

۲



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

القای الکترو مغناطیسی

۴-۱- پدیده‌ی القای الکترو مغناطیسی

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 خاصیت مغناطیسی ایجاد می‌شود. پدیده‌ی القای دیگری نیز وجود دارد که در آن، جریان الکتریکی در یک رسانا القا می‌شود. این پدیده را القای الکترو مغناطیسی می‌نامند. با انجام آزمایش زیر با این پدیده آشنا می‌شوید.

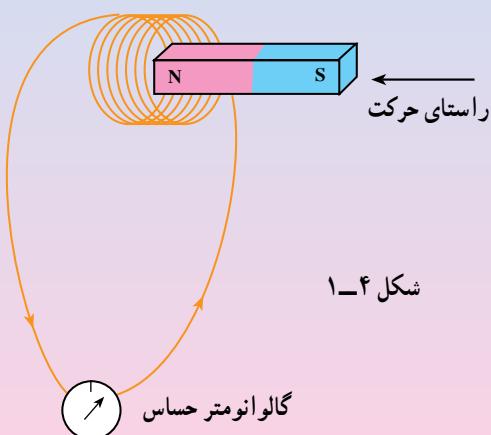
آزمایش ۴-۱

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

- ۱- با پیچه و گالوانومتر مداری مانند شکل ۴-۱ را بیندید.
- ۲- قطب N آهنربای میله‌ای را مطابق شکل به پیچه نزدیک کنید. آن چه را که در حین انجام دادن این عمل می‌بینید، یادداشت کنید.
- ۳- قطب N آهنربای میله‌ای را نزدیک پیچه نگه دارید. سپس آن را از پیچه دور

کنید. آن چه را مشاهده می‌کنید، بنویسید.

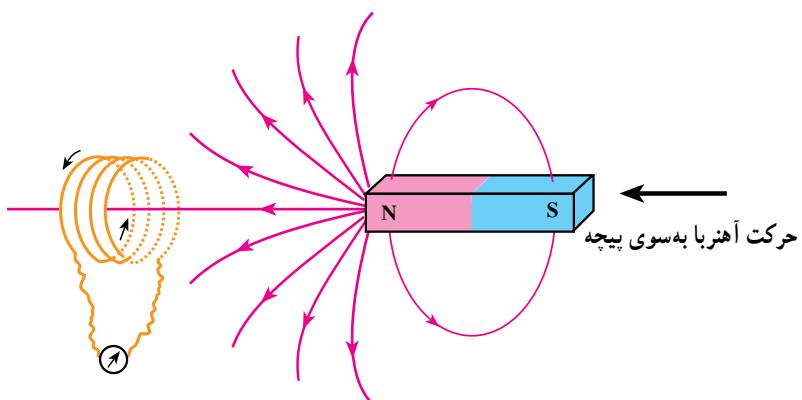
- ۴- بندهای ۲ و ۳ را با قطب S آهنربای نیز انجام دهید.



شکل ۴-۱

در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فارادی دانشمند انگلیسی و تقریباً همزمان با او جوزف هانری دانشمند امریکایی، با انجام دادن آزمایش‌های مشابه آزمایش ۱-۴ دریافتند که با دور و تزدیک کردن 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.

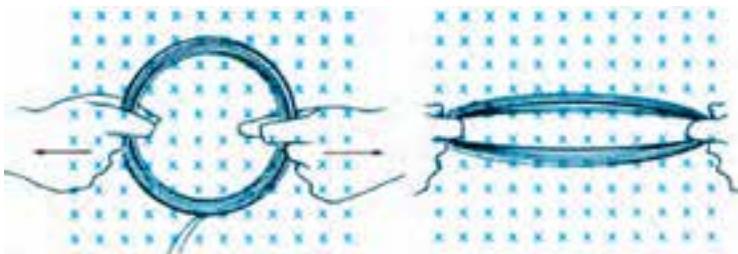
دور یا تزدیک شدن آهنربا به پیچه باعث تغییر میدان مغناطیسی در محل پیچه می‌شود (شکل ۲-۴) و همین امر جریان الکتریکی القایی را در پیچه ایجاد می‌کند. پس می‌توان چنین نتیجه گرفت که: تغییر اندازه‌ی میدان مغناطیسی در محل یک مدار بسته باعث القای جریان الکتریکی در آن مدار می‌شود.



شکل ۲-۴

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

اگر پیچه‌ای از یک سیم انعطاف‌پذیر را مطابق شکل ۴-۳ در میدان مغناطیسی یکنواخت B قرار دهیم، سپس پیچه را تغییر شکل دهیم به گونه‌ای 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 ۴-۳- با تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می شود.

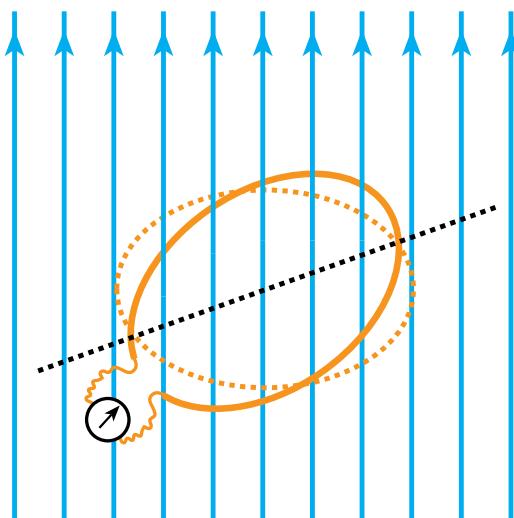
با انجام دادن فعالیت زیر، با یک روش دیگر ایجاد جریان الکتریکی القایی آشنا می شوید.

فعالیت ۴-۱

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 ۴-۴، بزرگی میدان مغناطیسی و مساحت حلقه‌ی مدار تغییر نمی‌کند، ولی زاویه‌ی بین میدان مغناطیسی و سطح پیچه تغییر می‌کند. از این فعالیت نیز می‌توان نتیجه گرفت که :

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



شکل ۴-۴- در حین چرخش پیچه در میدان مغناطیسی و تغییر زاویه‌ی بین پیچه و راستای میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می شود.

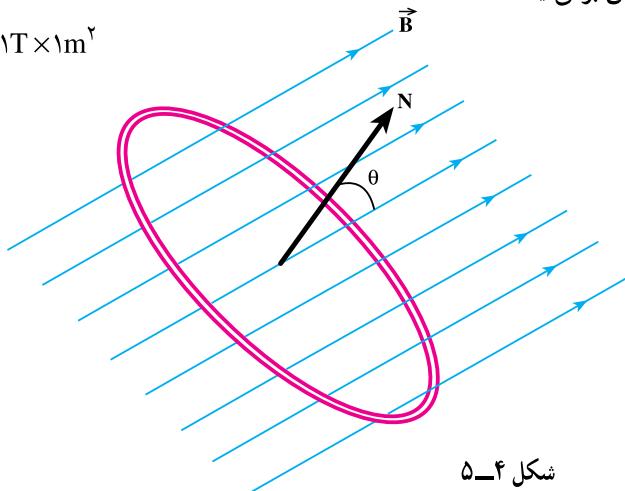
۴-۲- شار مغناطیسی

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 نزد های به صورت زیر معرفی می‌شود. فرض کنید حلقه‌ای به مساحت A مطابق شکل ۴-۵ در میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} قرار دارد. شار میدان مغناطیسی یکنواخت^{*} که از سطح حلقه می‌گذرد به صورت زیر تعریف و با نماد Φ نمایش داده می‌شود.

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (4-1)$$

که در این رابطه، θ زاویه‌ی بین بردار میدان مغناطیسی \vec{B} و نیم خط عمود بر سطح حلقه است (این نیم خط را می‌توان به طور 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 و بر (Wb) است. از معادله‌ی ۱-۴ چنین برمی‌آید:

$$1\text{Wb} = 1\text{T} \times 1\text{m}^2$$



شکل ۴-۵

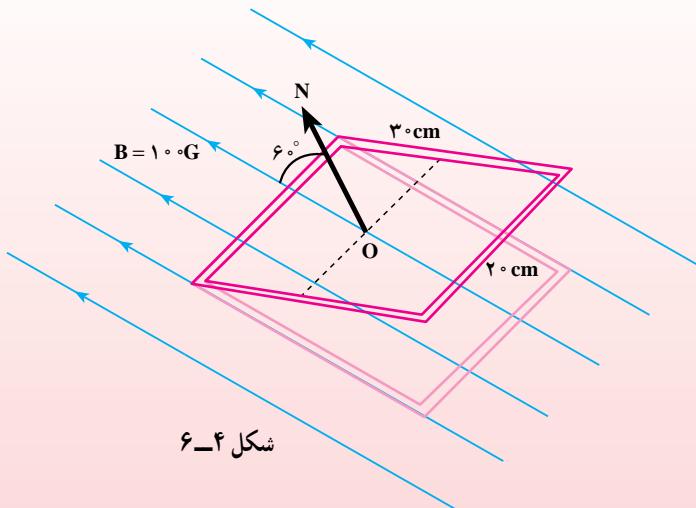
مثال ۴-۱

الف) شار مغناطیسی عبوری از سطح یک قاب مستطیلی شکل به ابعاد $20\text{cm} \times 30\text{cm}$ که خط عمود بر آن با میدان مغناطیسی یکنواخت 100 Gaus مطابق

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

شکل ۶-۴ زاویه‌ی 60° می‌سازد را به دست آورید.

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



شکل ۶-۴

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

$$A = 30 \times 20 = 600 \text{ cm}^2 = 6 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$B = 1.00 \text{ G} = 1.0^{-1} \text{ T}$$

$$\Phi = BA \cos \theta = 10^{-2} \times 6 \times 10^{-2} \cos 60^\circ = 3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

ب) در وضعیت جدید داریم:

$$\theta' = 30^\circ$$

درنتیجه، به دست می‌آوریم:

$$\Phi' = BA \cos \theta' = 10^{-2} \times 6 \times 10^{-2} \cos 30^\circ$$

$$\Phi' = 5/2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

تغییر شار حاصل از این چرخش برابر است با:

$$\Delta\Phi = \Phi' - \Phi = 5/2 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$$

$$\Delta\Phi = 2/2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

تمرین ۴

حلقه‌ای به مساحت 5 cm^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 اندازه $T/3^\circ$ افزایش یابد، شار مغناطیسی که از سطح حلقه می‌گذرد، چه قدر تغییر می‌کند؟

با انجام دادن آزمایش‌ها و فعالیت‌های پیش درمی‌باییم که تغییر هریک از کمیت‌های B , A و زاویه‌ی بین B و نیم خط 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 مولد 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 ۴-۲ تا ۴-۴ هر چه حرکتی که باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، سریع‌تر انجام شود، عقره‌ی گالوانومتر پیش‌تر منحرف می‌شود، و این نشان می‌دهد که جریان بزرگ‌تری به وجود آمده است.

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

۴-۳- قانون القای الکترومغناطیسی فارادی

بنابر قانون فارادی هرگاه شار مغناطیسی‌ای که از مدار بسته‌ای می‌گذرد تغییر کند، نیروی محرکه‌ای در آن القای شود که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار مغناطیسی متناسب است.

يعني 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.

$$\epsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2-4)$$

در این رابطه، ϵ نیروی محرکه‌ی القایی بر حسب ولت و $\frac{d\Phi}{dt}$ آهنگ تغییر شار مغناطیسی (یعنی مشتق شار نسبت به زمان) بر حسب ویر بر ثانیه ($\frac{\text{Wb}}{\text{s}}$) 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 به طور متواالی به هم بسته شده‌اند، در نظر گرفت. تغییر شار مغناطیسی در هر حلقه‌ی پیچه نیروی محرکه‌ای القایی کند. نیروی محرکه‌ی القایی کل، برابر مجموع نیروی محرکه‌ی القایی شده در حلقه‌هاست. به بیان دیگر، نیروی محرکه‌ی القایی در هر پیچه با تعداد دورهای پیچه (N) نیز نسبت مستقیم دارد؛ یعنی،

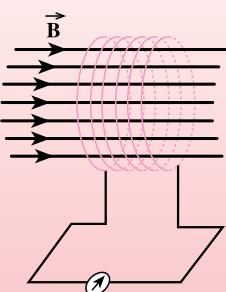
$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3-4)$$

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

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

مثال ۲-۴

پیچه‌ای شامل 200 دور سیم با مساحت سطح مقطع 2 سانتی‌متر مربع مطابق شکل ۷-۴ در میدان مغناطیسی یکنواختی قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که خط‌های میدان بر سطح آن عمود است. بزرگی میدان مغناطیسی در بازه‌ی زمانی $3/2$ میلی ثانیه و بدون تغییر جهت از $18T$ به $22T$ می‌رسد. اندازه‌ی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط چه قدر است؟



شکل ۷-۴

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

$$\Phi_1 = B_1 A \cos \theta = 0/18 \times 2 \times 10^{-4} \times \cos 0^\circ = 3/6 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$

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

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

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = 4 / 4 \times 10^{-5} - 3 / 6 \times 10^{-5} = 0.1 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$

این تغییر شار در بازه‌ی زمانی $3 / 2 \times 10^{-3}$ ثانیه روی داده است؛ بنابراین،

آهنگ متوسط تغییر شار برابر است با :

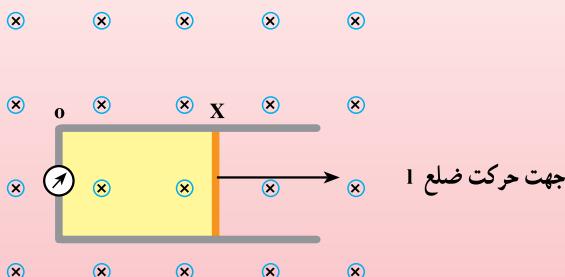
$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{0.1 \times 10^{-5}}{3 / 2 \times 10^{-3}} = 2 / 5 \times 10^{-3} \frac{\text{Wb}}{\text{s}}$$

درنتیجه بزرگی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط برابر است با :

$$|\bar{\varepsilon}| = \left| -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \left| -200 \times 2 / 5 \times 10^{-3} \right| = 0.5 \text{ V}$$

مثال ۴

قاب مستطیلی شکلی که از سیم بدون روکش ساخته شده است مطابق شکل ۴ در میدان مغناطیسی یکنواخت و ثابت با بزرگی 18 T در 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 ۴

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 نیم خط عمود بر حلقه ثابت و برابر صفر است و $\cos \theta = 1$ ، 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:

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

$$|\varepsilon| = lvB = 0.2 \times 2.0 \times 0.18$$

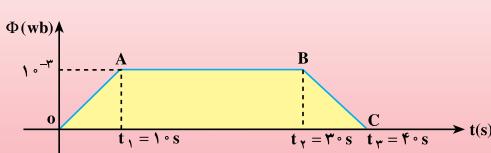
$$= 0.72 v = 72 \text{ mV}$$

تمرین ۴-۴

میدان مغناطیسی عمود بر یک قاب دایره‌ای شکل به قطر 20 سانتی‌متر با زمان تغییر می‌کند و در مدت 0.58 از 0.28 تسلیا به 0.12 تسلیا می‌رسد (تغییر علامت نشان می‌دهد که جهت میدان نیز وارون شده است). نیروی محرکه‌ی القایی متوسط در حلقه را حساب کنید.

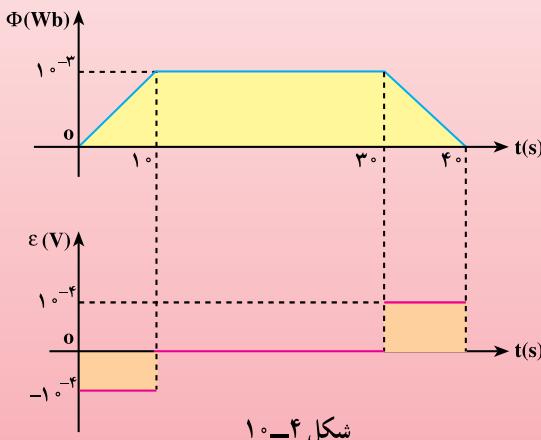
مثال ۴-۴

نمودار تغییرات شار مغناطیسی که از یک حلقه می‌گذرد برحسب زمان در منحنی شکل ۴-۹ داده شده است. نمودار تغییرات نیروی محرکه‌ی القایی شده در حلقه را برحسب زمان رسم کنید.



شکل ۴-۹

حل: نمودار تغییرات شار مغناطیسی بر حسب زمان نشان می‌دهد که در بازه زمانی $t_1 = 0$ – $t_2 = 1$ سار به صورت 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 $-1 \text{--} 10^{-4}$ ولت. در بازه‌ی زمانی $t_2 = t_1 = 1$ – $t_3 = 3$ سار ثابت مانده است. بنابراین، $\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt}$ و نیروی محرکه‌ی القایی در این بازه برابر صفر است. در بازه‌ی زمانی $t_3 = t_2 = 3$ – $t_4 = 4$ سار به صورت خطی کاهش یافته است، و درنتیجه، نیروی محرکه‌ی القایی در این بازه مثبت است و مقدار آن برابر $< 10^{-4}$ ؛ و درنتیجه، نیروی محرکه‌ی القایی در این بازه مثبت است و مقدار آن برابر است با $1 \text{--} 10^{-4}$ ولت. نمودار این تغییرات در شکل ۴–۱ رسم شده است.



۴–۴ 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 القایی در آن از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

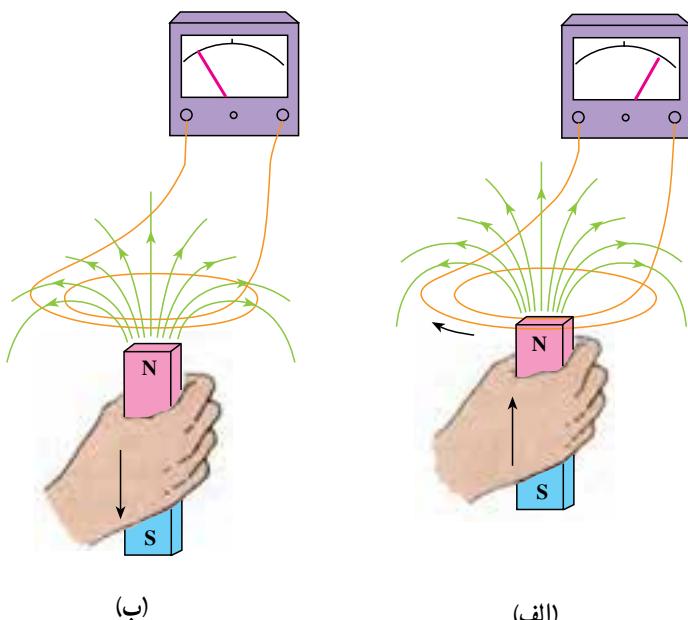
$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{N}{R} \frac{d\Phi}{dt} \quad (5-4)$$

قانون لنز که به صورت 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

به وجود آور ندهی جریان القایی یعنی تغییر شار مغناطیسی مخالفت می کند.

علامت منفی در رابطه $4-5$ نشان دهنده همین مخالفت است. در عمل، برای به دست آوردن جهت جریان القایی در یک مدار از قانون لنز استفاده می شود. به عنوان مثال، اگر قطب N یک آهنربای میله ای را مطابق شکل ۱۱-۴ الف به یک پیچه تزدیک کنیم، شار مغناطیسی که از پیچه می گذرد، به دلیل قوی ترشدن میدان در محل پیچه، افزایش می یابد. جهت جریان القایی در پیچه همان طور که در شکل ۱۱-۴ الف نشان داده شده است در جهتی است که میدان مغناطیسی حاصل از آن در خلاف جهت میدان آهنربای میله ای باشد، تا با افزایش شار مغناطیسی که از پیچه می گذرد مخالفت کند. یعنی قطب N آهنربا را به عقب براند.



شکل ۱۱-۴- جریان القایی در جهتی است که با حرکت آهنربا به طرف پیچه مخالفت می کند.

تمرین ۴-۳

قطب N یک آهنربای میله ای را مطابق شکل ۱۱-۴ ب از پیچه دور می کنیم، با استفاده از قانون لنز جهت جریان القایی را در پیچه تعیین کنید.

مثال ۶-۴

سیم‌لوله‌ای با 500 دور و مقاومت الکتریکی 1Ω و مساحت سطح مقطع 25cm^2 در یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد. برای اینکه جریانی بهشده 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 $4-4$ اندازه‌ی جریان القایی برابر است با :

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

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

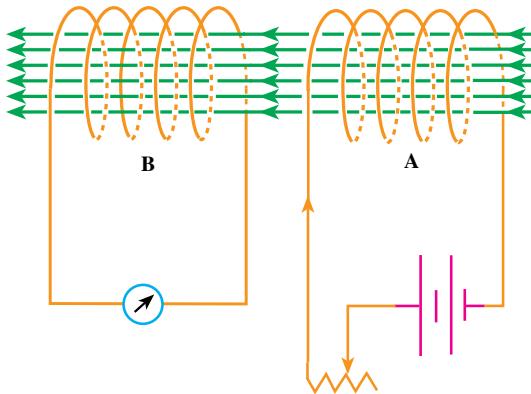
$$10^{-3} A = \frac{500 \times 25 \times 10^{-4} \text{m}^2}{1\Omega} \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right|$$

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

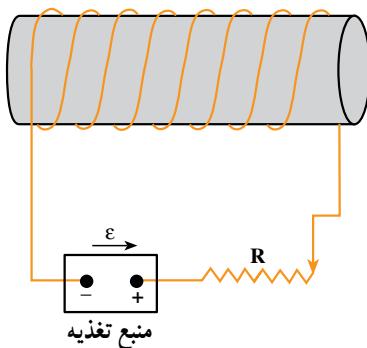
۶-۵ خودالقایی

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 $4-12$ تغییر جریان در مدار A باعث تغییر شار مغناطیسی در سیم‌لوله 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 القایی کند. برای این کار مداری مطابق شکل $4-13$ در نظر بگیرید.

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



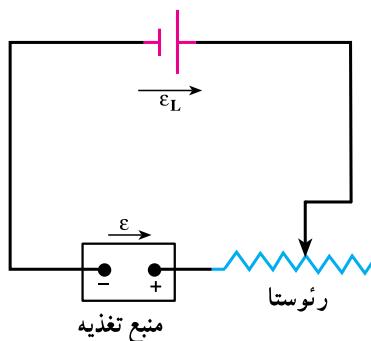
شکل ۱۲-۴- تغییر جریان در سیم‌لوله‌ی A باعث ایجاد جریان در سیم‌لوله‌ی B می‌شود.



شکل ۱۳-۴- خودالقایی - تغییر جریان در مدار نیروی محرکه‌ای در خود سیم‌لوله‌ی القا می‌کند.

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

مقابله می‌کند. به عبارت دیگر در این حالت نیروی محرکه‌ی القایی معادل نیروی محرکه‌ی باتری‌ای عمل می‌کند که در جهت مخالف منبع تغذیه مانند شکل ۱۴-۴ در مدار قرار گرفته باشد.



شکل ۱۴-۴ - خودالقایی باعث می‌شود که سیم‌لوله مانند پیل ۴ در مدار عمل کند.

فعالیت ۴-۲

با بحث در گروه خود، نتیجه‌ی آزمایشی را پیش‌بینی کنید که در آن مشابه آزمایش بالا عمل شود؛ با این تفاوت که به جای کاهش مقاومت مدار، آن را افزایش دهنده. دلیل وجود نیروی محرکه‌ی القایی و جهت آن را 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 به وجود 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 به وجود می‌آید. بزرگی این میدان در هر لحظه متناسب با جریانی است که در آن لحظه از سیم‌لوله می‌گذرد (به عنوان مثال رابطه‌های ۷-۳ و ۹-۳ 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 به صورت زیر است:

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

یا:

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

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

$$\varepsilon_L = N\varepsilon_1$$

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

اگر $L = Nb$ قرار دهیم، نیروی محرکه‌ای خودالقایی سیم‌لوله به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (5-4)$$

L از مشخصات ساختمانی سیم‌لوله است (به تعداد حلقه‌ها، طول سیم‌لوله و... بستگی دارد) و ضریب خودالقایی یا القاییدگی سیم‌لوله نام دارد. یکای خودالقایی «هانزی» نام دارد که آن را با نماد H نمایش می‌دهند. یک هانزی 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.

۷-۴ مثال

از سیم‌لوله‌ای به ضریب خودالقایی $H = 4 \text{ H}/\text{A}$ ، جریان متغیری می‌گذرد که با زمان به صورت $I = 4t - 3$ تغییر می‌کند (I بر حسب آمپر و t بر حسب ثانیه است). بزرگی نیروی محرکه‌ای القا شده را محاسبه کنید.

حل: داریم

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

را از رابطه‌ی جریان بر حسب زمان که در مسئله داده شده محاسبه می‌کنیم.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt}(4t - 3) = 4 \text{ A/s}$$

در نتیجه، به دست می‌آوریم

$$|\varepsilon| = 0 / 4 \times 4 = 1/6 \text{ V}$$

محاسبه‌ی ضریب خودالقایی سیم‌لوله: در فصل ۳ 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 به دست می‌آید :

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

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 به دست می‌آید.

$$B = k\mu_0 \frac{N}{l} I \quad (6-4)$$

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 آن که میدان مغناطیسی در داخل سیم‌لوله یکنواخت و موازی با محور سیم‌لوله است، شار مغناطیسی حاصل از آن که از سیم‌لوله می‌گذرد برابر است با :

$$\Phi = AB = k\mu_0 \frac{NA}{l} I \quad (7-4)$$

نیروی محرکه‌ی خودالقایی برابر است با :

$$\varepsilon_L = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (8-4)$$

با قرار دادن Φ از رابطه‌ی ۷-۴ در رابطه‌ی ۸-۴ به دست می‌آوریم :

$$\varepsilon_L = -N \frac{d}{dt} (k\mu_0 \frac{NA}{l} I)$$

یعنی :

$$\varepsilon_L = -k\mu_0 \frac{N^2 A}{l} \frac{dI}{dt} \quad (9-4)$$

از مقایسه رابطه های ۹-۴ و ۹-۵ بدست می آوریم :

$$L = k\mu_0 \frac{N^2 A}{l} \quad (10-4)$$

این رابطه نشان می دهد که ضریب خودالقایی از مشخصه های ساختاری القاگر است و به جریان متغیری که از القاگر می گذرد بستگی ندارد.

مثال ۱۰-۴

سیم‌لوله‌ای بدون هسته، با سطح مقطع 10 cm^2 و طول 50 cm در نظر بگیرید.

اگر تعداد حلقه‌های این سیم‌لوله برابر 2000 باشد، ضریب خودالقایی آن را حساب کنید.

حل: چون سیم‌لوله بدون هسته است، $k = 1$ است بنابراین با استفاده از رابطه $10-4$ داریم :

$$L = 1 \times 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{(2000)^2 \times (10 \times 10^{-4})}{0.5}$$

در نتیجه :

$$L = 10^{-3} \text{ H} = 1 \text{ mH}$$

تمرین ۱۰-۴

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

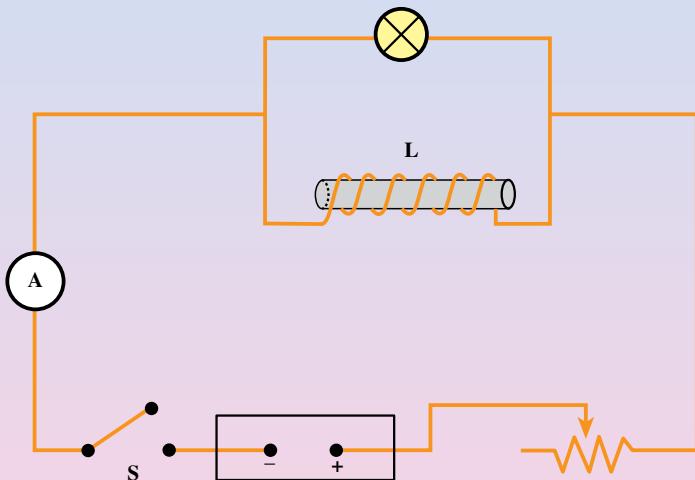
۱۵-۴ آزمایش

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

۱- مداری مطابق شکل ۱۵-۴ بیندید.

۲- رئوستا را به گونه‌ای تنظیم کنید تا لامپ با روشنایی ضعیف تاش کند.

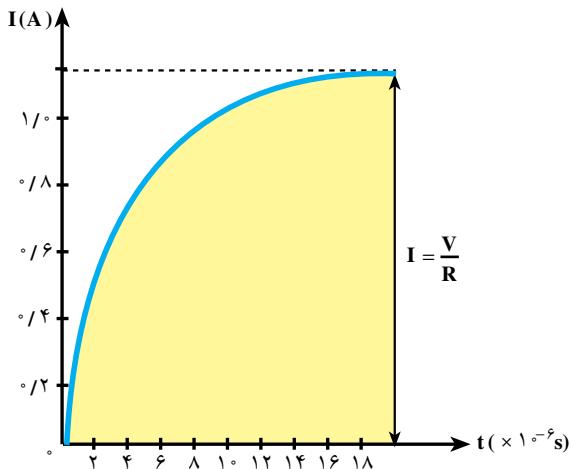
۳- کلید S را سریعاً قطع کنید و آنچه را مشاهده می‌کنید پس از بحث در گروه به کلاس گزارش کنید.



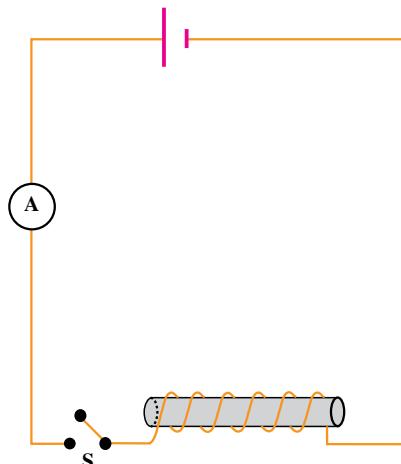
شکل ۱۵-۴

دیدیم که تغییر جریان در یک القاگر باعث ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در آن می‌شود. ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی باعث می‌شود جریان به سرعت به مقدار نهایی خود نرسد. برای مثال مداری مانند شکل ۱۶-۴ الف در نظر بگیرید که در آن یک سیم‌ولوه با تعداد دور نسبتاً زیاد به دو سر یک باتری بسته شده است. هنگامی که کلید S را می‌بندیم، جریان به طور آنی به مقداری که از قانون اهم ($I = \frac{V}{R}$) به دست می‌آید نمی‌رسد، بلکه با زمان تغییر می‌کند. منحنی تغییر جریان با زمان به صورت منحنی شکل ۱۶-۴ ب است.

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



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



(الف) سیمی به مقاومت R را به صورت یک سیم‌لوه بسته ایم

شکل ۴-۱۶—اثر خودالقایی در مدار شامل سیم‌لوه (اعداد روی شکل مربوط به یک آزمایش خاص است)

افزایش می‌گذارد و نیروی محرکه‌ی خودالقایی در جهت مخالف نیروی محرکه‌ی مولد در سیم‌لوهه 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 رابطه $I = \frac{V}{R}$ بدست می‌آید. با گذشت زمان و تردیک

شدن جریان به I، آهنگ تغییر جریان کندر 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 ۴-۳

با توجه به مطالب بالا نتیجه‌ی آزمایش ۴-۲ را توجیه کنید.

۴-۶— انرژی ذخیره شده در القاگر

هنگامی که در دوسر القاگر 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 سیم‌لوهه ذخیره می‌شود، این انرژی از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید :

$$U = \frac{1}{2} L I^2 \quad (11-4)$$

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

مثال ۴-۴

سیم‌لوله‌ای با ضریب خودالقابی $H/4^{\circ}$ و مقاومت 10Ω مفروض است.

سیم‌لوله را مطابق شکل ۴-۱۵ 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:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{6}{10} = 0.6 \text{ A}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱۱-۴ انرژی ذخیره شده در القاگر برابر است با:

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} LI^2 \\ &= \frac{1}{2} (0.6)(0.6)^2 = 7/2 \times 10^{-4} \text{ J} \end{aligned}$$

تمرین ۴-۵

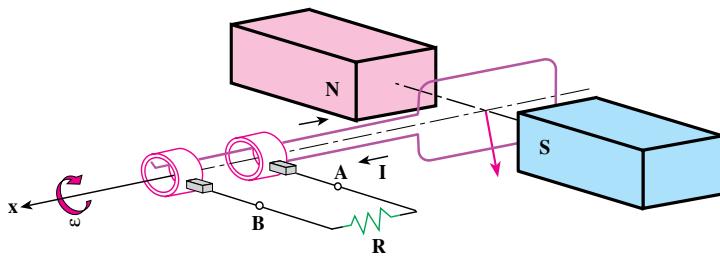
رابطه‌ای برای انرژی ذخیره شده در یک سیم‌لوله‌ی بدون هسته بر حسب ویژگی‌های سیم‌لوله به دست آورید.

۴-۷- جریان متناوب

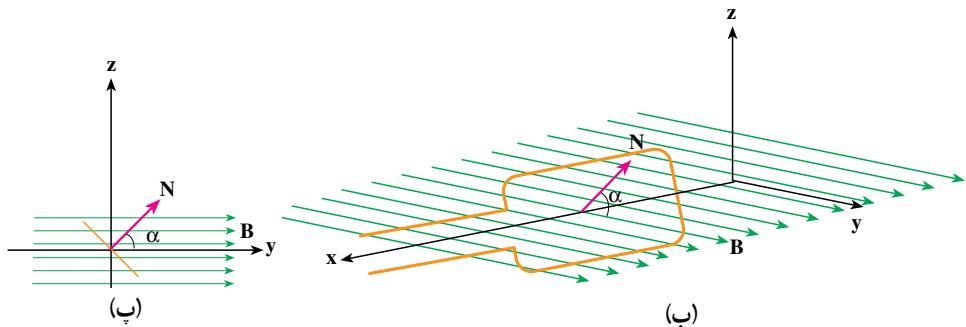
یکی از کاربرست‌های مهم القای الکترومغناطیسی، تولید جریان متناوب است. دیدیم که برای ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی باید شار عبوری از مدار تغییر کند، و شار مغناطیسی‌ای که از یک پیچه می‌گذرد از رابطه‌ی $\Phi = AB \cos \alpha$ محاسبه می‌شود، که در آن α زاویه‌ی بین نیم خط عمود بر سطح پیچه و میدان مغناطیسی است.

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

شکل ۴-۱۷ 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 ۴-۱۷ 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 ۴-۱۷

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 لحظه $t = 0$ در وضعیت عمود بر میدان مغناطیسی ($\alpha = 0^\circ$) باشد، پس از گذشت t ثانیه در وضعیت زیر خواهد بود :

$$\alpha = 2\pi \frac{t}{T} \quad (12-4)$$

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 :

$$\alpha = \omega t$$

در نتیجه شار مغناطیسی $\Phi = AB \cos \alpha$ که در لحظه t از پیچه عبور می‌کند برابر است با :

$$\Phi = AB \cos \omega t \quad (13-4)$$

نیروی محرکه‌ی القا شده در پیچه با توجه به قانون فارادی از رابطه $3-4$ محاسبه می‌شود

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

و یا

$$\varepsilon = NAB\omega \sin \omega t \quad (14-4)$$

یعنی نیروی محرکه‌ای که در پیچه القا می‌شود با زمان تغییر می‌کند. بیشترین مقدار این نیروی محرکه مربوط به زمانی است که برای آن $\sin \omega t = 1$ باشد و برابر است با $\epsilon_m = NAB\omega$. در نتیجه

می‌توانیم بنویسیم :

$$\epsilon = \epsilon_m \sin \omega t \quad (15-4)$$

این رابطه نشان می‌دهد که نیروی محرکه‌ای القا شده به طور دوره‌ای تغییر می‌کند.

تمرین ۴-۴

(الف) نمودار تغییرات شاری که از مدار پیچه در شکل ۴-۱۷ الف می‌گذرد را

بر حسب زمان در طول یک دوره‌ی چرخش پیچه رسم کنید.

(ب) نمودار تغییرات نیروی محرکه‌ای القا شده در پیچه در شکل ۴-۱۷ 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 به دست می‌آید.

$$I = \frac{\epsilon}{R} = \frac{\epsilon_m}{R} \sin \omega t \quad (16-4)$$

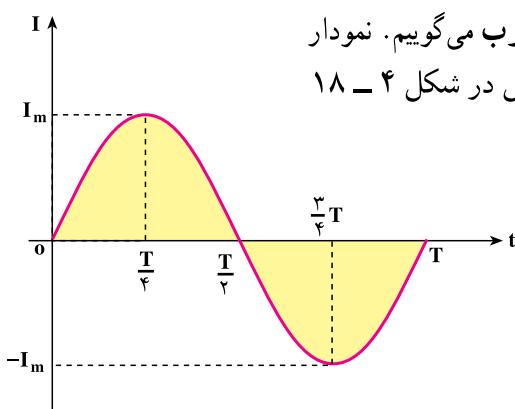
این رابطه نشان می‌دهد که جریان نیز با زمان تغییر می‌کند. بیشترین مقدار جریانی که از مدار می‌گذرد،

مربوط به زمانی است که $\sin \omega t = 1$ باشد، و برابر است با $I_m = \frac{\epsilon_m}{R}$. در نتیجه می‌توانیم بنویسیم

$$I = I_m \sin \omega t \quad (17-4)$$

رابطه‌ی ۴-۱۷ نشان می‌دهد که جریان الکتریکی تولید شده در مدار پیچه به طور سینوسی تغییر

می‌کند. به یک چنین جریانی، جریان متناوب می‌گوییم. نمودار تغییرات جریان متناوب در یک دوره‌ی کامل در شکل ۴-۱۸ رسم شده است.



شکل ۴-۱۸—نمودار تغییرات جریان متناوب سینوسی در یک دوره

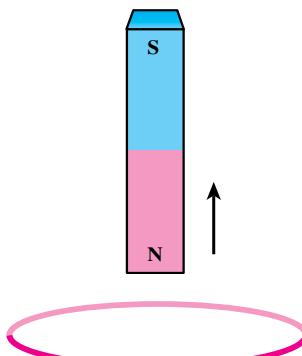
فعالیت ۴-۴

با بحث در گروه خود و با استفاده از نمودار شکل ۴-۱۸ جهت جریان متناوب را در هر بازه‌ی زمانی برابر $\frac{1}{4}$ 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

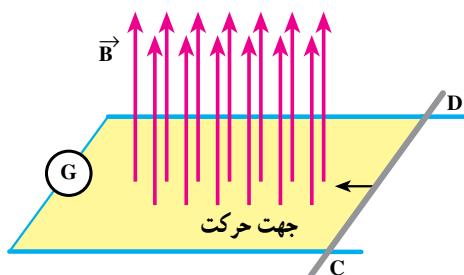
۱- قطب شمال یک آهنربا، مطابق شکل ۴-۱۹ از یک حلقه‌ی فلزی دور می‌شود. جهت جریان القایی را در حلقه مشخص کنید.



شکل ۴-۱۹

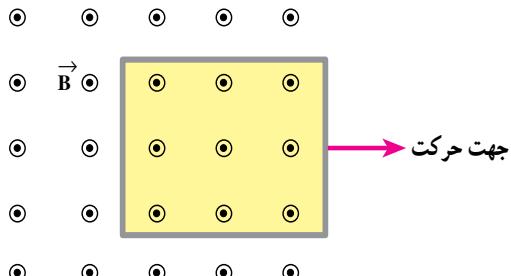
۲- یک آهنربای میله‌ای را به‌طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک زمین رها می‌کنیم. اگر سطح زمین در محل برخورد آهنربا با آن نرم باشد آهنربا در زمین فرو می‌رود. اگر این آزمایش را باز دیگر در وضعیتی تکرار کنیم که آهنربا در حین سقوط از درون حلقه‌های یک پیچه بگزند، مقدار فرورفتگی آهنربا در زمین چه تغییری خواهد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

۳- دو میله‌ی رسانای موازی در صفحه‌ای عمود بر میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} قرار دارند. این میله‌ها توسط گالوانومتری مطابق شکل ۴-۲۰ به یک دیگر 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؟



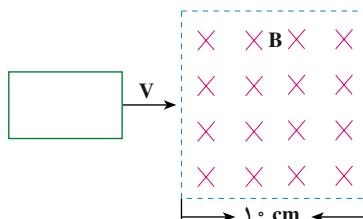
شکل ۴-۲۰

۴ - پیچه‌ی مستطیلی را که شکل ۲۱-۴ نشان داده شده است به طرف راست می‌کشیم و از میدان مغناطیسی برونسو خارج می‌کیم. جهت جریان القایی در پیچه در چه سویی است؟



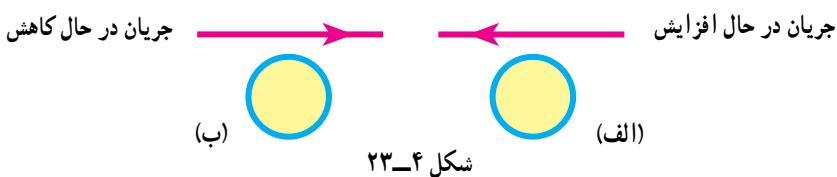
شکل ۲۱-۴

۵ - حلقه‌ی فلزی مستطیل شکلی به ابعاد $3\text{cm} \times 5\text{cm}$ مطابق شکل ۲۲-۴ با سرعت ثابت 2m/s وارد میدان مغناطیسی بکنواخت 2T درجه 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 ۲۲-۴

۶ - جهت جریان القایی در هر یک از حلقه‌های دایره‌ای نشان داده شده در شکل ۲۳-۴ در چه سویی است؟



شکل ۲۳-۴

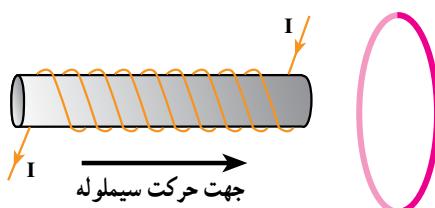
۷- پیچه‌ای که دارای 1000 حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازه‌ی آن $T = 0.4$ و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت 1 s تغییر کرده و به $T = 0.4$ در خلاف جهت اولیه می‌رسد. اگر سطح هر حلقه‌ی پیچه 5 cm^2 باشد،

الف- اندازه‌ی نیروی محرکه‌ی القابی متوسط در پیچه را حساب کنید.

ب- جهت جریان القابی را تعیین کنید.

۸- در شکل ۲۴-۴ اگر سیم‌لوه را در جهت نشان داده شده در شکل به حلقه نزدیک کنیم

جریان القابی در حلقه در چه جهتی است؟



شکل ۲۴-۴

۹- پیچه‌ای با سطح مقطع 30 cm^2 دارای 1000 حلقه است و در ابتدا بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت 2 s پیچه بچرخد و موازی میدان مغناطیسی زمین قرار بگیرد، نیروی محرکه‌ی متوسط القابی در آن چه قدر است؟ اندازه‌ی میدان زمین را 5 G در نظر بگیرید.

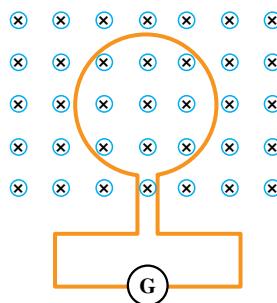
۱۰- اگر شار مغناطیسی عبوری از حلقه‌ای مطابق رابطه‌ی زیر (در SI) تغییر کند :

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

برگی نیروی محرکه‌ی القابی در حلقه در لحظه‌ی $t = 2\text{ s}$ چه قدر است؟

۱۱- حلقه‌ای مطابق شکل ۲۵-۴ درون یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد. اگر

اندازه‌ی میدان افزایش یابد، جهت جریان القابی را روی حلقه مشخص کنید.



شکل ۲۵-۴

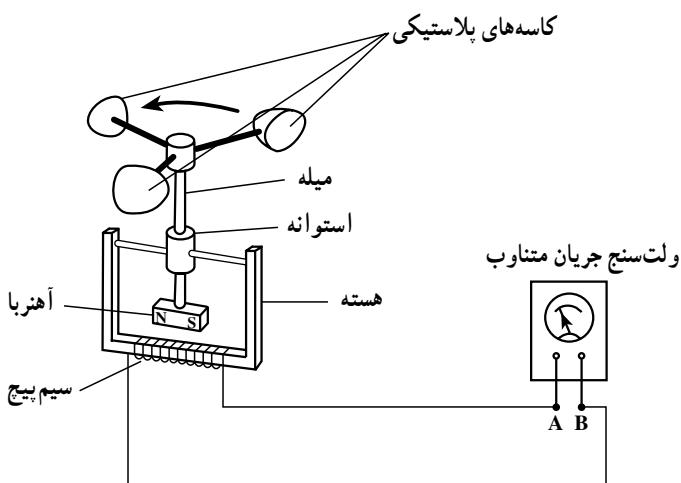
۱۲- جریان متناوبی که پیشینه‌ی آن $2A$ و دوره‌ی آن $2s$ ° است از یک رسانای ۵ اهمی می‌گذرد. (الف) در چه لحظه‌های شدت جریان پیشینه خواهد بود؟ در این لحظه‌ها نیروی محرکه‌ی القایی چه قدر است؟ (ب) در لحظه‌ی $s = \frac{1}{4} \text{ s}$ ، شدت جریان چه قدر است؟

۱۳- شکل ۴-۲۶ دینام یک دوچرخه را نشان می‌دهد، تحقیق کنید چگونه این دینام، برق مورد نیاز برای روشن شدن لامپ دوچرخه را تولید می‌کند.



شکل ۴-۲۶- دینام دوچرخه

۱۴- شکل ۴-۲۷ 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 ۴-۲۷