیزیک دانان تجربی قرن نوزدهم است که در آمریکا به دنیا آمد و کار خود را با آموزش علوم در یک مدرسه روستایی آغاز کرد. سپس به تحصیل در طب و مهندسی علاقه مند شد و سرانجام به فیزیک و ریاضیات روی آورد. هانری در سال ۱۸۳۱، هم زمان و مستقل از فاراده، موفق به کشف پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی شد. وی همچنین توانست نوعی موتور الکترومغناطیسی و یک تلگراف جدید و کارآمد اختراع کند. یکای SI ضریب القاوری به احترام یک عمر فعالیت های علمی وی، هانری (H) انتخاب شده است.

**خود – القاوری:** مداری را مطابق شکل ۳-۳ در نظر بگیرید. این مدار شامل منبع نیروی محرکه، رئوستا، آمپرسنج و القاگری است که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند. با تغییر مقاومت رئوستا، جریان در مدار تغییر می‌کند. تغییر جریان در مدار، سبب تغییر میدان مغناطیسی القاگر می‌شود و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از آن نیز تغییر می‌کند. این فرایند سبب القای نیروی محرکه‌ای در القاگر می‌شود که بنابر قانون لنز با تغییر جریان عبوری از آن مخالفت می‌کند. این پدیده که می‌تواند در هر القاگری (از قبیل پیچه یا سیملوله) رخ دهد اثر **خود – القاوری** نامیده می‌شود.



شکل ۳-۳ مدار ساده شامل رئوستا، القاگر، باتری و آمپرسنج

## آزمایش ۳-۵

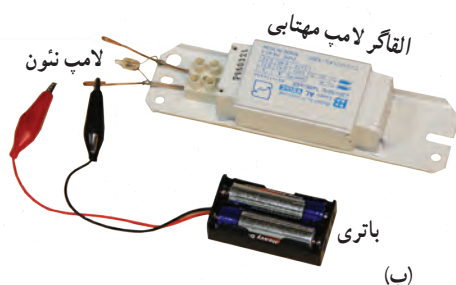
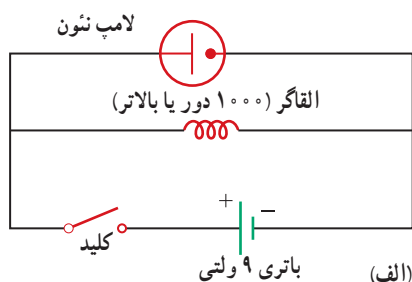
### هدف: بررسی اثر خود – القاوری

وسایله‌های مورد نیاز: لامپ نئون (لامپ فازمتری)، القاگر (۱۰۰۰ دور یا بالاتر)، باتری قلمی (۲ عدد) یا باتری ۹ ولتی، سیم رابط، کلید

شرح آزمایش:

- مداری مطابق شکل الف ببندید.
- کلید را وصل کنید. آیا لامپ روشن است؟ اینک کلید را قطع کنید. در لحظه قطع کردن کلید چه چیزی مشاهده می‌کنید؟ دلیل آنچه را مشاهده می‌کنید در گروه خود به گفت‌وگو بگذارید و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.

توجه: می‌توانید مطابق شکل ب، به جای القاگر از القاگر لامپ‌های مهتابی (که به اشتباه ترانس نامیده می‌شود) نیز استفاده کنید.



### خوب است بدانید:

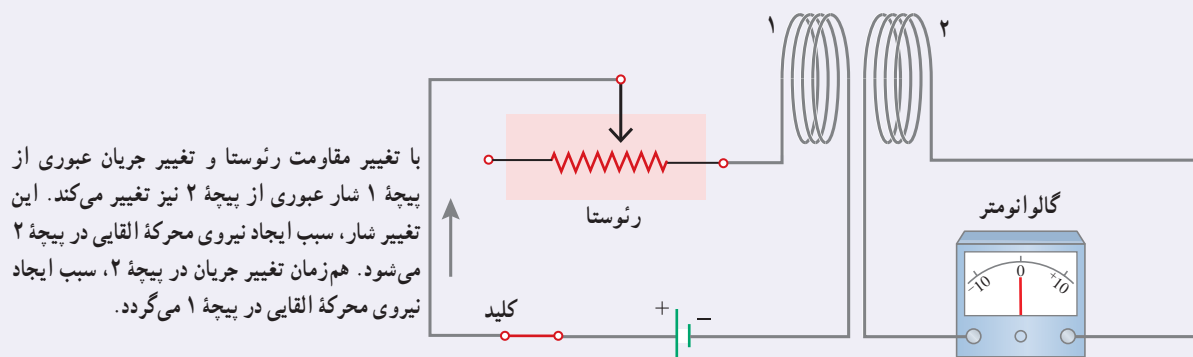
#### کاربرد القاگرها در سامانه‌های انتقال برق

برخورد آذرخش به بخشی از یک سامانه انتقال توان الکتریکی موجب افزایش ناگهانی ولتاژ می‌شود که می‌تواند به اجزای سامانه و هر چیز دیگری که به آن وصل باشد (برای مثال، وسیله‌های برقی خانگی) آسیب برساند. برای کمینه کردن این آثار، القاگرهای بزرگی را در مسیر سامانه انتقال قرار می‌دهند. این کار باعث می‌شود که القاگر با هر تغییر سریع در جریان مخالفت کند و آن را فرو نشاند!

#### کاربرد القاگرها در لامپ‌های فلوئورسان

همان‌طور که در ابتدای این بخش دیدیم القاگرها با تغییرات سریع جریان در مدار مخالفت می‌کنند، به همین دلیل نقش مهمی در لامپ‌های فلوئورسان (مهتابی) دارند. در این لامپ‌ها، جریان الکتریکی از گاز رقیقی که فضای درون لامپ را پر کرده است می‌گذرد و گاز را یونیده و به پلاسما تبدیل می‌کند. پلاسما یک رسانای غیراھمی است و هرچه بیشتر یونیده شود مقاومت آن کمتر می‌شود. اگر ولتاژ به حد کافی بالایی به گاز اعمال شود، جریان می‌تواند بسیار زیاد شود و به مدار بیرونی لامپ فلوئورسان آسیب برساند. برای جلوگیری از این مسئله، یک القاگر را به طور متوالی با لامپ فلوئورسان می‌بندند تا مانع افزایش زیاد جریان شود. متعادل کننده همچنین باعث می‌شود تا لامپ فلوئورسان بتواند با ولتاژ متناوب کار کند.

شکل زیر اسباب آزمایش ساده‌ای را برای بررسی اثر القای متقابل نشان می‌دهد. جریان عبوری از پیچه ۱، میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  را به وجود می‌آورد. این میدان  $\vec{B}$ ، شار مغناطیسی‌ای را از پیچه ۲ می‌گذراند که در مجاورت آن قرار دارد. با تغییر دادن مقاومت رئوستا و تغییر جریان در پیچه ۱، میدان مغناطیسی پیچه ۱ و در نتیجه شار عبوری از پیچه ۲ نیز تغییر می‌کند؛ بنابر قانون فاراده، این تغییر شار، نیروی محرکه‌ای را در پیچه ۲ القا می‌کند که به ایجاد جریان القایی در این پیچه می‌انجامد. همچنین تغییر جریان در پیچه ۲، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی در پیچه ۱ می‌شود. این فرایند، **القای متقابل** نامیده می‌شود و به کمک آن می‌توان انرژی را از یک پیچه، به پیچه دیگر منتقل کرد.



با تغییر مقاومت رئوستا و تغییر جریان عبوری از پیچه ۱ شار عبوری از پیچه ۲ نیز تغییر می‌کند. این تغییر شار، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی در پیچه ۲ می‌شود. هم‌زمان تغییر جریان در پیچه ۲، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی در پیچه ۱ می‌گردد.



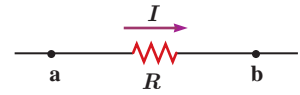
برای به حداقل رساندن اثر القای متقابل در برخی از مدارهای الکتریکی، القاگرهای مجاور را به گونه‌ای قرار می‌دهند که سطح حلقه‌های آنها بر یکدیگر عمود باشد.

در برخی از مدارهایی که از چندین القاگر به وجود آمده است، تغییرات جریان در یک القاگر می‌تواند نیروهای محرکه ناخواسته‌ای را در القاگرهای مجاور القا کند. به همین دلیل، در برخی از مدارهای الکتریکی، القای متقابل می‌تواند مزاحم باشد. برای هرچه کمتر کردن این اثر ناخواسته، باید سطح حلقه‌های القاگرهای مجاور را به طور عمود بر یکدیگر قرار داد (شکل روبه‌رو). در این صورت، اثر القای متقابل تا حد امکان کوچک می‌شود. القای متقابل کاربردهای مفید بسیاری نیز دارد. مثلاً در مبدل‌ها که در پایان همین فصل با آنها آشنا خواهید شد، القای متقابل، نقش مهمی در مقدار ولتاژ خروجی مبدل ایفا می‌کند.

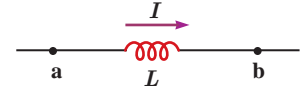
**انرژی ذخیره شده در القاگر:** وقتی توسط باتری جریانی در القاگر برقرار شود، مولد به القاگر انرژی می‌دهد. بخشی از این انرژی در مقاومت الکتریکی سیم‌های القاگر به صورت گرما تلف و بقیه آن در میدان مغناطیسی القاگر ذخیره می‌شود. مقدار انرژی ذخیره شده در میدان القاگر با ضرب القاوری  $L$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (۸-۳)$$

مقاومت با جریان  $I$ : انرژی تلف شده است.



القاگر با جریان  $I$ : انرژی ذخیره شده است.



لازم است رفتار مقاومت و القاگر را به لحاظ انرژی اشتباه نگیرید (شکل ۳-۳۱). هنگام عبور جریان از مقاومت، انرژی وارد آن می‌شود، جریان چه پایا باشد و چه تغییر کند، این انرژی در مقاومت به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود؛ در حالی که در یک القاگر آرمانی (با مقاومت صفر) تنها وقتی انرژی وارد القاگر می‌شود که جریان در آن افزایش یابد. این انرژی تلف نمی‌شود؛ بلکه در میدان مغناطیسی القاگر ذخیره شده و هنگام کاهش جریان، آزاد می‌شود. هنگام عبور جریان پایا از یک القاگر آرمانی (سیم پیچ بدون مقاومت)، انرژی به آن وارد یا از آن خارج نمی‌شود.

**شکل ۳-۳۱** مقاومت قطعه‌ای است که در آن انرژی به طور غیرقابل برگشت تلف می‌شود. برخلاف آن، انرژی ذخیره شده در القاگر حامل جریان را می‌توان هنگام کاهش جریان، بازیافت.

### مثال ۳-۷

متخصصان صنعت برق، علاقه‌مندند راه‌های مؤثری را برای ذخیره انرژی الکتریکی تولیدی در ساعت‌های کم مصرف (کم‌باری) بیابند تا با استفاده از آن، نیاز مشترکان را در ساعت‌های پر مصرف (اوج بار) تأمین کنند. یک ایده فرضی، استفاده از یک القاگر بزرگ است. ضریب القاوری این القاگر چقدر باشد تا بتواند  $۱/۰ \text{ kWh}$  انرژی الکتریکی را در پیچه حامل جریان  $۲۰۰ \text{ A}$  ذخیره کند؟ **پاسخ:** مقدار انرژی ذخیره شده مورد نیاز  $U = ۱/۰ \text{ kWh}$  و جریان  $I = ۲۰۰ \text{ A}$  داده شده است. از معادله ۳-۸ ضریب القاوری را به دست می‌آوریم:

$$U = ۱/۰ \text{ kWh} = (۱/۰ \times ۱۰^۳ \text{ W})(۳۶۰۰ \text{ s}) = ۳/۶ \times ۱۰^۶ \text{ J}$$

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \Rightarrow L = \frac{2U}{I^2} = \frac{2(۳/۶ \times ۱۰^۶ \text{ J})}{(۲۰۰ \text{ A})^2} = ۱/۸ \times ۱۰^۲ \text{ H}$$

ضریب القاوری به دست آمده، بسیار بیشتر از ضریب القاوری یک القاگر معمولی (در حد میلی‌هانی) است که در آزمایشگاه از آن استفاده می‌کنیم. افزون بر این همان‌طور که در فصل ۲ دیدیم سیم‌های معمولی که بتوانند جریان  $۲۰۰ \text{ A}$  را از خود عبور دهند باید قطر بسیار بزرگی داشته باشند. اندازه یک القاگر  $۱۸ \text{ H}$  که از سیم‌های معمولی ساخته شده باشد و بتواند چنین جریانی را تحمل کند باید خیلی بزرگ (به اندازه یک اتاق بزرگ) باشد. با توجه به فناوری‌های موجود، این ایده غیرعملی است و توجیه اقتصادی ندارد.

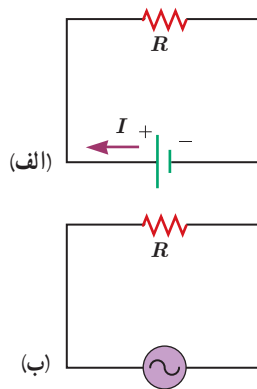
### فناوری و کاربرد: انرژی لازم برای جرقه زدن شمع خودرو



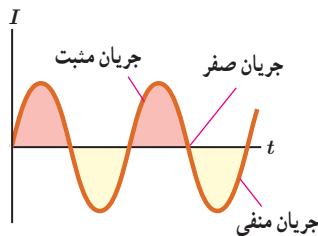
انرژی لازم برای جرقه زدن شمع خودرو، از انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی پیچه احتراق تأمین می‌شود.

انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی نقش مؤثری در دستگاه‌های احتراق خودروهای با موتور بنزینی دارد. پیچه اولیه با حدود  $۲۵۰^\circ$  دور به باتری خودرو بسته شده است و میدان مغناطیسی قوی‌ای تولید می‌کند. این پیچه، درون یک پیچه ثانویه با  $۲۵۰۰^\circ$  دور سیم خیلی نازک قرار گرفته است. برای جرقه زدن شمع، جریان در پیچه اولیه قطع می‌شود و میدان مغناطیسی به سرعت به صفر می‌رسد و نیروی محرکه الکتریکی ده‌ها هزار ولتی در پیچه ثانویه القا می‌کند. در نتیجه انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی همراه با جریانی لحظه‌ای از پیچه ثانویه به طرف شمع می‌رود و جرقه‌ای تولید می‌کند که سبب احتراق مخلوط سوخت و هوا در سیلندرهای موتور می‌شود (شکل روبه‌رو).

## ۳-۱۱ جریان متناوب

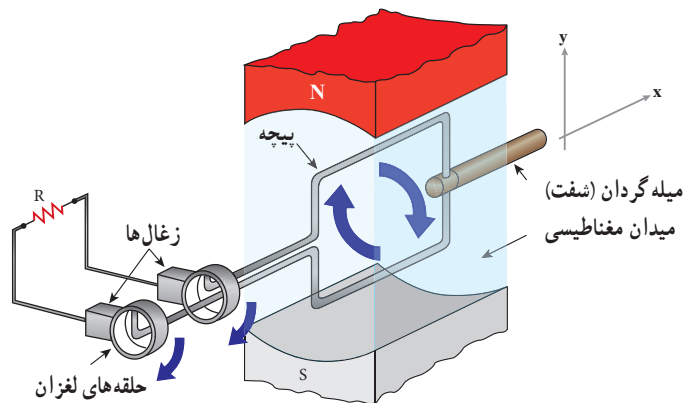


شکل ۳-۳۲ (الف) مدار ساده جریان مستقیم، که در آن جریان با گذشت زمان تغییر نمی‌کند. (ب) مدار ساده جریان متناوب، که در آن ولتاژ و جریان با گذشت زمان به طور سینوسی تغییر می‌کنند.



شکل ۳-۳۳ جریان متناوب سینوسی، متداول‌ترین نوع جریان متناوب است.

شکل ۳-۳۴ اجزای یک مولد (ژنراتور) جریان متناوب. حرکت مکانیکی از طریق میله گردان، سبب چرخیدن پیچه در میدان مغناطیسی می‌شود و جریان متناوبی را در مدار به وجود می‌آورد.



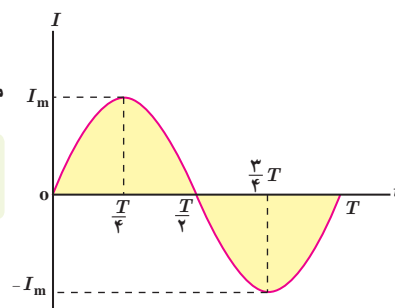
هر دور چرخش پیچه، معادل  $2\pi$  رادیان است. اگر پیچه به طور یکنواخت بچرخد و هر دور چرخش آن  $T$  ثانیه طول بکشد، پیچه در مدت  $t$  ثانیه، به اندازه  $\frac{t}{T}$  دور خواهد چرخید. در نتیجه اگر سطح پیچه در لحظه  $t=0$  عمود بر میدان مغناطیسی باشد ( $\theta=0$ )، پس از گذشت  $t$  ثانیه، زاویه  $\theta$  برابر  $(\frac{t}{T})(2\pi)$  رادیان است. زمان یک دور چرخش کامل پیچه ( $T$ ) را **دوره** یا **زمان تناوب** می‌نامند. شاری که در لحظه  $t$  از پیچه می‌گذرد برابر است با

$$\Phi = BA \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (9-3)$$

می‌توان نشان داد با تغییر شار مغناطیسی، جریانی که در پیچه القا می‌شود، از رابطه زیر به‌دست می‌آید<sup>۱</sup>:

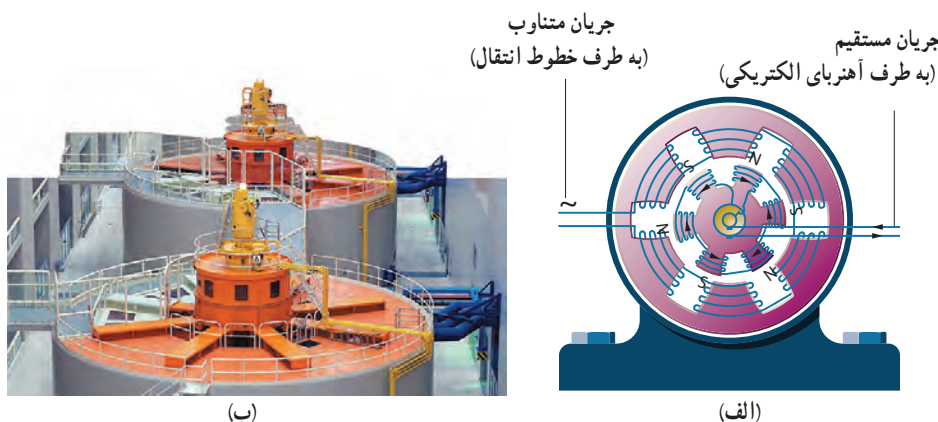
$$I = I_m \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (۱-۳)$$

در این رابطه  $I_m$  بیشینه جریانی القا شده در پیچه است. رابطه ۳-۱ همچنین نشان می‌دهد که جریان القایی در پیچه، به‌طور سینوسی تغییر می‌کند، به‌همین سبب به آن **جریان متناوب** می‌گویند. نمودار این جریان برحسب زمان، در یک دوره در شکل ۳-۳۵ رسم شده است.



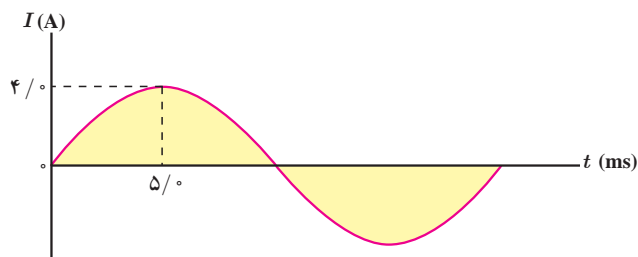
شکل ۳-۳۵ نمودار جریان متناوب سینوسی در یک دوره

در نیروگاه‌های تولید برق، برای تولید جریان متناوب از مولدهای خاصی استفاده می‌شود که به آنها مولدهای صنعتی جریان متناوب می‌گویند. در مولدهای صنعتی پیچه‌ها ساکن‌اند و آهنربای الکتریکی در آنها می‌چرخد (شکل ۳-۳۶). در نیروگاه‌های تولید برق در ایران، آهنربای الکتریکی در هر ثانیه، ۵۰ دور درون پیچه می‌چرخد. این کمیت را بسامد برق تولید شده می‌نامند و به‌صورت  $50\text{ Hz}$  بیان می‌کنند. یکای SI بسامد  $s^{-1}$  یا  $\text{Hz}$  (هرتز) است.



شکل ۳-۳۶ (الف) در مولدهای صنعتی با چرخیدن آهنربای الکتریکی بین پیچه‌ها، جریان متناوب تولید می‌شود. (ب) نمایی از مولدهای صنعتی تولید برق.

### مثال ۳-۸



شکل روبه‌رو، نمودار جریان متناوب سینوسی را نشان می‌دهد که یک مولد جریان متناوب تولید کرده است. معادله جریانی برحسب زمان را بنویسید.

**پاسخ:** چون ربع چرخه در  $5\text{ ms}$  طی شده است، دوره تناوب برابر  $T = 20\text{ ms}$  است. همچنین با توجه به نمودار، بیشینه جریانی  $I_m = 4\text{ A}$  است. در نتیجه از رابطه ۳-۹ داریم:

$$I = I_m \sin \frac{2\pi}{T} t = (4\text{ A}) \sin \left( \frac{2\pi}{20 \times 10^{-3} \text{ s}} \right) t = 4 \sin 100\pi t$$

نتیجه نهایی برحسب یکاهای SI نوشته شده است.

۱- اثبات این رابطه، خارج از اهداف برنامه درسی این کتاب است.

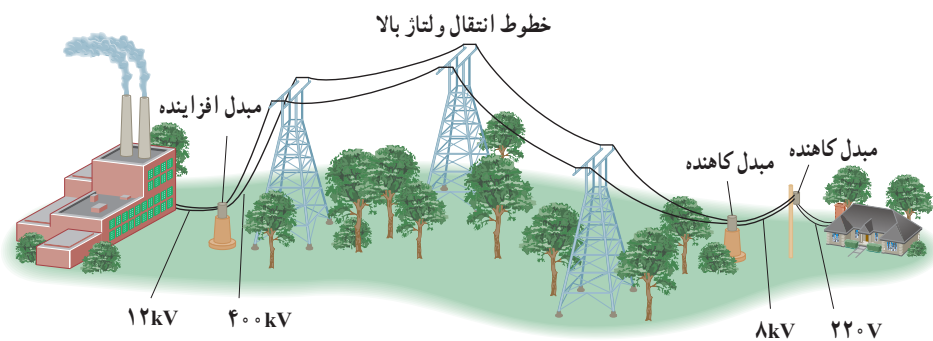


## تمرین ۳-۶

معادله جریان - زمان یک مولد جريان متناوب بر حسب يکاهای SI به صورت  $I = (4/\sqrt{2} \times 10^{-3}) \sin 250\pi t$  است. (الف) جريان در دو لحظه  $t_1 = 2/\sqrt{2} \text{ ms}$  و  $t_2 = 8/\sqrt{2} \text{ ms}$  چقدر است؟ (ب) دوره تناوب جريان را به دست آورید و نمودار جريان - زمان را در یک دوره کامل رسم کنید.

**مبدل ها:** یکی از مزیت‌های مهم توزیع توان الکتریکی ac بر dc آن است که افزایش و کاهش ولتاژ ac، بسیار آسان‌تر از dc است. برای انتقال توان الکتریکی در فاصله‌های دور، تا جایی که امکان دارد باید از ولتاژهای بالا و جریان‌های کم استفاده کنیم. این کار اتلاف توان را در خط‌های انتقال کاهش می‌دهد. همچنین با توجه به کاهش جريان می‌توان از سیم‌های نازک‌تری استفاده و در مصرف مواد اولیه ساخت سیم صرفه‌جویی کرد.

خط‌های انتقال توان الکتریکی به طور معمول از ولتاژهایی در حدود  $400 \text{ kV}$  استفاده می‌کنند (شکل ۳-۳۸). از طرف دیگر، ملاحظات ایمنی و الزامات عایق‌بندی در ساخت وسایل خانگی و صنعتی، ولتاژهای به نسبت پایین‌تری را در محل مصرف انرژی ضروری می‌کند. ولتاژ استاندارد برای سیم‌کشی خانگی در ایران و بسیاری از کشورهای دیگر  $220 \text{ V}$  است. تبدیل ولتاژ مورد نیاز با استفاده از مبدل‌ها صورت می‌گیرد.



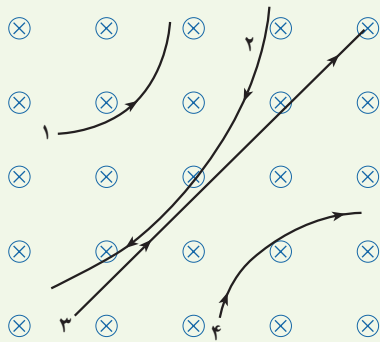
**شکل ۳-۳۸** قبل از انتقال توان الکتریکی از نیروگاه‌ها، مبدل‌های افزایشنده، ولتاژ را تا حدود  $400 \text{ kV}$  افزایش می‌دهند. در انتهای مسیر، مبدل‌های کاهشنده، ولتاژ را کاهش می‌دهند تا توان الکتریکی با امنیت بیشتر به محل مصرف برسد.



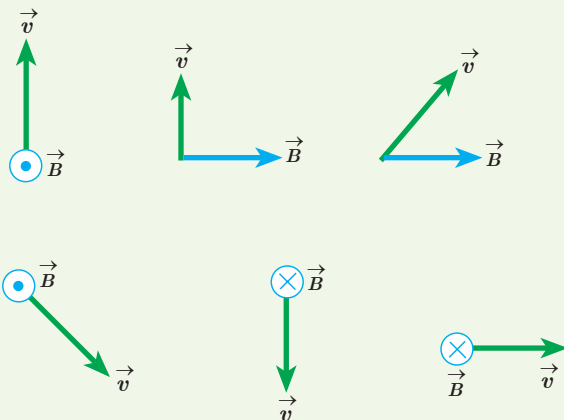
الف) هنگامی که آهنربای دائمی به نوک ثابت آهنی نزدیک می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟  
 ب) ساختن نوک ثابت آهن چه مزیتی دارد؟  
 پ) این وسیله را باید به درون گلولی کودک وارد و به سوی فلز بلعیده شده هدایت کرد؛ چرا غلاف باید انعطاف پذیر باشد؟  
 ت) پزشک می‌خواهد یک گیره آهنی کاغذ و یک واشر آلومینیومی را از گلولی کودک بیرون بیاورد؛ کدام یک را می‌توان بیرون آورد؟ چرا؟

### ۳-۳ نیروی مغناطیسی وارد بر ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی

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

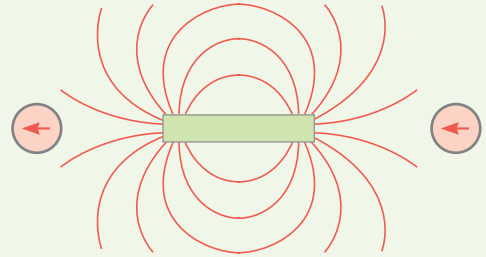


۵) جهت نیروی مغناطیسی وارد بر بار مثبت را در هریک از حالت‌های نشان داده در شکل زیر تعیین کنید.



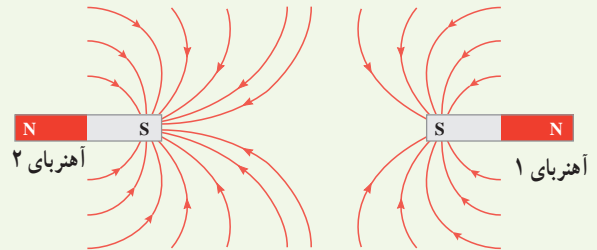
### ۱-۳ و ۲-۳ مغناطیسی و قطب‌های مغناطیسی و میدان مغناطیسی

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

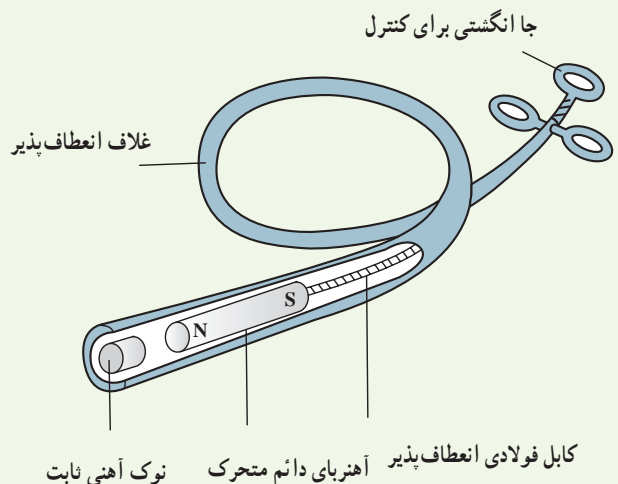


۲) الف) آهنربای میله‌ای با قطب‌های نامشخص در اختیار داریم. دست کم دو روش را برای تعیین قطب‌های این آهنربا بیان کنید.

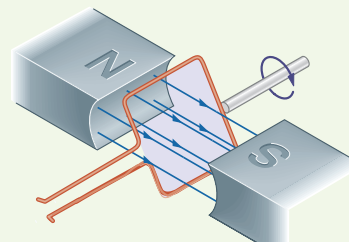
ب) خط‌های میدان مغناطیسی بین دو آهنربا در شکل زیر نشان داده شده است. اندازه میدان مغناطیسی را در نزدیکی قطب‌های آهنرباها با هم مقایسه کنید.



۳) کودکی یک قطعه کوچک آهنی را بلعیده است. پزشک می‌خواهد آن را با دستگاه شکل زیر بیرون بیاورد.



۶ حلقه رسانای مستطیل شکلی که حامل جریان  $I$  است، مطابق شکل درون میدان مغناطیسی یکنواخت می‌چرخد. جهت جریان را در حلقه تعیین کنید.

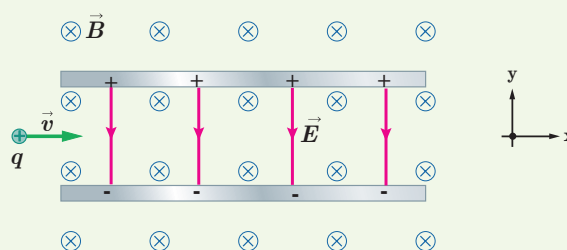


۷ پروتونی با تندی  $4/4 \times 10^6 \text{ m/s}$  درون میدان مغناطیسی یکنواختی به اندازه  $18 \text{ mT}$  در حرکت است. جهت حرکت پروتون با جهت  $\vec{B}$ ، زاویه  $60^\circ$  می‌سازد.

الف) اندازه نیروی وارد بر این پروتون را محاسبه کنید.

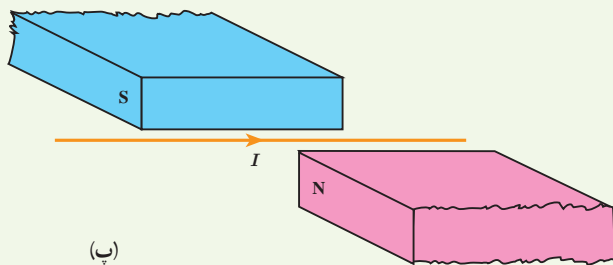
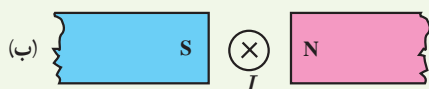
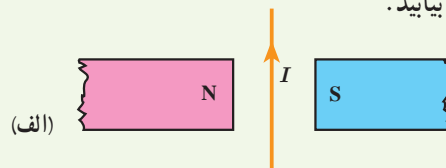
ب) اگر تنها این نیرو بر پروتون وارد شود، شتاب پروتون را حساب کنید. (بار الکتریکی پروتون  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  و جرم آن  $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$  در نظر بگیرید).

۸ ذره باردار مثبتی با جرم ناچیز و با سرعت  $\vec{v}$  در امتداد محور  $x$  وارد فضایی می‌شود که میدان‌های یکنواخت  $\vec{B}$  و  $\vec{E}$  وجود دارد (شکل زیر). اندازه این میدان‌ها برابر  $E = 450 \text{ N/C}$  و  $B = 0.18 \text{ T}$  است. تندی ذره چقدر باشد تا در همان امتداد محور  $x$  به حرکت خود ادامه دهد؟



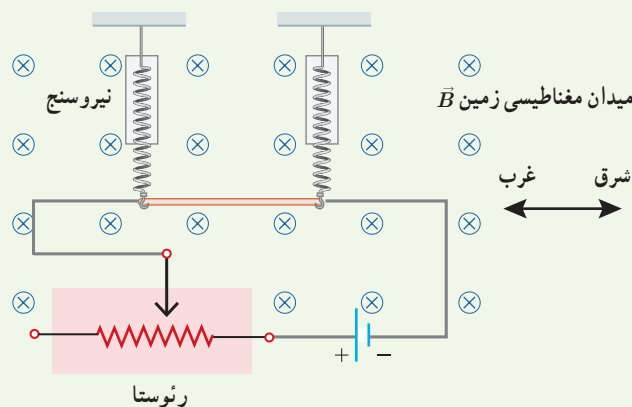
### ۴-۳ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان

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



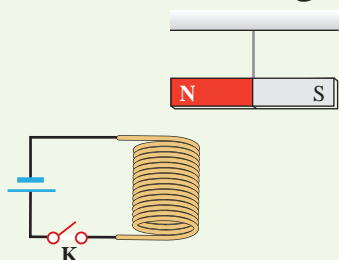
۱۰ یک سیم حامل جریان  $1/6$  آمپر مطابق شکل زیر با دو نیروسنج فنی که به دو انتهای آن بسته شده‌اند، به طور افقی و در راستای غرب - شرق قرار دارد. میدان مغناطیسی زمین را یکنواخت، به طرف شمال و اندازه  $5 \text{ mT}$  بگیرد.

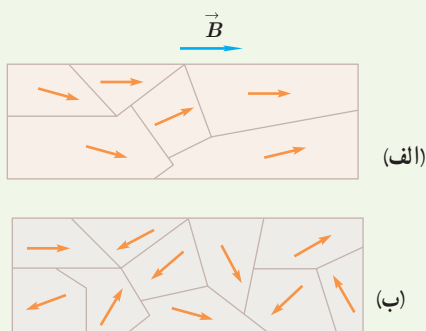
الف) اندازه نیروی مغناطیسی وارد بر هر متر این سیم را پیدا کنید. ب) اگر بخواهیم نیروسنج‌ها عدد صفر را نشان دهند، چه جریانی و در چه جهتی باید از سیم عبور کند؟ جرم هر متر از طول این سیم  $8$  گرم است ( $g = 9.8 \text{ N/kg}$ ).



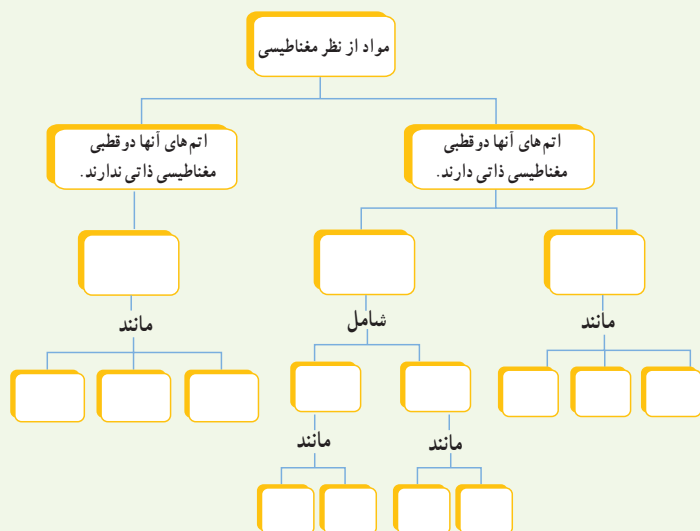
### ۵-۳ میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی

۱۱ یک آهنربای میله‌ای مطابق شکل زیر، بالای سیملوله‌ای آویزان شده است. توضیح دهید با بستن کلید  $K$  چه تغییری در وضعیت آهنربا رخ می‌دهد.



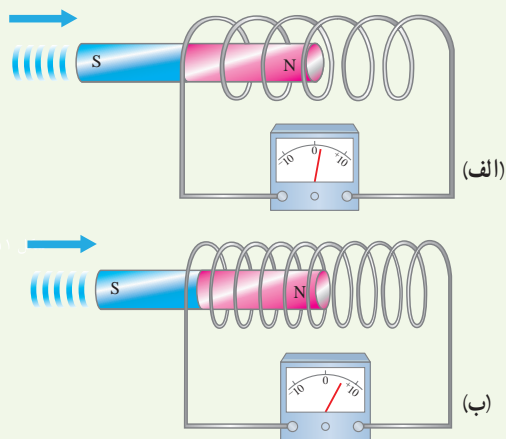


۱۶ با توجه به آنچه در بخش ویژگی‌های مغناطیسی مواد دیدید، نقشه مفهومی زیر را کامل کنید.

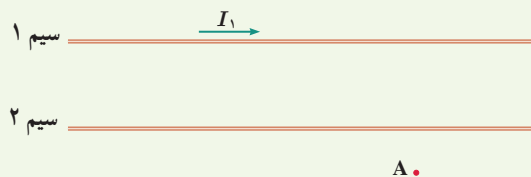


### ۳-۸ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده

۱۷ دو سیمولوله با حلقه‌های با مساحت یکسان ولی با تعداد دور متفاوت را مطابق شکل‌های زیر به ولت‌سنج حساسی وصل کرده‌ایم. دریافت خود را از این شکل‌ها بنویسید. (آهنرباها مشابه‌اند و با تندی یکسانی به طرف سیمولوله‌ها حرکت می‌کنند.)

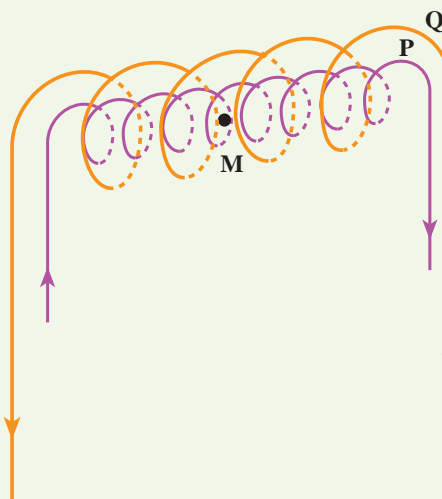


۱۲ شکل زیر، دو سیم موازی و بلند حامل جریان را نشان می‌دهد. اگر میدان مغناطیسی برآیند حاصل از این سیم‌ها در نقطه A صفر باشد، جهت جریان آن را در سیم ۲ پیدا کنید.



۱۳ سیمولوله‌ای شامل ۲۵۰ حلقه است که دور یک لوله پلاستیکی توخالی به طول ۱۴/۰ متر پیچیده شده است. اگر جریان گذرنده از سیمولوله ۸/۸۰ A باشد، اندازه میدان مغناطیسی درون سیمولوله را حساب کنید.

۱۴ در شکل زیر دو سیمولوله P و Q هم محورند و طول برابر دارند. تعداد دور سیمولوله P برابر ۲۰۰ و تعداد دور سیمولوله Q برابر ۳۰۰ است. اگر جریان ۱ A از سیمولوله Q عبور کند، از سیمولوله P چه جریانی باید عبور کند تا برآیند میدان مغناطیسی ناشی از دو سیمولوله در نقطه M (روی محور دو سیمولوله) صفر شود؟



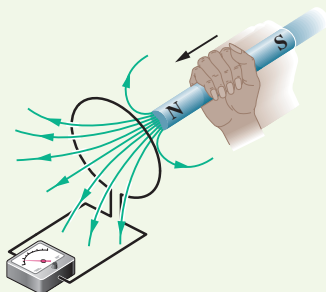
### ۳-۶ ویژگی‌های مغناطیسی مواد

۱۵ شکل الف حوزه‌های مغناطیسی ماده فرومغناطیسی را درون میدان خارجی  $\vec{B}$  نشان می‌دهد. شکل ب همان ماده را پس از حذف میدان  $\vec{B}$  نشان می‌دهد. نوع ماده فرومغناطیسی را با ذکر دلیل تعیین کنید.

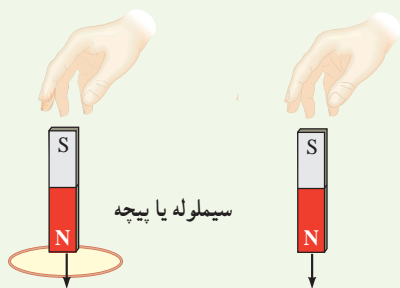
تغییر می‌کند و به  $40\%$  در خلاف جهت اولیه می‌رسد. اگر سطح هر حلقه پیچه  $5\text{ cm}^2$  باشد، اندازه نیروی محرکه القایی متوسط در پیچه را حساب کنید.

### ۹-۳ قانون لنز

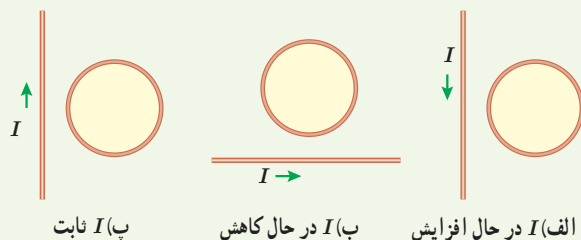
۲۱ قطب N یک آهنربا را مطابق شکل زیر به یک حلقه رسانا نزدیک می‌کنیم. جهت جریان القایی را در حلقه مشخص کنید.



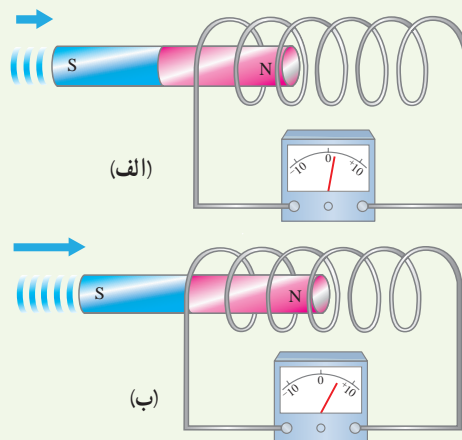
۲۲ دو آهنربای میله‌ای مشابه را مطابق شکل، به طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک سطح زمین رها می‌کنیم به طوری که یکی از آنها از حلقه رسانایی عبور می‌کند. اگر سطح زمین در محل برخورد آهنرباها نرم باشد، مقدار فرو رفتگی آهنرباها را در زمین با یکدیگر مقایسه کنید. (تأثیر میدان مغناطیسی زمین روی آهنرباها را نادیده بگیرید.)



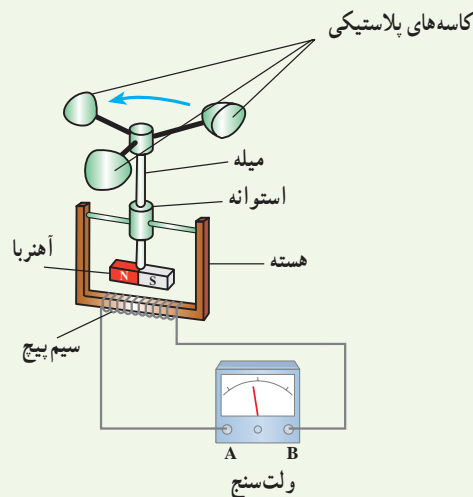
۲۳ جهت جریان القایی را در هریک از حلقه‌های رسانای نشان داده شده در شکل‌های زیر تعیین کنید.



۱۸ دو سیمولوه مشابه را مطابق شکل‌های زیر به ولت‌سنج حساسی وصل کرده‌ایم. دریافت خود را از شکل‌های زیر بنویسید. (آهنرباها مشابه اند ولی با تندی متفاوتی به طرف سیمولوه حرکت می‌کنند.)

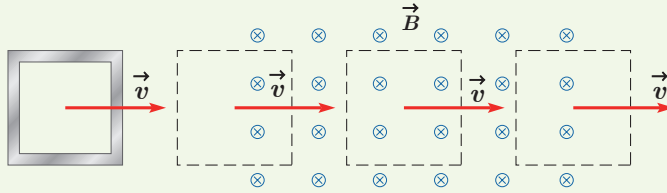


۱۹ شکل زیر ساختمان یک بادسنج را نشان می‌دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد میله آن می‌چرخد و ولت‌سنج عددی را نشان می‌دهد. الف) چرا چرخش میله سبب انحراف عقربه ولت‌سنج می‌شود؟ ب) آیا با افزایش تندی باد، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ چرا؟ پ) برای بهبود و افزایش دقت کار دستگاه دو پیشنهاد ارائه دهید.

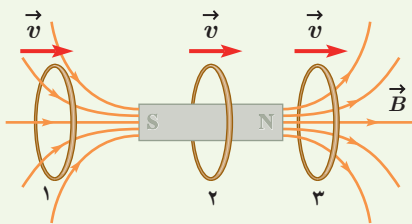


۲۰ سطح حلقه‌های پیچه‌ای که دارای ۱۰۰۰ حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازه آن  $40\text{ T}$  و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت  $0.1\text{ s}$

الف) در کدام مرحله شار عبوری از حلقه بیشینه است؟ مقدار شار گذرنده از حلقه در این حالت چقدر است؟  
 ب) در کدام وضعیت (ها) شار گذرنده از حلقه تغییر می کند؟ جهت جریان القایی را در حلقه تعیین کنید.

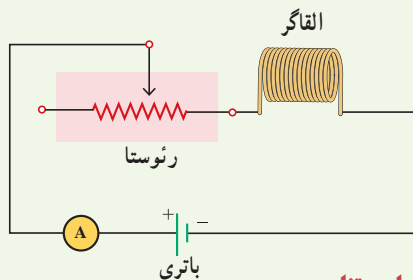


۲۹ حلقه رسانایی به طرف یک آهنربای میله ای حرکت می کند. شکل زیر، حلقه را در سه وضعیت نسبت به آهنربا نشان می دهد. جهت جریان القایی را در حلقه برای هر وضعیت به طور جداگانه تعیین کنید.



### ۳-۱۰ القاگرها

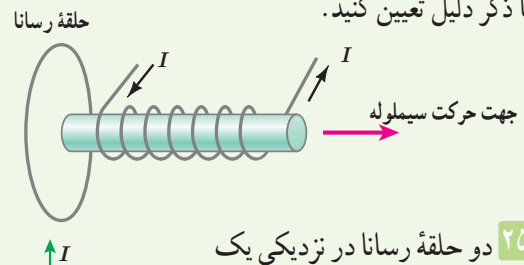
۳۰ شکل زیر مداری را نشان می دهد؛ شامل یک القاگر (سیملوله)، باتری، رنوستا و آمپرسنج که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده اند. اگر بخواهیم بدون تغییر ولتاژ باتری، انرژی ذخیره شده در القاگر را زیاد کنیم چه راهی پیشنهاد می کنید؟



### ۳-۱۱ جریان متناوب

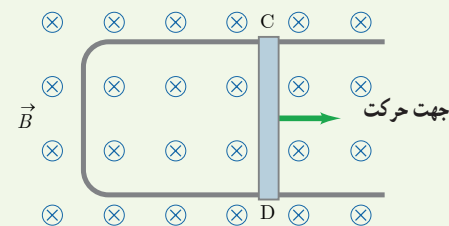
۳۱ جریان متناوبی که بیشینه آن  $A/2$  و دوره آن  $20\text{ ms}$  است، از یک رسانای  $5\text{ }\Omega$  اهمی می گذرد.  
 الف) اولین لحظه ای که در آن جریان بیشینه است چه لحظه ای است؟ در این لحظه نیروی محرکه القایی چقدر است؟  
 ب) در لحظه  $t = \frac{1}{40}\text{ s}$ ، جریان چقدر است؟

۲۴ شکل زیر سیملوله حامل جریانی را نشان می دهد که در حال دور شدن از یک حلقه رساناست. جهت جریان القایی را در حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.

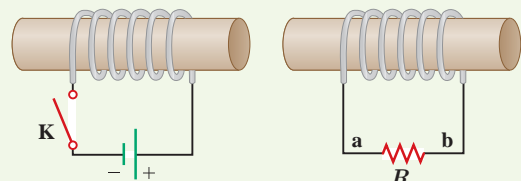


۲۵ دو حلقه رسانا در نزدیکی یک سیم دراز حامل جریان ثابت  $I$  قرار دارند؛ این دو حلقه با تندی یکسان، ولی در جهت های متفاوت مطابق شکل روبه رو حرکت می کنند. جهت جریان القایی را در هر حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.

۲۶ شکل زیر رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  که عمود بر صفحه شکل و رو به داخل صفحه است نشان می دهد. وقتی میله فلزی CD به طرف راست حرکت کند، جهت جریان القایی در مدار در چه جهتی است؟



۲۷ در مدار نشان داده شده در شکل زیر، جهت جریان القایی را در مقاومت R در هریک از دو حالت زیر با ذکر دلیل پیدا کنید:  
 الف) در لحظه بستن کلید K، ب) در لحظه باز کردن کلید K.



۲۸ حلقه رسانای مربعی شکل، به طول ضلع  $10\text{ cm}$  وارد میدان مغناطیسی درون سویی به اندازه  $20\text{ mT}$  و سپس از آن خارج می شود.