

القای الکترومغناطیسی و جریان متناوب



وقتی کارت بانکی درون دستگاه کارت‌خوان «کشیده» می‌شود، اطلاعات رمزپنه شده در نوار مغناطیسی پشت کارت، به مرکز اطلاعات بانک ارسال می‌شود. چرا به جای ثابت نگه داشتن کارت در شکاف دستگاه کارت‌خوان، لازم است آن را بکشیم؟ پاسخ در همین فصل.

در فصل قبل، 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 تولید جریان الکتریکی است. در این فصل، پس از آشنایی با این قانون، به چگونگی تولید جریان متناوب خواهیم پرداخت.

۱-۴ پدیده القای الکترومغناطیسی

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 ۱-۴

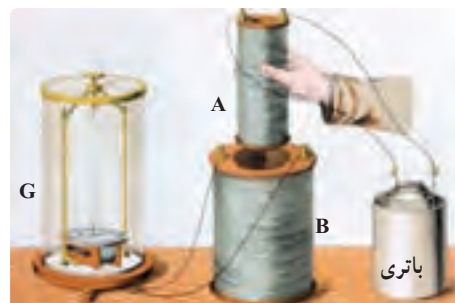
هدف: بررسی پدیده القای الکترومغناطیسی

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

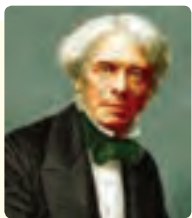
- دو سر سیملوله را به گالوانومتر ببندید.
- یکی از قطب‌های آهنربا را وارد سیملوله کنید (شکل روبه‌رو).
- مشاهدات خود را هنگام انجام این کار، یادداشت کنید.
- اکنون آهنربا را از سیملوله خارج کنید. مشاهدات خود را هنگام انجام این کار، دوباره یادداشت کنید.
- مراحل بالا را برای قطب دیگر آهنربا تکرار کنید.
- 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.



در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فاراده دانشمند انگلیسی و تقریباً هم‌زمان با او جوزف هانری دانشمند آمریکایی، با انجام آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۱-۴ 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 ۱-۴). این پدیده را القای الکترومغناطیسی و جریان تولید شده را جریان الکتریکی القایی می‌نامند.



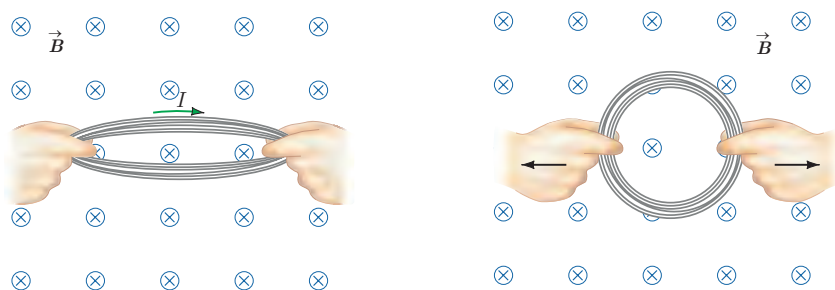
شکل ۱-۴ فاراده برای پی بردن به پدیده القای الکترومغناطیسی، به جای آهنربای دائمی، از آهنربای الکتریکی (سیملوله A که به باتری وصل شده است) استفاده کرد. فاراده مشاهده کرد که با عبور آهنربا از درون سیملوله B و تغییر میدان مغناطیسی در محل این سیملوله، عقربه گالوانومتر منحرف می‌شود.



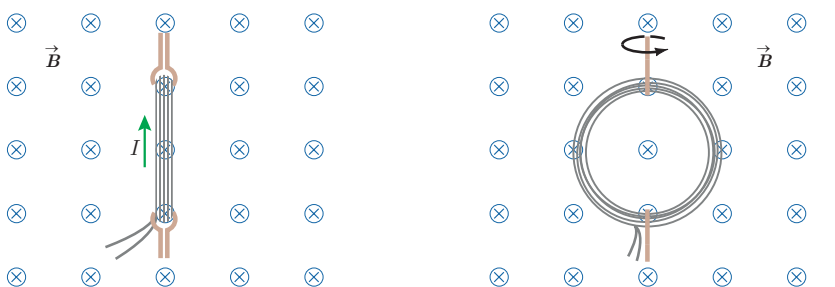
مایکل فاراده (۱۸۶۷-۱۷۹۱)

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 سیرهمفری 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، الکتریسته 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.

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 ۲-۴) یا پیچه‌ای را درون میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} بچرخانیم (شکل ۳-۴)، مشاهده می‌شود که در هنگام انجام این کارها، جریانی در پیچه القا می‌شود.



شکل ۲-۴ تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی \vec{B} ، جریانی در پیچه القا می‌کند.



شکل ۳-۴ 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.

۲-۴ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده

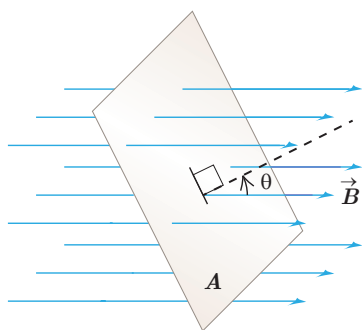
پیش از این دیدیم که به دلایلی مانند تغییر میدان مغناطیسی در محل یک پیچه، تغییر مساحت پیچه در حضور میدان مغناطیسی یا چرخش پیچه درون میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در آن القا می‌شود. عامل اساسی و مشترک در ایجاد جریان القایی در همه این آزمایش‌ها، **تغییر شار مغناطیسی** عبوری از پیچه است.

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

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (۱-۴)$$

همان‌طور که در شکل ۴-۴ دیده می‌شود: θ 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، وِبر (Wb) است که با توجه به رابطه ۱-۴ داریم: $۱ \text{ Wb} = ۱ \text{ T} \times ۱ \text{ m}^2$



شکل ۴-۴ نیم خط عمود بر سطح، با میدان یکنواخت \vec{B} زاویه θ می‌سازد.

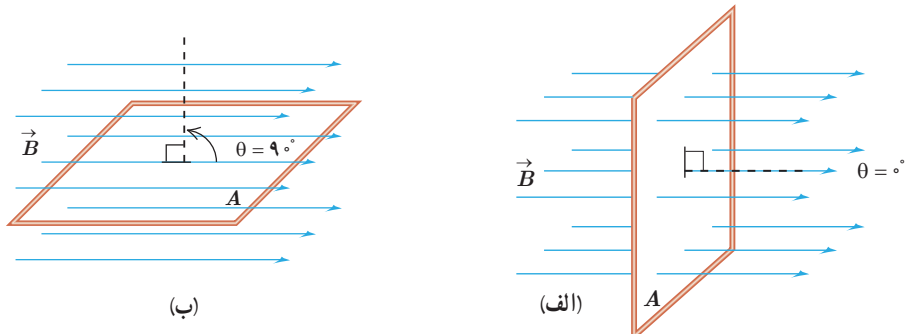
توجه: همواره دو جهت برای رسم نیم خط عمود بر یک سطح معین وجود دارد. علامت شار مغناطیسی عبوری از این سطح نیز به انتخاب این جهت بستگی دارد. برای مثال، در شکل ۴-۴، نیم خط عمود را در طرفی از سطح رسم کرده ایم که زاویه بین آن و جهت میدان \vec{B} کمتر از 90° است و در نتیجه شار عبوری از سطح مثبت می شود. اگر نیم خط عمود را در طرف دیگر سطح انتخاب کنیم، در این صورت، زاویه آن با جهت میدان \vec{B} بیشتر از 90° خواهد شد و شار عبوری از سطح منفی می شود. 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 ۴-۱

الف) مطابق شکل الف، سطح حلقه رسانایی، به شکل مربع با ضلع 2.0 cm ، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی به بزرگی 25.0 G قرار دارد. شار عبوری از این حلقه را به دست آورید.

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

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



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

$$A = 0.02\text{ m} \times 0.02\text{ m} = 0.0004\text{ m}^2, \quad B = 25.0\text{ G} = 2.5 \times 10^{-3}\text{ T}, \quad \theta = 0^\circ$$

$$\Phi = BA \cos \theta = (2.5 \times 10^{-3}\text{ T})(0.0004\text{ m}^2)(\cos 0^\circ) = 1 \times 10^{-6}\text{ Wb} = 1\text{ mWb}$$

ب) وقتی مطابق شکل ب، حلقه می چرخد و سطح آن موازی با خط های میدان مغناطیسی قرار می گیرد، زاویه بین میدان \vec{B} و نیم خط عمود بر سطح حلقه برابر 90° می شود. از آنجا که $\cos 90^\circ = 0$ است، در این شرایط، هیچ شاری از سطح حلقه عبور نمی کند.

پ) همان طور 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 $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = -1\text{ mWb}$ می شود. علامت منفی نشان می دهد 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:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{-1 \times 10^{-6}\text{ Wb}}{0.1\text{ s}} = -10^{-6}\text{ Wb/s}$$

تمرین ۴-۱

الف) حلقه‌ای به مساحت 25 cm^2 درون میدان مغناطیسی یکنواخت درون سویی به اندازه $3^\circ/\text{s}$ 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° 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 ۴-۱

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

Ω ☐

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 پیچه 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 مربوط به شکل‌های ۱-۴، ۲-۴ و ۳-۴ 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:

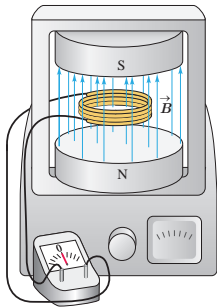
$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2-4)$$

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:

$$\bar{I} = \frac{\bar{\mathcal{E}}}{R} \quad (3-4)$$

همان‌طور که از رابطه ۳-۴ دیده می‌شود، هرچه مقاومت پیچه یا مداری که در آن شار مغناطیسی تغییر می‌کند، بیشتر باشد، جریان کوچک‌تری در آن القا می‌شود.

مثال ۴-۲



پیچه‌ای شامل ۲۰۰ دور که مساحت هر حلقه آن ۲۵cm^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 $۲/۰\text{ms}$ 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 ۱۰Ω 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:

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

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

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

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

به این ترتیب، تغییر شار مغناطیسی برابر است با:

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = (5/5 \times 10^{-4}\text{Wb}) - (4/5 \times 10^{-4}\text{Wb}) = 1/0 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

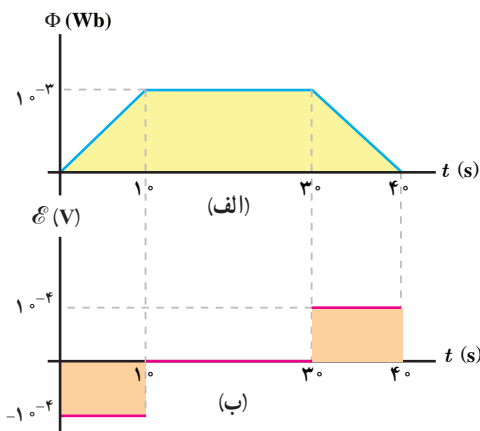
با قرار دادن این مقدار و داده‌های بالا در رابطه ۴-۲ داریم:

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -(200) \frac{1/0 \times 10^{-4}\text{Wb}}{2/0 \times 10^{-3}\text{s}} = -10\text{V}$$

(ب) با توجه به رابطه ۴-۳، جریان القایی متوسط در پیچه برابر است با:

$$\bar{I} = \frac{\bar{\mathcal{E}}}{R} = \frac{-10\text{V}}{10\Omega} = -1/0\text{A}$$

مثال ۴-۳



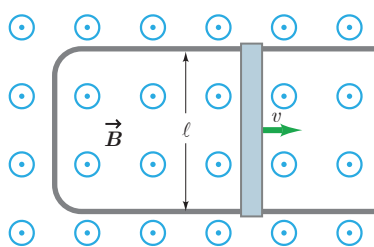
تغییرات شار مغناطیسی که از یک حلقه می‌گذرد برحسب زمان در نمودار شکل الف نشان داده شده است. نمودار نیروی محرکه القایی در حلقه را برحسب زمان در هریک از بازه‌های زمانی $(0, 1\text{s})$ ، $(1\text{s}, 3\text{s})$ و $(3\text{s}, 4\text{s})$ رسم کنید.

پاسخ: همان‌طور که در نمودار شار مغناطیسی برحسب زمان دیده می‌شود در بازه زمانی صفر تا 1s شار به صورت خطی افزایش می‌یابد. در نتیجه مقدار لحظه‌ای آهنگ تغییر شار با مقدار متوسط آن برابر است. به این ترتیب، در تمامی لحظات این بازه زمانی، نیروی محرکه القایی با نیروی محرکه القایی متوسط برابر است:

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

در بازه زمانی 1s تا 3s شار ثابت مانده است. در نتیجه نیروی محرکه القایی در تمامی لحظات این بازه زمانی برابر صفر است. در بازه زمانی 3s تا 4s شار به صورت خطی کاهش یافته و سرانجام صفر شده است. بنابراین شبیه آنچه در مورد بازه زمانی صفر تا 1s گفتیم، نیروی محرکه القایی در تمام لحظات این بازه با مقدار متوسط نیروی محرکه در این بازه زمانی برابر و مساوی $1 \times 10^{-4}\text{V}$ است. نمودار نیروی محرکه القایی برحسب زمان در شکل ب رسم شده است.

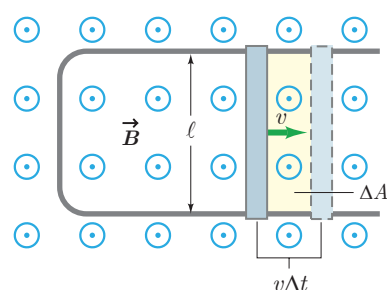
مثال ۴-۴



شکل روبه‌رو، رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} به اندازه 18° نشان می‌دهد. میدان \vec{B} عمود بر صفحه شکل و رو به بیرون است. میله‌ای فلزی (سیم لغزنده) به طول $\ell = 20 \text{ cm}$ بین دو بازوی رسانا قرار دارد و مداری را تشکیل می‌دهد. میله را با تندی ثابت $v = 20 \text{ m/s}$ به طرف راست حرکت می‌دهیم. بزرگی نیروی محرکه القایی متوسط را پیدا کنید.

پاسخ: با حرکت میله فلزی و به دلیل افزایش سطح حلقه، شار مغناطیسی تغییر می‌کند. میدان مغناطیسی در سطح حلقه یکنواخت است، پس شار مغناطیسی را از رابطه $\Phi = BA \cos \theta$ محاسبه می‌کنیم. نیم خط عمود بر سطح حلقه را همسو با \vec{B} می‌گیریم. بنابراین زاویه نیم خط عمود با میدان \vec{B} صفر است ($\theta = 0^\circ$) و در نتیجه $\Phi = BA$. از قانون القای فارادی داریم:

$$\bar{\mathcal{E}} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(BA)}{\Delta t} = -B \frac{\Delta A}{\Delta t}$$



برای محاسبه $\Delta A / \Delta t$ ، توجه کنید که میله فلزی لغزنده در مدت Δt مسافت $v \Delta t$ را طی می‌کند (شکل روبه‌رو) و سطح حلقه به مقدار $\Delta A = \ell v \Delta t$ افزایش می‌یابد. به این ترتیب، نیروی محرکه القا شده برابر است با:

$$\bar{\mathcal{E}} = -B \frac{\ell v \Delta t}{\Delta t} = -B \ell v$$

با قرار دادن مقادیر داده شده، در رابطه بالا، داریم:

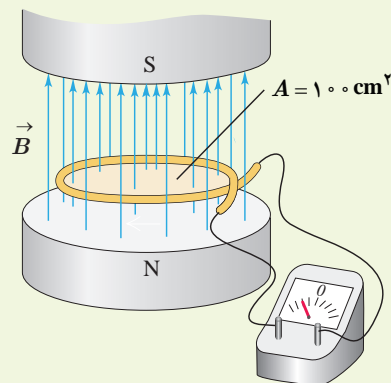
$$\bar{\mathcal{E}} = -(0.18 \text{ T})(20 \times 10^{-2} \text{ m})(20 \text{ m/s}) = -0.72 \text{ V}$$

و بزرگی آن برابر است با:

$$|\bar{\mathcal{E}}| = 0.72 \text{ V}$$

توجه کنید که به علت ثابت بودن تندی میله لغزنده، نیروی محرکه القایی ثابت است. در این حالت، رسانای U شکل با سیم لغزنده یک مولد جریان مستقیم است.

تمرین ۴-۲



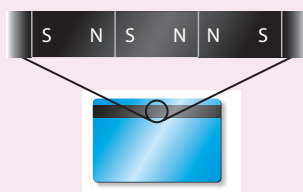
میدان مغناطیسی بین قطب‌های آهنربای الکتریکی شکل روبه‌رو که بر سطح حلقه عمود است با زمان تغییر می‌کند و در مدت 0.45 s از 28° ، رو به بالا، به 17° ، رو به پایین می‌رسد. در این مدت، الف) نیروی محرکه القایی متوسط در حلقه را به دست آورید. ب) اگر مقاومت حلقه 10Ω باشد، جریان القایی متوسط در حلقه را پیدا کنید.



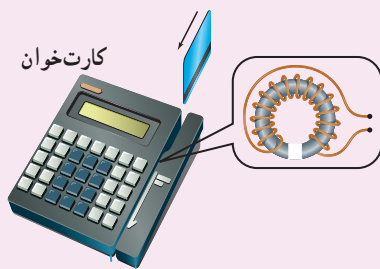
تندی سنج دوچرخه‌های مسابقه‌ای شامل یک آهنربای کوچک و یک پیچ است. آهنربا به یکی از پره‌های چرخ جلو و پیچ به دو شاخ فرمان متصل است (شکل روبه‌رو). دو سر پیچ با سیم‌های رسانا به نمایشگر تندی سنج (که در واقع نوعی رایانه کوچک است) وصل شده است. به نظر شما تندی سنج دوچرخه چگونه کار می‌کند؟ این موضوع را در گروه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

فناوری و کاربرد

کارت‌های اعتباری و دستگاه‌های کارت خوان



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

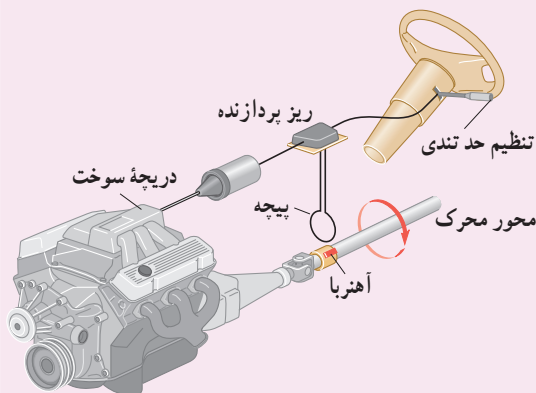


(ب) کشیدن کارت، جریان اندکی در پیچ دستگاه کارت خوان القا می‌کند.

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 پیچ قرار داده شده در دستگاه کارت خوان اثر می‌گذارد و جریان اندکی را در پیچ 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.

سامانه تنظیم حد تندی خودرو^۱

در بسیاری از خودروهای امروزی، سامانه‌ای وجود دارد که به کمک آن می‌توان تندی خودرو را روی مقدار دلخواهی تنظیم کرد. در این وضعیت، بدون آنکه لازم باشد راننده پای خود را روی پدال گاز قرار دهد، خودرو با تندی تعیین شده به حرکتش ادامه می‌دهد. اساس کار این سامانه، جریان القایی است. وقتی محور محرک خودرو می‌چرخد آهنربایی که روی آن قرار دارد، شار مغناطیسی متغیری را از پیچ می‌گذراند و جریانی در آن القا می‌کند.



ریزپردازنده (مغز رایانه) تعداد تپ‌های جریان^۲ را در هر ثانیه می‌شمارد و به این روش، تندی خودرو را اندازه می‌گیرد. سپس با مقایسه تندی اندازه‌گیری شده با تندی تنظیم شده توسط راننده، سوخت مورد نیاز را به موتور تزریق می‌کند. تا هنگامی که راننده ترمز نگیرد، حرکت خودرو با تندی تعیین شده، توسط این سامانه تنظیم می‌شود.

^۱ Cruise Control Speed Limit System

^۲ Current pulses

خوب است بدانید: معاینه مغز با نیروهای محرکه القایی



برانگیزش (تحریک) مغناطیسی فرا جمجمه‌ای (TMS)^۱ 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 پیچ 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.

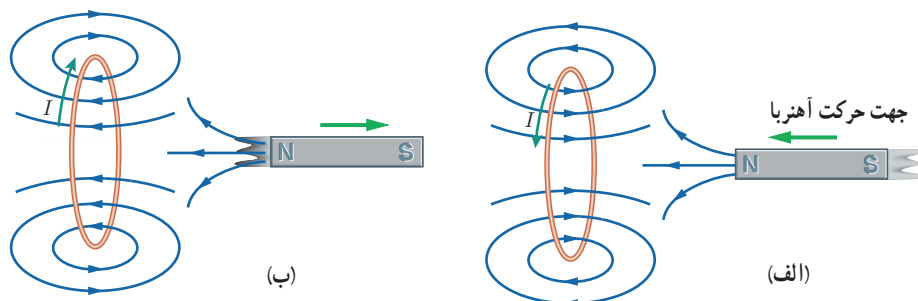
۳-۴ قانون لنز

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 پیچ 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 پیچ 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 ۴-۲ 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.

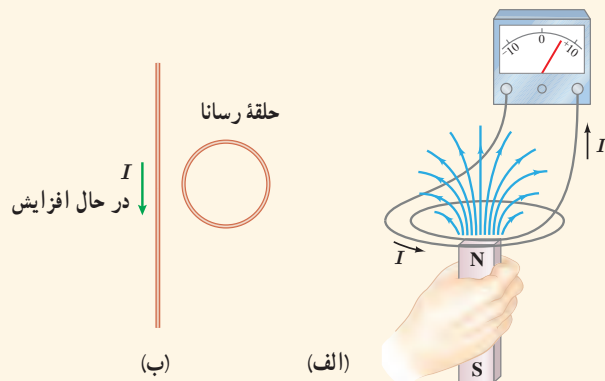
شکل ۴-۵ الف، آهنربایی را نشان می‌دهد که قطب N آن در حال نزدیک شدن به یک حلقهٔ رساناست. در این وضعیت اندازهٔ \vec{B} در محل حلقه افزایش می‌یابد و در نتیجه شار گذرنده از حلقه زیاد می‌شود. بنا به قانون لنز، جهت جریان القایی ایجاد شده در حلقه چنان است که میدان مغناطیسی ناشی از آن با افزایش شار مخالفت کند. 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 ۴-۵ 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.



هاینریش فردریش امیل لنز (۱۸۶۵-۱۸۰۴) 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 ۱۸۲۰ وارد دانشگاه دُریت شد و به تحصیل در زمینه فیزیک و شیمی پرداخت. لنز طی سال‌های ۱۸۲۳ تا ۱۸۲۶، در ضمن یک سفر دریایی به دور دنیا، به مطالعهٔ 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 مطالعهٔ الکترومغناطیس را در سال ۱۸۳۱ شروع کرد و بیشتر شهرتش برای فرمول‌بندی قانون لنز در الکترومغناطیس در سال ۱۸۳۴ است.

شکل ۴-۵ 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.

^۱ Transcranial Magnetic Stimulation (TMS)



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

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

خوب است بدانید: اثر دیامغناطیس

چرخش هر الکترون به دور هسته اتم را می‌توان به صورت یک حلقه میکروسکوپی جریان مدل‌سازی کرد. هرگاه ماده‌ای در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد، شار مغناطیسی گذرنده از هر یک از این حلقه‌های میکروسکوپی افزایش می‌یابد و در نتیجه بنابر قانون لنز، در این حلقه‌ها، یک میدان مغناطیسی در خلاف جهت میدان مغناطیس خارجی القا می‌شود. به این ویژگی که در اتم‌های همه مواد در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی رخ می‌دهد، پدیده یا اثر دیامغناطیس گفته می‌شود. اثر دیامغناطیسی در موادی نظیر بیسموت، جیوه، نقره، سرب، مس و کربن (الماس) بهتر نمایان می‌شود، زیرا اتم‌های آنها، فاقد دو قطبی‌های مغناطیسی دائمی‌اند. از آنجا که اثر دو قطبی‌های مغناطیسی دائمی در مواد فرومغناطیسی و پارامغناطیسی بسیار بیشتر از اثر دو قطبی‌های القایی است، اثر دیامغناطیس در این گونه مواد نمود کمتری دارد.

۴-۴ القاگرها

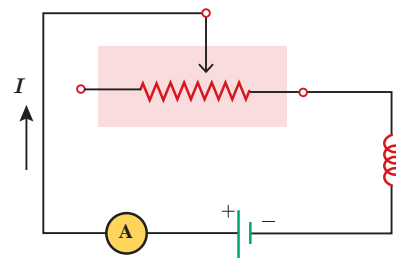
در فصل ۲ دیدیم که در فضای بین صفحه‌های یک خازن باردار، میدان الکتریکی ایجاد می‌شود و انرژی الکتریکی در این میدان ذخیره می‌شود. به همین ترتیب، می‌توان از القاگر (سیم پیچ) برای تولید میدان مغناطیسی دلخواه و همچنین ذخیره انرژی در این میدان استفاده کرد. القاگر مانند مقاومت و خازن یکی از اجزای ضروری مدارهای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

شکل ۴-۶ تصویر چند القاگر را در اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت نشان می‌دهد. نماد مداری القاگر، است.



شکل ۴-۶ تصویری از چند القاگر در اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت

خود - القاوری: مداری را مطابق شکل ۴-۷ 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 ۴-۷ مداری ساده شامل رئوستا، القاگر، باتری و آمپرسنج

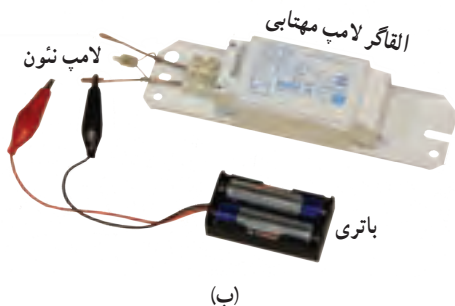
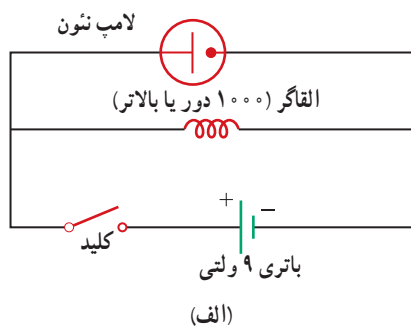
هدف: بررسی اثر خود – القاوری

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

شرح آزمایش:

- مداري 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، وسيله‌های 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!

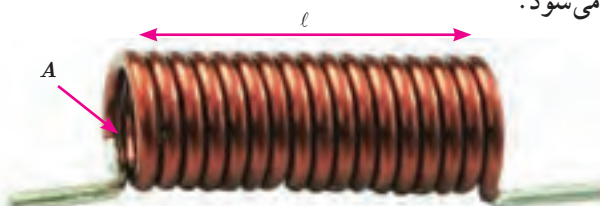


جوزف هنری (۱۸۷۸-۱۷۹۷): یکی از فیزیک‌دانان تجربی قرن نوزدهم است که در آمریکا به دنیا آمد و کار خود را با آموزش علوم در یک مدرسه روستایی آغاز کرد. سپس به تحصیل در طب و مهندسی علاقه‌مند شد و سرانجام به فیزیک و ریاضیات روی آورد. هنری در سال ۱۸۳۱، هم‌زمان و مستقل از فاراده، موفق به کشف پدیده القای الکترومغناطیسی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

ضریب القاوری: ویژگی‌های فیزیکی هر القاگر، توسط **ضریب القاوری** آن تعیین می‌شود. ضریب القاوری که با نماد L نمایش داده می‌شود به عواملی همچون تعداد دور، طول و سطح مقطع القاگر و جنس هسته‌ای که داخل آن قرار می‌گیرد بستگی دارد. برای مثال، ضریب القاوری سیم‌لوله‌ای آرمانی و بدون هسته، که دارای طول ℓ ، سطح مقطع A و N حلقه نزدیک به هم است (شکل ۴-۸)، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L = \mu_0 \frac{AN^2}{\ell} \quad (4-4)$$

یکای SI ضریب القاوری، اهم. ثانیه ($\Omega \cdot s$) است که به احترام جوزف هنری، **هنری** نامیده و با نماد H نشان داده می‌شود.



شکل ۴-۸ سیم‌لوله‌ای با N حلقه نزدیک به هم

مثال ۴-۵

ضرب القاوری سیملوله آرمانی بدون هسته‌ای به طول $62/8\text{cm}$ و سطح مقطع 1cm^2 را پیدا کنید که شامل 2000 حلقه نزدیک به هم است.

پاسخ: با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$A = 1\text{cm}^2 \quad \ell = 62/8\text{cm} \quad N = 2000 \quad L = ?$$

با قراردادن مقادیر بالا در رابطه ۴-۴ داریم:

$$L = \mu_0 \frac{AN^2}{\ell} = (4\pi \times 10^{-7} \text{T.m/A}) \frac{(1 \times 10^{-4} \text{m}^2)(2000)^2}{0.628\text{m}} = 8 \times 10^{-3} \text{H} = 8\text{mH}$$

تمرین ۴-۳

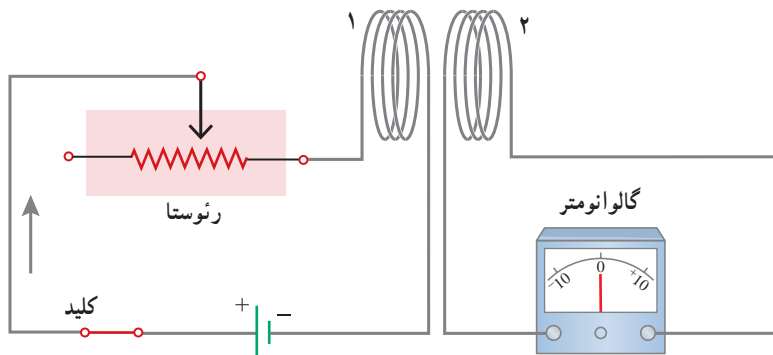
- ۱- تعداد حلقه‌های سیملوله‌ای بدون هسته، به طول $2/8\text{cm}$ و سطح 1cm^2 چه تعداد باشد تا ضرب القاوری آن 1H شود؟
- ۲- دو سیملوله بدون هسته با سطح مقطع و تعداد دور یکسان را در نظر بگیرید. اگر طول یکی از سیملوله‌ها دو برابر دیگری باشد، ضرب القاوری‌اش چند برابر دیگری است؟

خوب است بدانید: کاربرد القاگرها در لامپ‌های فلئورسان

همان‌طور که در ابتدای این بخش دیدیم القاگرها با تغییرات سریع جریان در مدار مخالفت می‌کنند، به همین دلیل نقش مهمی در لامپ‌های فلئورسان (مختابی) 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 فلئورسان آسیب برساند. برای جلوگیری از این مسئله، یک القاگر را به طور متوالی با لامپ فلئورسان می‌بندند تا مانع افزایش زیاد جریان شود. متعادل کننده همچنین باعث می‌شود تا لامپ فلئورسان بتواند با ولتاژ متناوب کار کند.

شکل ۴-۹ 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،

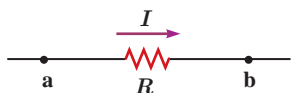


شکل ۴-۹ با تغییر مقاومت رئوستا و تغییر جریان عبوری از پیچه ۱ شار عبوری از پیچه ۲ نیز تغییر می‌کند. این تغییر شار، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی در پیچه ۲ می‌شود. هم‌زمان تغییر جریان در پیچه ۲، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی در پیچه ۱ می‌گردد.

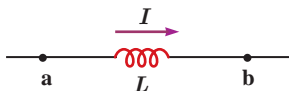


شکل ۴-۱۰ برای به حداقل رساندن اثر القای متقابل در برخی از مدارهای الکتریکی، القاگرهای مجاور را به گونه‌ای قرار می‌دهند که سطح حلقه‌های آنها بر یکدیگر عمود باشد.

مقاومت با جریان I : انرژی تلف شده است.



القاگر با جریان I : انرژی ذخیره شده است.



شکل ۴-۱۱ 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.

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.

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 ۴-۱۰). 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 جرابی 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:

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (4-5)$$

لازم است رفتار مقاومت و القاگر را به لحاظ انرژی اشتباه نگیرید (شکل ۴-۱۱). 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.

مثال ۴-۶

متخصصان صنعت برق، علاقه‌مندند راه‌های مؤثری را برای ذخیره انرژی الکتریکی تولیدی در ساعت‌های کم‌مصرف (کم‌باری) بیابند تا با استفاده از آن، نیاز مشترکان را در ساعت‌های پرمصرف (اوج بار) تأمین کنند. یک ایده فرضی، استفاده از یک القاگر بزرگ است. ضرب القاوری این القاگر چقدر باشد تا بتواند 1 kWh انرژی الکتریکی را در پیچه حامل جریان 200 A ذخیره کند؟

پاسخ: مقدار انرژی ذخیره شده مورد نیاز $U = 1 \text{ kWh}$ و جریان $I = 200 \text{ A}$ داده شده است. از معادله ۴-۵ ضرب القاوری را به دست می‌آوریم:

$$U = 1 \text{ kWh} = (1 \times 10^3 \text{ W})(3600 \text{ s}) = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \Rightarrow L = \frac{2U}{I^2} = \frac{2(3.6 \times 10^6 \text{ J})}{(200 \text{ A})^2} = 1.8 \times 10^2 \text{ H}$$

همان طور که نتیجه صفحه قبل نشان می دهد ضریب القاوری لازم، بسیار بیشتر از ضریب القاوری یک القاگر معمولی (در حد میلی هانری) است که در آزمایشگاه از آن استفاده می کنیم. افزون بر این همان طور که در فصل ۲ دیدیم سیم های معمولی که بتوانند جریان 20 A را از خود عبور دهند باید قطر بسیار بزرگی داشته باشند. در نتیجه اندازه یک القاگر 180 H که از سیم های معمولی ساخته شده باشد و بتواند چنین جریانی را تحمل کند باید خیلی بزرگ (به اندازه یک اتاق بزرگ) باشد. با توجه به فناوری های موجود این ایده، غیر عملی است و توجیه اقتصادی ندارد.

تمرین ۴-۴

سیملوله آرمانی بدون هسته ای به طول 22 cm و با حلقه هایی به مساحت 44 cm^2 ، شامل $N=2000$ حلقه نزدیک به هم است و جریان $1/7\text{ A}$ از آن می گذرد. ضریب القاوری و انرژی ذخیره شده در سیملوله را حساب کنید.

فناوری و کاربرد: انرژی لازم برای جرقه زدن شمع خودرو



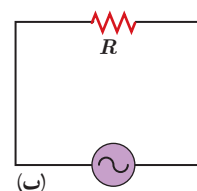
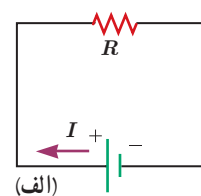
انرژی لازم برای جرقه زدن شمع خودرو، از انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی پیچه احتراق تأمین می شود.

انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی نقش مؤثری در دستگاه های احتراق خودروهای با موتور بنزینی دارد. پیچه اولیه با حدود 25° دور به باتری خودرو بسته شده است و میدان مغناطیسی قوی ای تولید می کند. این پیچه، درون یک پیچه ثانویه با 2500° دور سیم خیلی نازک قرار گرفته است. برای جرقه زدن شمع، جریان در پیچه اولیه قطع می شود و میدان مغناطیسی به سرعت به صفر می رسد و نیروی محرکه الکتریکی ده ها هزار ولتی در پیچه ثانویه القا می کند. در نتیجه انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی همراه با جریانی لحظه ای از پیچه ثانویه به طرف شمع می رود و جرقه ای تولید می کند که سبب احتراق مخلوط سوخت و هوا در سیلندرهای موتور می شود (شکل روبه رو).

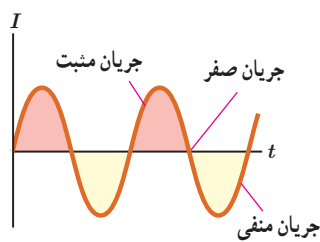
۴-۵ جریان متناوب

در اواخر قرن نوزدهم، بحث های داغی بین توماس ادیسون و جورج وستینگهاوس درباره بهترین روش انتقال انرژی الکتریکی از محل تولید تا محل مصرف صورت گرفت. ادیسون موافق جریان مستقیم (dc) بود، در حالی که وستینگهاوس از جریان متناوب (ac) حمایت می کرد. سرانجام، وستینگهاوس پیروز شد و پس از آن سامانه های انتقال و توزیع برق و بیشتر وسایل خانگی با جریان متناوب به کار افتادند.

شکل ۴-۱۲ دو مدار ساده جریان مستقیم و جریان متناوب را نشان می دهد. همان طور که می بینید جهت جریان در مدار جریان مستقیم معین است، در حالی که در مدار جریان متناوب، به دلیل تغییر جهت جریان با گذشت زمان، نمی توان جهت معینی را برای جریان در نظر گرفت. تمامی نیروگاه های تولید برق در دنیا و از جمله ایران، جریان متناوب تولید می کنند که تابعی سینوسی از زمان است و به همین دلیل، جریان متناوب سینوسی نامیده می شود (شکل ۴-۱۳).

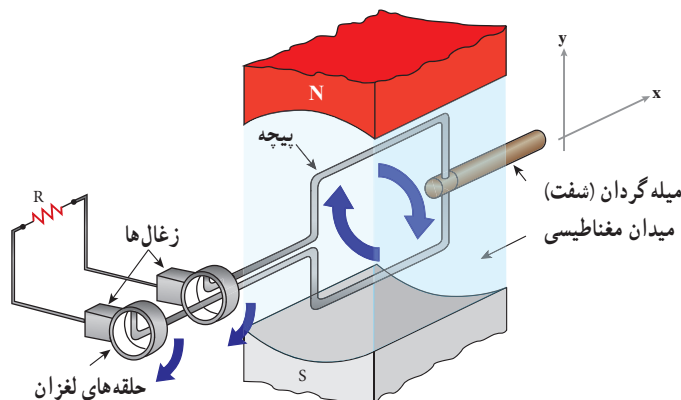


شکل ۴-۱۲ (الف) مدار ساده جریان مستقیم، که در آن جریان با گذشت زمان تغییر نمی کند. (ب) مدار ساده جریان متناوب، که در آن ولتاژ و جریان با گذشت زمان به طور سینوسی تغییر می کنند.



شکل ۱۳-۴ جریان متناوب سینوسی، متداول ترین نوع جریان متناوب است.

تولید جریان متناوب: یکی از کاربردهای مهم اثر القای الکترومغناطیسی، تولید جریان متناوب است. پیش از این دیدیم که برای تولید نیروی محرکه القایی باید شار عبوری از پیچه تغییر کند. همچنین دیدیم که در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت، شاری که از پیچه می گذرد از رابطه $\Phi = BA \cos \theta$ محاسبه می شود که در آن θ زاویه بین نیم خط عمود بر سطح حلقه های پیچه و میدان مغناطیسی است. رایج ترین روش برای تغییر شار و در نتیجه تولید جریان القایی، تغییر زاویه θ است. شکل ۱۴-۴ پیچه ای را نشان می دهد که می تواند در میدان مغناطیسی یکنواخت دور محور x بچرخد.



شکل ۱۴-۴ اجزای یک مولد (ژنراتور) جریان متناوب. حرکت مکانیکی از طریق میله گردان، سبب چرخیدن پیچه در میدان مغناطیسی می شود و جریان متناوبی را در مدار به وجود می آورد.

هر دور چرخش پیچه، معادل 2π 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 θ برابر $(\frac{t}{T})(2\pi)$ رادیان است. زمان یک دور چرخش کامل پیچه (T) را **دوره** یا **زمان تناوب** می نامند. شاری که در لحظه t از پیچه می گذرد برابر است با

$$\Phi = BA \cos \frac{2\pi}{T} t$$

به کمک قانون فاراده می توان نشان داد نیروی محرکه القایی در پیچه در لحظه t از رابطه زیر به دست می آید^۱:

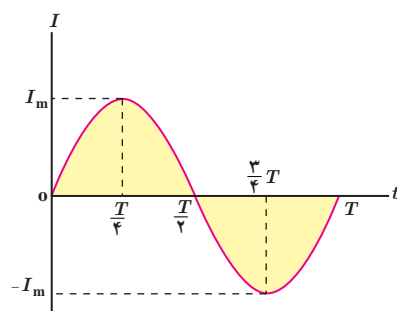
$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (۶-۴)$$

که در آن \mathcal{E}_m بیشینه مقدار نیروی محرکه القایی در پیچه است. این رابطه نشان می دهد که نیروی محرکه القا شده به طور دوره ای نسبت به زمان تغییر می کند.

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

اگر مقاومت کل مدار پیچه برابر R باشد، با توجه به رابطه $I = \mathcal{E}/R$ ، جریانی که در پیچه القا می شود برابر است با:

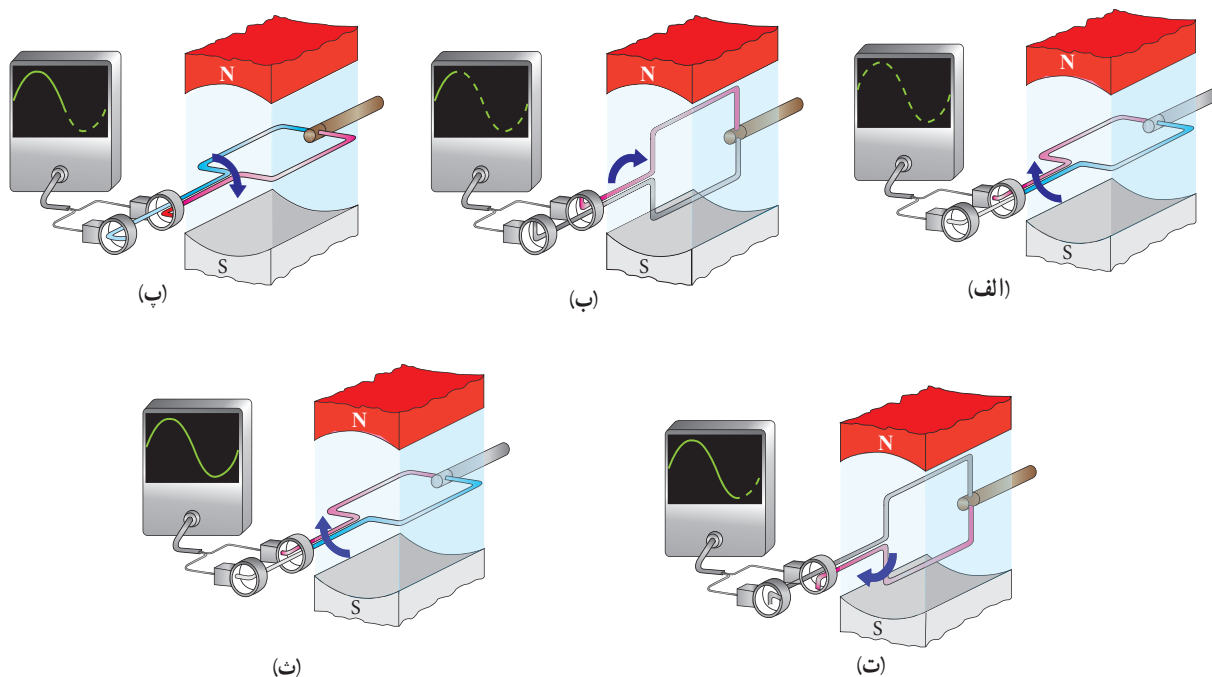
$$I = I_m \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (۷-۴)$$



شکل ۴-۱۵ نمودار جریان متناوب سینوسی در یک دوره

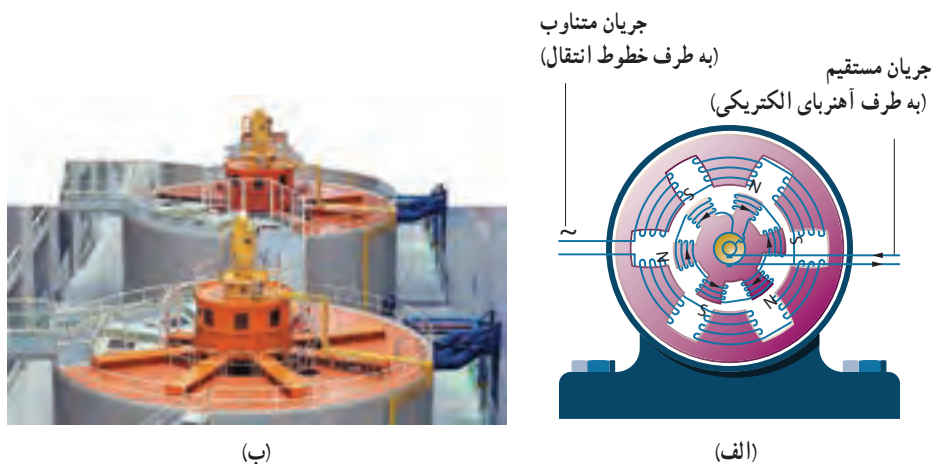
در این رابطه I_m بیشینه جریان القا شده در پیچه و برابر $I_m = \mathcal{E}_m/R$ است. رابطه ۷-۴ همچنین نشان می دهد که جریان القایی در پیچه، به طور سینوسی تغییر می کند، به همین سبب به آن **جریان متناوب** می گویند. نمودار این جریان برحسب زمان، در یک دوره در شکل ۴-۱۵ رسم شده است.

شکل ۴-۱۶ تولید جریان متناوب سینوسی در مدت یک دوره را نشان می دهد. در $t = 0$ سطح پیچه بر خطوط میدان مغناطیسی عمود است و جریانی در مدار وجود ندارد (شکل ۴-۱۶ الف). پیچه یک چهارم دور می چرخد تا در وضعیت شکل ۴-۱۶ ب قرار گیرد. در حین این چرخش، شار عبوری از پیچه تغییر می کند و جریان از صفر به مقدار بیشینه مثبت می رسد (ربع اول چرخش). پیچه به چرخیدن ادامه می دهد تا در وضعیت شکل ۴-۱۶ پ قرار گیرد. در نتیجه جریان از مقدار بیشینه مثبت به صفر می رسد (ربع دوم چرخش). پس از آن پیچه از وضعیت شکل ۴-۱۶ ب به وضعیت شکل ۴-۱۶ ت می رسد. در حین این چرخش، جریان از صفر به مقدار بیشینه منفی می رسد (ربع سوم چرخش). سرانجام پیچه یک ربع دور دیگر می چرخد و به این ترتیب یک چرخه کامل را طی می کند و به وضعیت شکل ۴-۱۶ ث می رسد و در نتیجه جریان از مقدار بیشینه منفی به صفر می رسد. این حرکت به طور متناوب (پی در پی) توسط پیچه ادامه می یابد و جریان متناوب تولید می شود.



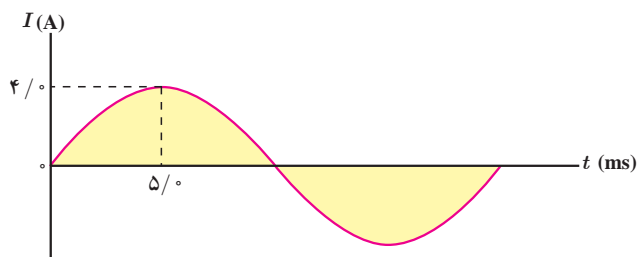
شکل ۴-۱۶ تولید جریان متناوب سینوسی در یک چرخش کامل

در نیروگاه‌های تولید برق، برای تولید جریان متناوب از مولدهای خاصی استفاده می‌شود که به آنها مولدهای صنعتی جریان متناوب می‌گویند. در مولدهای صنعتی پیچ‌ها ساکن اند و آهنربای الکتریکی در آنها می‌چرخد (شکل ۴-۱۷). در نیروگاه‌های تولید برق در ایران، آهنربای الکتریکی در هر ثانیه، ۵۰ دور درون پیچ می‌چرخد. این کمیت را بسامد برق تولید شده می‌نامند و به صورت 50 Hz بیان می‌کنند. یکای SI بسامد s^{-1} یا Hz (هرتز) است.



شکل ۴-۱۷ الف) در مولدهای صنعتی با چرخیدن آهنربای الکتریکی بین پیچ‌ها، جریان متناوب تولید می‌شود. ب) نمایی از مولدهای صنعتی تولید برق.

مثال ۴-۷



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

پاسخ: چون ربع چرخه در $5/0\text{ ms}$ طی شده است، دوره تناوب برابر $T = 2\text{ ms}$ است. همچنین با توجه به نمودار، بیشینهٔ جریان $I_m = 4/0\text{ A}$ است. در نتیجه از رابطهٔ ۴-۷ داریم:

$$I = I_m \sin \frac{2\pi}{T} t = (4/0\text{ A}) \sin \left(\frac{2\pi}{2 \times 10^{-3}\text{ s}} \right) t = 4/0 \sin 1000\pi t$$

نتیجهٔ نهایی برحسب یکاهای SI نوشته شده است.

تمرین ۴-۵

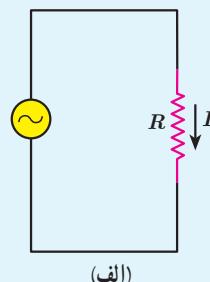
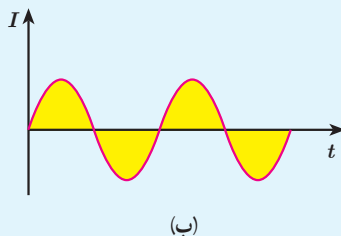
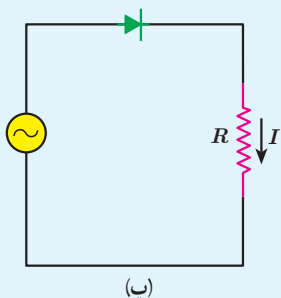
معادلهٔ جریان – زمان یک مولد جریان متناوب برحسب یکاهای SI به صورت $I = (4/0 \times 10^{-3}) \sin 250\pi t$ است.

الف) جریان در دو لحظهٔ $t_1 = 2/0\text{ ms}$ و $t_2 = 8/0\text{ ms}$ چقدر است؟

ب) دورهٔ تناوب جریان را به دست آورید و نمودار جریان – زمان را در یک دورهٔ کامل رسم کنید.

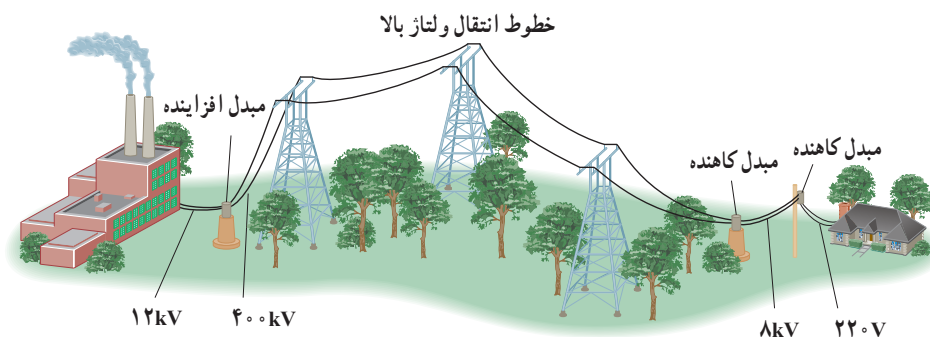
فعالیت ۴-۱

در فصل ۲ دیدیم که دیود جریان را در یک جهت از خود عبور می‌دهد و در جهت دیگر مانع عبور جریان می‌شود. به همین دلیل آن را یکسوکنده جریان می‌نامند. نمودار شکل ب، تغییرات جریان برحسب زمان را برای مدار شکل الف نشان می‌دهد. پس از گفت‌وگو در گروه خود، نمودار تغییرات جریان برحسب زمان را برای مدار شکل پ رسم کنید.

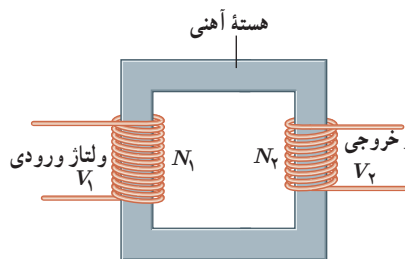


مبدل‌ها : یکی از مزیت‌های مهم توزیع توان الکتریکی ac بر dc آن است که افزایش و کاهش ولتاژ ac، بسیار آسان‌تر از dc است. برای انتقال توان الکتریکی در فاصله‌های دور، تا جایی که امکان دارد باید از ولتاژهای بالا و جریان‌های کم استفاده کنیم. این کار اتلاف توان را در خط‌های انتقال کاهش می‌دهد. همچنین با توجه به کاهش جریان 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 kV استفاده می‌کنند (شکل ۴-۱۸). 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 V است. تبدیل ولتاژ مورد نیاز با استفاده از مبدل‌ها صورت می‌گیرد.



شکل ۴-۱۸ قبل از انتقال توان الکتریکی از نیروگاه‌ها، مبدل‌های افزایشنده، ولتاژ را تا حدود 400 kV افزایش می‌دهند. در انتهای مسیر، مبدل‌های کاهشنده، ولتاژ را کاهش می‌دهند تا توان الکتریکی با امنیت بیشتر به محل مصرف برسد.

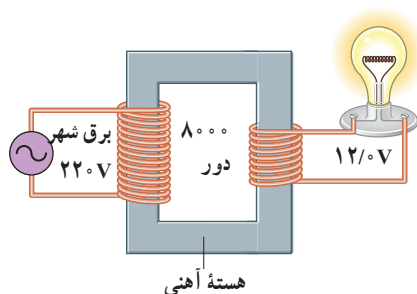


شکل ۱۹-۴ یک مبدل آرمانی شامل دو پیچه که روی یک هسته آهنی پیچیده شده‌اند.

شکل ۱۹-۴ مبدلی شامل دو پیچه با تعداد دورهای متفاوت را نشان می‌دهد که دور یک هسته آهنی (فرومغناطیس نرم) پیچیده شده‌اند. در عمل پیچه اولیه با N_1 دور به ولتاژ V_1 بسته شده است و پیچه ثانویه با N_2 دور ولتاژ V_2 را تأمین می‌کند^۱. برای یک مبدل آرمانی که مقاومت پیچه‌های آن ناچیز است، رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (۸-۴)$$

مثال ۸-۴



شکل روبه‌رو یک مبدل ۲۲۰V به ۱۲۰V را نشان می‌دهد. پیچه اولیه ۸۰۰۰ دور دارد. با فرض آرمانی بودن مبدل، تعداد دورهای پیچه ثانویه را پیدا کنید.

پاسخ: با توجه به داده‌ها داریم:

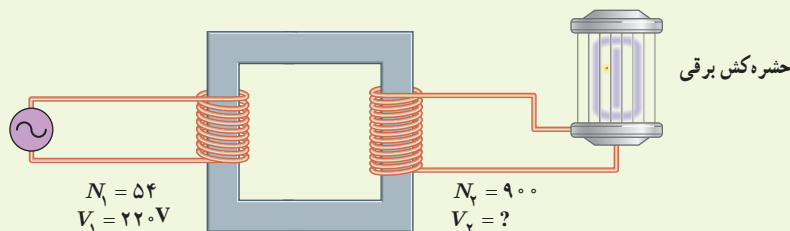
$$V_1 = ۲۲۰\text{V}, \quad V_2 = ۱۲۰\text{V}, \quad N_1 = ۸۰۰۰ \text{ دور}, \quad N_2 = ?$$

با جای‌گذاری این مقادیر در رابطه ۸-۴ داریم:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow \frac{۱۲۰\text{V}}{۲۲۰\text{V}} = \frac{N_2}{۸۰۰۰} \Rightarrow N_2 = ۴۳۶ \text{ دور}$$

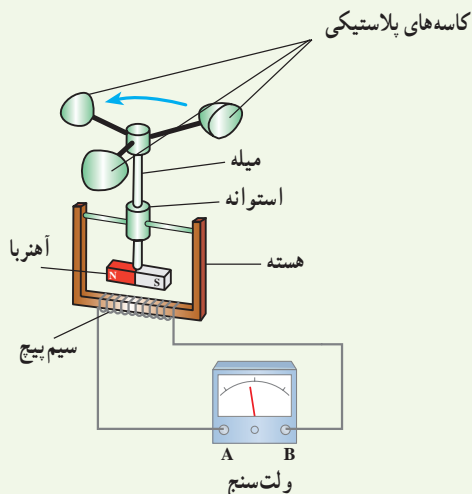
تمرین ۶-۴

برخی از وسیله‌های برقی، مانند حشره‌کش برقی، برای کار کردن نیاز به ولتاژهای بالا از مرتبه چند هزار ولت دارند. شکل زیر مبدلی را نشان می‌دهد که ولتاژ لازم را برای کار یک دستگاه حشره‌کش برقی فراهم می‌کند. اگر تعداد دور اولیه مبدل $N_1 = ۵۴$ و تعداد دور ثانویه $N_2 = ۹۰۰$ باشد، مبدل چه ولتاژی را برای کار کردن دستگاه حشره‌کش تأمین می‌کند؟



۱- لازم است توجه شود که ولتاژهای V_1 و V_2 تقریباً V/cm برابر ولتاژ بیشینه ورودی و خروجی مبدل هستند. بررسی دلایل این موضوع خارج از اهداف این کتاب است.

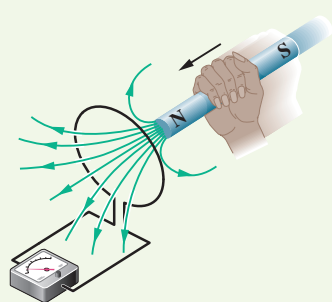
پ) برای بهبود و افزایش دقت کار دستگاه دو پیشنهاد ارائه دهید.



۴ سطح حلقه های پیچه ای که دارای ۱۰۰۰ حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازه آن 0.4 T و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت 0.1 s تغییر می کند و به 0.4 T در خلاف جهت اولیه می رسد. اگر سطح هر حلقه پیچه 5 cm^2 باشد، اندازه نیروی محرکه القایی متوسط در پیچه را حساب کنید.

۵ مساحت هر حلقه پیچه ای 3 cm^2 و پیچه متشکل از ۱۰۰۰ حلقه است. در ابتدا سطح پیچه ها بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت 0.2 s پیچه بچرخد و سطح حلقه ها موازی میدان مغناطیسی زمین شود، نیروی محرکه متوسط القایی در آن چقدر است؟ اندازه میدان زمین را 5 G در نظر بگیرید.

۳-۴ قانون لنز

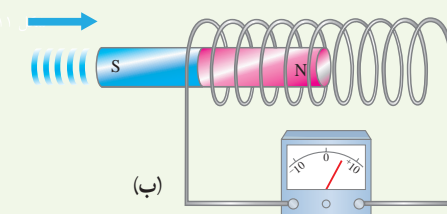
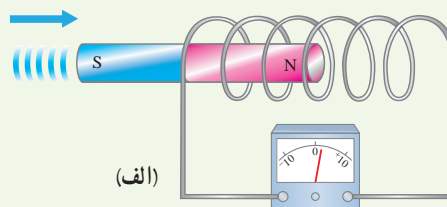


۶ قطب N یک آهنربا را مطابق شکل روبه رو به یک حلقه رسانا نزدیک می کنیم. جهت جریان القایی را در حلقه مشخص کنید.

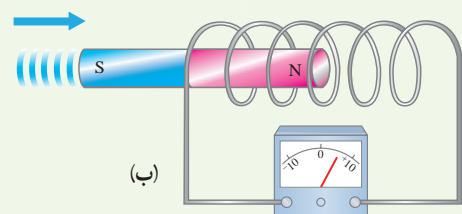
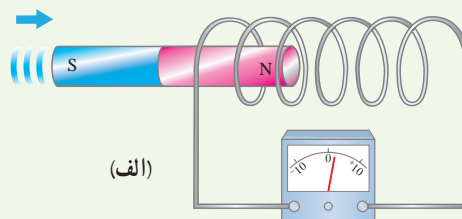
۷ دو آهنربای میله ای مشابه را مطابق شکل، به طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک سطح زمین رها می کنیم به طوری که یکی از آنها از حلقه رسانایی عبور می کند. اگر سطح زمین در محل

۱-۴ و ۲-۴ پدیده القای الکترومغناطیسی و قانون القای الکترومغناطیسی فاراده

۱ دو سیملوله با حلقه های با مساحت یکسان ولی با تعداد دور متفاوت را مطابق شکل های زیر به ولت سنج حساسی وصل کرده ایم. دریافت خود را از این شکل ها بنویسید. (آهنرباها مشابه اند و با تندی یکسانی به طرف سیملوله ها حرکت می کنند.)



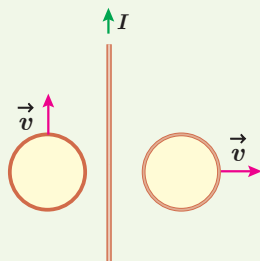
۲ دو سیملوله مشابه را مطابق شکل های زیر به ولت سنج حساسی وصل کرده ایم. دریافت خود را از شکل های زیر بنویسید. (آهنرباها مشابه اند ولی با تندی متفاوتی به طرف سیملوله حرکت می کنند.)



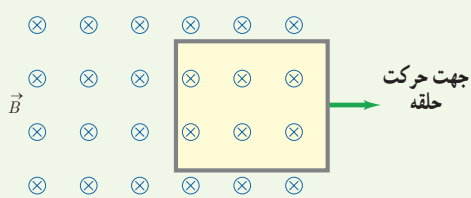
۳ شکل داده شده ساختمان یک بادسنج را نشان می دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد میله آن می چرخد و ولت سنج عددی را نشان می دهد.

الف) چرا چرخش میله سبب انحراف عقربه ولت سنج می شود؟
ب) آیا با افزایش تندی باد، عددی که ولت سنج نشان می دهد تغییر می کند؟ چرا؟

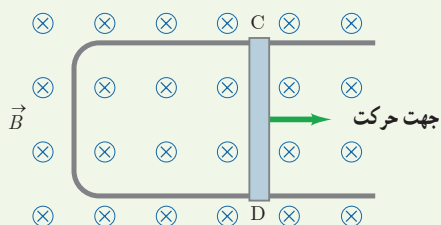
۱۱ دو حلقهٔ رسانا در نزدیکی یک سیم دراز حامل جریان ثابت I قرار دارند؛ این دو حلقه با تندی یکسان، ولی در جهت‌های متفاوت مطابق شکل زیر حرکت می‌کنند. جهت جریان القایی را در هر حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



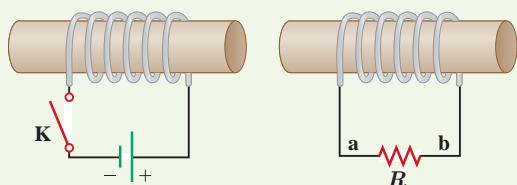
۱۲ حلقهٔ رسانای مستطیل شکلی را مطابق شکل زیر به طرف راست می‌کشیم و از میدان مغناطیسی درون سویی خارج می‌کنیم. جهت جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟



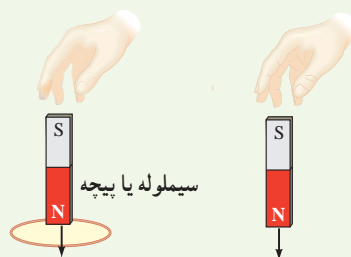
۱۳ شکل زیر رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی \vec{B} یکنواخت که عمود بر صفحهٔ شکل و رو به داخل صفحه است نشان می‌دهد. وقتی میلهٔ فلزی CD به طرف راست حرکت کند، جهت جریان القایی در مدار در چه جهتی است؟



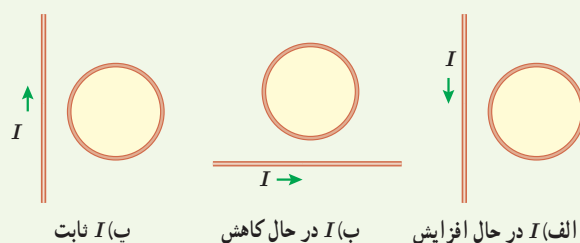
۱۴ در مدار نشان داده شده در شکل زیر، جهت جریان القایی را در مقاومت R در هر یک از دو حالت زیر با ذکر دلیل پیدا کنید: (الف) در لحظهٔ بستن کلید K، (ب) در لحظهٔ باز کردن کلید K.



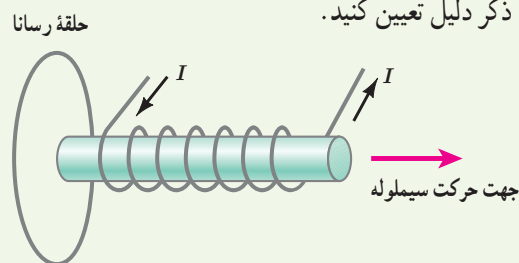
برخورد آهنرباها نرم باشد، مقدار فرورفتگی آهنرباها را در زمین با یکدیگر مقایسه کنید. (تأثیر میدان مغناطیسی زمین روی آهنرباها را نادیده بگیرید.)



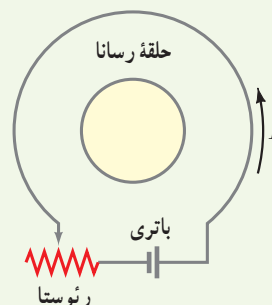
۸ جهت جریان القایی را در هر یک از حلقه‌های رسانای نشان داده شده در شکل‌های زیر تعیین کنید.



۹ شکل زیر سیملولهٔ حامل جریانی را نشان می‌دهد که در حال دور شدن از یک حلقهٔ رساناست. جهت جریان القایی را در حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



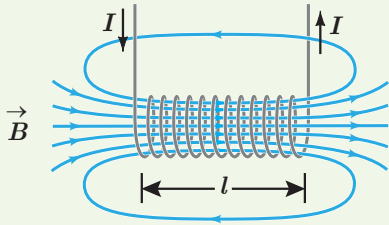
۱۰ اگر در مدار شکل زیر مقاومت رثوستا افزایش یابد، جریان القایی در حلقهٔ رسانای داخلی در چه جهتی ایجاد می‌شود؟



۱۸ مساحت هر حلقه و طول سیملوله شکل زیر به ترتیب 2 cm^2 و 8 cm است. اگر این سیملوله از 1000 حلقه نزدیک به هم تشکیل شده باشد،

الف) ضریب خودالقایی آن را پیدا کنید.

ب) چه جریانی از سیملوله بگذرد تا در میدان مغناطیسی آن 4 mJ انرژی ذخیره شود؟



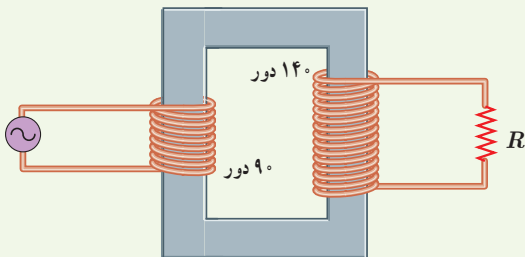
۴-۵ جریان متناوب

۱۹ جریان متناوبی که بیشینه آن 2 A و دوره آن 20 ms است، از یک رسانای 5 اهمی می‌گذرد.

الف) اولین لحظه‌ای که در آن جریان بیشینه است چه لحظه‌ای است؟ در این لحظه نیروی محرکه القایی چقدر است؟

ب) در لحظه $t = \frac{1}{4} \text{ s}$ ، جریان چقدر است؟

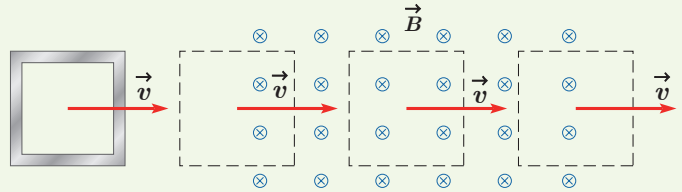
۲۰ در مبدل آرمانی شکل زیر، اگر بیشینه ولتاژ دوسر مقاومت R برابر 7 V باشد، بیشینه ولتاژ مولد چقدر است؟



۱۵ حلقه رسانای مربعی شکل، به طول ضلع 1 cm وارد میدان مغناطیسی درون‌سویی به اندازه 2 mT و سپس از آن خارج می‌شود.

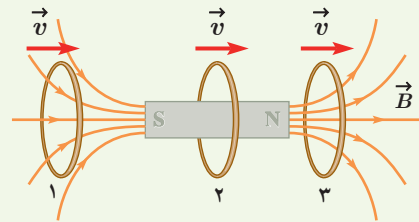
الف) در کدام مرحله شار عبوری از حلقه بیشینه است؟ مقدار شار گذرنده از حلقه در این حالت چقدر است؟

ب) در کدام وضعیت (ها) شار گذرنده از حلقه تغییر می‌کند؟ جهت جریان القایی را در حلقه تعیین کنید.



۱۶ حلقه رسانایی به طرف یک آهنربای میله‌ای حرکت می‌کند.

شکل زیر، حلقه را در سه وضعیت نسبت به آهنربا نشان می‌دهد. جهت جریان القایی را در حلقه برای هر وضعیت به طور جداگانه تعیین کنید.



۴-۴ القاها

۱۷ شکل زیر مداری را نشان می‌دهد؛ شامل یک القاگر (سیملوله)،

باتری، رئوستا و آمپرسنج که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند.

اگر بخواهیم بدون تغییر ولتاژ باتری، انرژی ذخیره شده در القاگر را زیاد کنیم چه راهی پیشنهاد می‌کنید؟

