

القای الکترومغناطیسی



القای الکترومغناطیسی، اساس تولید انرژی الکتریکی در همهٔ نیروگاه‌های برق است که جریان متناوب را تولید، منتقل و توزیع می‌کنند. پالش مهم مهندسان برق، طراحی و سافت سامانه‌هایی است که به کمک آنها توان الکتریکی را به‌طور مؤثر و با اتلاف کم منتقل کنند.

یک تکه سیم مسی را به صورت سیملوله یا پیچه دور یک مداد بپیچید. اگر این پیچه را در مداری قرار دهید خواهید دید که رفتاری کاملاً متفاوت از یک تکه سیم راست خواهد داشت. در یک موتور بنزینی اتومبیل، پیچه‌ای شبیه این باعث می‌شود باتری ۱۲ ولتی اتومبیل، هزاران ولت اختلاف پتانسیل برای تولید جرقه در سر شمع‌ها تأمین کند و موتور اتومبیل را به راه اندازد. پیچه‌های دیگری شبیه این برای روشن کردن لامپ‌های کم مصرف یا مهتابی به کار می‌روند. پیچه‌های بزرگی که زیر سطح خیابان‌های شهری برای کنترل رفت و آمد و به کار انداختن چراغ‌های راهنمایی قرار داده می‌شوند نیز نمونه دیگری از کاربرد القای الکترومغناطیسی است که در این فصل با آن آشنا خواهیم شد.

۴-۱- پدیده القای الکترومغناطیسی

در فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که با استفاده از روش القای الکتریکی می‌توان اجسام رسانا را باردار کرد. در فصل گذشته نیز با پدیده القای مغناطیسی آشنا شدیم. در مورد اول بر اثر القا، بار الکتریکی در ماده رسانا پدیدار می‌شود. در مورد دوم، بر اثر القا در ماده فرومغناطیسی خاصیت مغناطیسی به وجود می‌آید. پدیده 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 ۱۴-۱

بررسی پدیده القای الکترومغناطیسی

وسایلهای آزمایش: میلی آمپرسنج صفر وسط (گالوانومتر)، آهنربای میله‌ای، سیملوله یا پیچه و سیم رابط
شرح آزمایش:

- ۱- با سیملوله و گالوانومتر مداری مانند شکل زیر را ببندید.
- ۲- قطب N آهنربای میله‌ای را مطابق شکل به سیملوله نزدیک کنید. مشاهدات خود را هنگام انجام دادن این عمل، یادداشت کنید.
- ۳- قطب N آهنربای میله‌ای را نزدیک سیملوله نگه دارید. سپس آن را از سیملوله دور کنید؛ مشاهده خود را بنویسید.
- ۴- بندهای ۲ و ۳ را با قطب S آهنربا نیز انجام دهید.
- ۵- آزمایش بالا را در حالی انجام دهید که آهنربا ثابت باشد و سیملوله نسبت به آن دور و نزدیک شود؛ آیا در نتیجه آزمایش تغییری رخ می‌دهد؟ توضیح دهید.





شکل ۱-۴ با حرکت آهنربا به طرف

سیملوله یا پیچه گالوانومتر جریان القایی را نشان می دهد.

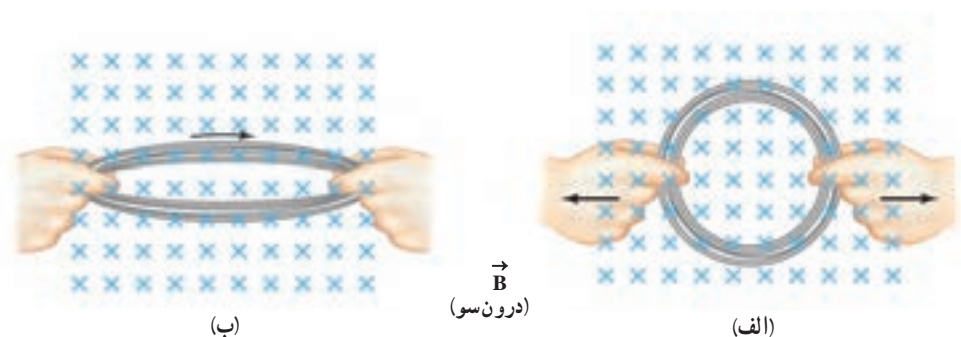
در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فارادی دانشمند انگلیسی و تقریباً همزمان با او جوزف هانری دانشمند آمریکایی، با انجام دادن آزمایش هایی مانند آزمایش ۴-۱ دریافتند که هنگام دور و نزدیک کردن آهنربا به پیچه، عقربه میلی آمپرسنج منحرف می شود، و عبور جریانی را از مدار نشان می دهد؛ مانند وقتی که مولد در مدار وجود داشته باشد. یعنی با حرکت آهنربا نسبت به پیچه، یک جریان الکتریکی در مدار القا می شود. این پدیده را **القای الکترومغناطیسی** و جریان تولید شده را **جریان الکتریکی القایی** می نامند. القای الکترومغناطیسی اساس کار مولد جریان متناوب، دینام، مبدل ها و بسیاری از وسیله های الکتریکی است.

دور یا نزدیک شدن آهنربا به پیچه باعث تغییر میدان مغناطیسی در محل پیچه می شود (شکل ۴-۱)؛ و همین امر جریان الکتریکی را در پیچه القا می کند. پس می توان چنین نتیجه گرفت که **تغییر اندازه میدان مغناطیسی در محل یک مدار بسته باعث القای جریان الکتریکی در آن مدار می شود.**

آزمایش نشان می دهد که علاوه بر روش گفته شده، به روش های دیگر نیز می توان در یک پیچه جریان الکتریکی القا کرد.

اگر پیچه ای از یک سیم انعطاف پذیر را مطابق شکل ۴-۲ در میدان مغناطیسی یکنواخت B قرار دهیم، سپس شکل پیچه را تغییر دهیم تا مساحت حلقه آن تغییر کند، خواهیم دید که در هنگام این کار نیز جریان الکتریکی در پیچه القا می شود. می توان نتیجه گرفت که:

تغییر مساحت مدار بسته در میدان مغناطیسی نیز می تواند جریان القایی در مدار تولید کند.



شکل ۴-۲ با تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می شود.

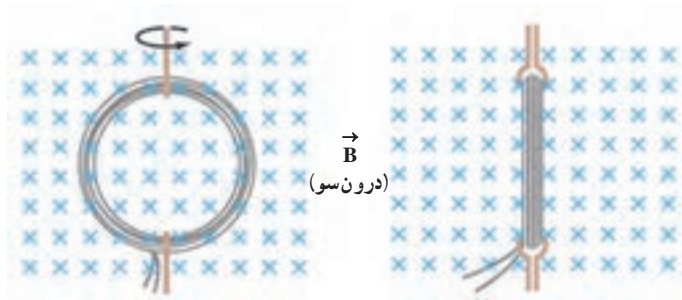
با انجام دادن فعالیت زیر، با یک روش دیگر تولید جریان القایی آشنا می شوید.

فعالیت ۱-۴

یک آهنربای میله ای را در نزدیکی پیچه ای قرار دهید. بدون تغییر فاصله آهنربا از پیچه، آن را بچرخانید. هر تغییری را که در گالوانومتر مشاهده می کنید، گزارش دهید.

با چرخاندن پیچه در میدان مغناطیسی یکنواخت مطابق شکل ۳-۴، اندازه میدان مغناطیسی و مساحت حلقه مدار تغییر نمی کند، ولی زاویه بین میدان مغناطیسی و سطح پیچه تغییر می کند. از این فعالیت می توان نتیجه گرفت که :

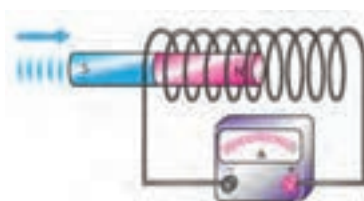
تغییر زاویه بین پیچه و راستای میدان مغناطیسی نیز سبب برقراری جریان الکتریکی القایی می شود.



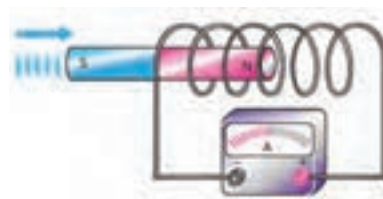
شکل ۳-۴ هنگام چرخش پیچه در میدان مغناطیسی و تغییر زاویه بین پیچه و میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می شود.

مثال ۱-۴

دریافت خود را از شکل های زیر بنویسید.



(ب)

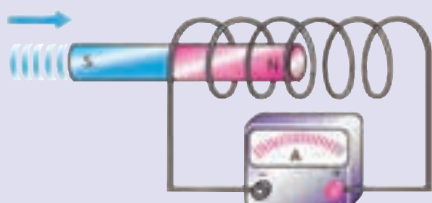


(الف)

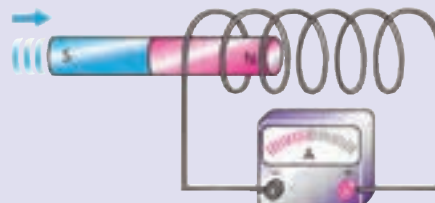
پاسخ: در شکل الف با ورود آهنربا به پیچه، جریانی در آن القا شده است. در شکل ب، آهنربا با همان شرایط قسمت الف، وارد پیچه ای با تعداد دور بیشتر شده است. در نتیجه همان طور که در شکل نیز دیده می شود جریان بزرگ تری در پیچه القا شده است.

پرسش ۱-۴

دریافت خود را از شکل های زیر بنویسید.

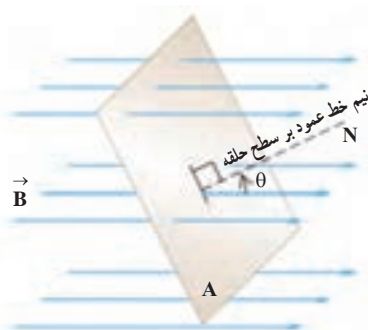


(ب)



(الف)

۲-۴- شار مغناطیسی



شکل ۲-۴ نیم خط عمود بر سطح

A با میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} زاویه θ می‌سازد.

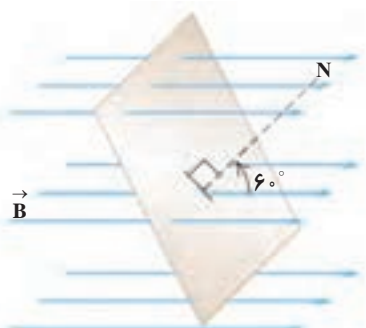
در آزمایش‌های قبل دیدیم که بر اثر تغییر میدان مغناطیسی در حلقه، تغییر مساحت حلقه و یا تغییر زاویه بین سطح حلقه و جهت میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود. کمیت موسوم به شار مغناطیسی، این سه کمیت را در بر دارد. این کمیت نرده‌ای به صورت زیر معرفی می‌شود. فرض کنید حلقه‌ای به مساحت A مطابق شکل ۲-۴ در میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} قرار دارد. شار میدان مغناطیسی یکنواخت^۱ که از سطح حلقه می‌گذرد به صورت زیر تعریف و با نماد Φ نشان داده می‌شود.

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (۲-۴)$$

که در آن، θ زاویه 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 پس از انتخاب نباید جهت آن را عوض کرد). یکای شار مغناطیسی در SI ویر (Wb) است. از معادله ۲-۴ چنین برمی‌آید:

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

مثال ۲-۴



(الف)



(ب)

الف) شار مغناطیسی عبوری از سطح یک قاب مستطیلی شکل به ابعاد $3 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ را به دست آورید که نیم خط عمود بر آن با میدان مغناطیسی یکنواخت 100 G مطابق شکل الف زاویه 60° می‌سازد.

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

پاسخ: الف) مطابق شکل الف زاویه بین خط‌های میدان و نیم خط عمود بر سطح برابر 60° است. بنابراین داریم:

$$A = 3 \times 2 = 6 \text{ cm}^2 = 6 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$B = 100 \text{ G} = 10^{-2} \text{ T}$$

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

ب) در وضعیت شکل ب، $\theta' = 30^\circ$ است. به این ترتیب داریم:

$$\Phi' = BA \cos \theta' = (10^{-2} \text{ T}) \times (6 \times 10^{-2} \text{ m}^2) \cos 30^\circ$$

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

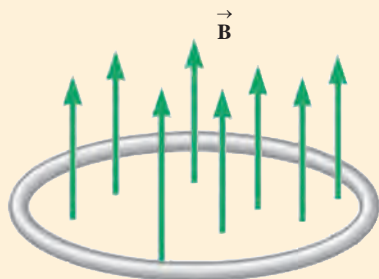
به این ترتیب تغییر شار حاصل از این چرخش برابر است با:

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

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

۱- اگر میدان مغناطیسی یکنواخت نباشد، رابطه مربوط به شار مغناطیسی پیچیده‌تر می‌شود که فراتر از سطح این کتاب است.

تمرین ۱۴



حلقه‌ای به مساحت 5 cm^2 مطابق شکل روبه‌رو در یک میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} قرار دارد، به‌طوری که خط‌های میدان مغناطیسی \vec{B} بر سطح حلقه عمودند. اگر اندازه میدان مغناطیسی بدون تغییر جهت به 3 T افزایش یابد، شار مغناطیسی عبوری از سطح حلقه چقدر تغییر می‌کند؟

تا اینجا دیدیم که تغییر هر یک از کمیت‌های \vec{B} ، A و زاویه بین \vec{B} و نیم‌خط عمود بر سطح پیچه باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، و تغییر شار مغناطیسی جریان الکتریکی القایی در مدار به‌وجود می‌آورد. این وضعیت درست شبیه به حالتی است که یک مولد در مدار باشد، و نیروی محرکه آن جریانی در مدار ایجاد کرده باشد. علاوه بر این، آزمایش نشان می‌دهد که هرچه تغییر شار سریع‌تر باشد، جریان القایی بزرگ‌تر خواهد شد؛ مثلاً در آزمایش‌های مربوط به شکل‌های ۲-۴ تا ۴-۴ هرچه حرکتی که باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، سریع‌تر انجام شود، عقربه گالوانومتر بیشتر منحرف می‌شود، و این نشان می‌دهد که جریان القایی بزرگ‌تری به‌وجود آمده است.

قانون القای الکترومغناطیسی فارادی، که موضوع بخش بعدی است، نشان می‌دهد که هنگام تغییر شار مغناطیسی، یک نیروی محرکه الکتریکی که آن را **نیروی محرکه القایی** می‌نامیم در پیچه ایجاد می‌شود.

۴-۳- قانون القای الکترومغناطیسی فارادی

عامل مشترک در تمام اثرهای القای الکترومغناطیسی که در بخش قبل دیدیم، تغییر شار مغناطیسی عبوری از یک مدار بسته است. 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 محرکه القایی و در نتیجه جریان القایی تولید شده در مدار بیشتر خواهد بود. قانون فارادی را برای یک مدار بسته تک حلقه می‌توان با رابطه زیر بیان کرد.

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

در این رابطه \mathcal{E} نیروی محرکه 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.



مایکل فارادی (۱۷۹۱-۱۸۶۷)

پسریک 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.» او در سن ۱۲ سالگی به عنوان شاگرد در یک کتابفروشی مشغول به کار شد. پس از آن با یک صحاف همکاری داشت.

فارادی ۱۹ ساله بود که به او اجازه داده شد تا در جلسه سخنرانی سیرهمفری دیوی که در مؤسسه سلطنتی لندن برگزار می‌شد، حضور یابد. مؤسسه سلطنتی یک مرکز مهم پژوهش و آموزش علوم بود. فارادی 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 به‌عنوان یک همکار در امور پژوهشی استخدام کرد. فارادی به‌زودی نبوغ خود را به‌عنوان یک آزمایشگر نشان داد. او مقاله‌های مهمی در شیمی، خواص مغناطیسی، الکتریسیته و نور نوشت و سرانجام به‌عنوان رئیس مؤسسه سلطنتی برگزیده شد. فارادی را به سبب کشف‌های بسیارش یکی از بزرگ‌ترین دانشمندان تجربی عصر خود می‌دانند.

اگر مدار از پیچهای با N دور مشابه تشکیل شده باشد، قانون القای فارادی به صورت زیر

نوشته می شود :

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

اگر مقاومت پیچه برابر R باشد، جریان القا شده در آن از رابطه زیر محاسبه می شود :

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

همچنین اگر شار مغناطیسی که از پیچه می گذرد در بازه زمانی Δt به اندازه $\Delta\Phi$ تغییر کرده باشد،

آهنگ متوسط تغییر شار مغناطیسی در بازه زمانی Δt با $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ متناسب خواهد بود. نیروی محرکه القایی متوسط (که با $\bar{\mathcal{E}}$ نمایش داده می شود) در این پیچه از رابطه زیر به دست می آید :

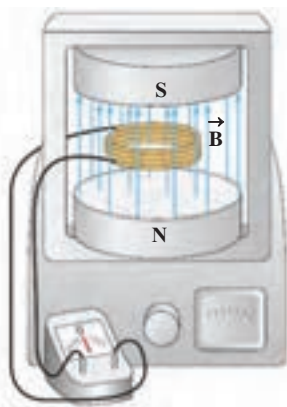
$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (5-4)$$

همان طور که از رابطه (4-4) دیده می شود، هرچه مقاومت پیچه یا مداری که در آن شار

مغناطیسی تغییر می کند، بیشتر باشد، جریان القایی کوچک تر می شود. لازم به توجه است که

برای پیدا کردن جریان القایی متوسط در پیچه به جای رابطه 4-4، باید از رابطه $\bar{I} = -\frac{N}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ استفاده کنیم.

مثال ۳-۴



پیچه ای شامل ۲۰۰ دور که مساحت هر حلقه آن 24 cm^2 است مطابق شکل روبه رو بین قطب های یک آهنربای الکتریکی قرار گرفته است که میدان مغناطیسی یکنواخت تولید می کند. خط های میدان بر سطح پیچه عمودند. اگر بزرگی میدان \vec{B} در بازه زمانی $3/2 \text{ ms}$ از 0.18 T به 0.22 T افزایش یابد،

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

(ب) اگر مقاومت پیچه 1Ω باشد، اندازه جریان القایی متوسط که از پیچه می گذرد

چقدر است؟

پاسخ: الف) با توجه به داده های مسئله داریم :

$$N=200, A=24 \text{ cm}^2=24 \times 10^{-4} \text{ m}^2, \theta=0^\circ$$

$$B_1=0.18 \text{ T}, B_2=0.22 \text{ T}, \Delta t=3/2 \text{ ms}=3/2 \times 10^{-3} \text{ s}, \bar{\mathcal{E}}=?$$

ابتدا شار مغناطیسی را در دو حالت اولیه و نهایی پیدا می کنیم.

$$\Phi_1 = B_1 A \cos \theta = (0.18 \text{ T})(24 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \cos 0^\circ \simeq 4/3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Phi_f = B_f A \cos \theta = (0.2 \text{ T})(24 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \cos 0^\circ \simeq 5/3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

تغییر شار مغناطیسی برابر است با :

$$\Delta \Phi = \Phi_f - \Phi_i = (5/3 \times 10^{-4} \text{ Wb}) - (4/3 \times 10^{-4} \text{ Wb}) = 1/3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

با قرار دادن این مقدار و داده‌های بالا در رابطه ۵-۴ داریم :

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -(200) \frac{(1/3 \times 10^{-4} \text{ Wb})}{(3/2 \times 10^{-3} \text{ s})} = -6/2 \text{ V}$$

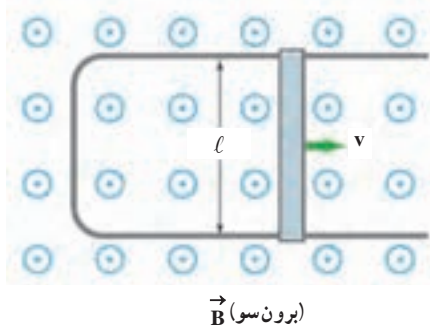
و اندازه آن برابر است با :

$$|\bar{\mathcal{E}}| = |-6/2| \text{ V} = 6/2 \text{ V}$$

ب) اندازه جریان متوسط که در پیچ قرار می‌شود برابر است با :

$$\bar{I} = |\bar{\mathcal{E}}|/R = (6/2 \text{ V})/(10 \Omega) = 0.62 \text{ A}$$

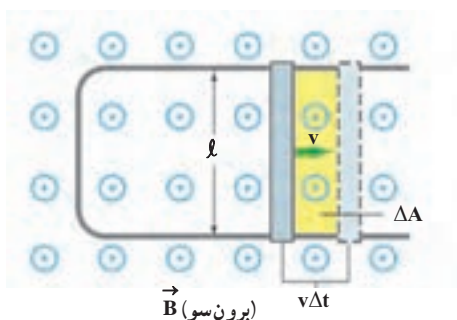
مثال ۱۴-۴



شکل روبه‌رو رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} به بزرگی 0.18 T نشان می‌دهد که عمود بر صفحه شکل و رو به بیرون است. میله‌ای فلزی (سیم لغزنده) به طول $\ell = 2 \text{ cm}$ بین دو بازوی رسانا قرار دارد و مداری را تشکیل می‌دهد. میله را با سرعت ثابت $v = 2 \text{ m/s}$ 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. چون میدان مغناطیسی در سطح حلقه یکنواخت است، پس می‌توانیم شار مغناطیسی را از رابطه $\Phi = BA \cos \theta$ محاسبه کنیم. از طرفی زاویه نیم خط عمود بر سطح حلقه با جهت میدان \vec{B} صفر است ($\theta = 0^\circ$). 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 :

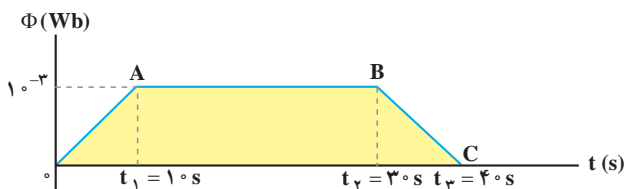
$$\bar{\mathcal{E}} = -(0.18 \text{ T})(2 \times 10^{-2} \text{ m})(2 \text{ m/s}) = -0.72 \text{ V}$$

و اندازه آن برابر است با :

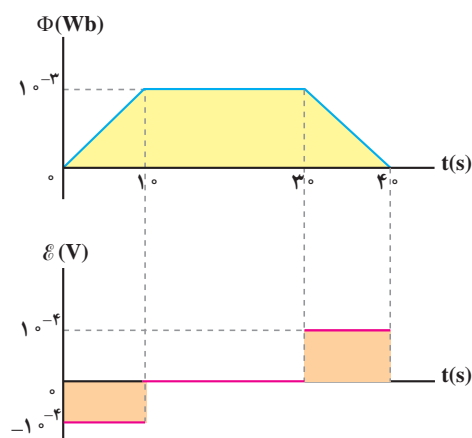
$$|\bar{\mathcal{E}}| = 0.72 \text{ V} = 720 \text{ mV}$$

توجه کنید که به علت ثابت بودن سرعت میله لغزنده، نیروی محرکه القایی ثابت است. از این رو، رسانای U شکل با سیم لغزنده یک مولد جریان مستقیم است. سرانجام چون میله از رسانای U شکل خارج و تماس آن قطع و جریان متوقف می شود، این وسیله کاربرد چندانی ندارد.

مثال ۴-۵



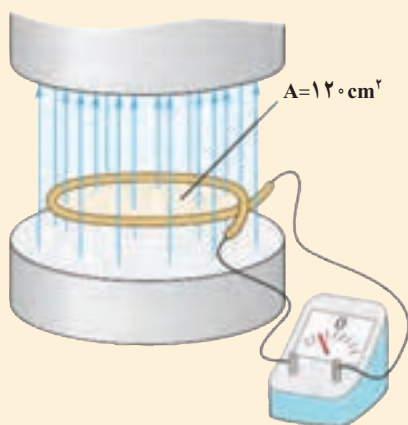
تغییرات شار مغناطیسی برحسب زمان که از یک حلقه می گذرد در نمودار شکل روبه رو داده شده است. نمودار نیروی محرکه القا شده در حلقه را برحسب زمان رسم کنید.



پاسخ: نمودار شار مغناطیسی برحسب زمان نشان

می دهد که در بازه زمانی ۰ تا t_1 شار به صورت خطی افزایش می یابد. در نتیجه، در این بازه نیروی محرکه القایی که برابر است با $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ، مقداری ثابت (برابر شیب خط OA) و منفی خواهد داشت و برابر است با 10^{-4} ولت. در بازه زمانی t_1 تا t_2 شار ثابت مانده است. بنابراین، $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 0$ و نیروی محرکه القایی در این بازه برابر صفر است. در بازه زمانی t_2 تا t_3 ، شار به صورت خطی کاهش یافته است، $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$ ؛ در نتیجه، نیروی محرکه القایی در این بازه مثبت و برابر است با 10^{-4} ولت. نمودار نیروی محرکه القایی برحسب زمان در شکل روبه رو رسم شده است.

تمرین ۴-۲



میدان مغناطیسی بین قطب های آهنربای الکتریکی شکل روبه رو که بر سطح حلقه عمود است با زمان تغییر می کند و در مدت $\Delta t = 0.5$ s از 28 mT به 12 mT می رسد (تغییر علامت نشان می دهد که جهت میدان \vec{B} وارون شده است). الف) اندازه نیروی محرکه القایی متوسط در حلقه را به دست آورید. ب) اگر مقاومت حلقه 2Ω باشد بزرگی جریان القایی متوسط در حلقه را پیدا کنید.



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



(الف) ذره‌های فرومغناطیسی، که در واقع هر کدام آهنربای بسیار کوچکی هستند، داده‌ها را به صورت صفر یا یک در خود ذخیره می‌کنند. در نوار مغناطیسی پشت هر کارت میلیاردها ذره فرومغناطیسی وجود دارد.



(ب) با کشیدن کارت در دستگاه کارت خوان، میدان مغناطیسی ناشی از ذره‌های فرومغناطیسی، جریان اندکی در پیچه تعبیه شده در دستگاه کارت خوان القا می‌کند.

کارت‌های اعتباری و دستگاه‌های کارت خوان

نوار مغناطیسی پشت کارت‌های اعتباری حاوی میلیاردها ذره فرومغناطیسی (آهنربای بسیار کوچک) 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 این ذره‌های مغناطیسی ذخیره می‌کنند (شکل الف). وقتی کارت اعتباری شما درون دستگاه کارت خوان کشیده می‌شود، میدان مغناطیسی ناشی از ذره‌های مغناطیسی، روی پیچه تعبیه شده در دستگاه کارت خوان اثر می‌گذارد و جریان اندکی را در آن القا می‌کند (شکل ب). این جریان بسیار کوچک توسط دستگاه دیگری تقویت و داده‌های ذخیره شده در آن رمزگشایی می‌شود. پس از رمزگشایی داده‌ها، دستور موردنظر انجام می‌شود.

مطالعه آزاد



معاینه مغز با نیروهای محرکه القایی

برانگیزش 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 نیروی محرکه القایی به وجود می‌آورد و باعث فعالیت الکتریکی مغز در ناحیه‌ای می‌شود که در زیر پیچه قرار دارد. با مشاهده واکنش TMS مغز (مثلاً اینکه کدام عضله‌ها به علت برانگیزش بخش خاصی از مغز حرکت می‌کنند) پزشک می‌تواند شرایط عصب شناختی مختلفی را بیازماید.

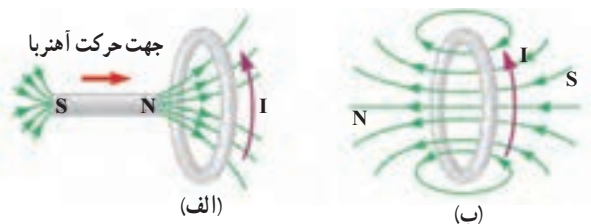
۴-۴- قانون لنز

سه سال پس از آنکه فارادی قانون القای الکترومغناطیسی را ارائه کرد، هاینریش لنز دانشمند روس تبار در سال ۱۸۳۴ میلادی قاعده‌ای را موسوم به **قانون لنز**، برای تعیین جهت جریان القایی در یک مدار پیشنهاد کرد. قانون لنز حاکی از آن است که: **جریان حاصل از نیروی محرکه القایی در یک مدار یا پیچه در جهتی است که آثار مغناطیسی ناشی از آن با عامل به وجودآورنده جریان القایی، یعنی تغییر شار مغناطیسی، مخالفت می‌کند.**

علامت منفی در رابطه ۴-۵ نشان دهنده همین مخالفت است که دلیل آن توسط قانون لنز بیان می‌شود. توضیح دقیق‌تر این مطلب فراتر از سطح این کتاب است و در اینجا تنها به ذکر مثال‌هایی از چگونگی استفاده از قانون لنز برای تعیین جهت جریان القایی اکتفا می‌کنیم.

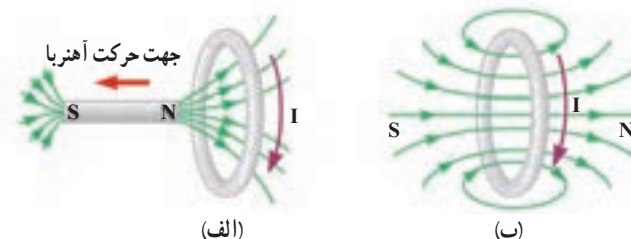
شکل ۴-۵ الف آهنربایی را در حال نزدیک شدن به یک حلقه رسانا نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود جریان در حلقه در جهتی القا شده است که میدان مغناطیسی حلقه با نزدیک شدن آهنربا به حلقه مخالفت می‌کند (شکل ۴-۵ ب).

شکل ۴-۵ الف (الف) با نزدیک شدن آهنربا به حلقه رسانا، در آن جریان القایی ایجاد می‌شود. (ب) جریان حاصل از نیروی محرکه القایی در حلقه در جهتی است که با نزدیک شدن آهنربا مخالفت می‌کند. در شکل ب برای سادگی، آهنربا نشان داده نشده است.

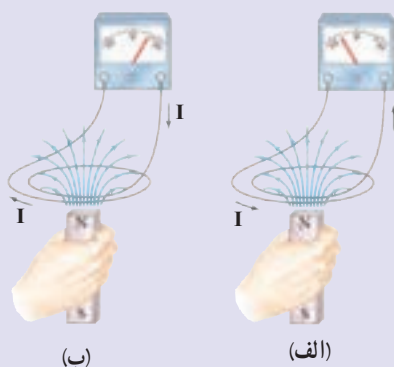


همچنین اگر مطابق شکل ۴-۶ الف، قطب N آهنربا را از حلقه رسانا دور کنیم، باز هم جریان القایی در جهتی خواهد بود که میدان مغناطیسی تولید شده توسط حلقه، در مقابل قطب N آهنربا قطب S ایجاد و رپایش بین این دو قطب با دور شدن قطب N آهنربا مخالفت کند (شکل ۴-۶ ب).

شکل ۴-۶ الف (الف) با دور شدن آهنربا از حلقه، جریانی در آن القا می‌شود. (ب) میدان مغناطیسی حاصل از جریان القایی در حلقه، با دور شدن آهنربا از حلقه مخالفت می‌کند. در شکل ب برای سادگی، آهنربا نشان داده نشده است.



پرسش ۳-۴



با توجه به جهت جریان القایی در هر یک از شکل‌های الف و ب، و با توجه به قانون لنز، در هر مورد توضیح دهید که آیا آهنربا رو به بالا حرکت می‌کند یا رو به پایین.

مقاله آزاد

اثر دیامغناطیسی


در فصل قبل با مواد پارامغناطیسی و فرومغناطیسی آشنا شدیم. همان طور که دیدیم در این مواد هر اتم دارای یک دو قطبی مغناطیسی دائمی است.

از دیدگاه فیزیک کلاسیک، گردش هر الکترون به دور هسته اتم را می توان به صورت یک حلقه بسیار کوچک جریان در نظر گرفت. هرگاه ماده ای در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد، بنابر قانون لنز در این حلقه های کوچک جریان، یک میدان مغناطیسی در خلاف جهت میدان مغناطیسی خارجی القا می شود. به این ویژگی که در اتم های همه مواد در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی رخ می دهد، **پدیده یا اثر دیامغناطیسی** گفته می شود.

اثر دیامغناطیسی در موادی که اتم های آن دارای دو قطبی های مغناطیسی دائم نباشند، بهتر نمایان می شود. این اثر در مواد فرو مغناطیسی و پارامغناطیسی نمود کمتری دارد؛ زیرا اثر دو قطبی های مغناطیسی دائم این گونه مواد بسیار بیشتر از اثر دو قطبی های القایی است که بر اثر میدان مغناطیسی خارجی در اتم های ماده القا می شود.

در موادی نظیر بیسموت، جیوه، نقره، سرب، مس، نمک طعام و شیشه اثر دیامغناطیسی به خوبی نمایان می شود. به همین جهت به این گونه مواد، **مواد دیامغناطیسی** نیز گفته می شود.

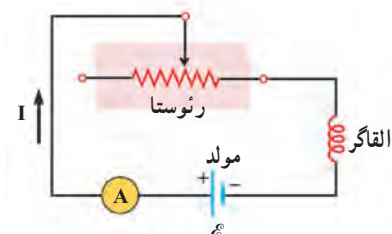
۴-۵- القاگرها و اثر خودالقایی

در فصل ۲ دیدیم که در فضای بین صفحه های یک خازن میدان الکتریکی ایجاد می شود و انرژی الکتریکی توسط همین میدان در خازن ذخیره می شود. به همین ترتیب، می توان از القاگر که در ادامه معرفی خواهد شد، برای تولید میدان مغناطیسی دلخواه و همچنین ذخیره انرژی مغناطیسی توسط میدان مغناطیسی استفاده کرد. افزون بر این، القاگر مانند مقاومت و خازن یکی از اجزای ضروری مدارهای الکترونیکی است. در مدار جریان مستقیم، القاگر به پایا نگه داشتن جریان در برابر افت و خیزهای emf اعمال شده کمک می کند؛ در مدار جریان متناوب (که در پایان همین فصل با آن آشنا خواهید شد)، القاگر از تغییرات جریان که سریع تر از مقدار تعیین شده باشد جلوگیری می کند. شکل ۴-۷ تصویر چند القاگر را در اندازه ها و شکل های متفاوت نشان می دهد. نماد مداری معمول برای القاگر به صورت  است.



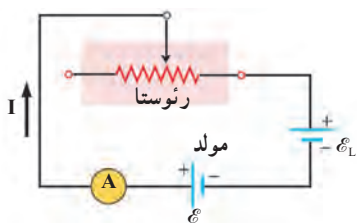
شکل ۴-۷ تصویری از چند القاگر در اندازه ها و شکل های متفاوت

برای بررسی اثر خودالقایی در یک القاگر، مداری را مطابق شکل ۴-۸ در نظر بگیرید. این مدار شامل یک مولد (باتری)، یک رئوستا و القاگری است که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده اند. با تغییر مقاومت رئوستا، جریان در مدار تغییر می کند (چرا؟). تغییر جریان در مدار، سبب تغییر جریان عبوری از القاگر می شود و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از القاگر تغییر می کند. این فرایند سبب القای **نیروی محرکه خودالقایی** در القاگر می شود که بنا به قانون لنز با هرگونه تغییر جریان عبوری از آن مخالفت می کند. این پدیده که می تواند در هر القاگری (از قبیل پیچه یا سیملوله) رخ دهد **اثر خودالقایی** نامیده می شود.



شکل ۴-۸ مداری ساده برای بررسی اثر خودالقایی در یک القاگر

القای الکترو مغناطیسی



شکل ۴-۹ اثر خودالقایی سبب می‌شود که القاگر مانند مولدی با نیروی محرکه \mathcal{E}_L در مدار عمل کند.

در مدار شکل ۴-۸، بنابه قانون لنز جهت نیروی محرکه خودالقایی چنان است که می‌خواهد مانع تغییر شار مغناطیسی‌ای شود که مولد ایجاد می‌کند. برای مثال، اگر مقاومت رئوستا کاهش یابد، جریان و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از القاگر می‌خواهد افزایش یابد. در نتیجه نیروی محرکه خودالقایی در جهتی ایجاد می‌شود که با افزایش شار مخالفت می‌کند. به عبارت دیگر در این حالت نیروی محرکه خودالقایی معادل نیروی محرکه باتری‌ای عمل می‌کند که در جهت مخالف مولد در مدار قرار گرفته باشد (شکل ۴-۹).

پرسش ۴-۱۴

فرض کنید در مدار شکل ۴-۹، به جای کاهش مقاومت رئوستا، مقاومت آن را افزایش دهیم. دلیل ایجاد نیروی محرکه خودالقایی و جهت آن را مورد بحث قرار دهید.

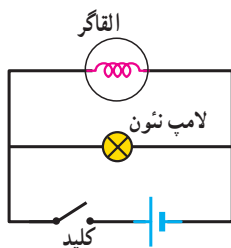
آزمایش ۲-۱۴

بررسی اثر خود القایی در یک پیچ

وسایلهای آزمایش: لامپ نئون (لامپ فازمتری)، القاگر (۱۰۰۰ دور یا بالاتر)، باتری ۹ ولتی، سیم رابط

شرح آزمایش:

۱- مداری مطابق شکل روبه‌رو ببندید. (لامپ، باتری و القاگر با یکدیگر موازی‌اند.)



۲- سر آزاد سیم رابط را به‌طور پی‌درپی به قطب دیگر باتری تماس داده و جدا کنید. دلیل آنچه را مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.

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

مطالعه آزاد



القاگر، انتقال انرژی الکتریکی و آذرخش

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

ضریب خودالقایی : آزمایش نشان می‌دهد که نیروی محرکه خودالقایی القاگر، به عواملی که در رابطه زیر آمده است بستگی دارد.

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (۴-۶)$$

در این رابطه L **ضریب خودالقایی** یا **القاییدگی** القاگر است و یکای آن به افتخار جوزف هانری، کاشف قانون القای الکترومغناطیسی و هم عصر با فارادی، هانری نامیده و با نماد H نشان داده می‌شود. ضریب خودالقایی L از ویژگی‌های ساختمانی القاگر است و به تعداد دور، طول، سطح مقطع و... القاگر بستگی دارد (مثال ۴-۸ را ببینید). رابطه ۴-۶ همچنین روشی به نسبت ساده برای اندازه‌گیری ضریب خودالقایی نامعلوم یک مدار را در اختیار ما می‌گذارد. به این منظور کافی است جریان را در مداری با آهنگ معلوم dI/dt تغییر دهیم و \mathcal{E}_L را اندازه بگیریم. نسبت این دو مقدار فیزیکی برابر L است.

مثال ۴-۶

جریان در یک القاگر با آهنگ 1 A/s تغییر می‌کند. اگر ضریب خودالقایی القاگر 1 H باشد، بزرگی نیروی محرکه خودالقایی در القاگر چقدر است؟
پاسخ : از داده‌های مسئله داریم :

$$\frac{dI}{dt} = 1 \frac{\text{A}}{\text{s}}, \quad L = 1 \text{ H}, \quad |\mathcal{E}_L| = ?$$

با قراردادن این مقادیر در رابطه ۴-۶ داریم :

$$|\mathcal{E}_L| = \left| -L \frac{dI}{dt} \right| \\ = |-(1 \text{ H})(1 \text{ A/s})| = 1 \text{ V}$$

به این ترتیب می‌توان گفت : **یک هانری (1 H) ضریب خودالقایی القاگری است که اگر جریان عبوری از آن با آهنگ یک آمپر بر ثانیه (1 A/s) تغییر کند، نیروی محرکه خودالقایی برابر یک ولت (1 V) در آن القا می‌شود.**

مثال ۴-۷

از سیم‌لوله‌ای به ضریب خودالقایی 4 mH ، جریان متغیری می‌گذرد که با زمان به صورت $I = (4t - 3) \times 10^{-3}$ تغییر می‌کند (I بر حسب آمپر و t بر حسب ثانیه است). بزرگی نیروی محرکه خودالقایی را محاسبه کنید.
پاسخ : از داده‌های مسئله داریم :

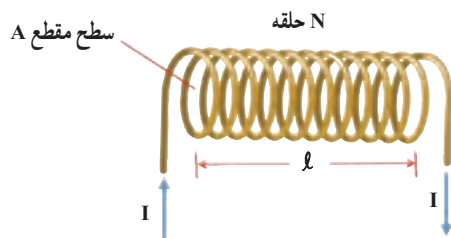
$$L = 4 \text{ mH}, \quad I = (4t - 3) \times 10^{-3}, \quad |\mathcal{E}_L| = ?$$

ابتدا آهنگ تغییر جریان نسبت به زمان (dI/dt) را به دست می‌آوریم :

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt} [(4t - 3) \times 10^{-3}] = 4 \times 10^{-3} \text{ A/s} = 4 \text{ mA/s}$$

با استفاده از رابطه ۴-۶ داریم :

$$|\mathcal{E}_L| = \left| -L \frac{dI}{dt} \right| = |-(4 \text{ mH})(4 \times 10^{-3} \text{ A/s})| \\ = 16 \times 10^{-6} \text{ V} = 16 \text{ mV}$$



شکل روبه‌رو سیملوله‌ای حامل جریان I به طول ℓ و سطح مقطع A را نشان می‌دهد که از N حلقهٔ نزدیک به هم تشکیل شده است. ضرب خودالقایی این سیملوله را پیدا کنید.

پاسخ: در فصل ۳ دیدیم که میدان مغناطیسی درون سیملولهٔ حامل جریان I از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

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

با توجه به اینکه میدان مغناطیسی درون سیملوله یکنواخت و موازی با محور آن است، شار مغناطیسی حاصل از آن، که از سیملوله می‌گذرد برابر است با:

$$\Phi = BA = \mu_0 \frac{NA}{\ell} I$$

با تغییر جریان، شار مغناطیسی عبوری از سیملوله نیز تغییر می‌کند. در این صورت نیروی محرکهٔ خودالقایی برابر است با:

$$\mathcal{E}_L = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$= -N \frac{d}{dt} \left(\mu_0 \frac{NA}{\ell} I \right)$$

$$\mathcal{E}_L = -\mu_0 \frac{N^2 A}{\ell} \frac{dI}{dt}$$

یا

$$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{\ell}$$

از مقایسهٔ این رابطه با رابطهٔ ۴-۶ داریم:

همان‌طور که انتظار داشتیم این رابطه نشان می‌دهد که القاییدگی یا ضرب خودالقایی یک القاگر، تنها تابع ویژگی‌های ساختاری آن است.

توجه: در فصل ۳ دیدیم که اگر سیملوله هسته داشته باشد، میدان مغناطیسی حاصل از آن تقویت می‌شود. به همین دلیل وجود هسته درون القاگر نیز سبب تقویت القاییدگی آن می‌شود و در نتیجه برای سیملوله دارای هسته داریم:

$$L = K \mu_0 \frac{N^2 A}{\ell}$$

در این رابطه، K ضریبی بدون یکا است که به جنس هستهٔ داخل سیملوله بستگی دارد و به آن **ضریب تراوایی**

مغناطیسی نسبی هسته می‌گویند.

ضرب خودالقایی سیملولهٔ بدون هسته به طول 5 cm و سطح مقطع 1 cm^2 متشکل از 2000 حلقهٔ نزدیک به هم را پیدا کنید.

پاسخ: از داده‌های مسئله داریم:

$$\ell = 5\text{ cm} = 0.05\text{ m} \text{ و } A = 1\text{ cm}^2 = 1 \times 10^{-4}\text{ m}^2 \text{ و } N = 2000$$

$$L = ?$$

با استفاده از نتیجه مثال ۴-۸ و قراردادن مقادیر بالا در آن داریم :

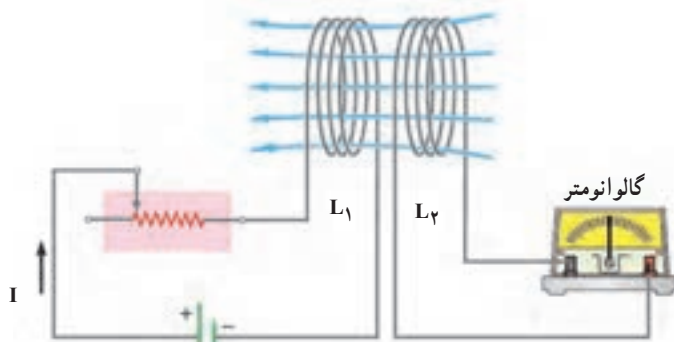
$$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{\ell} = (4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m / A}) \frac{(2000)^2 \times (10^{-3} \text{ m}^2)}{0.05 \text{ m}}$$

$$= 10^{-2} \text{ H} = 10 \text{ mH}$$

تمرین ۳۴-۳

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

القای متقابل : دو پیچه مجاور هم را مطابق شکل ۴-۱۰ در نظر بگیرید. جریان عبوری در پیچه ۱، میدان مغناطیسی \vec{B} را به وجود می‌آورد و در نتیجه این میدان یک شار مغناطیسی از پیچه ۲ می‌گذراند. اگر جریان در پیچه ۱ تغییر کند، شار عبوری از پیچه ۲ نیز تغییر می‌کند؛ بنابر قانون فارادی، این تغییر شار نیروی محرکه‌ای در پیچه ۲ القا می‌کند. این فرایند **القای متقابل** نامیده می‌شود و به کمک آن می‌توان انرژی را از پیچه‌ای به پیچه دیگر منتقل کرد.



شکل ۴-۱۰ با تغییر جریان عبوری از القاگر L_1 ، شار مغناطیسی عبوری از القاگر L_2 نیز تغییر می‌کند. این تغییر شار مغناطیسی یک نیروی محرکه القایی در القاگر L_2 تولید می‌کند که می‌توان جریان ناشی از آن را با یک گالوانومتر مشاهده کرد.



هانری (۱۸۷۸-۱۷۹۷)

هانری در آمریکا به دنیا آمد. او در خانواده فقیری می‌زیست و از جوانی مجبور بود کار کند و در نتیجه تحصیلات مرتبی نداشت. او در سیزده سالگی شاگرد ساعت‌سازی شد و شبانه به تحصیل می‌پرداخت. پس از آن با کوشش بسیار توانست در یکی از مدارس روستایی به شغل معلمی بپردازد. سپس به تحصیل طب و مهندسی علاقه‌مند شد و سرانجام به سمت استاد ریاضیات و فیزیک انتخاب گردید. او از سال ۱۸۶۸ تا پایان عمر ریاست آکادمی ملی علوم را عهده‌دار بود. او تجربیات زیادی در مورد الکترومغناطیس داشت و با پیچیدن سیم‌های ظریف عایق‌بندی شده به تعداد زیاد به دور هسته‌های آهنی، آنتریاهای الکتریکی پر قدرتی را ساخت. سپس موفق به کشف پدیده خودالقایی شد. او همچنان یک موتور الکتریکی ساخت که بعداً در تلگراف مورد استفاده زیادی قرار گرفت. یکای القاییدگی به احترام او هانری نامیده می‌شود.

اگر در شرایط آرمانی تمام شار مغناطیسی پیچه ۱ از پیچه ۲ بگذرد، ضریب القای متقابل که آن را با نماد M نشان می‌دهند، از رابطه $M = \sqrt{L_1 L_2}$ به دست می‌آید. از آنجا که تغییرات جریان در یک مدار می‌تواند نیروهای محرکه ناخواسته‌ای در دیگر مدارهای مجاور القا کند، القای متقابل می‌تواند مزاحمتی در مدارهای الکتریکی باشد. برای هرچه کم کردن این اثرها، سامانه‌های چندمداری باید به گونه‌ای طراحی شوند تا M تا حد ممکن کوچک باشد. القای متقابل کاربردهای مفید بسیاری نیز دارد. مثلاً در مبدل‌ها که در پایان همین فصل با آنها آشنا خواهید شد مقدار M نقش مهمی در مقدار ولتاژ خروجی آنها ایفا می‌کند.

کاربرد القاگرها در لامپ‌های فلورئورسان



چون القاگرها با تغییرات جریان مخالفت می‌کنند، نقش مهمی در لامپ‌های فلورئورسان (موسوم به لامپ‌های مهتابی) دارند (شکل روبه‌رو). در این لامپ‌ها، جریان الکتریکی از گازی که فضای درون لامپ را پر کرده است می‌گذرد، گاز را یونیده می‌کند و باعث درخشش آن می‌شود؛ ولی گاز یونیده یک رسانای کاملاً غیراھمی است. هرچه جریان بیشتر باشد، گاز را بیشتر یونیده می‌کند و مقاومت آن کمتر می‌شود. اگر ولتاژ به حد کافی بالایی به گاز اعمال شود، جریان می‌تواند بسیار زیاد شود و به مدار بیرونی لامپ

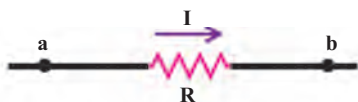
فلورئورسان آسیب برساند. برای جلوگیری از این مسئله، یک القاگر یا متعادل‌کننده مغناطیسی را به‌طور متوالی با لامپ فلورئورسان می‌بندند تا مانع افزایش زیاد جریان شود. متعادل‌کننده همچنین امکان کار لامپ فلورئورسان با ولتاژ متناوب را فراهم می‌سازد. این ولتاژ به‌طور سینوسی تغییر می‌کند؛ به‌طوری که با توجه به ویژگی‌های برق تولیدی در ایران، در هر ثانیه ولتاژ یکصد بار به‌طور لحظه‌ای صفر می‌شود. اگر متعادل‌کننده وجود نداشته باشد، با صفرشدن ولتاژ، گاز داخل لامپ به سرعت وایونیده (غیریونیده) و لامپ خاموش می‌شود. متعادل‌کننده، نیروی محرکه خودالقایی جریان را برقرار می‌سازد و لامپ را روشن نگه می‌دارد.

۶-۴- انرژی ذخیره‌شده در القاگر

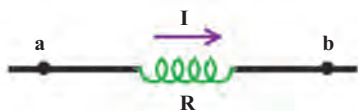
وقتی در دو سر القاگری پتانسیل برقرار شود، مولد به القاگر انرژی می‌دهد. بخشی از این انرژی در مقاومت الکتریکی سیم‌های القاگر به‌صورت گرما تلف و بقیه آن در میدان مغناطیسی القاگر ذخیره می‌شود که مقدار آن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (7-4)$$

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 به‌طور غیرقابل برگشت تلف می‌شود. برخلاف آن، انرژی ذخیره شده در القاگر حامل جریان را می‌توان وقتی جریان به صفر کاهش می‌یابد بازیافت کرد.

لازم است توجه کنید که 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 به‌صورت گرما تلف می‌شود. برخلاف آن، انرژی تنها وقتی وارد یک القاگر آرمانی با مقاومت صفر می‌شود که جریان در آن/فزش یابد. این انرژی تلف نمی‌شود، بلکه در القاگر ذخیره شده و هنگام کاهش جریان، آزاد می‌شود. هنگام عبور جریان پایا از یک القاگر، انرژی به آن وارد یا از آن خارج نمی‌شود.

مثال ۱۴-۱

متخصصان صنعت برق، علاقه‌مندند راه‌های مؤثری را برای ذخیره انرژی الکتریکی تولیدی در ساعت‌های کم‌مصرف بیابند تا با استفاده از آن، نیاز مشتریان را در ساعت‌های پر مصرف تأمین کنند. یک ایده این است که: شاید بتوان از یک القاگر بزرگ استفاده کرد. ضریب خودالقایی این القاگر چقدر باشد تا بتواند 1 kW.h انرژی الکتریکی را در پیچه حامل جریان 200 A ذخیره کند؟

پاسخ: مقدار انرژی ذخیره‌شده مورد نیاز $U = 1 \text{ kW.h}$ و جریان $I = 200 \text{ A}$ داده شده است. از معادله $U = \frac{1}{2} LI^2$ ضریب خودالقایی L را به دست می‌آوریم:

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

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \Rightarrow L = \frac{2U}{I^2}$$

$$L = \frac{2 \times 3.6 \times 10^6 \text{ J}}{(200 \text{ A})^2} = 18 \text{ H}$$

همان‌طور که نتیجه بالا نشان می‌دهد ضریب خودالقایی لازم، صدها هزار برابر بیشتر از ضریب خودالقایی یک القاگر معمولی است که در آزمایشگاه از آن استفاده می‌کنیم. سیم‌های معمولی که حامل 200 A جریان‌اند، برای اجتناب از اتلاف ناخواسته انرژی ناشی از گرمای RI^2t باید قطر بزرگی داشته باشند تا مقاومت القاگر پایین بیاید. در نتیجه اندازه یک القاگر 18 H که از سیم‌های معمولی ساخته شده باشد، باید خیلی بزرگ (به اندازه یک اتاق بزرگ) باشد. با توجه به فناوری‌های موجود این طرح غیرعملی است و توجیه اقتصادی ندارد.

تمرین ۱۴-۱

سیم‌لوله بدون هسته به طول 25 cm و مساحت سطح مقطع 5 cm^2 ، شامل 400 حلقه حامل جریان $1/5 \text{ A}$ است. مطلوب است:

- (الف) ضریب خودالقایی سیم‌لوله
(ب) انرژی ذخیره‌شده در القاگر

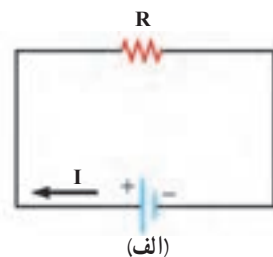
مطالعه آزاد



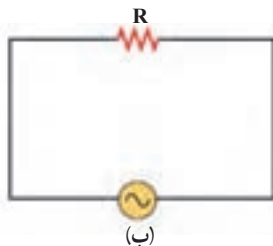
انرژی لازم برای جرقه‌زدن شمع اتومبیل، از انرژی مغناطیسی ذخیره‌شده در پیچه احتراق تأمین می‌شود.

انرژی میدان مغناطیسی نقش مؤثری در دستگاه‌های احتراق اتومبیل‌های با موتور بنزینی دارد. پیچه اولیه با حدود 25° دور به باتری اتومبیل بسته شده است و میدان مغناطیسی قوی‌ای تولید می‌کند. این پیچه را یک پیچه ثانویه با 2500° دور سیم خیلی نازک احاطه کرده است. هنگام جرقه‌زدن شمع برای انفجار، جریان در پیچه اولیه قطع می‌شود و میدان مغناطیسی به سرعت به صفر فرو می‌افتد و نیروی محرکه ده‌ها هزار ولتی در پیچه ثانویه القا می‌کند. در نتیجه انرژی ذخیره‌شده در میدان مغناطیسی به صورت جریان لحظه‌ای بسیار زیاد از پیچه ثانویه به طرف شمع می‌رود و جرقه‌ای تولید می‌کند که سبب احتراق مخلوط سوخت-هوا در سیلندرهای موتور می‌شود (شکل روبه‌رو).

۷-۴- جریان متناوب



(الف)



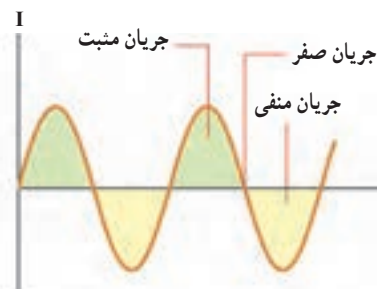
(ب)

شکل ۱۲-۴ الف) مدار ساده جریان

مستقیم و ب) مدار ساده جریان متناوب

در سال ۱۸۸۰ میلادی بحث‌های داغی بین دو مخترع دربارهٔ بهترین روش توزیع توان الکتریکی صورت گرفت. توماس ادیسون موافق جریان مستقیم (dc)، یعنی جریانی بود که با زمان تغییر نمی‌کند. جورج وستینگهاوس از **جریان متناوب (ac)** حمایت می‌کرد که در آن ولتاژ و جریان به‌طور سینوسی تغییر می‌کند. سرانجام، وستینگهاوس پیروز شد و پس از آن بیشتر وسایل خانگی و سامانه‌های توزیع برق با جریان متناوب کار می‌کنند.

شکل ۱۲-۴ دو مدار سادهٔ جریان مستقیم و جریان متناوب را نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید جهت جریان در مدار جریان مستقیم مشخص است درحالی که در مدار جریان متناوب، به دلیل تغییر جهت جریان برحسب زمان، نمی‌توان جهت مشخص و دائمی را برای جریان در نظر گرفت. تمامی نیروگاه‌های تولید برق در دنیا و از جمله ایران، جریان متناوب تولید می‌کنند که تابعی سینوسی از زمان است و به همین دلیل **جریان متناوب سینوسی** نامیده می‌شود (شکل ۱۳-۴).



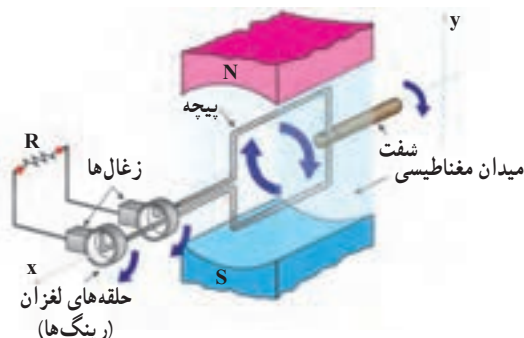
شکل ۱۳-۴ جریان متناوب سینوسی،

متداول‌ترین شکل جریان متناوب است.

یکی از کاربردهای مهم القای الکترومغناطیسی، تولید جریان متناوب است. دیدیم که برای تولید نیروی محرکهٔ القایی باید شار عبوری از مدار تغییر کند، و شار مغناطیسی که از یک پیچه می‌گذرد از رابطهٔ $\Phi = AB \cos \theta$ محاسبه می‌شود که در آن θ زاویهٔ بین نیم خط عمود بر سطح پیچه و میدان مغناطیسی است.

ساده‌ترین راه برای تغییر شار، تغییر زاویهٔ θ است. به همین دلیل متداول‌ترین روش تولید جریان القایی، تغییر زاویهٔ θ است.

شکل ۱۴-۴ پیچه‌ای را نشان می‌دهد که می‌تواند در میدان مغناطیسی یکنواخت دور محور x بچرخد. محور y را منطبق بر راستای میدان مغناطیسی انتخاب کرده‌ایم.



شکل ۱۴-۴ اجزای یک مولد (ژنراتور) سادهٔ ac.

حرکت مکانیکی از طریق میل‌گردان، سبب چرخیدن پیچه در میدان مغناطیسی می‌شود و جریان متناوبی را در مدار به‌وجود می‌آورد.

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

$$\theta = 2\pi \frac{t}{T} \text{ رادیان}$$

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 **پسامد زاویه‌ای** می‌گویند. در نتیجه داریم:

$$\theta = \omega t$$

به این ترتیب شار مغناطیسی $\Phi = AB \cos \theta$ که در لحظه t از پیچه عبور می‌کند برابر است با:

$$\Phi = AB \cos \omega t$$

نیروی محرکه القاشده در پیچه با توجه به قانون فارادی از رابطه ۳-۴ محاسبه می‌شود:

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

یا:

$$\mathcal{E} = NAB\omega \sin \omega t$$

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 $\mathcal{E}_m = NAB\omega$ ؛ در نتیجه می‌توانیم بنویسیم:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t \quad (۸-۴)$$

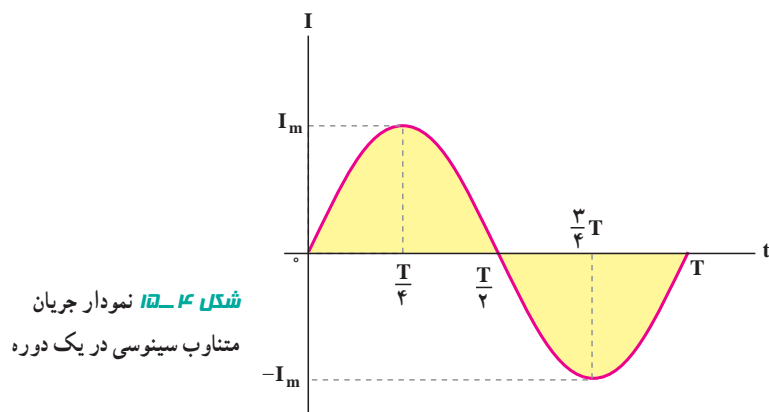
این رابطه نشان می‌دهد که نیروی محرکه القاشده به طور دوره‌ای تغییر می‌کند. اگر مقاومت مدار برابر R باشد، جریان حاصل از این نیروی محرکه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \sin \omega t$$

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 $I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{R}$. در نتیجه می‌توانیم بنویسیم:

$$I = I_m \sin \omega t \quad (۹-۴)$$

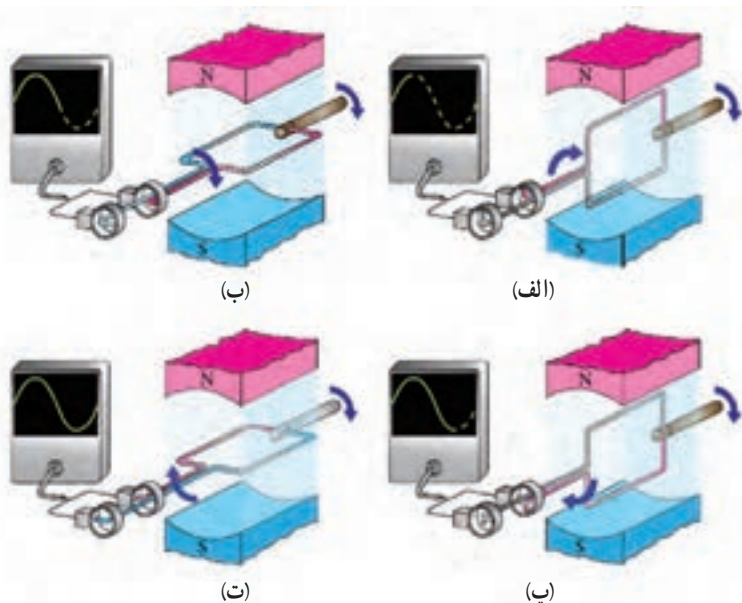
رابطه ۹-۴ نشان می‌دهد که جریان الکتریکی تولید شده در مدار پیچه به طور سینوسی تغییر می‌کند. به چنین جریانی، **جریان متناوب** می‌گوییم. نمودار این جریان بر حسب زمان، در یک دوره در شکل ۱۵-۴ رسم شده است.



شکل ۴-۱۵: نمودار جریان متناوب سینوسی در یک دوره

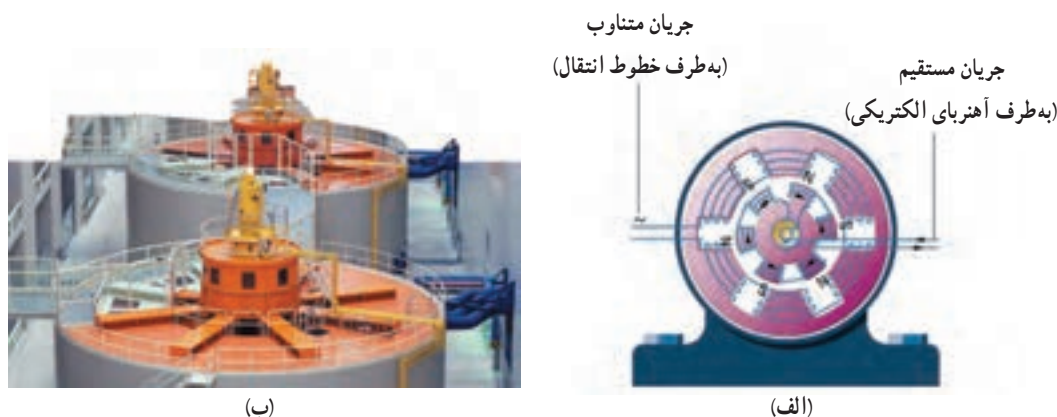
اکنون خواهیم دید که چگونه جریان متناوب سینوسی توسط مولد در یک چرخه کامل تولید می‌شود. این موضوع در شکل ۴-۱۶ در چهار مرحله یا به عبارت دیگر چهار ربع چرخه نشان داده شده است.

در $t=0$ سطح پیچه بر خطوط میدان مغناطیسی عمود است و جریانی در مدار وجود ندارد. پیچه به اندازه $\frac{1}{4}$ دور می‌چرخد تا در وضعیت شکل ۴-۱۶ الف قرار بگیرد. در حین این چرخش، شار مغناطیسی عبوری، از پیچه تغییر می‌کند و جریان از صفر به مقدار بیشینه مثبت می‌رسد (اولین ربع چرخه). پیچه به چرخیدن ادامه می‌دهد تا در وضعیت شکل ۴-۱۶ ب قرار بگیرد. در نتیجه جریان از مقدار بیشینه مثبت به صفر می‌رسد (دومین ربع چرخه). پس از آن پیچه از وضعیت شکل ۴-۱۶ ب به وضعیت شکل ۴-۱۶ پ می‌رسد. در حین این چرخش، جریان از صفر به مقدار بیشینه منفی می‌رسد (سومین ربع چرخه). سرانجام پیچه یک ربع دور دیگر می‌چرخد و یک چرخه کامل طی می‌کند و به وضعیت شکل ۴-۱۶ ت می‌رسد. در نتیجه جریان از مقدار بیشینه منفی به صفر می‌رسد. این حرکت به‌طور متناوب (پی در پی) در پیچه ادامه می‌یابد و جریان متناوب تولید می‌کند.



شکل ۴-۱۷: تولید جریان متناوب در یک چرخه 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 ساکن‌اند و آهنربای الکتریکی در آنها می‌چرخد (شکل ۱۷-۴). در ایران بسامد برق تولیدشده 50 Hz است که این عدد نشان می‌دهد آهنربای الکتریکی در هر ثانیه، 50 مرتبه به‌طور کامل در پیچ می‌چرخد.



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

مثال ۱۱-۴



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 ms طی شده است، دورهٔ تناوب برابر $T = 20\text{ ms}$ است و در نتیجه بسامد زاویه‌ای برابر است با:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi\text{rad}}{20 \times 10^{-3}\text{s}} = 100\pi \text{ rad/s}$$

با توجه به نمودار بیشینهٔ جریان برابر $I_m = 4\text{ A}$ است. به این ترتیب از رابطهٔ ۹-۴ داریم:

$$I = 4 \sin 100\pi t$$

توجه کنید که رابطهٔ بالا برحسب یکاهای SI نوشته شده است.

تمرین ۵-۴

معادلهٔ جریان – زمان یک مولد جریان متناوب برحسب یکاهای SI به‌صورت زیر است:

$$I = 2 \times 10^{-2} \sin 120\pi t$$

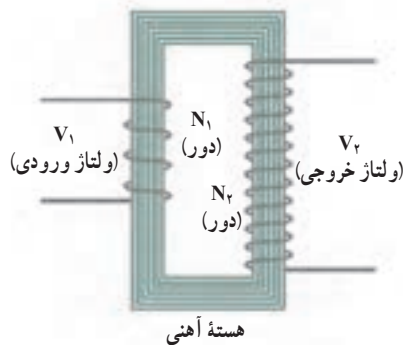
الف) مقدار جریان در لحظهٔ $t = \frac{1}{3}\text{ s}$ چقدر است؟

ب) نمودار جریان برحسب زمان را در یک چرخهٔ کامل رسم کنید.

مبدل ها: یکی از امتیازهای مهم توزیع توان الکتریکی ac بر dc آن است که افزایش و کاهش ولتاژ ac، بسیار آسان تر از dc است. در انتقال توان در فاصله های دور می خواهیم تا حد امکان از ولتاژ هرچه بالاتر و جریان هرچه کمتری استفاده کنیم، این کار اتلاف RI^2 را در خط های انتقال کم می کند و می توان از سیم های نازک تری استفاده و در مصرف مواد اولیه صرفه جویی کرد. خط های انتقال توان الکتریکی به طور معمول از ولتاژهای در حدود ۴۰۰ کیلوولت استفاده می کنند (شکل ۴-۱۸). از طرف دیگر، ملاحظات ایمنی و الزامات عایق بندی در ساخت وسایل خانگی و صنعتی، ولتاژهای به نسبت پایین تری را ضروری می کند. ولتاژ استاندارد برای سیم کشی خانگی در ایران و بسیاری از کشورهای دیگر ۲۲۰ V است. تبدیل ولتاژ مورد نیاز با استفاده از **مبدل ها**، که به دو صورت کاهنده و افزایشنده ساخته می شوند، صورت می گیرد.

شکل ۴-۱۸ قبل از انتقال توان الکتریکی

از نیروگاه ها، مبدل های افزایشنده، ولتاژ را تا حدود ۴۰۰ کیلوولت افزایش می دهند. در انتهای مسیر، مبدل های کاهنده، ولتاژ را کاهش می دهند تا با امنیت بیشتر به محل مصرف برسد.



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

شکل ۴-۱۹ مبدلی شامل دو پیچه با تعداد دورهای متفاوت را نشان می دهد که به دور یک هسته آهنی (فرومغناطیس نرم) پیچیده شده اند (پیچه ها نسبت به هسته عایق بندی شده اند). در عمل پیچه اولیه با N_1 دور به یک مولد جریان متناوب بسته شده است که ولتاژ بیشینه آن V_1 است. پیچه ثانویه با N_2 دور به مصرف کننده ای وصل شده است که ولتاژ بیشینه V_2 را تأمین کند. برای یک مبدل آرمانی که مقاومت پیچه های آن ناچیز است، رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (4-10)$$

مثال ۴-۱۲



شکل روبه رو یک مبدل ۲۲۰ ولت به ۱۲ ولت را نشان می دهد. تعداد دورهای پیچه ثانویه را پیدا کنید.

پاسخ: با توجه به داده های روی شکل داریم:

$$N_2 = ? \text{ و } V_2 = 12V \text{ و دور } N_1 = 8000 \text{ و } V_1 = 220V$$

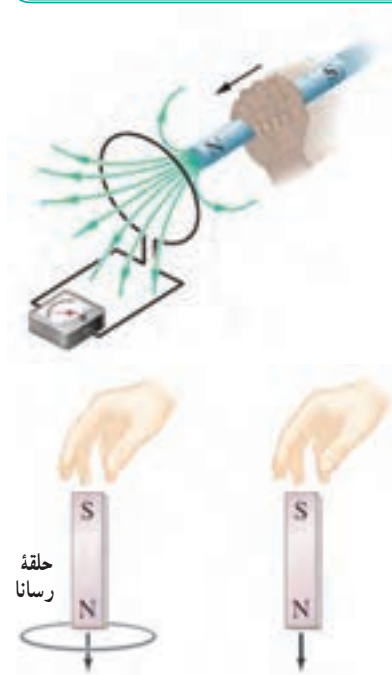
با جای گذاری این مقادیر در رابطه ۴-۱۰ داریم:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

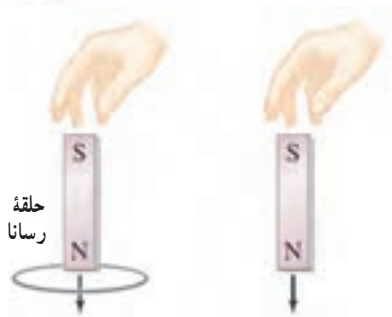
$$\frac{12V}{220V} = \frac{N_2}{8000} \Rightarrow N_2 = 436 \text{ دور}$$

پرسش‌ها

۱ قطب N یک آهنربا را مطابق شکل روبه‌رو به یک حلقهٔ رسانا نزدیک می‌کنیم. جهت جریان القایی را در حلقه مشخص کنید.



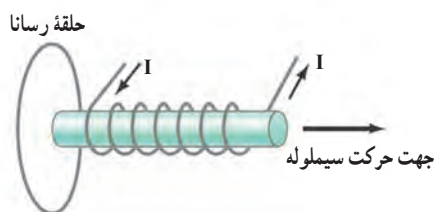
۲ دو آهنربای میله‌ای مشابه را به‌طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک سطح زمین رها می‌کنیم (شکل روبه‌رو). اگر سطح زمین در محل برخورد آهنرباها نرم باشد، مقدار فرو رفتگی آهنرباها را در زمین با یکدیگر مقایسه کنید. (تأثیر میدان مغناطیسی زمین روی آهنرباها را نادیده بگیرید.)



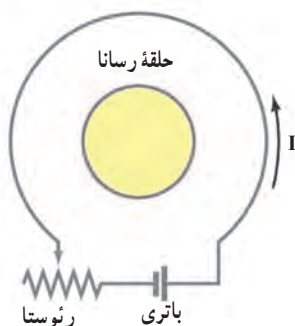
۳ جهت جریان القایی در هریک از حلقه‌های رسانای نشان داده شده در شکل روبه‌رو در چه جهتی است؟

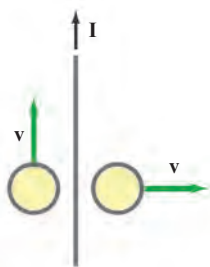


۴ شکل روبه‌رو سیم‌لولهٔ حامل جریانی را نشان می‌دهد که در حال دور شدن از یک حلقهٔ رساناست. جهت جریان القایی را در حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



۵ اگر در مدار شکل روبه‌رو مقاومت رنوستا افزایش یابد، جهت جریان القایی را در حلقهٔ رسانا با ذکر دلیل تعیین کنید.

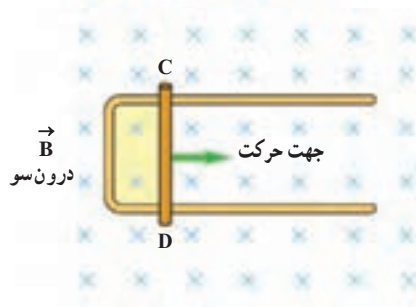




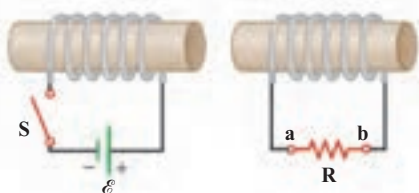
۶ دو حلقهٔ رسانا در مجاورت یک سیم دراز حامل جریان ثابت I قرار دارند؛ این دو حلقه با سرعت ثابت، ولی جهت‌های متفاوت مطابق شکل روبه‌رو حرکت می‌کنند. جهت جریان القایی را در هر حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



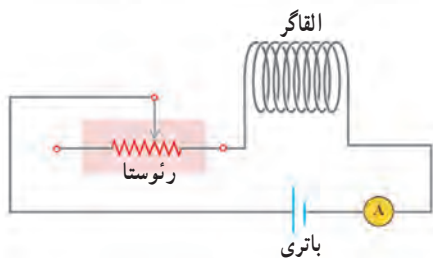
۷ حلقهٔ رسانای مستطیل شکلی را مطابق شکل روبه‌رو به طرف راست می‌کشیم و از میدان مغناطیسی درون‌سویی خارج می‌کنیم. جهت جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟



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

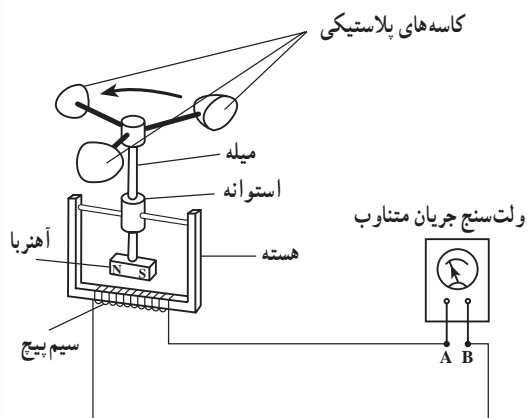


۹ در مدار نشان داده شده در شکل روبه‌رو، جهت جریان القایی را در مقاومت R در هریک از دو حالت زیر با ذکر دلیل پیدا کنید:
الف) در لحظهٔ بستن کلید S ،
ب) در لحظهٔ باز کردن کلید S .



۱۰ شکل روبه‌رو مداری را نشان می‌دهد که شامل یک القاگر (سیملوله)، باتری، رئوستا و آمپرسنج که به‌طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند. اگر بخواهیم بدون تغییر ولتاژ مولد، انرژی ذخیره شده در القاگر را زیاد کنیم چه راه‌هایی پیشنهاد می‌کنید؟

۱۱ شکل روبه‌رو ساختمان یک بادسنج را نشان می‌دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد میلهٔ آن می‌چرخد و ولت‌سنج عددی را نشان می‌دهد.

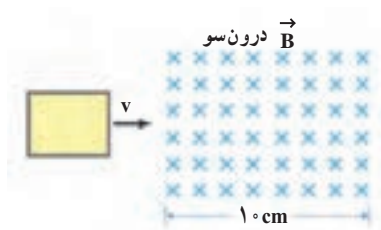


الف) چرا چرخش میله سبب انحراف عقربهٔ ولت‌سنج می‌شود؟

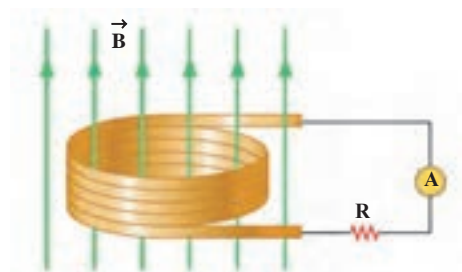
ب) آیا با افزایش سرعت باد، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ چرا؟

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

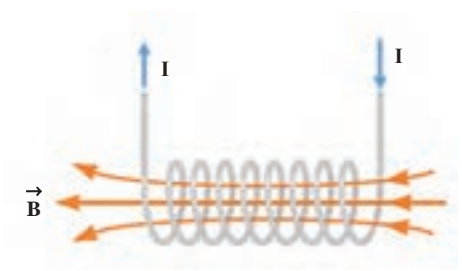
مسئله‌ها



- ۱ حلقه فلزی مستطیلی شکلی به ابعاد $3\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ مطابق شکل روبه‌رو با سرعت ثابت 2 m/s وارد میدان مغناطیسی یکنواخت 2 T می‌شود و از طرف دیگر آن خارج می‌شود. نمودار شاری که از حلقه می‌گذرد و همچنین نیروی محرکه القا شده در آن را برحسب زمان رسم کنید.



- ۲ شکل روبه‌رو بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد. در این مدار با افزایش شار مغناطیسی عبوری از القاگر (پیچه) در مدت 2 ms ، جریانی که آمپرسنج می‌خواند از صفر به 1 A می‌رسد. اگر ضریب خودالقایی القاگر 5 H باشد، بزرگی نیروی محرکه خودالقایی متوسط القاگر چند ولت است؟

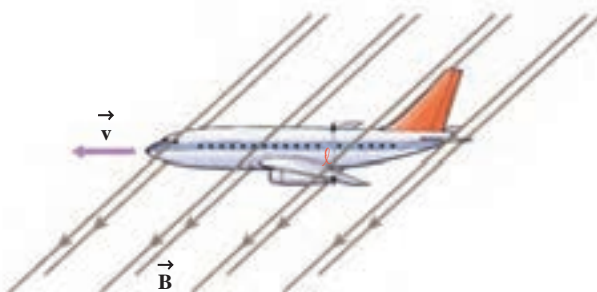


- ۳ سطح مقطع و طول سیم‌لوله شکل روبه‌رو به ترتیب 2 cm^2 و 8 cm است. اگر این سیم‌لوله از 1000 حلقه نزدیک به هم تشکیل شده باشد، الف) ضریب خودالقایی آن را پیدا کنید.

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

- ۴ پیچه‌ای که دارای 1000 حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازه آن 4 T و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت 1 s تغییر می‌کند و به 4 T در خلاف جهت اولیه می‌رسد. اگر سطح هر حلقه پیچه 5 cm^2 باشد، الف) اندازه نیروی محرکه القایی متوسط در پیچه را حساب کنید. ب) شکلی برای پیچه رسم کنید و جهت جریان القایی را روی این شکل تعیین کنید.

- ۵ شکل زیر هواپیمایی را نشان می‌دهد که در راستای افق درون میدان مغناطیسی زمین در حال حرکت است. نیروی محرکه الکتریکی بین دو طرف انتهایی بال‌های هواپیما را که به فاصله l از یکدیگر واقع پیدا کنید. فرض کنید $B = 5\text{ }\mu\text{T}$ ، $l = 3\text{ m}$ ، $v = 200\text{ m/s}$ و $\theta = 3^\circ$. (راهنمایی: به مثال ۴-۴ توجه کنید.)



القای الکترومغناطیسی

۶ پیکه‌ای با سطح مقطع 3 cm^2 و متشکل از 1000 حلقه، در ابتدا بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت 2 s پیکه بچرخد و موازی میدان مغناطیسی زمین قرار بگیرد، نیروی محرکه متوسط القایی در آن چقدر است؟ اندازه میدان زمین را 5 G در نظر بگیرید.

۷ اگر شار مغناطیسی عبوری از حلقه‌ای مطابق رابطه زیر (در SI) تغییر کند، بزرگی نیروی محرکه القایی در حلقه در لحظه $t = 2 \text{ s}$ چقدر است؟

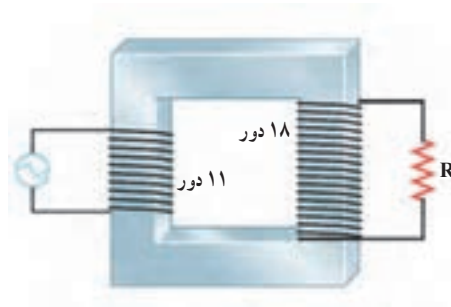
$$\Phi_B = (4t^2 + 3t - 1) \times 10^{-3}$$

۸ جریان متناوبی که بیشینه آن 2 A و دوره آن 2 s است از یک رسانای 5 اهمی می‌گذرد.

الف) در چه لحظه‌هایی جریان بیشینه است؟ در این لحظه‌ها نیروی محرکه القایی چقدر است؟

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

۹ در مبدل آرمانی شکل زیر، اگر بیشینه ولتاژ دوسر مقاومت R برابر 6 V باشد، بیشینه ولتاژ مولد چقدر است؟



عملیات چهارگانه با رقم‌های بامعنا

در محاسبه‌ها چنانچه تعداد رقم‌های بامعناى عددهایی که به کمک آنها یکی از عمل‌های چهارگانه (جمع، تفریق، ضرب و تقسیم) را انجام می‌دهیم، برابر نباشند، حاصل عملیات باید به گونه‌ای بیان شود که دقتی بیشتر از دقت عددهای اندازه‌گیری شده را بیان نکند. اگر بخواهیم دو مقدار $58/3 \text{ m}$ و $13/24 \text{ m}$ را با هم جمع کنیم، باید توجه داشته باشیم که عدد اول با دقت $1/10^\circ$ متر اندازه‌گیری شده است، یعنی رقم غیرقطعی آن (۳) دارای دقت از مرتبه دهم متر است و عدد دوم با دقت $1/10^\circ$ متر اندازه‌گیری شده است و رقم غیرقطعی آن (۴) دارای دقت از مرتبه صدم متر است. اگر حاصل جمع این دو مقدار را برابر $71/54 \text{ m}$ بیان کنیم، دقت یکصدم متر را برای عدد اول هم به کار برده‌ایم، در حالی که در اندازه‌گیری اول، دقت ما تا دهم متر بوده است. حاصل جمع این دو عدد را باید برابر $71/5 \text{ m}$ بیان کنیم، یعنی عدد ۵ را بزرگ‌ترین مرتبه عدم قطعیت دار نگاه داشته‌ایم و از رقم ۴ صرف‌نظر کرده‌ایم. برای اجتناب از هرگونه اشتباه در بیان نتیجه محاسبه‌های عددهای بامعنا، تعداد رقم‌های بامعناى حاصل عملیات را به کمک قاعده‌های کلی زیر تعیین می‌کنیم:

۱- تعداد رقم‌های بامعنا که از ضرب یا تقسیم چند عدد به دست می‌آید باید برابر باشد با تعداد رقم‌های بامعناى عددی که کمترین تعداد رقم‌های بامعنا را دارد.

۲- هنگام جمع (یا تفریق)، مرتبه آخرین رقم سمت راست حاصل جمع (یا حاصل تفریق) برابر با مرتبه آخرین رقم سمت راست بامعناى عددی است که مرتبه غیرقطعی آن بیشتر است، یعنی دقت اندازه‌گیری آن کمتر بوده است. به بیان دیگر در هنگام جمع (یا تفریق) عددها که با یک یکا بیان شده‌اند، تعداد رقم‌های پشت ممیز عدد حاصل، باید برابر تعداد رقم‌های پشت ممیز عددی باشد که کمترین رقم بعد از ممیز دارد.

مثال

شعاع یک کره $12/5 \text{ cm}$ برآورد شده است. حجم این کره را محاسبه کنید.

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3$$

پاسخ:

$$V = \frac{4}{3} (3/14) (12/5 \text{ cm})^3$$

$$V = 8177/083333 \text{ cm}^3$$

با توجه به اینکه شعاع کره با سه رقم بامعنا بیان شده است، حجم کره برابر $817 \times 10^3 \text{ cm}^3$ خواهد بود.

مثال

جمع زیر را انجام دهید.

$$4/326\text{kg} + 25/13\text{kg}$$

پاسخ: مقدار عدد اول با دقت هزارم کیلوگرم و مقدار دومی تا صدم کیلوگرم دقت دارد. در نتیجه، مرتبه رقم غیرقطعی در عدد دوم بیشتر است و رقم غیرقطعی حاصل جمع باید با دقت صدم بیان شود. در نتیجه خواهیم داشت:

$$4/326\text{kg} + 25/13\text{kg} = 29/45\text{kg}$$

در هنگام جمع و یا تفریق دو عدد که یکای آنها یکسان نیست، باید بدون آنکه در تعداد رقم‌های بامعناى آنها تغییری ایجاد شود، ابتدا همه را برحسب یکای مشترکی بنویسیم. آنگاه با توجه به قاعده کلی که بیان شد، محاسبه موردنظر را انجام دهیم.

مثال

یک سنگ $2/5$ کیلوگرمی را درون یک جعبه 264 گرمی قرار می‌دهیم. جرم کل چند گرم می‌شود؟

پاسخ: ابتدا هر دو عدد را برحسب یکای گرم و به صورت توان یکسان ده می‌نویسیم.

$$m_1 = 2/5\text{kg} = 2/5 \times 10^3\text{g}$$

$$m_2 = 264\text{g} = 264 \times 10^0\text{g}$$

$$m = m_1 + m_2$$

$$m = 2/5 \times 10^3\text{g} + 264 \times 10^0\text{g} = 2/8 \times 10^3\text{g}$$

در نوشتن حاصل جمع، ضمن به کارگیری قاعده بیان شده، از روش گرد کردن نیز استفاده کرده‌ایم و حاصل جمع را به جای $2/764 \times 10^3$ به صورت $2/8 \times 10^3$ نوشته‌ایم.

برخی از رابطه‌ها ضریب‌های ثابتی دارند که از محاسبه به دست نیامده‌اند. مانند عدد ۲ در رابطه زیر

(عرض مستطیل + طول مستطیل) $\times 2$ = (محیط مستطیل)

$$\text{حجم کره} = \frac{4}{3}\pi R^3$$

یا عددهای ۳ و ۴ در رابطه

این گونه ضریب‌ها که رقم غیرقطعی ندارند، به هنگام تعیین تعداد رقم‌های بامعناى حاصل یک محاسبه درنظر گرفته

نمی‌شوند.

واژه نامه فارسی - انگلیسی

Electric current	جریان الکتریکی	Alternating Current	جریان متناوب
Equivalent resistance	مقاومت معادل	Angular frequency	بسامد زاویه ای
Faraday's law of electromagnetic induction	قانون القای الکترومغناطیسی فارادی	Attraction	ربایش
Ferromagnetism	فرومغناطیس	Bar magnet	آهنربای میله ای
Horseshoe magnet	آهنربای نعلی شکل	Capacitance	ظرفیت
Inclination angle	زاویه شیب	Coefficient of resistivity	ضرب دمایی مقاومت ویژه
Induced current	جریان القایی	Coil	پیچ
Inductance	ضرب خودالقایی (القایدگی)	Capacitor	خازن
Inductor	القاگر	Conservation of charge	پایستگی بار
Insulator	عایق	Cosmic ray	پرتو کیهانی
Internal resistance	مقاومت درونی	Coulomb's Law	قانون کولن
Iron core	هسته آهنی	Cycle	چرخه
Kirochhoff's laws	قانون های کیرشهف	Declination Angle	زاویه میل
Lenz's law	قانون لنز	Dielectric constant	ثابت دی الکتریک
Loop	حلقه	Efficiency	بازده
Macroscopic quantities	کمیت های ماکروسکوپی	Electric breakdown	فروریزش الکتریکی
Magnetic axis	محور مغناطیسی	Electric dipole	دوقطبی الکتریکی
Magnetic declination	میل مغناطیسی	Electric field lines	خط های میدان الکتریکی
Magnetic dipole	دوقطبی مغناطیسی	Electric field	میدان الکتریکی
Magnetic domain	حوزه مغناطیسی	Electric force	نیروی الکتریکی
Magnetic energy	انرژی مغناطیسی	Electric motor	موتور الکتریکی
Magnetic field lines	خط های میدان مغناطیسی	Electric potential energy	انرژی پتانسیل الکتریکی
Magnetic field	میدان مغناطیسی	Electric resistance	مقاومت الکتریکی
Magnetic flux	شار مغناطیسی	Electro Motive Force (E.M.F.)	نیروی محرکه الکتریکی
		Electromagnetic induction	القای الکترومغناطیسی

Resistivity	مقاومت ویژه	Magnetic induction	القای مغناطیسی
Resistor	مقاومت	Magnetic permeability	تراوایی مغناطیسی
Rheostat	رئوستا	Mechanism	سازوکار
Right hand rule	قاعده دست راست	Net charge	بار خالص
Self – induction	خودالقایی	Node	گره
Series circuits	مدارهای متوالی	North pole	قطب شمال
Solenoid	سیملوله	Parallel circuits	مدارهای موازی
South pole	قطب جنوب	plate capacitor parallel	خازن تخت (خازن با صفحه‌های موازی)
Surface charge density	چگالی سطحی بار	Paramagnetism	پارامغناطیس
Temporary magnet	آهنربای موقت	Permanent magnet	آهنربای دائمی
Thermal equilibrium	تعادل گرمایی	Permittivity	ضریب گذردهی
to charge	پر کردن – شارژ (خازن)	Polarized	قطبیده
to discharge	خالی کردن (خازن)	Potential difference	اختلاف پتانسیل
Variable resistor	مقاومت متغیر	Relative magnetic permeability	تراوایی نسبی مغناطیسی
Voltage drop	افت پتانسیل	Repulsion	رانش

فهرست منابع

منابع فارسی

- ۱- مبانی فیزیک (جلدهای اول و دوم)، ویرایش دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیگ و ایل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر.
- ۲- فیزیک دانشگاهی (جلدهای اول و دوم)، ویرایش دوازدهم و سیزدهم، سیزر، زیمانسکی، یانگ و فریدمن، ترجمه اعظم پورقاضی، روح الله خلیلی بروجنی، محمدتقی فلاحتی مروتی، مؤسسه نشر علوم نوین.
- ۳- درک فیزیک با رویکرد تصویری، بریان آرنولد، ترجمه روح الله خلیلی بروجنی و مریم عباسیان. چاپ سوم ۱۳۹۲، انتشارات مدرسه.
- ۴- حرارت و ترمودینامیک، مارک زیمانسکی و ریچارد دیتمن، ترجمه حسین توتونچی، حسن شریفیان عطار و محمدهادی هادی زاده، چاپ اول ۱۳۶۴، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۵- دوره درسی فیزیک (جلد اول) گ. س. لندسبرگ، ترجمه لطیف کاشیگر و دیگران، چاپ اول ۱۳۷۴، انتشارات فاطمی.
- ۶- اصول فیزیک (جلد اول)، هانس سی. اوهانیان، ترجمه یوسف امیرارجمند و نادر رابط، چاپ اول ۱۳۸۳، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۷- فیزیک مفهومی، ویرایش دهم، پل جی. هیوئیت، ترجمه منیره رهبر، چاپ اول ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.
- ۸- فیزیک، مارچلو آلونسو و ادوارد جی. فین، ترجمه لطیف کاشیگر، چاپ اول ۱۳۶۷، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۹- دانشنامه فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ترجمه محمدابراهیم ابوکاظمی و دیگران، چاپ اول ۱۳۸۱، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی.
- ۱۰- نمایش هیجان انگیز فیزیک، ویرایش دوم، ایل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر و رسول جعفری تژاد، چاپ اول ۱۳۹۱.

منابع انگلیسی

1. Mc Graw – Hill Dictionary of scientific and technical terms, Parker, Fourth edition, 1989, McGraw – Hill.
2. Holt Physics, Serway and Faughn, 1999, Holt Rinehart and Winston.
3. Physics, Giambattista and Richardson, Second Edition, 2008, McGraw– Hill.
4. University Physics, Wolfgang Bauer and Gray D. Westfall, 2011, McGraw – Hill.
5. Physics, Eugene Hecht, Second Edition, 1997, Brooks / Cole Publishing Company.
6. University Physics, Hugh D. Young, 1992, Addison – Wesley.
7. Physics, Douglas C. Giancoli, 7th Edition, 2014, Prentice – Hall International.
8. Principles of Physics, Frank J. Blatt, 1989, Allyn and Bacon.
9. Introduction to physics, John D. Cutnell and Kenneth W. Johnson, 9th Edition, 2013, John Wiley & Sons.
10. Contemporary College, Edwin Jones and Richard Childers, 2001, McGraw–Hill.
11. Glencoe physics, Paul W. Zitzewitz, 2000, McGraw– Hill.

