۴

القای الکترومغناطیسی مبنای تولید انرژی الکتریکی در مولدهای جریان متناوب است. برای انتقال انرژی الکتریکی تا فاصله‌های خیلی دور از خطوط انتقال با ولتاژ بالا استفاده می‌شود.

فصل ۴

القای الکترومغناطیسی

۴ــ۱ــ پدیده‌ی القای الکترومغناطیسی

در فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که با استفاده از روش القای الکتریکی می‌توان اجسام رسانا را باردار کرد. در فصل قبل نیز با پدیده‌ی القای مغناطیسی آشنا شدیم. در پدیده‌ی اول در اثر القا، بار الکتریکی در ماده‌ی رسانا پدیدار می‌شود. در پدیده‌ی دوم، در اثر القا در ماده‌ی فرومغناطیس خاصیّت مغناطیسی ایجاد می‌شود. پدیده‌ی القایی دیگری نیز وجود دارد که در آن، جریان الکتریکی در یک رسانا القا می‌شود. این پدیده را القای الکترومغناطیسی می‌نامند. با انجام آزمایش زیر با این پدیده آشنا می‌شوید.

آزمایش ۴ــ۱

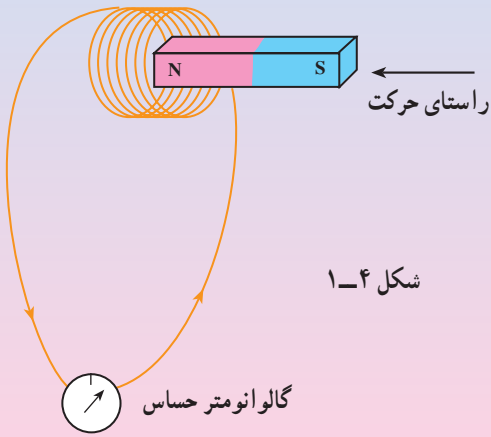
وسیله‌های آزمایش: میلی‌آمپرسنج صفر وسط (گالوانومتر)، آهنربای میله‌ای، پیچه و سیم رابط.

۱ــ با پیچه و گالوانومتر مداری مانند شکل ۴ــ۱ را ببندید.

۲ــ قطب N آهنربای میله‌ای را مطابق شکل به پیچه نزدیک کنید. آن چه را که در حین انجام‌دادن این عمل می‌بینید، یادداشت کنید.

۳ــ قطب N آهنربای میله‌ای را نزدیک پیچه نگه دارید. سپس آن‌را از پیچه دور کنید. آن‌چه را مشاهده می‌کنید، بنویسید.

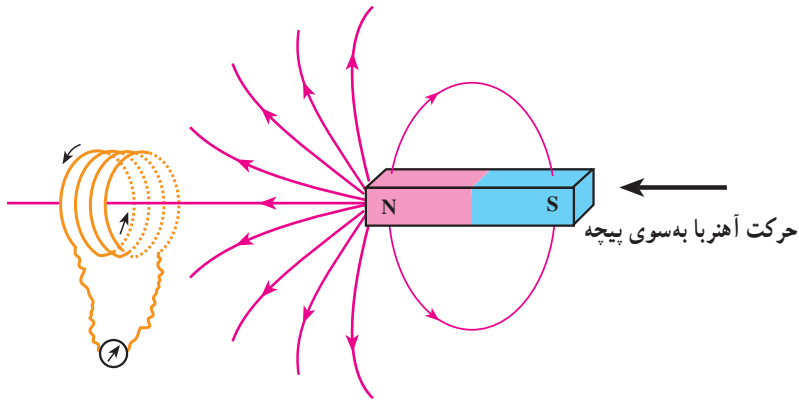
۴ــ بندهای ۲ و ۳ را با قطب S آهنربا نیز انجام دهید.



شکل ۴ــ۱

در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فارادی دانشمند انگلیسی و تقریباً همزمان با او جوزف هانری دانشمند امریکایی، با انجام‌دادن آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۴ـ۱ دریافتند که با دور و نزدیک‌کردن آهنربا به پیچه، عقربه‌ی میلی آمپرسنج منحرف می‌شود، و عبور جریانی را از مدار نشان می‌دهد ؛ مانند وقتی که در مدار یک مولّد وجود داشته باشد. یعنی با حرکت آهنربا نسبت به پیچه، یک جریان الکتریکی در مدار القا می‌شود. این پدیده را القای الکترومغناطیسی و جریان تولید شده را جریان الکتریکی القایی می‌نامند. القای الکترومغناطیسی اساس کار مولّد جریان متناوب، دینام، مبدل‌ها و بسیاری از وسیله‌های الکتریکی است.

دور یا نزدیک شدن آهنربا به پیچه باعث تغییر میدان مغناطیسی در محل پیچه می‌شود (شکل ۴ــ۲) و همین امر جریان الکتریکی القایی را در پیچه ایجاد می‌کند. پس می‌توان چنین نتیجه گرفت که : **تغییر اندازه‌ی میدان مغناطیسی در محل یک مدار بسته باعث القای جریان الکتریکی در آن مدار می‌شود.**

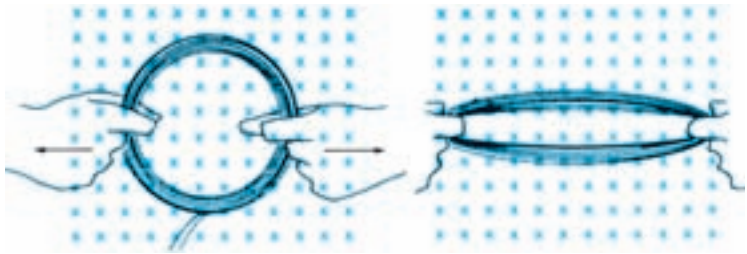


شکل ۴ــ۲

آزمایش نشان می‌دهد که علاوه‌بر روش گفته شده، به روش‌های دیگر نیز می‌توان در یک پیچه جریان الکتریکی القا کرد.

اگر پیچه‌ای از یک سیم انعطاف‌پذیر را مطابق شکل ۴ــ۳ در میدان مغناطیسی یکنواخت B قرار دهیم، سپس پیچه را تغییر شکل دهیم به‌گونه‌ای که مساحت حلقه‌ی پیچه تغییر کند، خواهیم دید که در حین این عمل جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که :

تغییر مساحت مدار بسته در میدان مغناطیسی نیز می‌تواند عامل ایجاد جریان القایی شود.



شکل ۴ــ۳ــ با تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود.

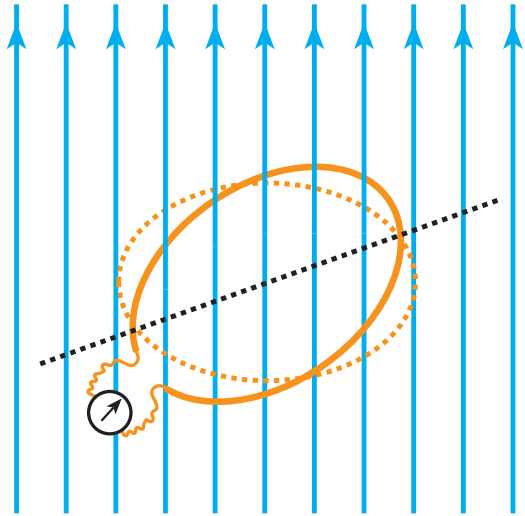
با انجام‌دادن فعالیّت زیر، با یک روش دیگر ایجاد جریان الکتریکی القایی آشنا می‌شوید.

فعالیت ۴ ـ ۱

یک آهنربای میله‌ای را در نزدیکی یک پیچه قرار دهید. بدون آنکه فاصله‌ی آهنربا از پیچه را تغییر دهید، پیچه را بچرخانید. هر تغییری را که در گالوانومتر مشاهده می‌کنید، بنویسید.

با چرخاندن پیچه در میدان مغناطیسی یکنواخت مطابق شکل ۴ــ۴، بزرگی میدان مغناطیسی و مساحت حلقه‌ی مدار تغییر نمی‌کند، ولی زاویه‌ی بین میدان مغناطیسی و سطح پیچه تغییر می‌کند. از این فعالیّت نیز می‌توان نتیجه گرفت که :

تغییر زاویه‌ی بین حلقه و راستای میدان مغناطیسی نیز می‌تواند عامل برقراری جریان الکتریکی القایی شود.



شکل ۴ــ۴ــ در حین چرخش پیچه در میدان مغناطیسی و تغییر زاویه‌ی بین پیچه و راستای میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود.

۴ــ۲ــ شار مغناطیسی

در آزمایش‌های قبل دیدیم که در اثر تغییر میدان مغناطیسی در حلقه، تغییر مساحت حلقه، و یا تغییر زاویه‌ی بین سطح حلقه و جهت میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود. کمیتی به نام شار مغناطیسی، این سه کمیت را دربر دارد. این کمیت نرده‌ای به‌صورت زیر معرفی می‌شود.

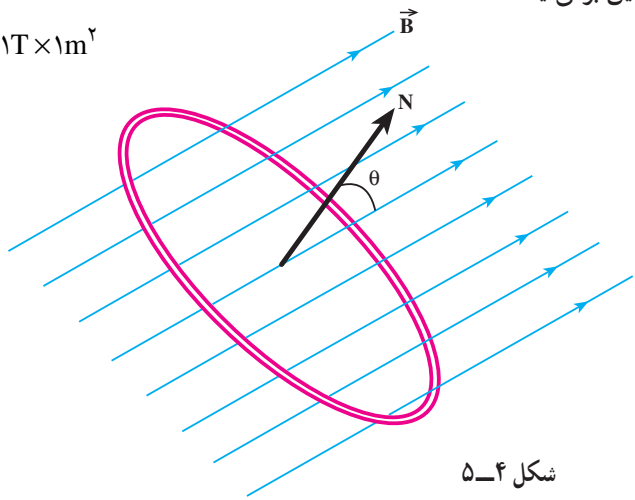
فرض کنید حلقه‌ای به مساحت A مطابق شکل ۴ــ۵ در میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ قرار دارد.

شار میدان مغناطیسی یکنواخت* که از سطح حلقه می‌گذرد به‌صورت زیر تعریف و با نماد Φ نمایش داده می‌شود.

$$\Phi = BA\cos\theta \qquad (۱ــ۴)$$

که در این رابطه، θ زاویه‌ی بین بردار میدان مغناطیسی $\vec{B}$ و نیم‌خط عمود بر سطح حلقه است (این نیم‌خط را می‌توان به‌طور اختیاری در هر یک از دو طرف سطح حلقه رسم کرد، ولی در هر مورد پس از انتخاب دیگر جهت آن را نباید عوض کرد). یکای شار مغناطیسی در SI وِبر (Wb) است. از معادله‌ی ۴ــ۱ چنین برمی‌آید :

$$1\,Wb = 1\,T \times 1\,m^2$$



شکل ۴ــ۵

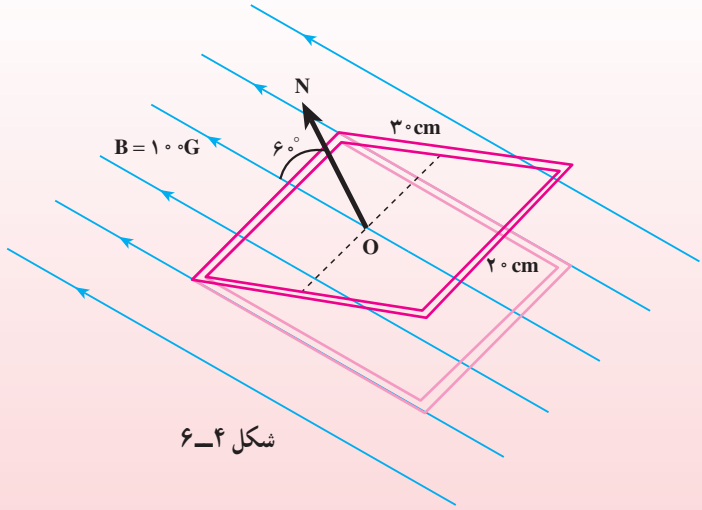
مثال ۴ــ۱

الف) شار مغناطیسی عبوری از سطح یک قاب مستطیلی شکل به‌ابعاد $20\,cm \times 30\,cm$ که خط عمود بر آن با میدان مغناطیسی یکنواخت ۱۰۰ گاؤس مطابق

* اگر میدان مغناطیسی یکنواخت نباشد، رابطه‌ی مربوط به شار مغناطیسی پیچیده‌تر می‌شود. این رابطه فراتر از سطح برنامه این کتاب است.

شکل ۴ــ۶ زاویه‌ی 60° می‌سازد را به‌دست آورید.

ب) اگر این قاب را بچرخانیم به‌طوری که زاویه‌ی خط عمود بر آن با خط‌های میدان مغناطیسی از 60° به 30° کاهش یابد، شار مغناطیسی چه‌قدر تغییر می‌کند؟



شکل ۴ــ۶

حل: الف) نیم‌خطِ ON را مطابق شکل عمود بر سطح رسم می‌کنیم. زاویه‌ی بین خط‌های میدان و نیم‌خط ON برابر 60° است؛ بنابراین داریم:

$$A = ۳۰\times۲۰ = ۶۰۰\,cm^۲ = ۶\times۱۰^{-۲}\,m^۲$$

$$B = ۱۰۰\,G = ۱۰^{-۲}\,T$$

$$\Phi = BA\cos\theta = ۱۰^{-۲}\times۶\times۱۰^{-۲}\cos۶۰^\circ = ۳\times۱۰^{-۴}\,Wb$$

ب) در وضعیت جدید داریم:

$$\theta' = ۳۰^\circ$$

درنتیجه، به‌دست می‌آوریم:

$$\Phi' = BA\cos\theta' = ۱۰^{-۲}\times۶\times۱۰^{-۲}\cos۳۰^\circ$$

$$\Phi' = ۵/۲\times۱۰^{-۴}\,Wb$$

تغییر شار حاصل از این چرخش برابر است با:

$$\Delta\Phi = \Phi'-\Phi = ۵/۲\times۱۰^{-۴} - ۳\times۱۰^{-۴}$$

$$\Delta\Phi = ۲/۲\times۱۰^{-۴}\,Wb$$

تمرین ۴ـ۱

حلقه‌ای به مساحت $50cm^2$ در یک میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ قرار دارد.

با فرض این که خط‌های میدان مغناطیسی $\vec{B}$ عمود بر سطح حلقه باشند، اگر بزرگی میدان مغناطیسی بدون تغییر جهت آن به اندازه‌ی $0/3\ T$ افزایش یابد، شار مغناطیسی که از سطح حلقه می‌گذرد، چه‌قدر تغییر می‌کند؟

با انجام‌دادن آزمایش‌ها و فعالیت‌های پیش درمی‌یابیم که تغییر هریک از کمیت‌های B، A و زاویه‌ی بین B و نیم‌خط عمود بر سطح باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، و تغییر شار مغناطیسی باعث ایجاد جریان الکتریکی القایی در مدار می‌شود. درست شبیه به وضعیتی که یک مولّد در مدار باشد، و نیروی محرکه‌ی آن جریانی در مدار ایجاد کرده باشد. علاوه‌بر این آزمایش‌ها نشان می‌دهند که هر چه تغییر شار سریع‌تر اتفاق افتد، جریان القایی و نیروی محرکه‌ی القایی بزرگ‌تر خواهد شد. مثلاً در آزمایش‌های مربوط به شکل‌های ۴ـ۲ تا ۴ـ۴ هر چه حرکتی که باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، سریع‌تر انجام شود، عقربه‌ی گالوانومتر بیش‌تر منحرف می‌شود، و این نشان می‌دهد که جریان بزرگ‌تری به‌وجود آمده است.

لنز، فیزیکدان آلمانی روس‌تبار، و فارادی پدیده‌ی القای الکترومغناطیسی را فرمول‌بندی کردند، و قانون‌های القای الکترومغناطیسی را بیان کردند.

۴ـ۳ـ قانون القای الکترومغناطیسی فارادی

بنابر قانون فارادی **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 محرکه‌ی القایی و درنتیجه جریان ایجاد شده در مدار بیش‌تر خواهد بود. قانون فارادی را می‌توان با رابطه‌ی زیر بیان کرد.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \qquad (۴ـ۲)$$

در این رابطه، ε نیروی محرکه‌ی القایی برحسب ولت و $\frac{d\Phi}{dt}$ آهنگ تغییر شار مغناطیسی (یعنی مشتق شار نسبت به زمان) برحسب وبر بر ثانیه ($\frac{Wb}{s}$) است. علامت منفی نشان‌دهنده‌ی جهت

نیروی محرکه‌ی القایی است که در بخش بعد در مورد آن بیش‌تر سخن می‌گوییم.

نیروی محرکه‌ی القایی در پیچه: هر پیچه را می‌توان به صورت چند حلقه سیم که به‌طور متوالی به هم بسته شده‌اند، در نظر گرفت. تغییر شار مغناطیسی در هر حلقه‌ی پیچه نیروی محرکه‌ای القا می‌کند. نیروی محرکه‌ی القایی کل، برابر مجموع نیروی محرکه‌ی القا شده در حلقه‌هاست. به بیان دیگر، نیروی محرکه‌ی القایی در هر پیچه با تعداد دورهای پیچه (N) نیز نسبت مستقیم دارد ؛ یعنی،

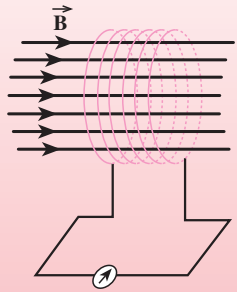
$$\mathcal{E} = -N\frac{d\Phi}{dt} \qquad (۳_۴)$$

اگر شار مغناطیسی که از پیچه‌ای با N حلقه می‌گذرد در بازه‌ی زمانی Δt به‌اندازه‌ی Φ تغییر کرده باشد، آهنگ متوسط تغییر شار مغناطیسی در بازه‌ی زمانی Δt برابر $\frac{\Phi}{\Delta t}$ خواهد بود. نیروی محرکه‌ی القایی متوسط (که با $\bar{\mathcal{E}}$ نمایش داده می‌شود) ایجاد شده در این پیچه از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$\bar{\mathcal{E}} = -N\frac{\Phi}{\Delta t} \qquad (۴_۴)$$

مثال ۴ـ۲

پیچه‌ای شامل ۲۰۰ دور سیم با مساحت سطح مقطع ۲ سانتی‌مترمربع مطابق شکل ۴ـ۷ در میدان مغناطیسی یکنواختی قرار گرفته است ؛ به گونه‌ای که خط‌های میدان بر سطح آن عمود است. بزرگی میدان مغناطیسی در بازه‌ی زمانی ۳/۲ میلی ثانیه و بدون تغییر جهت از ۰/۱۸T به ۰/۲۲T می‌رسد. اندازه‌ی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط چه‌قدر است؟



شکل ۴ـ۷

حل: ابتدا شاری را که در دو حالت اولیه و نهایی از پیچه می‌گذرد، محاسبه می‌کنیم.

$$\Phi_1 = B_1 A\cos\theta = ۰/۱۸\times۲\times۱۰^{-۴}\times\cos۰^\circ = ۳/۶\times۱۰^{-۵}\ \text{Wb}$$

$$\Phi_2 = B_2 A\cos\theta = ۰/۲۲\times۲\times۱۰^{-۴}\times\cos۰^\circ = ۴/۴\times۱۰^{-۵}\ \text{Wb}$$

تغییر شار مغناطیسی که از سطح پیچه می‌گذرد، برابر است با :

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = 4/4\times10^{-5} - 3/6\times10^{-5} = 0/8\times10^{-5}\ \text{Wb}$$

این تغییر شار در بازه‌ی زمانی $3/2\times10^{-3}$ ثانیه روی داده است ؛ بنابراین، آهنگ متوسط تغییر شار برابر است با :

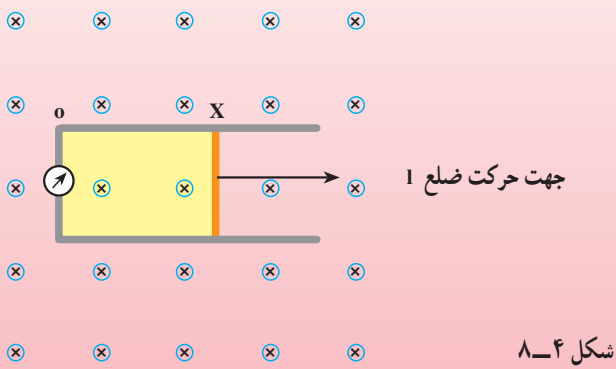
$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{0/8\times10^{-5}}{3/2\times10^{-3}} = 2/5\times10^{-2}\ \frac{\text{Wb}}{\text{s}}$$

درنتیجه بزرگی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط برابر است با :

$$|\bar{\varepsilon}| = \left|-N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right| = \left|-200\times2/5\times10^{-2}\right| = 0/5\ \text{V}$$

مثال ۴ـ۳

قاب مستطیلی شکلی که از سیم بدون روکش ساخته شده است مطابق شکل ۴ـ۸ در میدان مغناطیسی یکنواخت و ثابت با بزرگی $0/18\text{T}$ قرار گرفته است. سطح حلقه بر میدان مغناطیسی عمود است. اگر ضلع $l = 20\text{cm}$ با سرعت $v = 20\text{m/s}$ در جهتی که در شکل نشان داده شده است حرکت کند بزرگی نیروی محرکه‌ی القایی را محاسبه کنید.



شکل ۴ـ۸

حل: بنابر قانون فارادی، نیروی محرکه‌ی القایی برابر است با $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$ ، که

در آن Φ ، شار مغناطیسی که از حلقه می‌گذرد، برابر است با :

$$\Phi = AB\cos\theta$$

در این مسئله، B بزرگی میدان مغناطیسی ثابت است، همچنین θ زاویه‌ی میدان مغناطیسی با نیم‌خط عمود بر حلقه ثابت و برابر صفر است و $\theta = 0$ ، $\cos\theta = 1$ ، و تنها مساحت حلقه با زمان تغییر می‌کند. مساحت حلقه در هر لحظه برابر است با :

$$A = lx = lvt$$

درنتیجه آهنگ تغییر مساحت با زمان از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{dA}{dt} = \frac{d(lvt)}{dt} = lv$$

درنتیجه، داریم :

$$|\varepsilon| = \left|-\frac{d\Phi}{dt}\right| = \left|-\frac{d}{dt}(AB)\right| = B\frac{dA}{dt}$$

$$|\varepsilon| = lvB = ۰/۲ \times ۲۰ \times ۰/۱۸$$

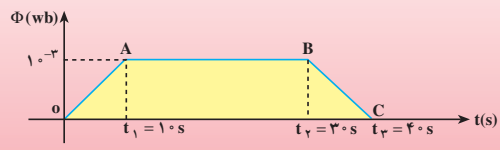
$$= ۰/۷۲\,v = ۷۲۰\,mv$$

تمرین ۴ـ۲

میدان مغناطیسی عمود بر یک قاب دایره‌ای شکل به قطر ۲۰ سانتی‌متر با زمان تغییر می‌کند و در مدت ۰/۵s از ۰/۲۸+ تسلا به ۰/۱۲− تسلا می‌رسد (تغییر علامت نشان می‌دهد که جهت میدان نیز وارون شده است). نیروی محرکه‌ی القایی متوسط در حلقه را حساب کنید.

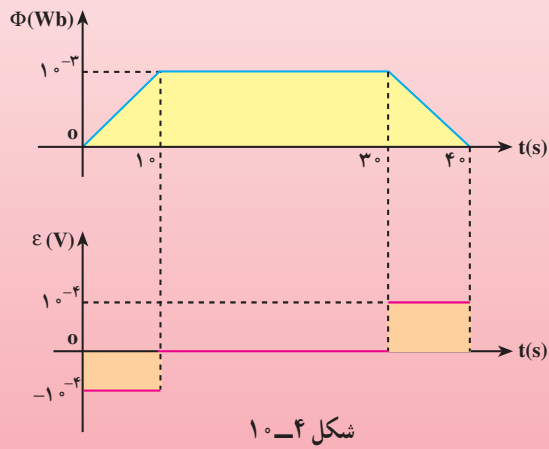
مثال ۴ـ۴

نمودار تغییرات شار مغناطیسی که از یک حلقه می‌گذرد برحسب زمان در منحنی شکل ۴ـ۹ داده شده است. نمودار تغییرات نیروی محرکه‌ی القا شده در حلقه را برحسب زمان رسم کنید.



شکل ۴ـ۹

حل: نمودار تغییرات شار مغناطیسی برحسب زمان نشان می‌دهد که در بازه‌ی زمانی $\Delta t_1 = t_1 - 0$ شار به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. درنتیجه، در این بازه نیروی محرکه‌ی القایی که برابر است با $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$، مقداری ثابت (برابر شیب خط OA) و منفی خواهد داشت و مقدار آن برابر است با -10^{-4} ولت. در بازه‌ی زمانی $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ شار ثابت مانده است. بنابراین، $\frac{d\Phi}{dt} = 0$ و نیروی محرکه‌ی القایی در این بازه برابر صفر است. در بازه‌ی زمانی $\Delta t_3 = t_3 - t_2$، شار به‌صورت خطی کاهش یافته است، $\frac{d\Phi}{dt} < 0$؛ و درنتیجه، نیروی محرکه‌ی القایی در این بازه مثبت است و مقدار آن برابر است با 10^{-4} ولت. نمودار این تغییرات در شکل ۴ــ۱۰ رسم شده است.



شکل ۴ــ۱۰

۴ــ۴ــ محاسبه‌ی جریان القایی

دیدیم که نیروی محرکه‌ی القایی در پیچه (و یا در حلقه) جریانی تولید می‌کند که به آن جریان القایی گفته می‌شود. اگر مقاومت پیچه برابر R باشد، جریان القا شده در آن از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

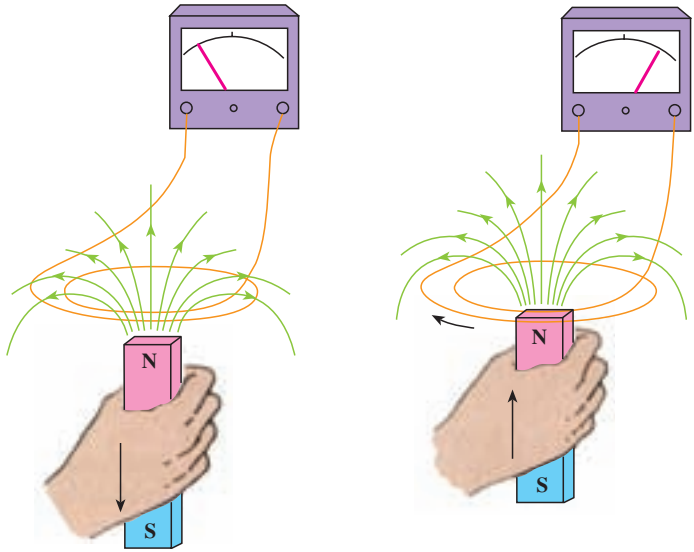
$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{N}{R}\frac{d\Phi}{dt} \qquad (۵ــ۴)$$

قانون لنز که به‌صورت زیر بیان می‌شود، در واقع دستورالعملی است برای تعیین جهت جریان القایی.

جریان القایی در مدار در جهتی است که آثار مغناطیسی ناشی از آن با عامل

به‌وجودآورنده‌ی جریان القایی یعنی تغییر شار مغناطیسی مخالفت می‌کند.

علامت منفی در رابطه‌ی ۴ــ۵ نشان‌دهنده‌ی همین مخالفت است. در عمل، برای به‌دست آوردن جهت جریان القایی در یک مدار از قانون لنز استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر قطب N یک آهنربای میله‌ای را مطابق شکل ۴ــ۱۱ الف به یک پیچه نزدیک کنیم، شار مغناطیسی که از پیچه می‌گذرد، به‌دلیل قوی‌ترشدن میدان در محل پیچه، افزایش می‌یابد. جهت جریان القایی در پیچه همان‌طور که در شکل ۴ــ۱۱ الف نشان داده شده است در جهتی است که میدان مغناطیسی حاصل از آن در خلاف جهت میدان آهنربای میله‌ای باشد، تا با افزایش شار مغناطیسی که از پیچه می‌گذرد مخالفت کند. یعنی قطب N آهنربا را به عقب براند.



(ب) (الف)

شکل ۴ــ۱۱ــ جریان القایی در جهتی است که با حرکت آهنربا به‌طرف پیچه مخالفت می کند.

تمرین ۴ـ۳

قطب N یک آهنربای میله‌ای را مطابق شکل ۴ــ۱۱ ب از پیچه دور می‌کنیم، با استفاده از قانون لنز جهت جریان القایی را در پیچه تعیین کنید.

مثال ۴ـ۶

سیملوله‌ای با ۵۰۰ دور و مقاومت الکتریکی ۱۰Ω و مساحت سطح مقطع $25cm^2$ در یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد. برای اینکه جریانی به‌شدت 1mA در سیملوله القا شود، میدان مغناطیسی با چه آهنگی باید تغییر کند؟ فرض کنید سطح مقطع سیملوله بر میدان مغناطیسی عمود است.

حل: زاویه‌ی بین میدان و خط عمود بر سطح سیملوله صفر است، درنتیجه داریم :

$$\Phi = BA$$

چون مساحت هر حلقه‌ی سیملوله ثابت است، تغییر Φ در اثر تغییر در بزرگی میدان مغناطیسی است. درنتیجه تغییر شار مغناطیسی برابر است با :

$$\Delta\Phi = A\Delta B$$

از سوی دیگر، با توجه به رابطه‌ی ۴ـ۴ اندازه‌ی جریان القایی برابر است با :

$$I = \left|\frac{N}{R}\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right| = \left|\frac{N}{R}\frac{A\Delta B}{\Delta t}\right|$$

$$= \frac{NA}{R}\left|\frac{\Delta B}{\Delta t}\right|$$

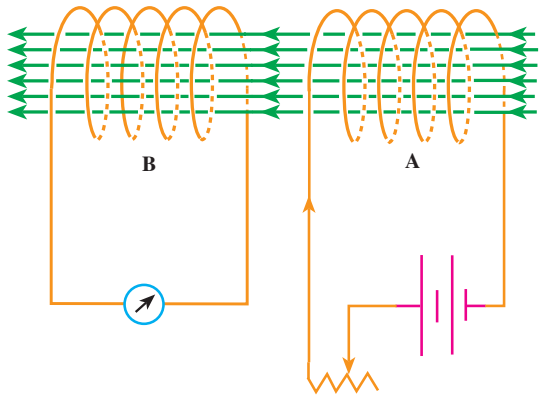
$$10^{-3}A = \frac{500\times 25\times 10^{-4}m^2}{10\Omega}\left|\frac{\Delta B}{\Delta t}\right|$$

$$\left|\frac{\Delta B}{\Delta t}\right| = 8\times 10^{-3}T/s$$

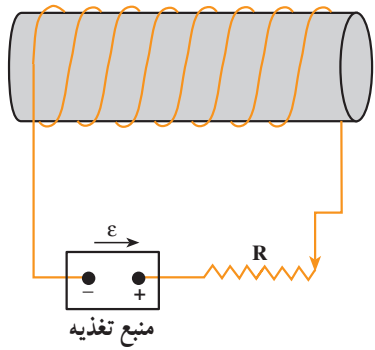
۴ـ۵ـ خودالقایی

در آزمایش‌ها و فعالیت‌هایی که از ابتدای این فصل تا این‌جا انجام داده‌اید، همواره یک عامل خارجی باعث تغییر شار مغناطیسی و در نتیجه، القای نیروی محرکه و جریان الکتریکی در مدار شده است. برای مثال در شکل ۴ـ۱۲تغییر جریان در مدار A باعث تغییر شار مغناطیسی در سیملوله‌ی B و ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در مدار B می‌شود.در ادامه به بررسی این موضوع می‌پردازیم که : تغییر جریان الکتریکی در یک مدار حتی در خود مدار نیروی محرکه‌ای را القا می‌کند. برای این کار مداری مطابق شکل ۴ـ۱۳ در نظر بگیرید.

فرض کنید که رئوستا با بیش‌ترین مقاومت در مدار قرار گرفته است و جریان ثابتی از مدار



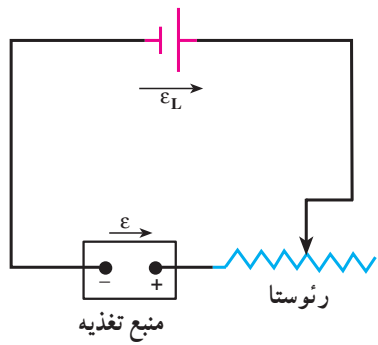
شکل ۴ــ۱۲ــ تغییر جریان در سیملوله‌ی A باعث ایجاد جریان در سیملوله‌ی B می‌شود.



شکل ۴ــ۱۳ــ خودالقایی ــ تغییر جریان در مدار نیروی محرکه‌ای در خود سیملوله القا می‌کند.

می‌گذرد. درنتیجه، شار مغناطیسی ثابت Φ از سیملوله می‌گذرد. حال اگر مقاومت رئوستا را به‌تدریج کاهش دهیم، جریان در سیملوله افزایش می‌یابد. در مدتی که جریان در حال افزایش است، شار مغناطیسی که از سیملوله می‌گذرد افزایش پیدا می‌کند. بنابر قانون فارادی این تغییر شار باعث ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در خود مدار می‌شود. روشن است که در تمام مدتی که جریان ثابتی از مدار می‌گذرد، چون شار مغناطیسی تغییر نمی‌کند نیروی محرکه‌ی القایی وجود ندارد. به این پدیده که تغییر جریان در یک مدار باعث ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در همان مدار می‌شود **خودالقایی** می‌گویند. در این مثال، جهت این نیروی محرکه‌ی القایی چنان است که می‌خواهد مانع افزایش شار مغناطیسی‌ای شود که منبع تغذیه ایجاد می‌کند. افزایش شار مغناطیسی به‌دلیل افزایش شدت جریانی است که از مدار می‌گذرد، درنتیجه نیروی محرکه‌ی القایی در واقع در جهتی است که با افزایش شدت جریان

مقابله می‌کند. به‌عبارت دیگر در این حالت نیروی محرکه‌ی القایی معادل نیروی محرکه‌ی باتری‌ای عمل می‌کند که در جهت مخالف منبع تغذیه مانند شکل ۴ــ۱۴ در مدار قرار گرفته باشد.



شکل ۴ــ۱۴ــ خودالقایی باعث می‌شود که سیملوله مانند پیل ε در مدار عمل کند.

فعالیت ۴ـ۲

با بحث در گروه خود، نتیجه‌ی آزمایشی را پیش‌بینی کنید که در آن مشابه آزمایش بالا عمل شود ؛ با این تفاوت که به‌جای کاهش مقاومت مدار، آن‌را افزایش دهند. دلیل وجود نیروی محرکه‌ی القایی و جهت آن‌را نیز مورد بحث قرار دهید.

به این ترتیب، دریافتیم که :

هرگاه جریانی که از یک سیملوله (یا یک پیچه) می‌گذرد، تغییر کند، در آن نیروی محرکه‌ای به‌وجود می‌آید که با عامل تغییر جریان مخالفت می‌کند و به آن نیروی محرکه‌ی خودالقایی گفته می‌شود. این پدیده را **خودالقایی** می‌نامند.

ضریب خودالقایی (یا القاییدگی): در پدیده‌ی خودالقایی، در اثر عبور یک جریان الکتریکی متغیر از سیملوله، میدان مغناطیسی متغیری به‌وجود می‌آید. بزرگی این میدان در هر لحظه متناسب با جریانی است که در آن لحظه از سیملوله می‌گذرد (به‌عنوان مثال رابطه‌های ۳ــ۷ و ۳ــ۹ را ملاحظه کنید)، یعنی :

$$B \propto I$$

این میدان مغناطیسی متغیر، شار مغناطیسی متغیری را از سیملوله عبور می‌دهد که با میدان مغناطیسی متناسب است و در نتیجه با شدت جریانی که از سیملوله می‌گذرد متناسب است، یعنی

$$\Phi \propto B \rightarrow \Phi \propto I$$

اگر ضریب تناسب را با نماد b نشان دهیم، داریم :

$$\Phi = bI$$

این شار مغناطیسی متغیر در هر حلقه‌ی سیملوله (یا پیچه) نیروی محرکه‌ای القا می‌کند که به‌صورت زیر است :

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi}{dt}$$

یا :

$$\varepsilon_1 = -b\frac{dI}{dt}$$

در نتیجه اگر سیملوله دارای N حلقه باشد، نیروی محرکه‌ی القا شده در سیملوله برابر خواهد بود با :

$$\varepsilon_L = N\varepsilon_1$$

$$\varepsilon_L = -Nb\frac{dI}{dt}$$

اگر $Nb = L$ قرار دهیم، نیروی محرکه‌ی خودالقایی سیملوله به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

$$\varepsilon_L = -L\frac{dI}{dt} \qquad (۵ - ۴)$$

L از مشخصات ساختمانی سیملوله است (به تعداد حلقه‌ها، طول سیملوله و... بستگی دارد) و **ضریب خودالقایی یا القاییدگی** سیملوله نام دارد. یکای خودالقایی «هانری» نام دارد که آن‌را با نماد H نمایش می‌دهند. **یک هانری ضریب خودالقایی سیملوله‌ای است که هرگاه جریانی که از آن عبور می‌کند با آهنگ یک آمپر بر ثانیه تغییر کند، نیروی محرکه‌ای برابر یک ولت در آن القا شود.**

به هر قسمتی از یک مدار که خاصیت خودالقایی داشته باشد، القاگر می‌گویند. پیچه و سیملوله در مداری با جریان متغیر القاگرند.

مثال ۴ـ۷

از سیملوله‌ای به ضریب خودالقایی ۰/۴H، جریان متغیری می‌گذرد که با زمان به‌صورت $I = 4t - 3$ تغییر می‌کند (I برحسب آمپر و t برحسب ثانیه است). بزرگی نیروی محرکه‌ی القا شده را محاسبه کنید.

حل: داریم

$$|\varepsilon| = \left| L\frac{dI}{dt} \right|$$

$\frac{dI}{dt}$ را از رابطه‌ی جریان برحسب زمان که در مسئله داده شده محاسبه می‌کنیم.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt}(۴t - ۳) = ۴ \ \ A/s$$

در نتیجه، به‌دست می‌آوریم

$$|\varepsilon| = ۰/۴ \times ۴ = ۱/۶ \ \ V$$

محاسبه‌ی ضریب خودالقایی سیملوله: در فصل۳ دیدیم که میدان مغناطیسی حاصل از عبور جریانی به شدت I از سیملوله‌ای به طول l که دارای N حلقه است، در داخل سیملوله یکنواخت و موازی با محور سیملوله است و از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$B = \mu_{\circ}\frac{NI}{l}$$

علاوه بر این دیدیم که اگر سیملوله دارای هسته‌ای باشد، میدان مغناطیسی سیملوله تقویت می‌شود. میدان مغناطیسی سیملوله‌ای که هسته داشته باشد، در داخل سیملوله از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$B = k\mu_{\circ}\frac{N}{l}I \qquad (۶_۴)$$

که در آن k ضریبی است که به جنس هسته‌ی داخل سیملوله بستگی دارد و به آن **تراوایی نسبی مغناطیسی هسته** می‌گویند. با توجه به آن‌که میدان مغناطیسی در داخل سیملوله یکنواخت و موازی با محور سیملوله است، شار مغناطیسی حاصل از آن که از سیملوله می‌گذرد برابر است با :

$$\Phi_{AB} = k\mu_{\circ}\frac{NA}{l}I \qquad (۷_۴)$$

نیروی محرکه‌ی خودالقایی برابر است با :

$$\varepsilon_L = -N\frac{d\Phi}{dt} \qquad (۸_۴)$$

با قرار دادن Φ از رابطه‌ی ۴ ــ ۷ در رابطه‌ی ۴ــ ۸ به‌دست می‌آوریم :

$$\varepsilon_L = -N\frac{d}{dt}(k\mu_\circ \frac{NA}{l} I)$$

یعنی :

$$\varepsilon_L = -k\mu_\circ \frac{N^2 A}{l} \frac{dI}{dt} \qquad (۹_۴)$$

از مقایسه‌ی رابطه‌های ۴ ــ ۵ و ۴ ــ۹ به‌دست می‌آوریم :

$$L = k\mu_\circ \frac{N^2 A}{l} \qquad (۱۰_۴)$$

این رابطه نشان می‌دهد که ضریب خودالقایی از مشخصه‌های ساختاری القاگر است و به‌جریان متغیری که از القاگر می‌گذرد بستگی ندارد.

مثال ۴ ــ ۸

سیملوله‌ای بدون هسته، با سطح مقطع $۱۰cm^2$ و طول ۵۰cm در نظر بگیرید. اگر تعداد حلقه‌های این سیملوله برابر ۲۰۰۰ باشد، ضریب خودالقایی آن را حساب کنید.

حل: چون سیملوله بدون هسته است، $k = ۱$ است بنابراین با استفاده از رابطه‌ی ۴ ــ۱۰ داریم :

$$L = ۱ \times ۴\pi \times ۱۰^{-۷} \times \frac{(۲۰۰۰)^2 \times (۱۰ \times ۱۰^{-۴})}{۰/۵}$$

در نتیجه :

$$L = ۱۰^{-۲} H = ۱۰ mH$$

تمرین ۴ ــ۴

دو سیملوله با سطح مقطع و تعداد دور یکسان درنظر بگیرید. اگر طول یکی از سیملوله‌ها دو برابر دیگری باشد، نسبت ضریب خودالقایی آن‌ها را محاسبه کنید.

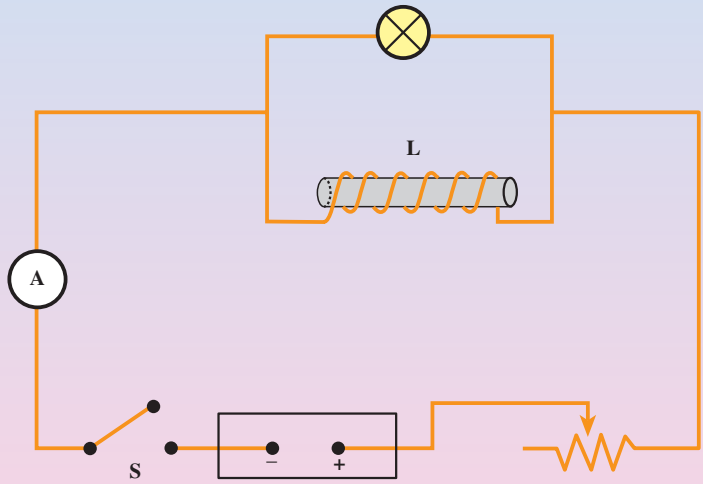
آزمایش ۴ـ۲

وسیله‌های آزمایش: لامپ ۱۲ ولتی، منبع تغذیه، رئوستا، کلید، سیم رابط، سیملوله (با ۲۰۰ تا ۴۰۰ دور) و هسته‌ی آهنی.

۱ــ مداری مطابق شکل ۴ ــ ۱۵ ببندید.

۲ــ رئوستا را به‌گونه‌ای تنظیم کنید تا لامپ با روشنایی ضعیف تابش کند.

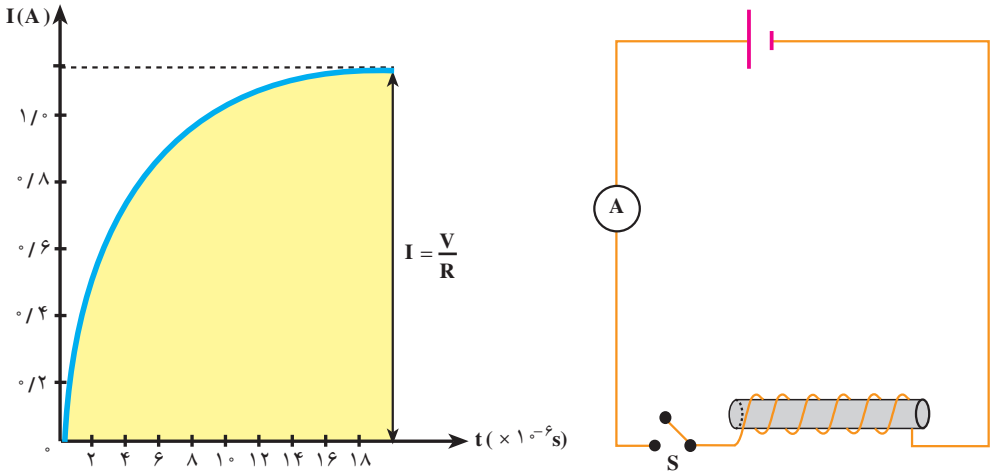
۳ــ کلید S را سریعاً قطع کنید و آن‌چه را مشاهده می‌کنید پس از بحث در گروه به‌کلاس گزارش کنید.



شکل ۴ــ ۱۵

دیدیم که تغییر جریان در یک القاگر باعث ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در آن می‌شود. ایجاد نیروی محرکه القایی باعث می‌شود جریان به سرعت به مقدار نهایی خود نرسد. برای مثال مداری مانند شکل ۴ ــ۱۶ الف در نظر بگیرید که در آن یک سیملوله با تعداد دور نسبتاً زیاد به دو سر یک باتری بسته شده است. هنگامی که کلید S را می‌بندیم، جریان به‌طور آنی به مقداری که از قانون اهم $(I = \frac{V}{R})$ به‌دست می‌آید نمی‌رسد، بلکه با زمان تغییر می‌کند. منحنی تغییر جریان با زمان به‌صورت منحنی شکل ۴ــ۱۶ب است.

این اثر را می‌توانیم به این صورت توجیه کنیم که به هنگام بستن کلید، جریان از صفر روبه



(ب) چگونگی تغییر جریان با زمان به هنگام بستن کلید

(الف) سیمی به مقاومت R را به‌صورت یک سیملوله بسته‌ایم

شکل ۴ ــ۱۶ــ اثر خودالقایی در مدار شامل سیملوله (اعداد روی شکل مربوط به یک آزمایش خاص است)

افزایش می‌گذارد و نیروی محرکه‌ی خودالقایی در جهت مخالف نیروی محرکه‌ی مولد در سیملوله القا می‌شود، در نتیجه جریان در مدار کم‌تر از حالتی است که خودالقا در مدار وجود نداشته باشد. یعنی جریان کم‌تر از مقداری است که از رابطه‌ی $I = \frac{V}{R}$ به‌دست می‌آید. با گذشت زمان و نزدیک شدن جریان به I، آهنگ تغییر جریان کندتر می‌شود. بنابراین نیروی محرکه‌ی خودالقایی نیز کوچک‌تر می‌شود. هنگامی که جریان برابر I می‌شود، دیگر جریان تغییر نمی‌کند و نیروی محرکه‌ی خودالقایی به صفر می‌رسد.

فعالیت ۴ ــ ۳

با توجه به مطالب بالا نتیجه‌ی آزمایش ۴ ــ۲ را توجیه کنید.

۴ ــ۶ ــ انرژی ذخیره شده در القاگر

هنگامی که در دو سر القاگری اختلاف پتانسیل برقرار شود، از طرف مولد به القاگر انرژی داده می‌شود. بخشی از این انرژی در مقاومت R تلف می‌شود و بقیه‌ی آن در میدان مغناطیسی سیملوله ذخیره می‌شود، این انرژی از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \qquad (۱۱ــ ۴)$$

این انرژی در میدان مغناطیسی حاصل از عبور جریان از القاگر ذخیره می‌شود.

مثال ۴ـ۹

سیملوله‌ای با ضریب خودالقایی $0/4H$ و مقاومت 100Ω مفروض است. سیملوله را مطابق شکل ۴ ــ ۱۵ به یک باتری ۶ ولتی وصل می‌کنیم. چه مقدار انرژی در سیملوله ذخیره می‌شود؟

حل: پس از آنکه جریان در سیملوله به مقدار نهایی خود رسید، داریم :

$$I=\frac{V}{R}=\frac{6}{100}=0/06A$$

با استفاده از رابطه‌ی ۴ــ۱۱ انرژی ذخیره شده در القاگر برابر است با :

$$U=\frac{1}{2}LI^2$$

$$=\frac{1}{2}(0/4)(0/06)^2=7/2\times10^{-4}J$$

تمرین ۴ـ۵

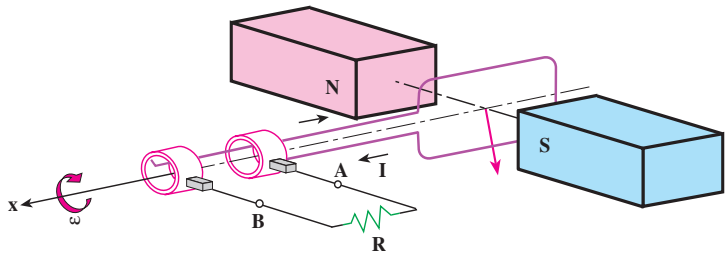
رابطه‌ای برای انرژی ذخیره شده در یک سیملوله‌ی بدون هسته بر حسب ویژگی‌های سیملوله به‌دست آورید.

۴ــ۷ــ جریان متناوب

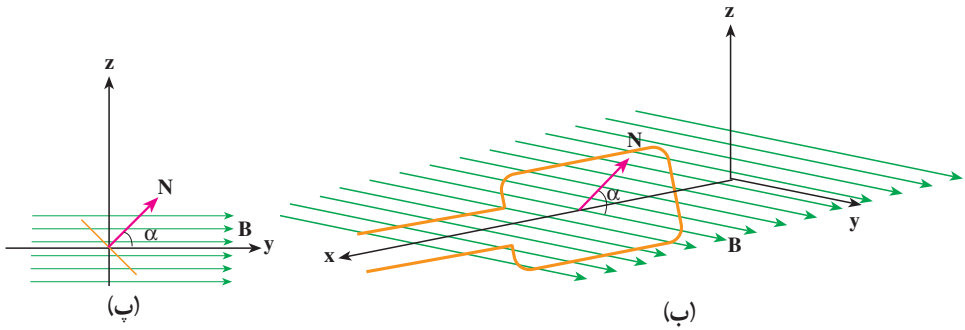
یکی از کاربست‌های مهم القای الکترومغناطیسی، تولید جریان متناوب است. دیدیم که برای ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی باید شار عبوری از مدار تغییر کند، و شار مغناطیسی‌ای که از یک پیچه می‌گذرد از رابطه‌ی $\Phi_B=AB\cos\alpha$ محاسبه می‌شود، که در آن α زاویه‌ی بین نیم‌خط عمود بر سطح پیچه و میدان مغناطیسی است.

ساده‌ترین راه برای تغییر شار، تغییر زاویه‌ی α است. به همین لحاظ متداول‌ترین روش تولید جریان القایی، تغییر زاویه‌ی α است.

شکل ۴ــ۱۷ الف پیچه‌ای را نشان می‌دهد که می‌تواند در میدان مغناطیسی یکنواخت حول محور x دوران کند. محور y را منطبق بر راستای میدان مغناطیسی انتخاب کرده‌ایم، شکل‌های ۴ــ۱۷ ب و پ نشان می‌دهند که چگونه زاویه‌ی α ، با چرخش پیچه حول محور x، تغییر می‌کند.



(الف) پیچه در میدان مغناطیسی یکنواخت می‌چرخد



شکل ۴ ــ ۱۷

اگر زمان یک دور چرخش پیچه T ثانیه باشد، پیچه در مدت t ثانیه $\frac{t}{T}$ دور خواهد چرخید. هر دور کامل برابر 2π رادیان است. در نتیجه اگر پیچه در لحظه‌ی $t = 0$ در وضعیت عمود بر میدان مغناطیسی ($\theta = 0$) باشد، پس از گذشت t ثانیه در وضعیت زیر خواهد بود :

$$\theta = 2\pi \frac{t}{T} \text{ رادیان} \qquad (۱۲ــ ۴)$$

T یعنی زمان چرخش یک دور کامل را «**دوره**» یا «**زمان تناوب**» می‌نامند. $\frac{2\pi}{T}$ را با ω نمایش می‌دهند و به آن بسامد زاویه‌ای می‌گویند. در نتیجه داریم :

$$\theta = \omega t$$

در نتیجه شار مغناطیسی $AB\cos\alpha$ Φ که در لحظه‌ی t از پیچه عبور می‌کند برابر است با :

$$\Phi = AB\cos\omega t \qquad (۱۳ ــ ۴)$$

نیروی محرکه‌ی القا شده در پیچه با توجه به قانون فارادی از رابطه‌ی ۴ــ۳ محاسبه می‌شود

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} = -NAB\frac{d(\cos\omega t)}{dt}$$

و یا

$$\varepsilon = NAB\omega \sin\omega t \qquad (۱۴ــ ۴)$$

یعنی نیروی محرکه‌ای که در پیچه القا می‌شود با زمان تغییر می‌کند. بیش‌ترین مقدار این نیروی محرکه مربوط به زمانی است که برای آن $\sin\omega t = ۱$ باشد و برابر است با $\varepsilon_m = NAB\omega$. در نتیجه می‌توانیم بنویسیم :

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin\omega t \qquad (۱۵ـ ۴)$$

این رابطه نشان می‌دهد که نیروی محرکه‌ی القا شده به‌طور دوره‌ای تغییر می‌کند.

تمرین ۴ـ۶

(الف) نمودار تغییرات شاری که از مدار پیچه در شکل ۴ ــ ۱۷ الف می‌گذرد را بر حسب زمان در طول یک دوره‌ی چرخش پیچه رسم کنید.

(ب) نمودار تغییرات نیروی محرکه‌ی القا شده در پیچه در شکل ۴ــ ۱۷ الف را بر حسب زمان در طول یک دوره‌ی چرخش پیچه رسم کنید.

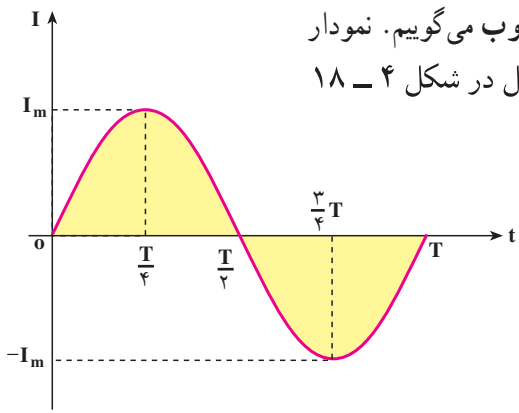
اگر مقاومت مدار برابر R باشد، جریان حاصل از این نیروی محرکه از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_m}{R}\sin\omega t \qquad (۱۶ ــ ۴)$$

این رابطه نشان می‌دهد که جریان نیز با زمان تغییر می‌کند. بیش‌ترین مقدار جریانی که از مدار می‌گذرد، مربوط به زمانی است که $\sin\omega t = ۱$ باشد، و برابر است با $I_m = \frac{\varepsilon_m}{R}$. در نتیجه می‌توانیم بنویسیم

$$I = I_m \sin\omega t \qquad (۱۷ــ ۴)$$

رابطه‌ی ۴ ــ۱۷ نشان می‌دهد که جریان الکتریکی تولید شده در مدار پیچه به‌طور سینوسی تغییر می‌کند. به یک چنین جریانی، **جریان متناوب** می‌گوییم. نمودار تغییرات جریان متناوب در یک دوره‌ی کامل در شکل ۴ ــ ۱۸ رسم شده است.



شکل ۴ــ ۱۸ــ نمودار تغییرات جریان متناوب سینوسی در یک دوره

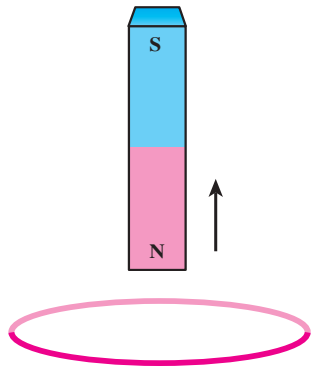
فعالیت ۴ـ۴

با بحث در گروه خود و با استفاده از نمودار شکل ۴ ــ ۱۸ جهت جریان متناوب را در هر بازه‌ی زمانی برابر $\frac{۱}{۴}$ دوره مورد بررسی قرار دهید، و نتیجه را به کلاس گزارش کنید.

در صنعت برای ایجاد جریان متناوب از مولدهای مخصوصی استفاده می‌شود که به آن‌ها «**مولدهای صنعتی جریان متناوب**» گفته می‌شود. در مولدهای صنعتی، پیچه‌ها را ساکن گرفته و آهنربا را در مقابل آن‌ها می‌چرخانند.

تمرین‌های فصل چهارم

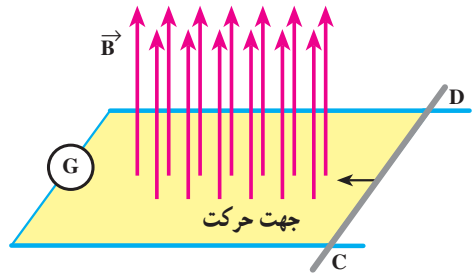
۱ــ قطب شمال یک آهنربا، مطابق شکل ۴ ــ ۱۹ از یک حلقه‌ی فلزی دور می‌شود. جهت جریان القایی را در حلقه مشخص کنید.



شکل ۴ ــ ۱۹

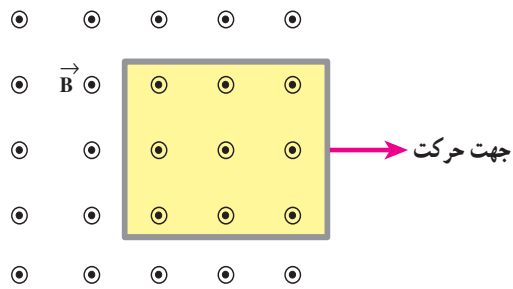
۲ــ یک آهنربای میله‌ای را به‌طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک زمین رها می‌کنیم. اگر سطح زمین در محل برخورد آهنربا با آن نرم باشد آهنربا در زمین فرو می‌رود. اگر این آزمایش را بار دیگر در وضعیتی تکرار کنیم که آهنربا در حین سقوط از درون حلقه‌های یک پیچه بگذرد، مقدار فرورفتگی آهنربا در زمین چه تغییری خواهد کرد؟ چرا؟ (از اثر مغناطیسی زمین بر روی آهنربا چشم‌پوشی کنید.)

۳ــ دو میله‌ی رسانای موازی در صفحه‌ای عمود بر میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ قرار دارند. این میله‌ها توسط گالوانومتری مطابق شکل ۴ــ۲۰ به یک‌دیگر بسته شده‌اند. میله‌ی رسانای CD می‌تواند روی دو میله‌ی موازی بلغزد. اگر میله‌ی CD در جهت نشان داده شده در شکل به حرکت درآید جهت جریان القایی در مدار در چه سویی است؟



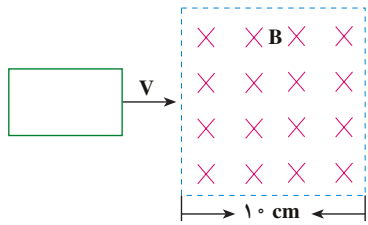
شکل ۴ــ۲۰

۴ ــ پیچه‌ی مستطیلی را که شکل ۴ــ۲۱ نشان داده شده است به‌طرف راست می‌کشیم و از میدان مغناطیسی برونسو خارج می‌کنیم. جهت جریان القایی در پیچه در چه سویی است؟



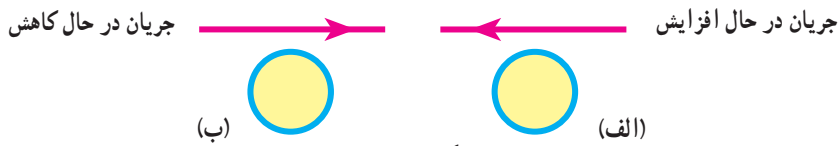
شکل ۴ــ۲۱

۵ ــ حلقه‌ی فلزی مستطیل شکلی به ابعاد $3cm \times 5cm$ مطابق شکل ۴ــ۲۲ با سرعت ثابت $2m/s$ وارد میدان مغناطیسی یکنواخت $0/02T$ می‌شود و از طرف دیگر آن خارج می‌شود. نمودار تغییرات شاری که از حلقه می‌گذرد و نیروی محرکه‌ی القا شده در آن را بر حسب زمان رسم کنید.



شکل ۴ــ۲۲

۶ــ جهت جریان القایی در هر یک از حلقه‌های دایره‌ای نشان داده شده در شکل ۴ــ۲۳ در چه سویی است؟



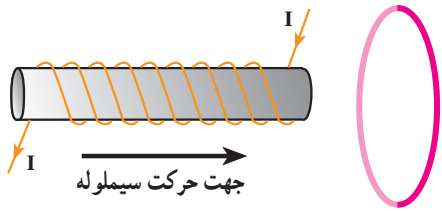
شکل ۴ــ۲۳

۷ــ پیچه‌ای که دارای ۱۰۰۰ حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازه‌ی آن $0/04\,T$ و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت $0/01\,s$ تغییر کرده و به $0/04\,T$ در خلاف جهت اولیه می‌رسد. اگر سطح هر حلقه‌ی پیچه $50\,cm^2$ باشد،

الف ــ اندازه‌ی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط در پیچه را حساب کنید.

ب ــ جهت جریان القایی را تعیین کنید.

۸ــ در شکل ۴ــ۲۴ اگر سیملوله را در جهت نشان داده شده در شکل به حلقه نزدیک کنیم جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟



شکل ۴ــ۲۴

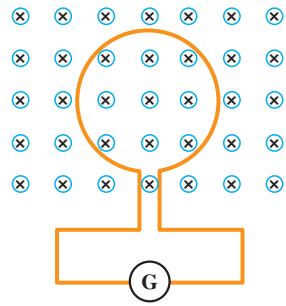
۹ــ پیچه‌ای با سطح مقطع $30\,cm^2$ دارای ۱۰۰۰ حلقه است و در ابتدا بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت $0/02\,s$ پیچه بچرخد و موازی میدان مغناطیسی زمین قرار بگیرد، نیروی محرکه‌ی متوسط القایی در آن چه‌قدر است؟ اندازه‌ی میدان زمین را $0/5\,G$ در نظر بگیرید.

۱۰ــ اگر شار مغناطیسی عبوری از حلقه‌ای مطابق رابطه‌ی زیر (در SI) تغییر کند :

$$\Phi_B = (4t^2 + 3t - 1) \times 10^{-3}$$

بزرگی نیروی محرکه‌ی القایی در حلقه در لحظه‌ی $t = 2\,s$ چه‌قدر است؟

۱۱ــ حلقه‌ای مطابق شکل ۴ــ۲۵ درون یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد. اگر اندازه‌ی میدان افزایش یابد، جهت جریان القایی را روی حلقه مشخص کنید.



شکل ۴ــ۲۵

۱۲ــ جریان متناوبی که بیشینه‌ی آن ۲A و دوره‌ی آن ۰/۰۲s است از یک رسانای ۵ اهمی می‌گذرد. (الف) در چه لحظه‌هایی شدت جریان بیشینه خواهد بود؟ در این لحظه‌ها نیروی محرکه‌ی القایی چه‌قدر است؟ (ب) در لحظه‌ی $t = \frac{۱}{۴۰۰}s$ ، شدت جریان چه‌قدر است؟

۱۳ــ شکل ۴ــ۲۶ دینام یک دوچرخه را نشان می‌دهد، تحقیق کنید چگونه این دینام، برق مورد نیاز برای روشن شدن لامپ دوچرخه را تولید می‌کند.

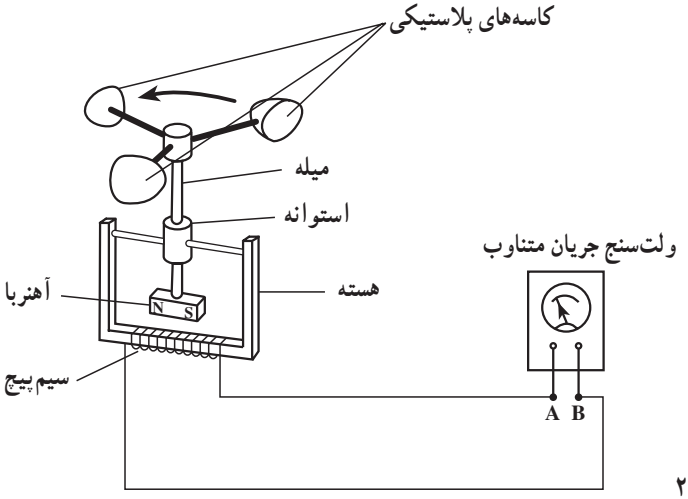
شکل ۴ــ ۲۶ــ دینام دوچرخه

۱۴ــ شکل ۴ــ۲۷ ساختمان یک بادسنج را نشان می‌دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد میله‌ی آن می‌چرخد و ولت‌سنج عددی را نشان می‌دهد.

الف) چرا چرخش میله سبب انحراف عقربه‌ی ولت‌سنج می‌شود؟

ب) آیا با افزایش سرعت باد، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ چرا؟

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



شکل ۴ ــ ۲۷