

## 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.

## ۵-۱- 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 ۵-۱

#### 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 ۱-۵:** با حرکت آهنربا به طرف سیملوله یا پیچه گالوانومتر جریان القایی را نشان می‌دهد.

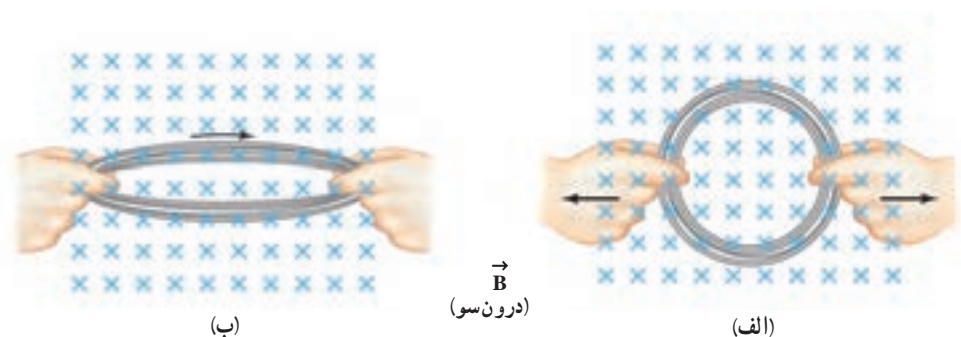
در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فارادی دانشمند انگلیسی و تقریباً همزمان با او جوزف هانری دانشمند آمریکایی، با انجام دادن آزمایش‌هایی مانند آزمایش ۵-۱ دریافتند که هنگام دور و نزدیک کردن آهنربا به پیچه، عقربه میلی آمپرسنج منحرف می‌شود، و عبور جریانی را از مدار نشان می‌دهد؛ مانند وقتی که مولد در مدار وجود داشته 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 مولد جریان متناوب، دینام، مبدل‌ها و بسیاری از وسیله‌های الکتریکی است.

دور یا نزدیک شدن آهنربا به پیچه باعث تغییر میدان مغناطیسی در محل پیچه می‌شود (شکل ۵-۱)؛ و همین امر جریان الکتریکی را در پیچه القا می‌کند. پس می‌توان چنین نتیجه گرفت که **تغییر اندازه میدان مغناطیسی در محل یک مدار بسته باعث القای جریان الکتریکی در آن مدار می‌شود.**

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 ۵-۲ 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 می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که:

**تغییر مساحت مدار بسته در میدان مغناطیسی نیز می‌تواند جریان القایی در مدار تولید کند.**



**شکل ۲-۵:** با تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود.

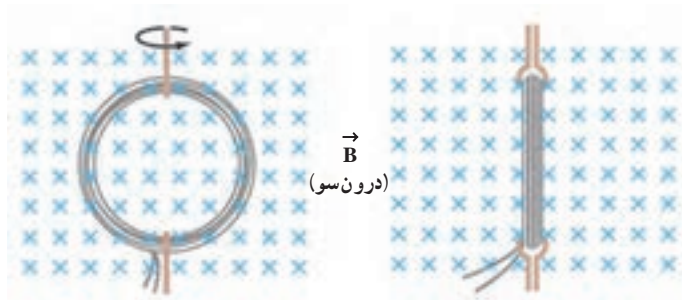
با انجام دادن فعالیت زیر، با یک روش دیگر تولید جریان القایی آشنا می‌شوید.

### فعالیت ۱-۵

یک آهنربای میله‌ای را در نزدیکی پیچه‌ای قرار دهید. بدون تغییر فاصله آهنربا از پیچه، آن را بچرخانید. هر تغییری را که در گالوانومتر مشاهده می‌کنید، گزارش دهید.

با چرخاندن پیچه در میدان مغناطیسی یکنواخت مطابق شکل ۵-۳، اندازه میدان مغناطیسی و مساحت حلقه مدار تغییر نمی‌کند، ولی زاویه بین میدان مغناطیسی و سطح پیچه تغییر می‌کند. از این فعالیت می‌توان نتیجه گرفت که :

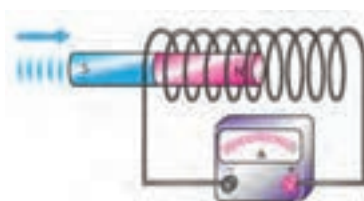
تغییر زاویه بین پیچه و راستای میدان مغناطیسی نیز سبب برقراری جریان الکتریکی القایی می‌شود.



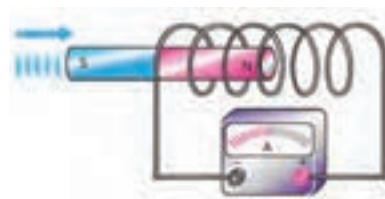
**شکل ۵-۳** هنگام چرخش پیچه در میدان مغناطیسی و تغییر زاویه بین پیچه و میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی القا می‌شود.

### مثال ۵-۱

دریافت خود را از شکل‌های زیر بنویسید.



(الف)

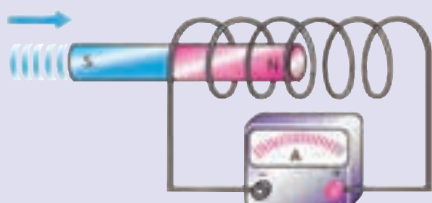


(ب)

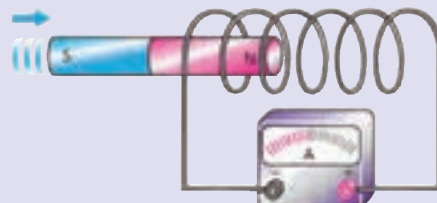
**پاسخ:** در شکل الف با ورود آهنربا به پیچه جریانی در آن القا شده است. در شکل ب، آهنربا با همان شرایط قسمت الف، وارد پیچه‌ای با تعداد دور بیشتر شده است. در نتیجه همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود جریان بزرگ‌تری در پیچه القا شده است.

### پرسش ۵-۱

دریافت خود را از شکل‌های زیر بنویسید.

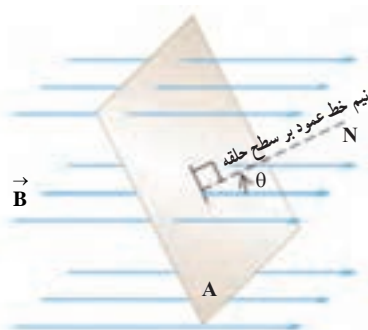


(الف)



(ب)

## ۲-۵- شار مغناطیسی



شکل ۲-۴ نیم خط عمود بر سطح

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

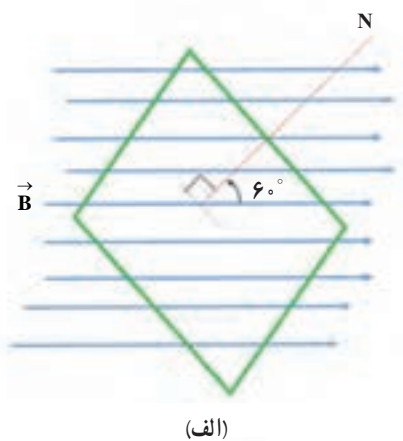
در آزمایش‌های قبل دیدیم که بر اثر تغییر میدان مغناطیسی در حلقه، تغییر مساحت حلقه، و یا تغییر زاویه بین سطح حلقه و جهت میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود. کمیت موسوم به شار مغناطیسی، این سه کمیت را دربر دارد. این کمیت نرده‌ای به صورت زیر معرفی می‌شود. فرض کنید حلقه‌ای به مساحت A مطابق شکل ۲-۵ در میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  قرار دارد. شار میدان مغناطیسی یکنواخت<sup>۱</sup> که از سطح حلقه می‌گذرد به صورت زیر تعریف و با نماد  $\Phi$  نشان داده می‌شود.

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (۱-۵)$$

که در آن،  $\theta$  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 ۱-۵ چنین برمی‌آید:

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

## مثال ۲-۵



(الف)

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  $100 \text{ G}$  مطابق شکل الف زاویه  $6^\circ$  می‌سازد.

ب) اگر این قاب را بچرخانیم به طوری که زاویه نیم خط عمود بر آن با خط‌های میدان مغناطیسی از  $6^\circ$  به  $3^\circ$  کاهش یابد، شار مغناطیسی چقدر تغییر می‌کند؟

پاسخ: الف) مطابق شکل الف زاویه بین خط‌های میدان و نیم خط عمود بر سطح برابر  $6^\circ$  است. بنابراین داریم:

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

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

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

ب) در وضعیت شکل ب،  $\theta' = 3^\circ$  است. به این ترتیب داریم:

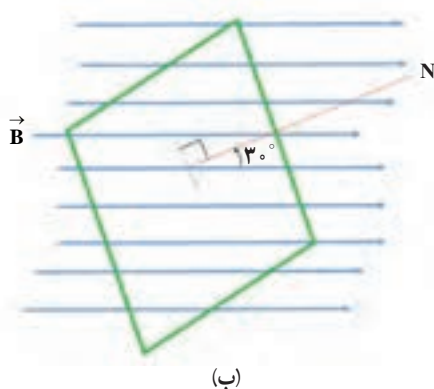
$$\Phi' = BA \cos \theta' = (10^{-2} \text{ T}) \times (6 \times 10^{-2} \text{ m}^2) \cos 3^\circ$$

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

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

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

$$\Delta \Phi = 1/2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

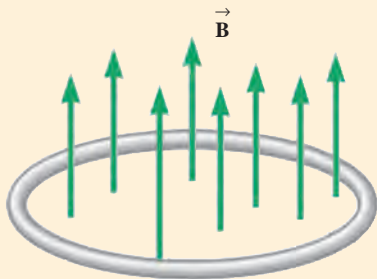


(ب)

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



## تمرین ۱۵



حلقه‌ای به مساحت  $5 \text{ cm}^2$  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  $3\% \text{ T}$  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 پیچیده 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 ۲-۵ تا ۴-۵ 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 پیچ ایجاد می‌شود.

### ۳-۵- 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.

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (۲-۵)$$

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  $\left(\frac{\text{Wb}}{\text{s}}\right)$  است.



مایکل فارادی (۱۷۹۱-۱۸۶۷)

پسر یک آهنگر انگلیسی بود. به گفته خود او: «تحصیلات من بسیار معمولی بود. خواندن را کمی بیشتر از حد مقدماتی و نوشتن و ریاضیات را در حد شاگرد یک مدرسه روزانه می‌دانستم. ساعت‌های خارج از مدرسه من در خانه و خیابان‌ها می‌گذشت.» 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 به عنوان یک همکار در امور پژوهشی استخدام کرد. فارادی به زودی نبوغ خود را به عنوان یک آزمایشگر نشان داد. او مقاله‌های مهمی در شیمی، خواص مغناطیسی، الکتریسته و نور نوشت و سرانجام به عنوان 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 :

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3-5)$$

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

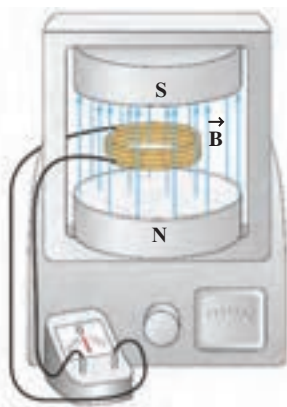
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = -\frac{N}{R} \frac{d\Phi}{dt} \quad (4-5)$$

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

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

همان طور که از رابطه (۴-۵) 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 ۴-۵، باید از رابطه  $\bar{I} = -\frac{N}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  استفاده کنیم.

### مثال ۳-۵



پیچه ای شامل  $200$  دور که مساحت هر حلقه آن  $24 \text{ cm}^2$  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  $0.18 \text{ T}$  به  $0.22 \text{ T}$  افزایش یابد،

(الف) اندازه نیروی محرکه القایی متوسط ایجاد شده در پیچه چقدر است؟  
(ب) اگر مقاومت پیچه  $1 \Omega$  باشد، اندازه جریان القایی متوسط که از پیچه می گذرد چقدر است؟

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

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

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

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 ۵-۵ داریم :

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

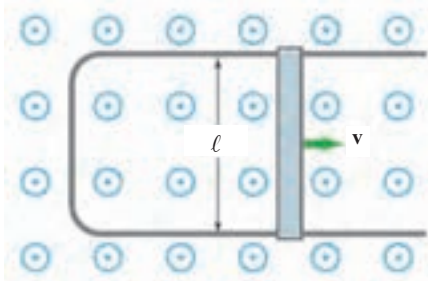
و اندازه آن برابر است با :

$$|\bar{\mathcal{E}}| = 6/2 \text{ V} = 3 \text{ V}$$

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

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

## مثال ۱۴-۵



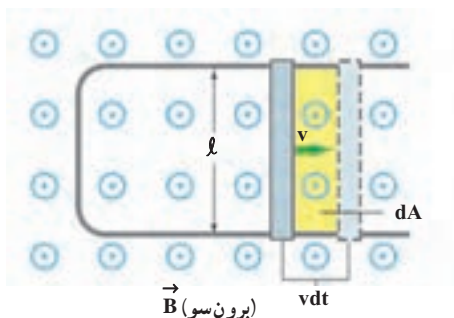
$\vec{B}$  (برون سو)

شکل روبه‌رو رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  به بزرگی  $0.18 \text{ T}$  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 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 :

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(BA)}{dt} = -B \frac{dA}{dt}$$



$\vec{B}$  (برون سو)

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

$$\mathcal{E} = -B \frac{\ell v dt}{dt} = -B \ell v$$

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

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

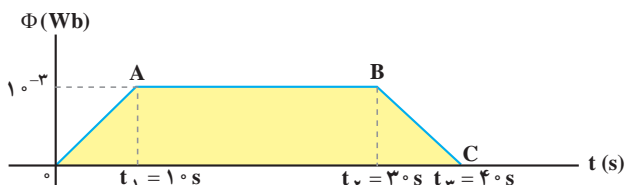
و اندازه آن برابر است با :

$$|\mathcal{E}| = 0.72 \text{ V} = 72 \text{ mV}$$

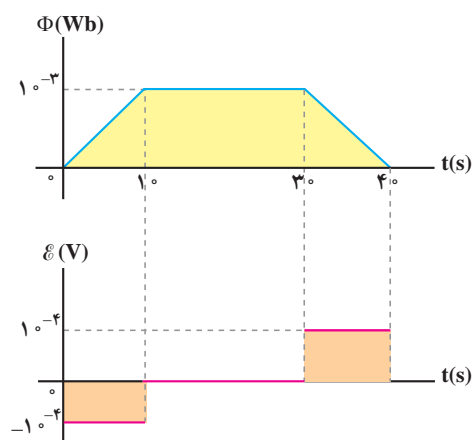


توجه کنید که به علت ثابت بودن سرعت میله لغزنده، نیروی محرکه القایی ثابت است. از این رو، رسانای U شکل با سیم لغزنده یک مولد جریان مستقیم است. سرانجام چون میله از رسانای U شکل خارج و تماس آن قطع و جریان متوقف می شود، این وسیله کاربرد چندانی ندارد.

## مثال ۵-۵

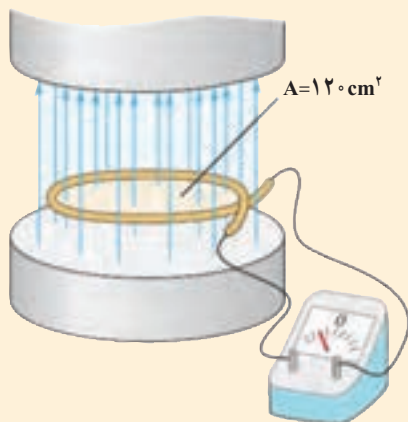


تغییرات شار مغناطیسی برحسب زمان که از یک حلقه می گذرد در نمودار شکل روبه رو داده شده است. نمودار نیروی محرکه القا شده در حلقه را برحسب زمان رسم کنید.



**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  $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$ ، 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،  $\frac{d\Phi}{dt} = 0$  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،  $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ ؛ 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 ۵-۵



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  $28 \text{ T}$  به  $12 \text{ T}$  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  $2 \Omega$  باشد بزرگی جریان القایی در حلقه را پیدا کنید.



سرعت سنج دو چرخه های مسابقه ای شامل یک آهنربای کوچک و یک پیچ است. آهنربا به یکی از پره های چرخ جلو و پیچ به دو شاخ فرمان متصل است (شکل روبه رو). دو سر پیچ با سیم های رسانا به سرعت سنج (که در واقع یک رایانه کوچک است) وصل شده است. به نظر شما سرعت سنج دو چرخه چگونه کار می کند؟ این موضوع را در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس درس ارائه دهید.



(الف) ذره های فزومغناطیسی، که در واقع هر کدام آهنربای بسیار کوچکی هستند، داده ها را به صورت صفر یا یک در خود ذخیره می کنند. در نوار مغناطیسی پشت هر کارت میلیارد ها ذره فزومغناطیسی وجود دارد.



(ب) با کشیدن کارت در دستگاه کارت خوان، میدان مغناطیسی ناشی از ذره های فزومغناطیسی، جریان اندکی در پیچ تعبیه شده در دستگاه کارت خوان القا می کنند.

### کارت های اعتباری و دستگاه های کارت خوان

نوار مغناطیسی پشت کارت های اعتباری حاوی میلیاردها ذره فزومغناطیسی (آهنربای بسیار کوچک) است که نوعی چسب خاص، آنها را به هم متصل می کند. داده ها را که به صورت دودویی، با صفر و یک به رمز درآورده اند، در این ذره های مغناطیسی ذخیره می کنند (شکل الف). وقتی کارت اعتباری شما درون دستگاه کارت خوان کشیده می شود، میدان مغناطیسی ناشی از ذره های مغناطیسی، روی پیچ تعبیه شده در دستگاه کارت خوان اثر می گذارد و جریان اندکی را در آن القا می کنند (شکل ب). این جریان بسیار کوچک توسط دستگاه دیگری تقویت و داده های ذخیره شده در آن رمزگشایی می شود. پس از رمزگشایی داده ها، دستور مورد نظر انجام می شود.

فناوری و کاربرد

### مطالعه آزاد



### معاینه مغز با نیروهای محرکه القایی

برانگیزش مغناطیسی فرا جمجمه ای (TMS)<sup>۱</sup> روشی برای بررسی عملکرد بخش های مختلف مغز است. در این روش پیچ های روی سر شخص بیمار قرار داده می شود که جریان الکتریکی متغیری از آن می گذرد و در نتیجه میدان مغناطیسی متغیری تولید می کند. این میدان نیروی محرکه القایی به وجود می آورد و باعث فعالیت الکتریکی مغز در ناحیه ای می شود که در زیر پیچ قرار دارد. با مشاهده واکنش TMS مغز (مثلاً اینکه کدام عضله ها به علت برانگیزش بخش خاصی از مغز حرکت می کنند) پزشک می تواند شرایط عصب شناختی مختلفی را بیازماید.

۱- Transcranial Magnetic Simulation (TMS)

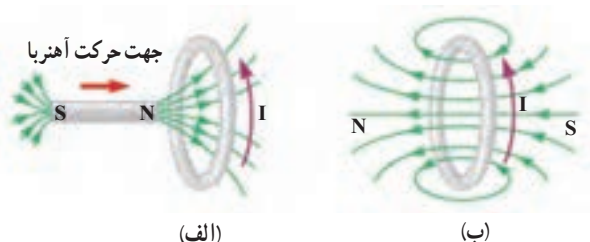
## ۵-۴- قانون لنز

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 ۵-۵ 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.

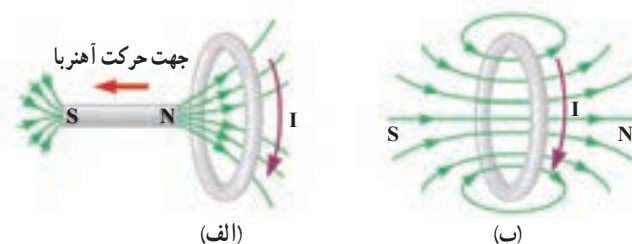
شکل ۵-۵ الف آهنربایی را در حال نزدیک شدن به یک حلقه رسانا نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود جریان در حلقه در جهتی القا شده است که میدان مغناطیسی حلقه با نزدیک شدن آهنربا به حلقه مخالفت می‌کند (شکل ۵-۵ ب).

**شکل ۵-۵ 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.

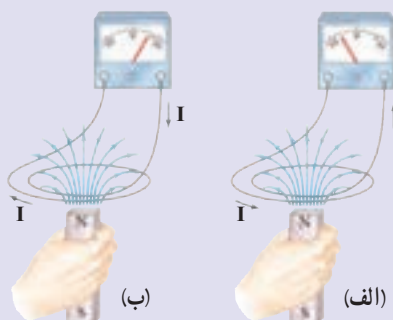


همچنین اگر مطابق شکل ۵-۶ الف، قطب N آهنربا را از حلقه رسانا دور کنیم، باز هم جریان القایی در جهتی خواهد بود که میدان مغناطیسی تولید شده توسط حلقه، در مقابل قطب N آهنربا قطب S ایجاد و ربایش بین این دو قطب با دور شدن قطب N آهنربا مخالفت کند (شکل ۵-۶ ب).

**شکل ۵-۶ 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 ۵-۳



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.

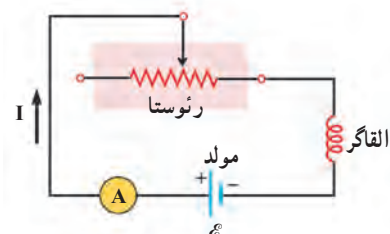
### ۵-۵- القاگرها و اثر خودالقایی

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 ۵-۷ تصویر چند القاگر را در اندازه ها و شکل های متفاوت نشان می دهد. نماد مداری معمول برای القاگر به صورت  است.



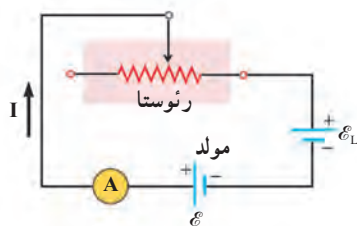
شکل ۵-۷ تصویری از چند القاگر در اندازه ها و شکل های متفاوت

برای بررسی اثر خودالقایی در یک القاگر، مداری را مطابق شکل ۵-۸ در نظر بگیرید. این مدار شامل یک مولد (باتری)، یک رثوستا و القاگری است که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده اند. با تغییر مقاومت رثوستا، 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 ۵-۸ مداری ساده برای بررسی اثر خودالقایی در یک القاگر

## القای مغناطیسی



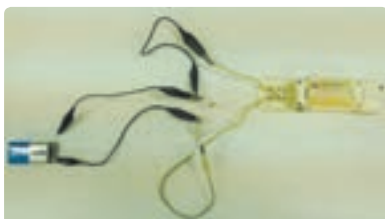
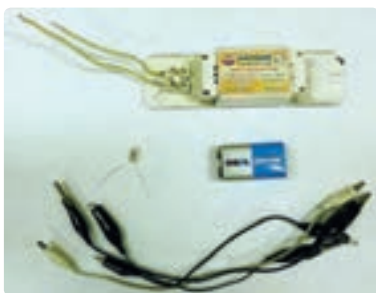
**شکل ۹-۵** اثر خودالقایی سبب می‌شود که القاگر مانند مولدی با نیروی محرکه  $\mathcal{E}_1$  در مدار عمل کند.

در مدار شکل ۸-۵، بنابه قانون لنز جهت نیروی محرکه خودالقایی چنان است که می‌خواهد مانع تغییر شار مغناطیسی‌ای شود که مولد ایجاد می‌کند. برای مثال، اگر مقاومت رنوستا 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 ۹-۵).

## پرسش ۴-۵

فرض کنید در مدار شکل ۹-۵، به جای کاهش مقاومت رنوستا، مقاومت آن را افزایش دهیم. دلیل ایجاد نیروی محرکه خودالقایی و جهت آن را مورد بحث قرار دهید.

## آزمایش ۲-۵



### بررسی اثر خودالقایی در یک پیچه

**وسایله‌های 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 باید دیگر 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، وسیله‌های 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 نشاند!

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

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (۴-۵)$$

در این رابطه  $L$  **ضرب 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. ضرب خودالقایی  $L$  از ویژگی‌های ساختمانی القاگر است و به تعداد دور، طول، سطح مقطع و... القاگر بستگی دارد (مثال ۵-۸ را ببینید). رابطه ۴-۵ همچنین روشی به نسبت ساده برای اندازه‌گیری ضرب 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 ۴-۵

جریان در یک القاگر با آهنگ  $1 \text{ A/s}$  تغییر می‌کند. اگر ضرب خودالقایی القاگر  $1 \text{ H}$  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 ۴-۵ 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 ( $1 \text{ H}$ ) ضرب خودالقایی القاگری است که اگر جریان عبوری از آن با آهنگ یک آمپر بر ثانیه ( $1 \text{ A/s}$ ) تغییر کند، نیروی محرکه خودالقایی برابر یک ولت ( $1 \text{ V}$ ) در آن القا می‌شود.

#### مثال ۴-۷

از سیم‌لوله‌ای به ضرب خودالقایی  $4 \text{ mH}$ ، 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 :

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

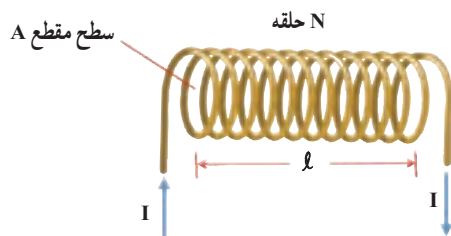
ابتدا آهنگ تغییر جریان نسبت به زمان ( $dI/dt$ ) را به دست می‌آوریم :

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

با استفاده از رابطه ۴-۵ 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\$ حلقه نزدیک به هم تشکیل شده است. ضریب خودالقایی این سیملوله را پیدا کنید.

**پاسخ:** در فصل ۴ دیدیم که میدان مغناطیسی درون سیملوله حامل جریان \$I\$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

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:

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

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

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_L &= -N \frac{d\Phi}{dt} \\ &= -N \frac{d}{dt} \left( \mu_0 \frac{NA}{l} I \right) \end{aligned}$$

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

یا

از مقایسه این رابطه با رابطه ۵-۶ داریم:

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

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

توجه: در فصل ۴ 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:

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

در این رابطه، \$K\$ ضریبی بدون یکا است که به جنس هسته داخل سیملوله بستگی دارد و به آن **تراوایی مغناطیسی**

**نسبی هسته** می‌گویند.

ضریب خودالقایی سیملوله بدون هسته به طول \$5\text{ cm}\$ و سطح مقطع \$1\text{ cm}^2\$ متشکل از \$2000\$ حلقه نزدیک به هم را

پیدا کنید.

پاسخ: از داده‌های مسئله داریم:

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

$$L = ?$$

با استفاده از نتیجه مثال ۵-۸ و قراردادن مقادیر بالا در آن داریم:

$$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{\ell} = (4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m / A}) \frac{(2000)^2 \times (1 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}{0.05 \text{ m}}$$

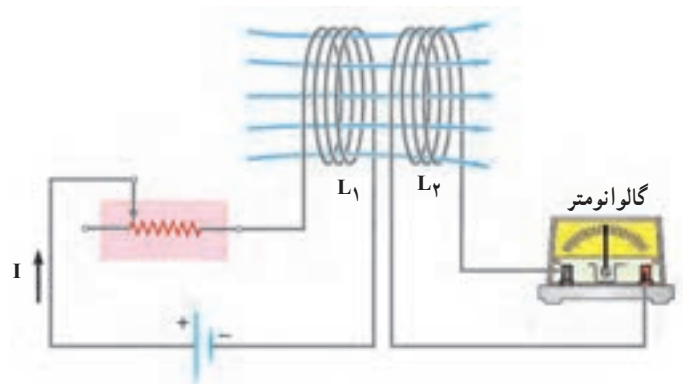
$$= 10^{-2} \text{ H} = 10 \text{ mH}$$

### تمرین ۳-۵

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 ۵-۱۰

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 ۵-۱۰ 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.

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 هر چه 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 فلوئورسان



چون القاگرها با تغییرات جریان مخالفت می‌کنند، نقش مهمی در لامپ‌های فلوئورسان (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

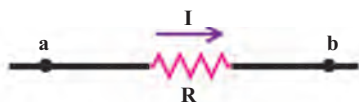
فلوئورسان آسیب برساند. برای جلوگیری از این مسئله، یک القاگر یا متعادل‌کننده مغناطیسی را به‌طور متوالی با لامپ فلوئورسان می‌بندند تا مانع افزایش زیاد جریان شود. متعادل‌کننده همچنین امکان کار لامپ فلوئورسان با ولتاژ متناوب را فراهم می‌سازد. این ولتاژ به‌طور سینوسی تغییر می‌کند؛ به‌طوری که با توجه به ویژگی‌های 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 (غیر یونیده) و لامپ خاموش می‌شود. متعادل‌کننده، نیروی محرکه خودالقایی جریان را برقرار می‌سازد و لامپ را روشن نگه می‌دارد.

### ۵-۶- انرژی ذخیره‌شده در القاگر

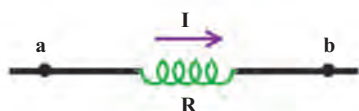
وقتی در دو سر القاگری اختلاف پتانسیل برقرار شود، مولد به القاگر انرژی می‌دهد. بخشی از این انرژی در مقاومت الکتریکی سیم‌های القاگر به‌صورت گرما تلف و بقیه آن در میدان مغناطیسی القاگر ذخیره می‌شود که مقدار آن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (7-5)$$

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



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



**شکل ۵-۱۱** 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 ۵-۱۱). 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 ۱-۵

متخصصان صنعت برق، علاقه‌مندند راه‌های مؤثری را برای ذخیره انرژی الکتریکی تولیدی در ساعت‌های کم‌مصرف بیابند تا با استفاده از آن، نیاز مشترکان 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  $1 \text{ kW.h}$  انرژی الکتریکی را در پیچه حامل جریان  $20^\circ \text{ A}$  ذخیره کند؟

**پاسخ:** مقدار انرژی ذخیره‌شده مورد نیاز  $U = 1 \text{ kW.h}$  و جریان  $I = 20^\circ \text{ A}$  داده شده است. از معادله ۷-۵ ضریب خودالقایی  $L$  را به دست می‌آوریم:

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

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

$$L = \frac{2 \times 3.6 \times 10^6 \text{ J}}{(20^\circ \text{ A})^2} = 18^\circ \text{ H}$$

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  $20^\circ \text{ A}$  جریان اند، 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  $18^\circ \text{ H}$  که از سیم‌های معمولی ساخته شده باشد، باید خیلی بزرگ (به اندازه یک اتاق بزرگ) باشد. با توجه به فناوری‌های موجود این طرح غیر عملی و توجیه اقتصادی ندارد.

### تمرین ۴-۵

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

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

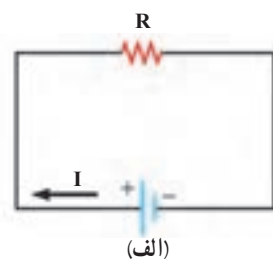
### مطالعه آزاد



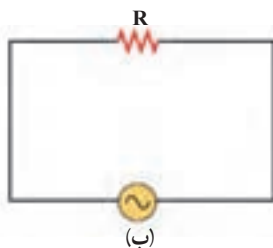
انرژی لازم برای جرقه‌زدن شمع اتومبیل، از انرژی مغناطیسی ذخیره‌شده در پیچه احتراق تأمین می‌شود.

انرژی میدان مغناطیسی نقش مؤثری در دستگاه‌های احتراق اتومبیل‌های با موتور بنزینی دارد. پیچه اولیه با حدود  $25^\circ$  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).

## ۵-۷- جریان متناوب



(الف)



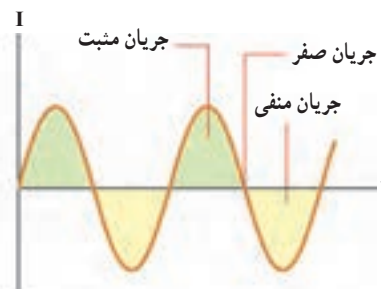
(ب)

شکل ۵-۱۲ (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 ۵-۱۲ 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 ۵-۱۳).



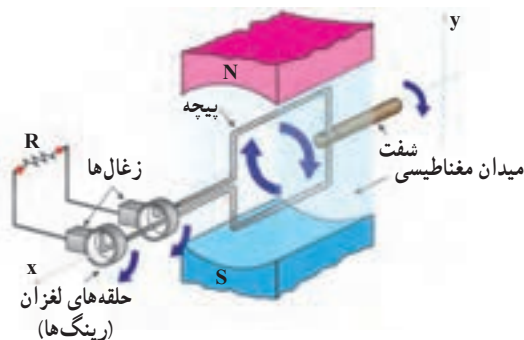
شکل ۵-۱۳ جریان متناوب سینوسی،

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  $\Phi = AB \cos \alpha$  محاسبه می‌شود که در آن  $\alpha$  زاویهٔ بین نیم خط عمود بر سطح پیچه و میدان مغناطیسی است.

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

شکل ۵-۱۴ 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 ۵-۱۴ 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 پیکه  $T$  ثانیه باشد، پیکه در مدت  $t$  ثانیه، به اندازه  $\frac{t}{T}$  دور خواهد چرخید. هر دور کامل برابر  $2\pi$  رادیان است. در نتیجه اگر پیکه در لحظه  $t=0$  در وضعیت عمود بر میدان مغناطیسی ( $\alpha=0$ ) باشد، پس از گذشت  $t$  ثانیه زاویه  $\alpha$  برابر است با:

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

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

$$\alpha = \omega t$$

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

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

نیروی محرکه القاشده در پیکه با توجه به قانون فارادی از رابطه ۳-۵ 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 پیکه 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:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t \quad (۸-۵)$$

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:

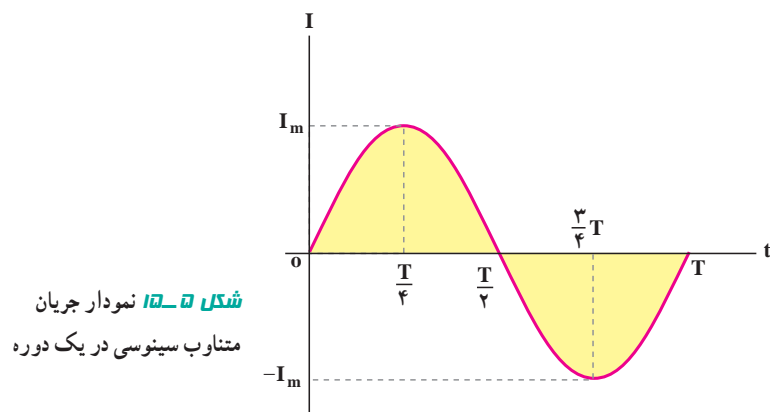
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \sin \omega t$$

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:

$$I = I_m \sin \omega t \quad (۹-۵)$$

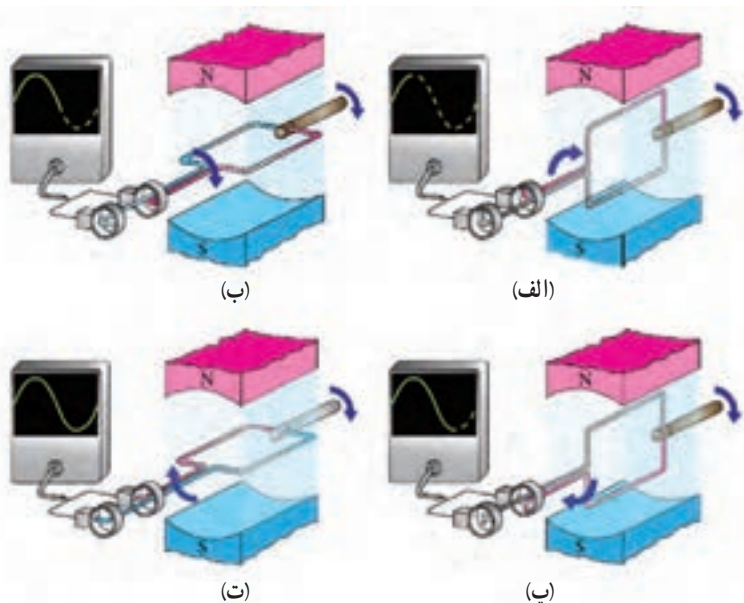
رابطه ۹-۵ نشان می‌دهد که جریان الکتریکی تولید شده در مدار پیکه به طور سینوسی تغییر می‌کند. به چنین جریانی، **جریان متناوب** می‌گوییم. نمودار این جریان بر حسب زمان، در یک دوره در شکل ۱۵-۵ رسم شده است.





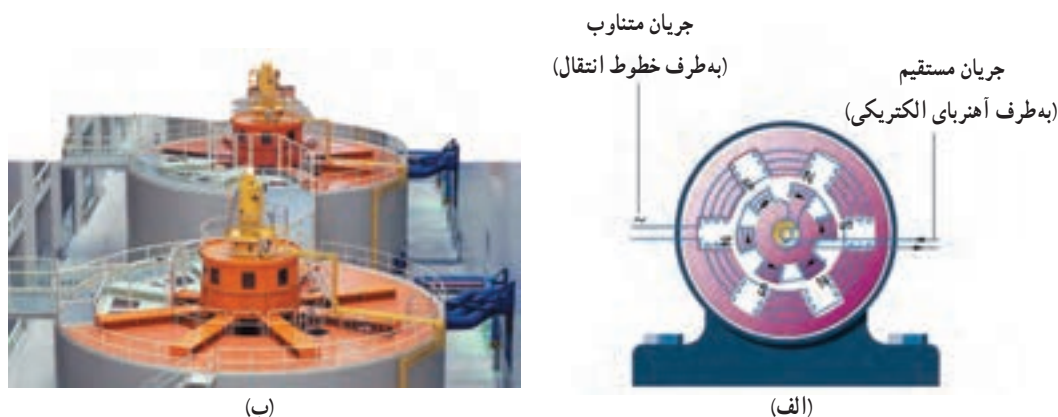
اکنون خواهیم دید که چگونه جریان متناوب سینوسی توسط مولد در یک چرخه کامل تولید می‌شود. این موضوع در شکل ۱۶-۵ در چهار مرحله یا به عبارت دیگر چهار ربع چرخه نشان داده شده است.

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 ۱۶-۵ 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 ۱۶-۵ ب قرار بگیرد. در نتیجه جریان از مقدار بیشینه مثبت به صفر می‌رسد (دومین ربع چرخه). پس از آن پیچه از وضعیت شکل ۱۶-۵ ب به وضعیت شکل ۱۶-۵ 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 ۱۶-۵ 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 ۵-۱۶: 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 ۵-۱۷). در ایران بسامد برق تولیدشده  $50\text{ Hz}$  است که این عدد نشان می‌دهد آهنربای الکتریکی در هر ثانیه،  $50$  مرتبه به‌طور کامل در پیچ می‌چرخد.



**شکل ۵-۱۷ الف)** در مولدهای صنعتی با چرخیدن آهنربای الکتریکی بین پیچ‌ها، جریان متناوب تولید می‌شود. **ب)** نمایی از مولدهای صنعتی تولید برق

## مثال ۵-۱۱



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  $5\text{ ms}$  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 ۵-۹ داریم:

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

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

## تمرین ۵-۵

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

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

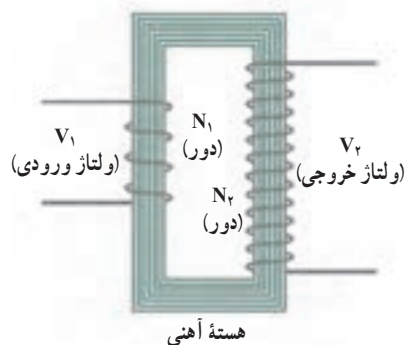
الف) مقدار جریان در لحظهٔ  $t = \frac{1}{3}\text{ s}$  چقدر است؟

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

**مبدل‌ها:** یکی از امتیازهای مهم توزیع توان الکتریکی ac بر dc آن است که افزایش و کاهش ولتاژ ac، بسیار آسان‌تر از dc است. در انتقال توان در فاصله‌های دور می‌خواهیم تا حد امکان از ولتاژ هرچه بالاتر و جریان هرچه کمتری استفاده کنیم، این کار اتلاف  $RI^2$  را در خط‌های انتقال کم می‌کند و می‌توان از سیم‌های نازک‌تری استفاده و در مصرف مواد اولیه صرفه‌جویی کرد. خط‌های انتقال توان الکتریکی به‌طور معمول از ولتاژهای در حدود ۴۰۰ کیلوولت استفاده می‌کنند (شکل ۱۸-۵). از طرف دیگر، ملاحظات ایمنی و الزامات عایق‌بندی در ساخت وسایل خانگی و صنعتی، ولتاژهای به نسبت پایین‌تری را ضروری می‌کند. ولتاژ استاندارد برای سیم‌کشی خانگی در ایران و بسیاری از کشورهای دیگر ۲۲۰ V است. تبدیل ولتاژ مورد نیاز با استفاده از **مبدل‌ها** صورت می‌گیرد.

**شکل ۱۸-۵** قبل از انتقال توان الکتریکی

از نیروگاه‌ها، مبدل‌های افزایشنده، ولتاژ را تا حدود ۴۰۰ کیلوولت افزایش می‌دهند. در انتهای مسیر، مبدل‌های کاهشنده، ولتاژ را کاهش می‌دهند تا با امنیت بیشتر به محل مصرف برسد.



**شکل ۱۹-۵** یک مبدل آرمانی شامل دو پیچ که روی یک هسته آهنی پیچیده شده‌اند.

شکل ۱۹-۵ مبدلی شامل دو پیچ با تعداد دورهای متفاوت را نشان می‌دهد که به‌دور یک هسته آهنی (فرومغناطیس نرم) پیچیده شده‌اند (پیچ‌ها نسبت به هسته عایق‌بندی شده‌اند). در عمل پیچ اولیه با  $N_1$  دور به یک مولد جریان متناوب بسته شده است که ولتاژ آن  $V_1$  است. پیچ ثانویه با  $N_2$  دور به مصرف‌کننده‌ای وصل شده است که ولتاژ  $V_2$  را تأمین کند. برای یک مبدل آرمانی که مقاومت پیچ‌های آن ناچیز است، رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (۱۰-۵)$$

## مثال ۱۲-۵

شکل روبه‌رو یک مبدل ۲۲۰ ولت به ۱۲ ولت را نشان می‌دهد. تعداد دورهای پیچ ثانویه را پیدا کنید.

**پاسخ:** با توجه به داده‌های روی شکل داریم:

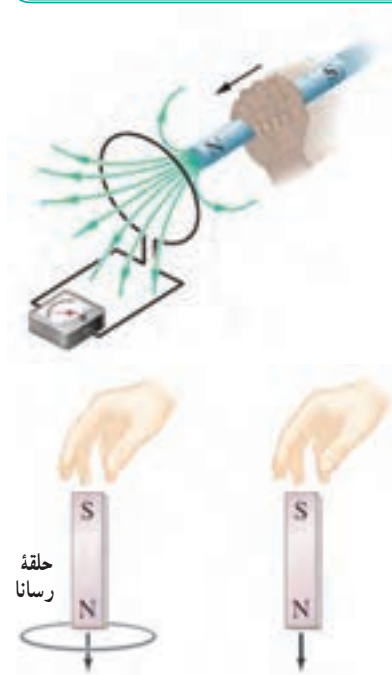
$$N_2 = ? \text{ و } V_2 = ۱۲V \text{ و دور } N_1 = ۸۰۰۰ \text{ و } V_1 = ۲۲۰V$$

با جای‌گذاری این مقادیر در رابطه ۱۰-۵ داریم:

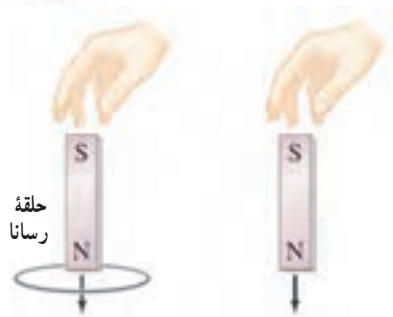
$$\begin{aligned} \frac{V_2}{V_1} &= \frac{N_2}{N_1} \\ \frac{۱۲V}{۲۲۰V} &= \frac{N_2}{۸۰۰۰} \Rightarrow N_2 = ۴۳۶ \text{ دور} \end{aligned}$$

## پرسش‌ها

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



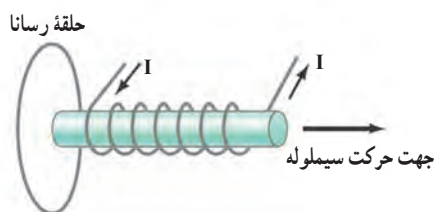
۲ دو آهنربای میله‌ای مشابه را به‌طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک سطح زمین رها می‌کنیم (شکل روبه‌رو). اگر سطح زمین در محل برخورد آهنرباها نرم باشد، مقدار فرو رفتگی آهنرباها را در زمین با یکدیگر مقایسه کنید. (تأثیر میدان مغناطیسی زمین روی آهنرباها را نادیده بگیرید.)



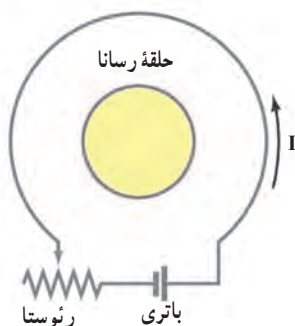
۳ جهت جریان القایی در هریک از حلقه‌های رسانای نشان داده شده در شکل روبه‌رو در چه جهتی است؟

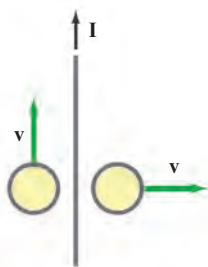


۴ شکل روبه‌رو سیم‌لولهٔ حامل جریانی را نشان می‌دهد که در حال دور شدن از یک حلقهٔ رساناست. جهت جریان القایی را در حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



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

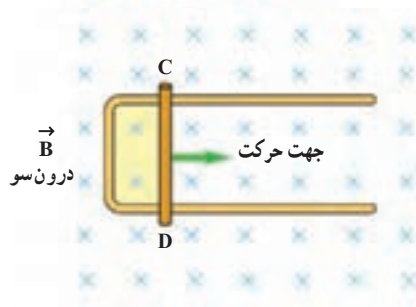




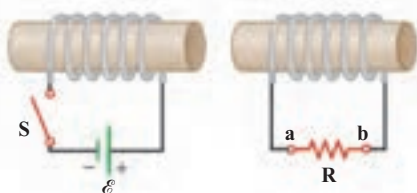
۶ دو حلقهٔ رسانا در مجاورت یک سیم دراز حامل جریان ثابت  $I$  قرار دارند؛ این دو حلقه با سرعت ثابت، ولی جهت‌های متفاوت مطابق شکل روبه‌رو حرکت می‌کنند. جهت جریان القایی را در هر حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



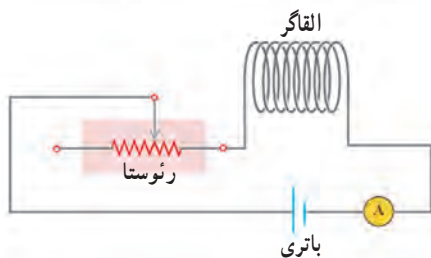
۷ حلقهٔ رسانای مستطیل شکلی را مطابق شکل روبه‌رو به طرف راست می‌کشیم و از میدان مغناطیسی درون‌سویی خارج می‌کنیم. جهت جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟



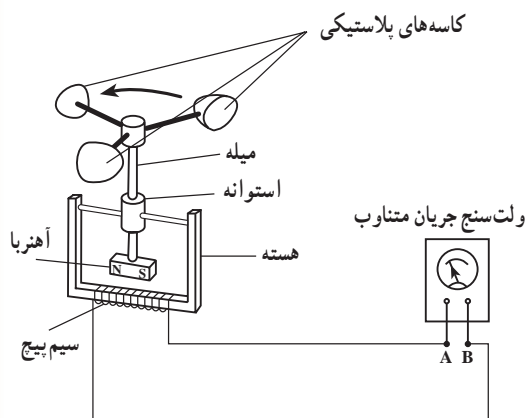
۸ شکل روبه‌رو رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  که عمود بر صفحهٔ شکل و روبه داخل صفحه است نشان می‌دهد. وقتی میلهٔ فلزی CD به طرف راست حرکت کند، جهت جریان القایی در مدار در چه جهتی است؟



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 الفاگر (سیملوله)، باتری، رئوستا و آمپرسنج است که به‌طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند. اگر بخواهیم بدون تغییر ولتاژ مولد، انرژی ذخیره شده در الفاگر را زیاد کنیم چه راه‌هایی پیشنهاد می‌کنید؟

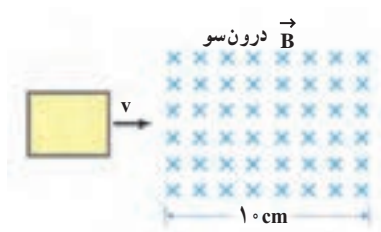


۱۱ شکل روبه‌رو ساختمان یک بادسنج را نشان می‌دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد، میلهٔ آن می‌چرخد و ولت‌سنج عددی را نشان می‌دهد.

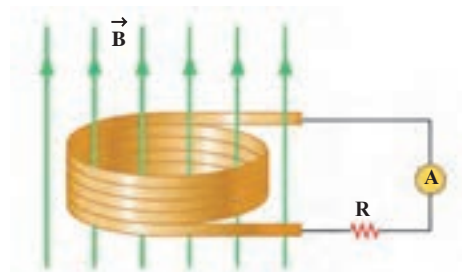
الف) چرا چرخش میله سبب انحراف عقربهٔ ولت‌سنج می‌شود؟  
ب) آیا با افزایش سرعت باد، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ چرا؟

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

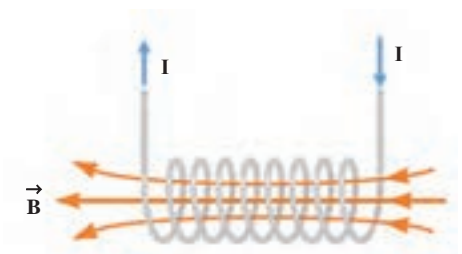
## مسئله‌ها



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



۲. در مدار شکل روبه‌رو، با افزایش شار مغناطیسی عبوری از القاگر (پیچه) در مدت  $2\text{ ms}$ ، جریانی که آمپرسنج می‌خواند از صفر به  $1\text{ A}$  می‌رسد. اگر ضریب خودالقایی القاگر  $5\text{ H}$  باشد، بزرگی نیروی محرکه خودالقایی توسط القاگر چند ولت است؟

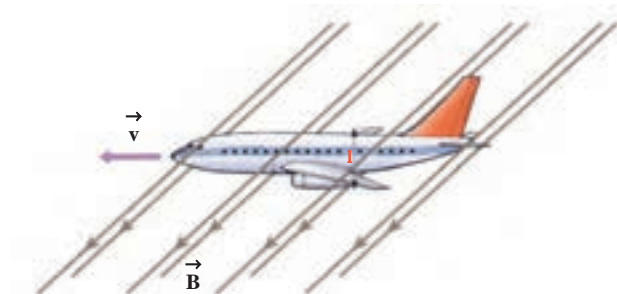


۳. سطح مقطع و طول سیم‌لوله شکل روبه‌رو به ترتیب  $2\text{ cm}^2$  و  $8\text{ cm}$  است. اگر این سیم‌لوله از  $1000$  حلقه نزدیک به هم تشکیل شده باشد، الف) ضریب خودالقایی آن را پیدا کنید.

ب) چه جریانی از سیم‌لوله بگذرد تا در میدان مغناطیسی آن  $4\text{ J}$  انرژی ذخیره شود؟

۴. پیچه‌ای که دارای  $1000$  حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازه آن  $4\text{ T}$  و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت  $1\text{ s}$  تغییر می‌کند و به  $4\text{ T}$  در خلاف جهت اولیه می‌رسد. اگر سطح هر حلقه پیچه  $5\text{ cm}^2$  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. پیچه‌ای با سطح مقطع  $3\text{ cm}^2$  و متشکل از  $1000$  حلقه، در ابتدا بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت  $2\text{ s}$  پیچه بچرخد و موازی میدان مغناطیسی زمین قرار بگیرد، نیروی محرکه متوسط القایی در آن چقدر است؟ اندازه میدان زمین را  $5\text{ G}$  در نظر بگیرید.



۶. شکل روبه‌رو 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 واقع‌اند 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 ۴-۵ توجه کنید.)



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؟

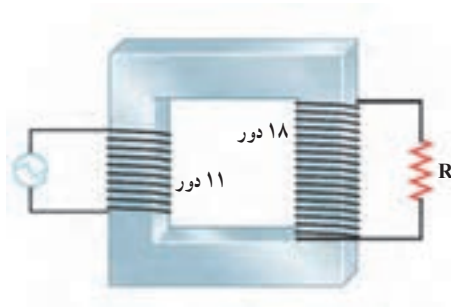
$$\Phi_B = (4t^2 + 3t - 1) \times 10^{-3}$$

۸ جریان متناوبی که بیشینه آن  $2\text{ A}$  و دوره آن  $2\text{ s}$  است از یک رسانای  $5\text{ }\Omega$  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  $6\text{ V}$  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 نگه 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 یا 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 بامعنای 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 بامعنای حاصل یک محاسبه در نظر گرفته

نمی‌شوند.

## واژه‌نامه فارسی - انگلیسی

Electric resistance	مقاومت الکتریکی	Adiabatic Process	فرایندی دررو
Electro Motive Force (E.M.F.)	نیروی محرکه الکتریکی	Alternating Current	جریان متناوب
Electromagnetic induction	القای الکترومغناطیسی	Angular frequency	بسامد زاویه‌ای
Electric current	جریان الکتریکی	Attraction	ربایش
Equation of state	معادله حالت	Bar magnet	آهنربای میله‌ای
Equilibrium	تعادل	Boiler	دیگ بخار
Equivalent resistance	مقاومت معادل	Capacitance	ظرفیت
Exhaust (step)	(مرحله) تخلیه	Condenser	چگالنده
Expansion	انبساط	Coefficient of performance	ضریب عملکرد
Explosion (step)	(مرحله) آتش گرفتن	Coefficient of resistivity	ضریب دمایی مقاومت ویژه
External combustion engine	ماشین برون سوز	Coil	پیچ
Faraday's law of electromagnetic induction	قانون القای الکترومغناطیسی فاراده	Cold reservoir	منبع سرد
Ferromagnetism	فرومغناطیس	Compression (step)	(مرحله) تراکم
First law of thermodynamics	قانون اول ترمودینامیک	Capacitor	خازن
Gas constant	ثابت گازها	Conservation of charge	پایستگی بار
Heat engine	ماشین گرمایی	Cosmic ray	پرتو کیهانی
Heat	گرم	Coulomb's Law	قانون کولن
Horseshoe magnet	آهنربای نعلی شکل	Cycle	چرخه
Hot reservoir	منبع گرم	Declination angle	زاویه میل
Ideal gas	گاز کامل	Dielectric constant	ثابت دی الکتریک
Inclination angle	زاویه شیب	Efficiency	بازده
Induced current	جریان القایی	Electric breakdown	فروریزش الکتریکی
Inductance	ضریب خودالقایی (القایدگی)	Environment	محیط
Inductor	القارگر	Electric dipole	دوقطبی الکتریکی
Insulator	عایق	Electric field lines	خط‌های میدان الکتریکی
Intake (step)	(مرحله) مکش	Electric field	میدان الکتریکی
Internal combustion engine	ماشین درون سوز	Electric force	نیروی الکتریکی
Internal energy	انرژی درونی	Electric motor	موتور الکتریکی
		Electric potential energy	انرژی پتانسیل الکتریکی

Potential difference	اختلاف پتانسیل	Internal resistance	مقاومت درونی
Power (step)	(مرحله) انجام کار	Iron core	هسته آهنی
Pressure	فشار	Isobaric process	فرایند هم فشار
Refrigerator	یخچال	Isochoric process	فرایند هم حجم
Relative magnetic permeability	تراوایی نسبی مغناطیسی	Isothermal process	فرایند هم دما
Repulsion	رانش	Kirochhoff's laws	قانون های کیرشهف
Resistivity	مقاومت ویژه	Lenz's law	قانون لنز
Resistor	مقاومت	Loop	حلقه
Rheostat	رئوستا	Macroscopic quantities	کمیت های ماکروسکوپی
Right hand rule	قاعده دست راست	Magnetic axis	محور مغناطیسی
Second law of thermodynamics	قانون دوم ترمودینامیک	Magnetic dipole	دوقطبی مغناطیسی
Self – induction	خودالقایی	Magnetic domain	حوزه مغناطیسی
Series circuits	مدارهای متوالی	Magnetic energy	انرژی مغناطیسی
Solenoid	سیملوله	Magnetic field lines	خط های میدان مغناطیسی
South pole	قطب جنوب	Magnetic field	میدان مغناطیسی
Steam engine	ماشین بخار	Magnetic flux	شار مغناطیسی
Surface charge density	چگالی سطحی بار	Magnetic induction	القای مغناطیسی
System	دستگاه	Magnetic permeability	تراوایی مغناطیسی
Temperature	دما	Mechanism	سازوکار
Temporary magnet	آهنربای موقت	Microscopic quantities	کمیت های میکروسکوپی
Thermal equilibrium	تعادل گرمایی	Molar heat capacity	ظرفیت گرمایی مولی
Thermodynamic process	فرایند ترمودینامیکی	Net charge	بار خالص
Thermodynamic variabels	متغیرهای ترمودینامیکی	Node	گره
Thermodynamics	ترمودینامیک	North pole	قطب شمال
to charge	پر کردن – شارژ (خازن)	Parallel circuits	مدارهای موازی
to discharge	خالی کردن (خازن)	plate capacitor parallel	خازن تخت (خازن با صفحه های موازی)
Valve	دریچه (سوپاپ)	Paramagnetism	پارامغناطیس
Variable resistor	مقاومت متغیر	Permanent magnet	آهنربای دائمی
Voltage drop	افت پتانسیل	Permittivity	ضریب گذردهی
Volume	حجم	Polarized	قطبیده

## فهرست منابع

### منابع فارسی

- ۱- مبانی فیزیک (جلدهای اول و دوم)، ویرایش دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیک و یرل واکر، ترجمه محمد رضا 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، محمد تقی فلاحتی مروستی، 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 محمد هادی 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 امیر ارجمند و نادر رابط، چاپ اول ۱۳۸۳، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۷- فیزیک مفهومی، ویرایش دهم، پُل جی. هیوئیت، ترجمه منیژه 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 محمد ابراهیم ابوکاظمی و دیگران، چاپ اول ۱۳۸۱، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی.
- ۱۰- نمایش هیجان انگیز فیزیک، ویرایش دوم، یرل واکر، ترجمه محمد رضا خوش بین خوش نظر و رسول جعفری نژاد، 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.



کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه			
ردیف	عنوان	پدیدآورنده	ناشر
۱	فیزیک برای علوم و مهندسی، جلد اول (مکانیک) ویرایش هفتم	ربوند سروی، محمود بهار	مبتکران/ پیشروان
۲	پژندگان آهنتن: از زمین تا فضا (آشنایی با دانش و فناوری هوا فضا)	عباس خاراآف	طلایی
کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه			
ردیف	عنوان	پدیدآورنده	ناشر
۱	الکترسیته ساکن	محمود حسینی اردستانی و دیگران	فاطمی
کتاب فیزیک پیش دانشگاهی، رشته علوم تجربی			
ردیف	عنوان	پدیدآورنده	ناشر
۱	فیزیک برای علوم و مهندسی، جلد اول (مکانیک) ویرایش هفتم	ربوند سروی، محمود بهار	مبتکران/ پیشروان
۲	فیزیک و مباحث علمی روز	مرقزی قریب	اندیشه‌سرا
۳	مبانی فیزیک، مکانیک و گرما - جلد اول	دیوید هالیدی و دیگران؛ محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر	نیاز دانش
۴	فیزیک دانشگاهی سیرز و زیمانسکی (جلد اول - مکانیک)	هیو دی‌بانگ و راجر ای فریدمن؛ حسین صالحی و دیگران	دانش‌نگار
کتاب فیزیک پیش دانشگاهی، رشته علوم ریاضی			
ردیف	عنوان	پدیدآورنده	ناشر
۱	فیزیک برای علوم و مهندسی، جلد اول (مکانیک) ویرایش هفتم	ربوند سروی، محمود بهار	مبتکران/ پیشروان
۲	فیزیک و مباحث علمی روز	مرقزی قریب	اندیشه‌سرا
۳	مبانی فیزیک، مکانیک و گرما - جلد اول	دیوید هالیدی و دیگران؛ محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر	نیاز دانش
۴	فیزیک دانشگاهی سیرز و زیمانسکی (جلد اول - مکانیک)	هیو دی‌بانگ و راجر ای فریدمن؛ حسین صالحی و دیگران	دانش‌نگار