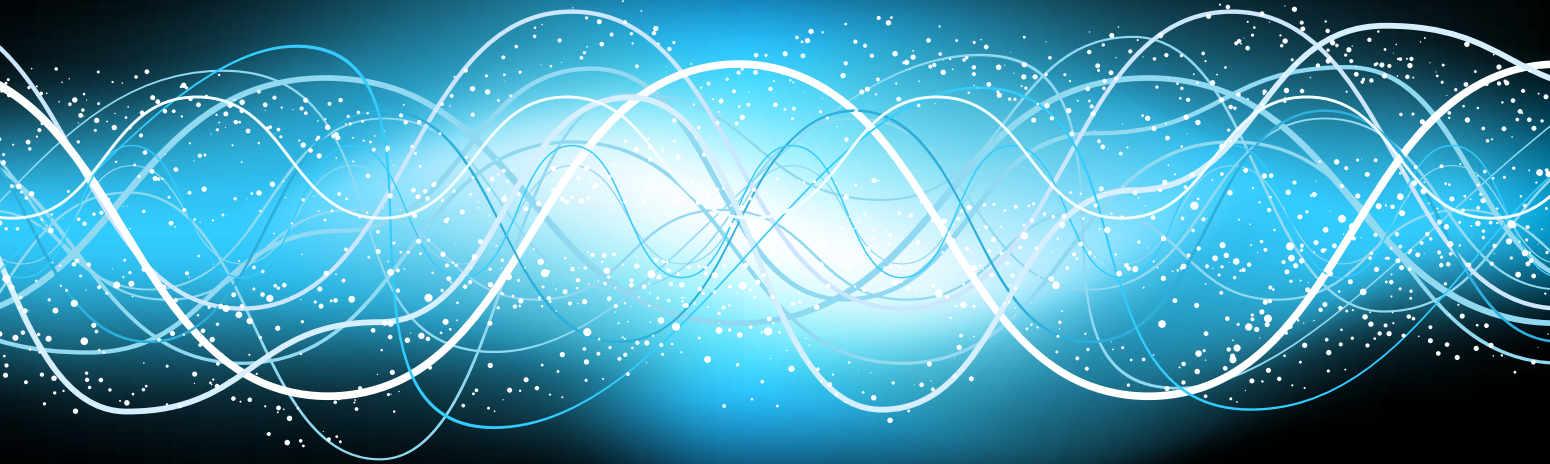


واحد یادگیری ۹

الکترومغناطیس



در جهان امروز، بشر به طرز عجیبی به الکتریسیته وابسته می‌باشد و بدون آن، زندگی بشر متمدن تقریباً غیرممکن است. اما باید خاطر نشان ساخت که پدیده مغناطیس نیز نقش بسیار عمده‌ای در زندگی بشر ایفا می‌کند. بدون پدیده مغناطیس لوازم الکتریکی و الکترومکانیکی از قبیل موتورهای الکتریکی، ترانسفورمرها و ژنراتورها دستگاه‌های اندازه‌گیری آنالوگ قادر به کار نخواهند بود. به‌طور کلی می‌توان گفت با آنکه بشر به الکتریسیته وابستگی شدید پیدا کرده است ولی در بیشتر موارد بدون پدیده مغناطیس قادر به استفاده از الکتریسیته نخواهد بود و بدون پدیده مغناطیس زندگی بشر متمدن غیرممکن خواهد بود.

در سال ۱۸۲۰ میلادی فیزیک‌دان دانمارکی به نام اورستد<sup>۱</sup> برای اولین بار متوجه شد که جریان الکتریکی می‌تواند آثار مغناطیسی به وجود آورد. این کشف مهم دو علم الکتریسیته و مغناطیس را به یکدیگر مربوط ساخت. برای تشریح رابطه بین جریان الکتریکی و مغناطیس نظریه‌ای به وجود آمده است که به آن نظریه الکترومغناطیس<sup>۲</sup> می‌گویند. تأثیر میدان مغناطیسی اطراف یک هادی حامل جریان بر عقربه قطب‌نما در شکل (۲۷) نشان داده شده است.



شکل ۲۷

مشاهده می‌شود عقربه قطب‌نما، عمود بر هادی جریان قرار می‌گیرد. وقتی جهت جریان الکتریکی در هادی تغییر داده شود عقربه و جهت آن نیز تغییر می‌کند. یکی از حوزه‌هایی که انتظار می‌رود فناوری نانو اثر فراوانی بر پیشرفت آن داشته باشد، مغناطیس‌ها و مواد مغناطیسی است. با ورود فناوری نانو به علم و صنعت مغناطیس، بهبود زیادی در کیفیت مغناطیس‌ها ایجاد شده است و مغناطیس‌هایی با ابعاد کوچک و نیروی مغناطیسی بزرگ ساخته شده‌اند.

۱- Oersted

۲-Electro Magnets

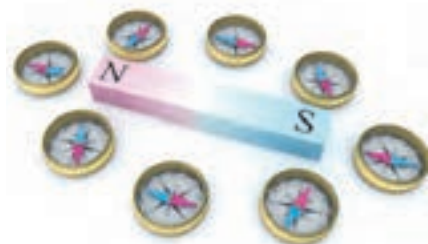


### هانس کریستن اوستد

داروساز، فیزیک‌دان و اندیشمند نابغه دانمارکی در سال ۱۷۷۷ دیده به جهان گشود. پدرش داروخانه داشت، بنابراین او در کودکی با بسیاری از مواد آشنایی پیدا کرد که این آشنایی سبب تحصیل در همین رشته شد. وی در سال ۱۷۹۹ در سن ۲۲ سالگی به اخذ درجه دکترا در داروشناسی نایل گردید. و در سال ۱۸۰۶ با سمت استاد عالی استخدام شد و در سال ۱۸۲۹ به ریاست مؤسسه پلی‌تکنیک کپنهاگن منصوب گردید.

### میدان مغناطیسی

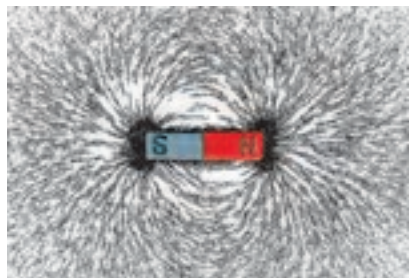
در فضای اطراف یک آهنربا یا مغناطیس طبیعی خاصیتی وجود دارد که ذرات آهن را به خود جذب می‌کند به این فضا «میدان مغناطیسی»<sup>۱</sup> می‌گویند.



شکل ۲۸

میدان مغناطیسی بر قطب‌نما تأثیر می‌گذارد و باعث انحراف آن می‌شود پس با حرکت دادن یک قطب‌نما در اطراف یک آهنربا می‌توان به وجود میدان مغناطیسی پی برد شکل (۲۸).

با قرار دادن یک مقوا بر روی یک آهنربا و پاشیدن براده‌های آهن به روی مقوا می‌توان خطوط نیروی میدان مغناطیسی را مشاهده کرد شکل (۲۹).



شکل ۲۹

هر خط نیروی میدان مغناطیسی را یک ماکسول<sup>۲</sup> (max) می‌گویند.

۱-Magnetic field

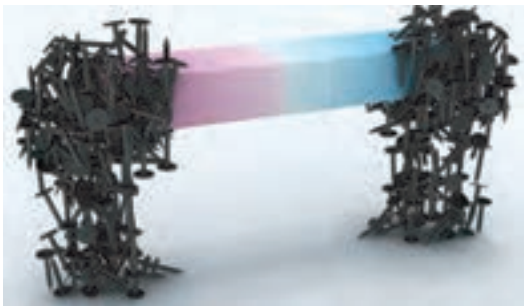
۲-Max Well

## ماکسول



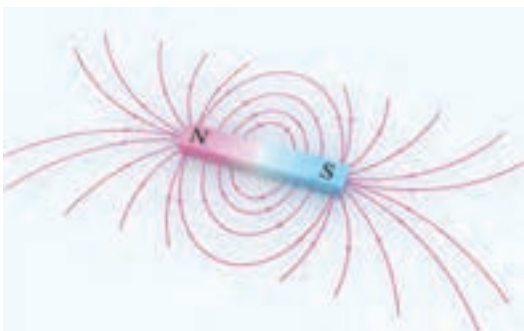
جیمز کلارک ماکسول در ۱۳ نوامبر سال ۱۸۳۱ در ادینبرای اسکاتلند متولد شد از کودکی به ریاضیات و فیزیک علاقه فراوان داشت در سال ۱۸۴۷ وارد دانشگاه ادینبرا شد و در ۱۸۵۰ به دانشگاه کمبریج رفت و در سال ۱۸۵۴ از تحصیل فراغت یافت.

ماکسول از سال ۱۸۵۶ تا ۱۸۶۵ استاد کالج مارشال در آبردین و کالج کینگ لندن بود، وی در سال ۱۸۷۳ کتابی به نام دوره الکتریسیته و مغناطیس منتشر کرد و بلافاصله به سمت استاد کرسی فیزیک دانشگاه انتخاب شد.



شکل ۳۰

خطوط نیروی میدان مغناطیسی در دو نقطه معین از میدان مغناطیسی دارای فشردگی بیشتری نسبت به سایر نقاط است این نقاط را قطب‌های مغناطیسی<sup>۱</sup> می‌نامند و با حروف  $S$  و  $N$  آنها را نشان می‌دهند. اثر جذب در قطب‌های میدان مغناطیسی بسیار قوی‌تر از سایر نقاط میدان مغناطیسی است شکل (۳۰).



شکل ۳۱- خطوط نیروی میدان مغناطیسی

خطوط نیروی میدان مغناطیسی هیچگاه یکدیگر را قطع نمی‌کنند. بنا به قرارداد از قطب  $N$  بیرون می‌آیند و پس از امتداد در فضای اطراف آهنربا به قطب  $S$  وارد می‌شوند شکل (۳۱).

در شکل خطوط نیروی میدان مغناطیسی اطراف یک آهنربا نمایش داده شده است.

<sup>۱</sup>-Magnetic poles

## فوران مغناطیسی

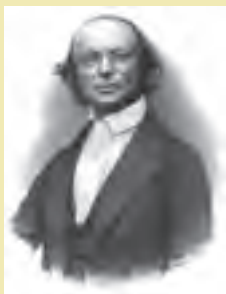
به مجموع خطوط نیروی میدان مغناطیسی اطراف یک مغناطیسی یا آهنربا «فوران» یا «شار مغناطیسی»<sup>۱</sup> می‌گویند و آن را با  $\varphi$  نشان می‌دهند.  
واحد فوران مغناطیسی ولت.ثانیه ( $v.sec$ ) است که اصطلاحاً به آن وِبر  $wb$  می‌گویند. یک وِبر<sup>۲</sup> برابر با  $10^8$  خط نیروی میدان مغناطیسی یا ماکسول است. پس:

$$1[v.sec] = 1[w.b] = 10^8 [max]$$

واحد رایج فوران مغناطیسی وِبر  $wb$  است و واحد کوچک‌تر آن میلی وِبر  $mwb$  می‌باشد. یک وِبر برابر با  $10^3$  میلی وِبر است. یعنی:

$$1[w.b] = 10^3 [mwb]$$

### ویلهلم وِبر



ویلهلم وِبر در سال ۱۷۹۵ میلادی در آلمان به دنیا آمد. وی فیزیکدان بود که شهرت‌اش به مطالعات در زمینه مغناطیس مربوط می‌شود. وِبر در سال ۱۸۷۸ میلادی دیده از جهان فرو بست.

تحقیق کنید

دیدگاه‌های دانشمندان در قرن هجدهم در مورد ولتاژ مستقیم و متناوب چه تفاوت‌هایی با یکدیگر دارد؟

$$\frac{1wb}{\varphi} = \frac{10^3 mwb}{2/5 mwb}$$

$$\varphi = \frac{2/5 \times 1}{10^3}$$

$$\varphi = 2/5 \times 1 \times 10^{-3}$$

$$\varphi = 2/5 \times 10^{-3} [wb]$$

**مثال ۱:** فوران مغناطیسی یک آهنربا  $2/5$  میلی وِبر است. فوران این آهنربا چند ماکسول  $max$  است؟

**حل:**

- با استفاده از تناسب، واحد فوران به وِبر تبدیل می‌شود.  
- یک وِبر برابر با  $10^8$  خط نیروی میدان مغناطیسی یا ماکسول  $max$  است.

۱-Magnetic Flux

۲- در برخی کتب آن را Flow می‌نامند.

۳-Weber

$$\frac{1 \text{ wb}}{2/5 \times 10^{-3}} = \frac{10^8 \text{ max}}{\varphi}$$

$$\varphi = \frac{2/5 \times 10^{-3} \times 10^8}{1}$$

$$\varphi = 2/5 \times 10^{-5} = 250000 [\text{max}]$$

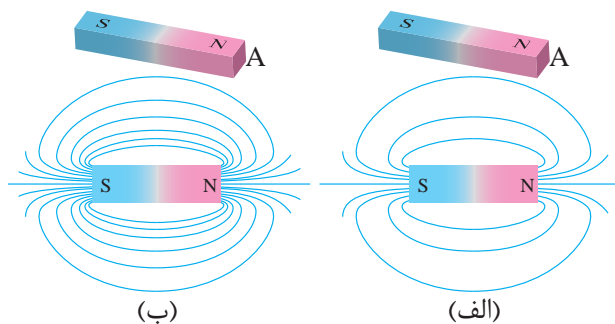
یا به عبارتی در اطراف این آهنربا  $250000$  خط نیروی میدان مغناطیسی وجود دارد.

### نیکولا تسلا



نیکولا تسلا در سال ۱۸۵۶ در امپراتوری اتریش - مجارستان متولد شد او پیشگام تولید، انتقال و استفاده از جریان الکتریکی متناوب شد. در سال ۱۸۸۸ شرکت وستینگهاوس امتیاز تسلا شامل موتور و ژنراتور الکتریکی را خرید و این شرکت از سیستم جریان متناوب تسلا برای روشنایی استفاده کرد. تسلا در طی زندگی اش یک میراث حقیقی از اختراعات به جای گذاشت از جمله انتقال انرژی الکتریکی از طریق امواج الکترومغناطیسی که امروزه هنوز جذاب هستند. به افتخار او نام واحد چگالی شار مغناطیسی تسلا می باشد.

### چگالی فوران مغناطیسی



شکل ۳۲

دو آهنربا با ابعاد مشابه و فوران های  $1000$  و  $2000$  ماکسول که سطح مقطع قطب آنها با  $A$  مشخص می باشد در شکل نشان داده شده است. میدان مغناطیسی آهنربای شکل ۳۲-الف در سطح مقطع قطب خود  $1000$  و میدان مغناطیسی آهنربای شکل ۳۲-ب در سطح مقطع خود  $2000$  خط نیروی داده است. سطح مقطع قطب  $A$  هر دو آهنربا برابر است، اما آهنربای شکل خطوط نیروی مغناطیسی یا فوران مغناطیسی بیشتری در سطح مقطع قطب  $A$  خود جای داده است. به

عبارتی فوران مغناطیسی در سطح مقطع قطب A آهنربای شکل ۳۲- ب نسبت به شکل ۳۲- الف فشرده و متراکم‌تر می‌باشد، لذا میدان مغناطیسی آن قوی‌تر است. در واقع میدان مغناطیسی این دو آهنربا با یکدیگر تفاوت دارند. برای نشان دادن این تفاوت کمیتی به نام «چگالی فوران مغناطیسی»<sup>۱</sup> تعریف می‌شود و آن را با B نشان می‌دهند.

چگالی فوران مغناطیسی B کمیتی است که تراکم یا فشردگی خطوط میدان مغناطیسی در سطح مقطع A را نشان می‌دهد. اگر سطح مورد نظر واحد انتخاب شود، «فوران عبوری از واحد سطح را چگالی فوران مغناطیسی» تعریف می‌کنند.

چگالی فوران مغناطیسی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$B = \frac{\phi}{A}$$

در این رابطه:

$\phi$  فوران مغناطیسی بر حسب وبر  $wb$

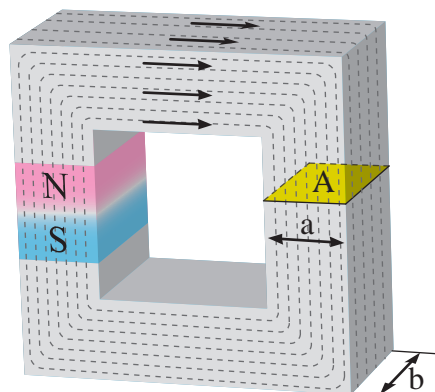
A مساحت مقطعی که فوران مغناطیسی  $\phi$  از آن می‌گذرد بر حسب مترمربع  $m^2$

B چگالی فوران مغناطیسی بر حسب وبر بر مترمربع  $\left[\frac{wb}{m^2}\right]$  است.

واحد چگالی فوران مغناطیسی B وبر بر مترمربع  $\left[\frac{wb}{m^2}\right]$  است که اصطلاحاً به آن تسلا<sup>۲</sup> [T] می‌گویند و واحد کوچک‌تر آن ماکسول بر سانتی‌مترمربع  $\left[\frac{max}{cm^2}\right]$  است که اصطلاحاً به آن گاوس<sup>۳</sup> [G] گفته می‌شود. پس:

$$1 \left[\frac{wb}{m^2}\right] = 1T = 10^4 [G]$$

**مثال ۲:** آهنربایی با فوران مغناطیسی  $2 \text{ mwb} / 0.2$  مطابق شکل ۳۳ در نظر است. چگالی فوران مغناطیسی در سطح مقطع A هسته چند گاوس می‌باشد؟ در صورتی که  $a = 10 \text{ mm}$  و  $b = 20 \text{ mm}$  باشد.



شکل ۳۳

**حل:**

- سطح مقطع A برابر است با:

$$A = a \cdot b = 10 \times 20 = 200 \left[mm^2\right]$$

- واحد سطح مقطع به متر مربع تبدیل می‌شود:

$$\frac{1m^2}{A} = \frac{10^6 mm^2}{200 \cdot mm^2}$$

$$A = \frac{200 \times 1}{10^6} = 200 \times 10^{-6}$$

- واحد فوران مغناطیسی به وبر تبدیل می‌شود:

$$\frac{1 \text{ wb}}{\varphi} = \frac{10^3 \text{ mwb}}{0.02 \text{ mwb}}$$

$$\varphi = \frac{0.02 \times 1}{10^3} = 0.02 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-5} \text{ [wb]}$$

- از رابطه زیر چگالی فوران مغناطیسی به دست می‌آید:

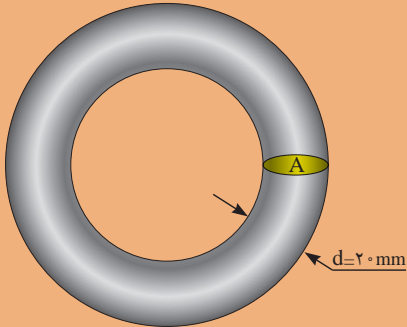
$$B = \frac{\varphi}{A} = \frac{2 \times 10^{-5}}{2 \times 10^{-4}} = 0.1 \left[ \frac{\text{wb}}{\text{m}^2} \right] = 0.1 \text{ [T]}$$

- واحد چگالی فوران مغناطیسی به گاوس تبدیل می‌شود:

$$\frac{1 \text{ T}}{0.1 \text{ T}} = \frac{10^4 \text{ G}}{B}$$

$$B = \frac{0.1 \times 10^4}{1} = 0.1 \times 10^4 = 1000 \text{ [G]}$$

تمرین



۱- یک آهنربا ۴۰۰۰۰۰ خط نیروی میدان مغناطیسی دارد. فوران این آهنربا چند میلی وبر است؟

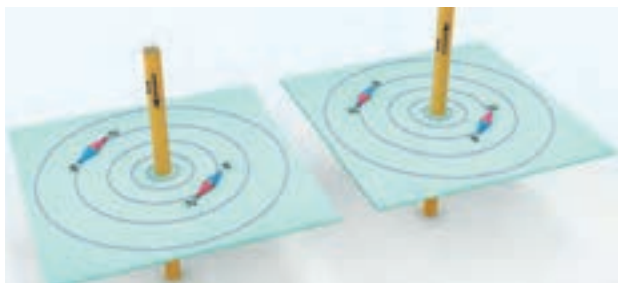
۲- آهنربایی با چگالی فوران مغناطیسی ۱۰۰۰۰ G مطابق شکل (۳۴) در نظر است. فوران مغناطیسی در سطح مقطع A هسته چند میلی وبر است.

شکل ۳۴

## میدان مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی

جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. اورستد اولین کسی بود که به بررسی ارتباط بنیادی میان جریان الکتریکی و مغناطیس پرداخت و نظریه الکترومغناطیس را ارائه کرد. وی برای تشریح این نظریه با قرار دادن یک عقربه مغناطیسی در تمام نقاط مختلف اطراف یک هادی حامل جریان مطابق شکل ۳۵ مشاهده کرد عبور جریان الکتریکی باعث انحراف عقربه مغناطیسی می‌شود. و با تغییر جهت جریان الکتریکی در هادی جهت عقربه‌های مغناطیسی تغییر می‌کند.





شکل ۳۵

جهت میدان الکترومغناطیسی به جهت جریان الکتریکی بستگی دارد.

### جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی

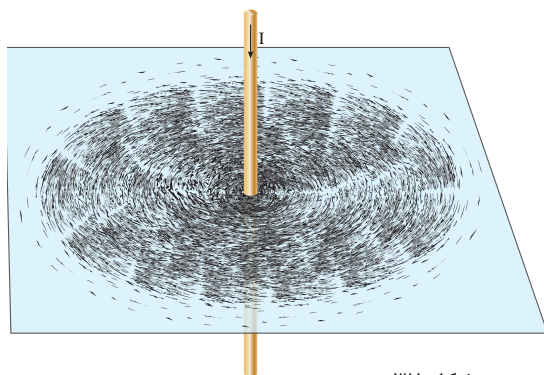
برای تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی علاوه بر استفاده از عقربه مغناطیسی مطابق شکل ۳۶ می‌توان از قانون شست<sup>۱</sup> نیز استفاده کرد. برای این منظور مطابق شکل ۳۶ باید شست



شکل ۳۶

دست راست را در جهت جریان الکتریکی هادی قرار داد تا بقیه انگشتان به صورت بسته جهت میدان الکترومغناطیسی را نشان دهند. مشاهده می‌کنید مانند جهت جریان می‌توان جهت میدان مغناطیسی را نیز به کمک نقطه (•) و ضربدر (X) مشخص کرد.

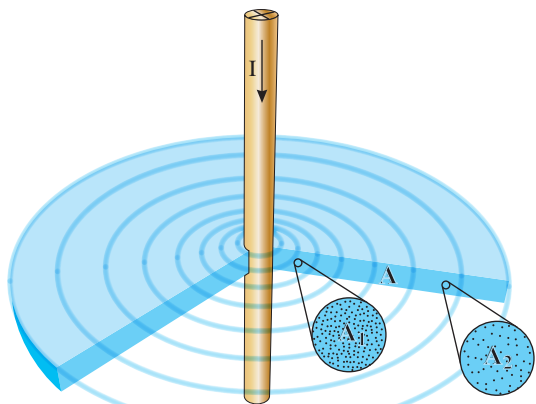
### چگالی فوران مغناطیسی اطراف یک هادی حامل جریان الکتریکی



شکل ۳۷

اورستد در ادامه آزمایش‌های خود، هادی حامل جریان الکتریکی را از میان یک صفحه مقوایی عبور داد و بر روی صفحه مقوایی براده‌های آهن پاشید. شکل (۳۷)

<sup>۱</sup>-Thumb Rule



شکل ۳۸

وی مشاهده کرد براده‌های آهن در مسیره‌های دایره‌ای منظم شدند و هرچه از هادی فاصله می‌گیرند از فشردگی آنها کاسته می‌شود و این پدیده در سرتاسر طول هادی صادق است. برای درک این پدیده برشی از فضای اطراف هادی در سطح مقطع A در شکل ۳۸ نشان داده شده است.

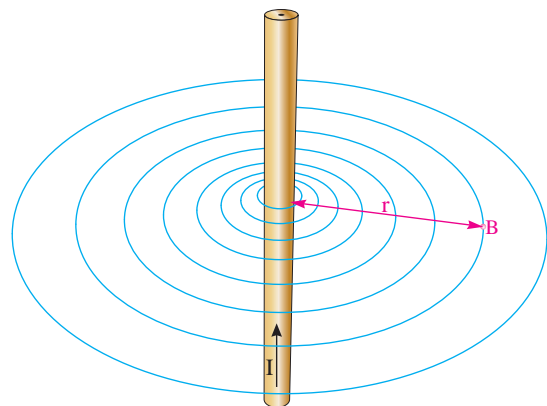
دو ناحیه  $A_1$  و  $A_2$  با مقاطع مساوی به فاصله  $r_1$  و  $r_2$  از هادی در سطح مقطع A بزرگ‌نمایی شده‌اند. چگالی فوران مغناطیسی ناحیه  $A_2$  که

در فاصله دورتری نسبت به ناحیه  $A_1$  از هادی واقع است کمتر می‌باشد. پس با افزایش فاصله از هادی حامل جریان، میدان مغناطیسی ضعیف‌تر می‌شود و چگالی فوران مغناطیسی B کاهش می‌یابد.

### محاسبه چگالی فوران مغناطیسی اطراف یک هادی حامل جریان الکتریکی

آمبرو ماکسول دانشمندانی بودند که ثابت کردند چگالی فوران مغناطیسی B اطراف هادی حامل جریان با شدت جریان الکتریکی هادی نسبت مستقیم و با فاصله از هادی نسبت عکس

دارد و رابطه زیر را برای تعیین مقدار چگالی فوران مغناطیسی B در نقطه‌ای به فاصله r از یک هادی حامل جریان به شدت I را براساس شکل ۳۹ ارائه کردند.



شکل ۳۹

$$B = k \frac{I}{r}$$

در این رابطه:

B چگالی فوران میدان مغناطیسی

برحسب  $\left[ \frac{wb}{m^2} \right]$

K ضریبی است که به محیط اطراف هادی بستگی دارد و برای هوا مقدار آن  $2 \times 10^{-7}$  برحسب

است.  $\left[ \frac{wb}{A.m} \right]$

I شدت جریان الکتریکی هادی بر حسب [A]  
r فاصله از هادی بر حسب [m] است.

مثال ۳: چگالی فوران میدان مغناطیسی در نقطه‌ای به فاصله ۱ cm از هادی حامل جریان ۱۰ A چند گاوس است؟

حل:

- واحد فاصله بر حسب متر تبدیل می‌شود.

$$\frac{1\text{m}}{r} = \frac{10\text{cm}}{1\text{cm}}$$

$$r = \frac{1 \times 1}{100} = 0.01\text{m}$$

- چگالی میدان مغناطیسی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$B = k \frac{I}{r}$$

$$B = 2 \times 10^{-7} \times \frac{10}{0.01} = 2 \times 10^{-4} \left[ \frac{\text{wb}}{\text{m}^2} \right]$$

یا

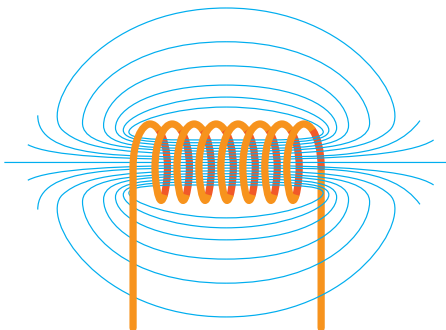
$$2 \times 10^{-4} [\text{T}]$$

- واحد چگالی فوران مغناطیسی به گاوس تبدیل می‌شود:

$$\frac{1\text{T}}{2 \times 10^{-4}\text{T}} = \frac{10^4\text{G}}{B}$$

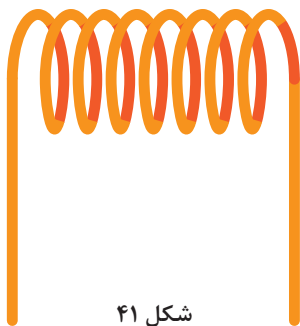
$$B = \frac{2 \times 10^{-4} \times 10^4}{1} = 2 [\text{G}]$$

## میدان مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی



شکل ۴۰

میدان الکترومغناطیسی هادی حامل جریان الکتریکی در سرتاسر دو طرف هادی توزیع می‌شود و متمرکز نیست و مقدار چگالی فوران مغناطیسی B در هر نقطه از اطراف هادی متغیر و کم است. اگر هادی حامل جریان الکتریکی به صورت سیم‌پیچ در آورده شود ضمن اینکه میدان الکترومغناطیسی در درون سیم‌پیچ متمرکز می‌شود، چگالی فوران مغناطیسی B نیز افزایش می‌یابد شکل (۴۰).



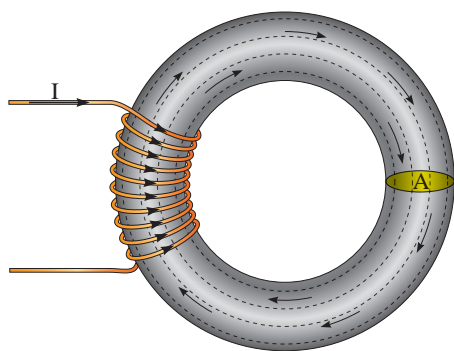
شکل ۴۱

سیم پیچ از پیچیدن چند دور هادی بوجود می‌آید.  
شکل (۴۱).

سیم پیچ را بوبین نیز می‌گویند. انواع سیم‌پیچ در شکل ۴۲ نشان داده شده است.



شکل ۴۲



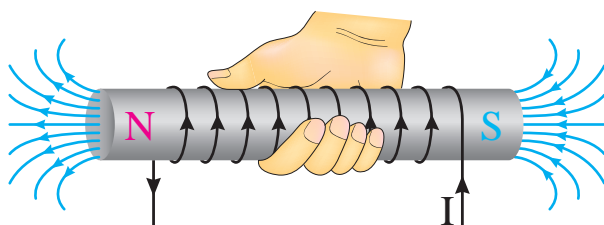
شکل ۴۳

با قرار دادن سیم‌پیچ بر روی یک هسته از جنس مواد فرومغناطیس<sup>۱</sup> مطابق شکل ۴۳ و عبور جریان الکتریکی از آن، میدان الکترومغناطیسی با چگالی  $B$  بیشتری نسبت به سیم‌پیچ با هسته هوا ایجاد می‌شود. هسته فرومغناطیس باعث می‌شود، میدان الکترومغناطیسی درون سیم‌پیچ متمرکزتر شود، لذا چگالی فوران مغناطیسی افزایش می‌یابد. مواد فرومغناطیسی خواص آهنربایی از خود نشان می‌دهند. آهن و آلیاژهای آهن، مواد فرومغناطیس هستند.

۱- Ferro magnetic

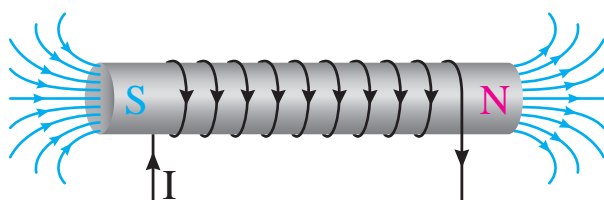
## جهت میدان الکترومغناطیس سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی

جهت میدان الکترومغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی از قاعده دست راست تعیین می‌شود بدین منظور مطابق شکل ۴۴ اگر انگشتان دست راست در جهت جریان الکتریکی سیم‌پیچ قرار گیرد شست جهت میدان الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. با تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی محل قطب‌های N و S مشخص می‌شود. طبق قرارداد محل خروج فوران مغناطیسی را با حرف N و محل ورود آن را با حرف S نشان می‌دهند.



شکل ۴۴

جهت میدان مغناطیسی سیم‌پیچ نیز تابع جهت جریان سیم‌پیچ است و با تغییر جهت جریان جهت میدان مغناطیسی تغییر می‌کند شکل (۴۵).

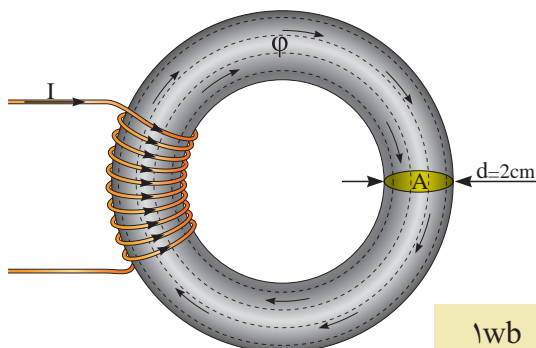


شکل ۴۵

مثال ۴: سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی شکل ۴۶ میدان الکترومغناطیسی با فوران  $3/14 \text{ mwb}$  در هسته تولید می‌کند. چگالی فوران مغناطیسی در هسته چند تسلا است؟

حل:

- چگالی فوران از رابطه  $\varphi = \frac{B}{A}$  به دست می‌آید. ابتدا واحد فوران را به وبر تبدیل می‌کنیم و سپس مساحت سطح مقطع A را محاسبه کنیم:



شکل ۴۶

$$\frac{1 \text{wb}}{\varphi} = \frac{10^{-3} \text{mwb}}{3/14} \Rightarrow \varphi = \frac{3/14}{10^{-3}} = 3/14 \times 10^{-3} [\text{wb}]$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

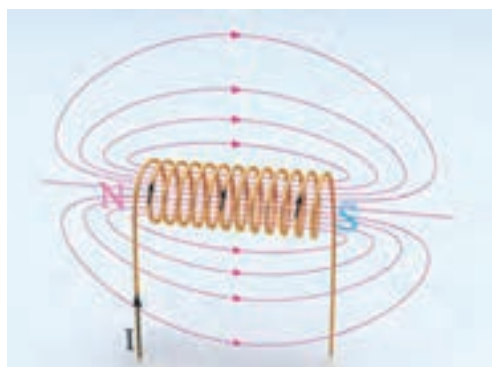
$$A = \frac{\pi (2)^2}{4} = 3/14 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\frac{1\text{m}^2}{A} = \frac{10^4 \text{cm}^2}{3/14} \Rightarrow A = \frac{1 \times 3/14}{10^4} = 3/14 \times 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$B = \frac{\varphi}{A}$$

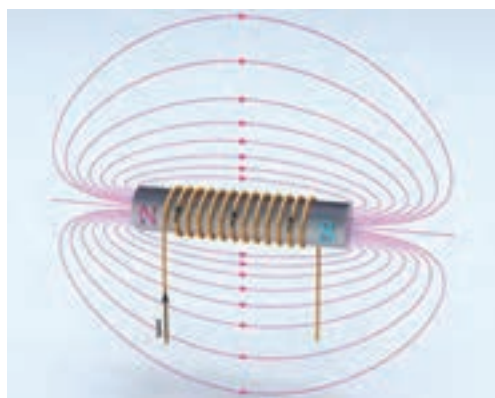
$$B = \frac{3/14 \times 10^{-3}}{3/14 \times 10^{-4}} = 10 \left[ \frac{\text{wb}}{\text{m}^2} \right] = 10 \text{ [T]}$$

## ضریب نفوذ مغناطیسی



شکل ۴۷

ضریب نفوذ مغناطیسی  $\mu$  معیاری است که میزان گذردهی هسته را در مقابل خطوط نیروی مغناطیسی نشان می‌دهد. میدان مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان  $I$  با هسته هوا در شکل ۴۷ نشان داده شده است.



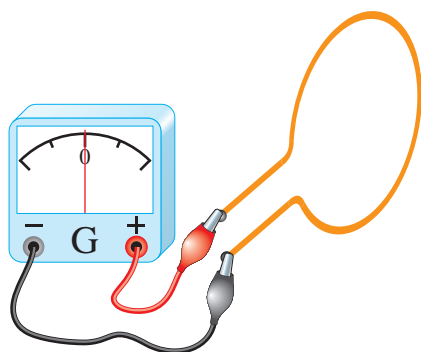
شکل ۴۸

اگر درون این سیم‌پیچ هسته فرومغناطیس قرار داده شود چگالی فوران مغناطیسی  $B$  در هسته به شدت افزایش می‌یابد شکل (۴۸). از مقایسه شکل‌های ۴۷ و ۴۸ می‌توان نتیجه گرفت. هسته فرومغناطیس نسبت به هسته هوا ضریب نفوذ مغناطیسی  $\mu$  بزرگ‌تری دارد و چگالی فوران مغناطیسی بزرگ‌تری به دست می‌آید.

## قانون القای الکترومغناطیسی فاراده

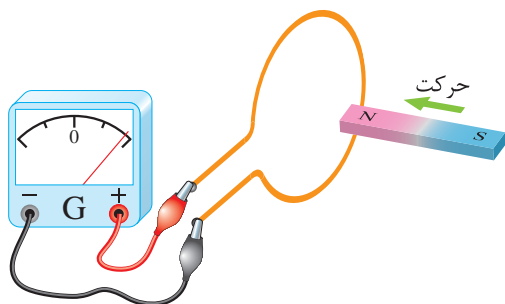
«قانون القای الکترومغناطیسی فاراده» یکی از اساسی‌ترین قوانین مغناطیسی در فیزیک است. طرز کار وسایل الکتریکی که الکترومغناطیس در آنها نقش دارد به کمک قانون القای الکترومغناطیسی فاراده قابل فهم است؛ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده در تحلیل طرز کار وسایل تبدیل انرژی الکترومکانیکی اعم از موتور یا ژنراتور کاربرد فراوان دارد.

قانون القای الکترومغناطیسی فاراده و روابط حاکم بر آن را می‌توان با انجام چند آزمایش به دست آورد.



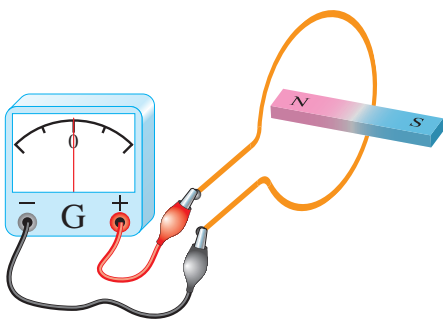
شکل ۴۹

**آزمایش ۱ -** مداری متشکل از یک حلقه هادی که دو سر آن به یک گالوانومتر متصل است در شکل ۴۹ نشان داده شده است.



شکل ۵۰

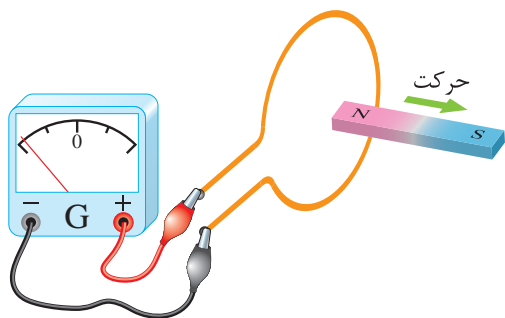
اگر یک آهنربای دائم از طرف قطب N آن مطابق شکل ۵۰ داخل حلقه شود، عقربه گالوانومتر منحرف می‌شود. انحراف عقربه گالوانومتر به معنای عبور جریان از گالوانومتر است.



شکل ۵۱

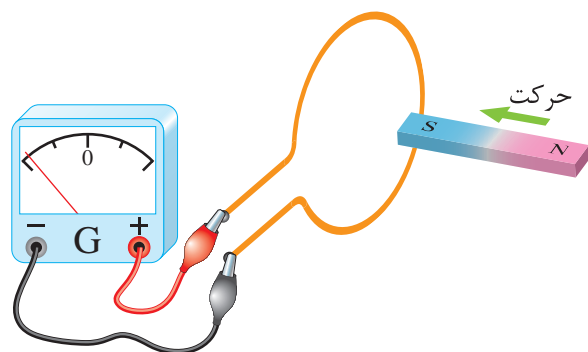
در صورتی که آهنربای دائم نسبت به حلقه، مطابق شکل ۵۱ حرکتی نداشته باشد، عقربه گالوانومتر منحرف نخواهد شد.

۱- گالوانومتر یک آمپرتر بسیار دقیق است که می‌تواند جریان‌های خیلی کم را اندازه بگیرد.



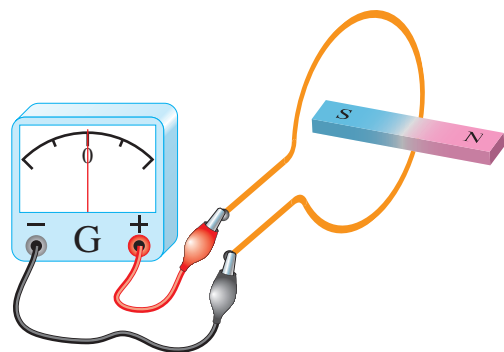
شکل ۵۲

وقتی که آهنربای دائم از حلقه، مطابق شکل ۵۲ دور شود، عقربه گالوانومتر در جهت عکس حالت قبل منحرف می‌شود. یعنی جهت جریان در حلقه تغییر کرده است.



شکل ۵۳

در ادامه آزمایش اگر قطب S داخل حلقه شود، عقربه گالوانومتر بر خلاف حالتی که قطب N وارد حلقه شد منحرف می‌گردد.



شکل ۵۴

در این حالت نیز در صورتیکه آهنربای دائم نسبت به حلقه: مطابق شکل ۵۴ حرکتی نداشته باشد، عقربه گالوانومتر منحرف نخواهد شد.

بدین ترتیب در این آزمایش پدیده‌ای مشاهده می‌شود که در اثر حرکت آهنربای دائم نسبت به حلقه به وجود آمده است.

در آزمایش ۱ جریانی که در حلقه برقرار می‌شود را «جریان القایی»<sup>۱</sup> می‌نامند. می‌دانید عامل جاری شدن جریان در هر مدار الکتریکی نیروی محرکه (E) است. جریان القایی نیز ناشی از یک نیروی محرکه است که آن را «نیروی محرکه القایی»<sup>۲</sup> می‌نامند. نیروی محرکه القایی را به اختصار با EMF نشان می‌دهند.

۱-Induced Current

۲-Electro Motive Force



فاراده با آزمایش‌هایی نظیر این آزمایش، توانست قانونی به‌دست آورد که به «قانون القای الکترومغناطیسی فاراده» مشهور شد. وی بر اساس این آزمایش‌ها متوجه شد که تغییر فوران مغناطیسی عامل ایجاد نیروی محرکه القایی است؛ لذا قانون القای الکترومغناطیسی فاراده را چنین تعریف کرد:

«مقدار نیروی محرکه القایی در هر مدار با آهنگ تغییر فوران متناسب است».

فاراده به کمک این قانون برای محاسبه مقدار نیروی محرکه القایی رابطه ریاضی زیر را ارائه کرد. این رابطه بیان ریاضی قانون القای الکترومغناطیسی فاراده است.

$$e \propto \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

در این رابطه:

$\Delta\phi$  تغییرات فوران مغناطیسی بر حسب وبر [wb]

$\Delta t$  مدت زمان وقوع تغییرات فوران مغناطیسی بر حسب ثانیه (s)

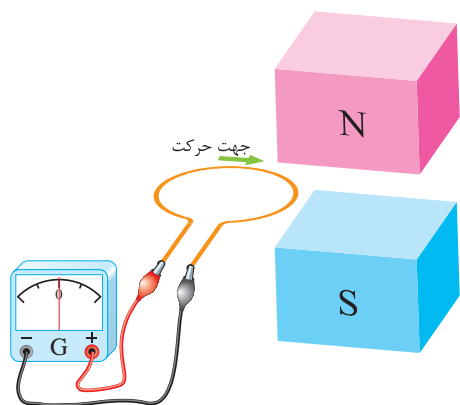
$e$  نیروی محرکه القایی بر حسب ولت [V] است.

نیروی محرکه القایی  $e$  در عمل بسیار حائز اهمیت است. چراغ‌های اتاکی که در آن، این کتاب را می‌خوانید با استفاده از نیروی محرکه القایی حاصل از یک ژنراتور روشن می‌شوند. اگر به‌جای استفاده از یک حلقه سیم، از سیم‌پیچی با  $N$  حلقه، آزمایش فاراده تکرار شود، در هر حلقه سیم‌پیچ نیروی محرکه القایی ایجاد می‌شود و این نیروهای محرکه با یکدیگر جمع می‌شوند تا نیروی محرکه القایی سیم‌پیچ به‌دست آید؛ لذا مقدار نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$e = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

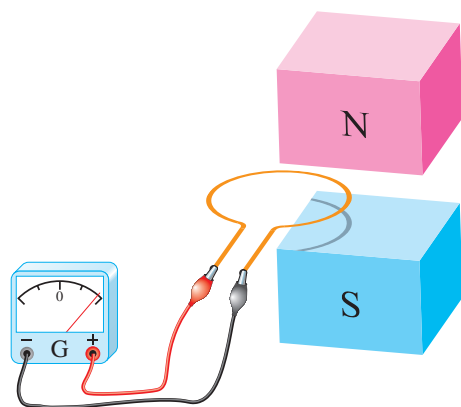
نیروی محرکه القایی  $e$  جریان القایی در سیم‌پیچ جاری می‌کند که از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$i = \frac{(V) \text{ نیروی محرکه القایی}}{(\Omega) \text{ مقاومت الکتریکی حلقه}}$$



شکل ۵۵

آزمایش ۲- حلقه هادی متصل به یک گالوانومتر در بیرون میدان مغناطیسی B ناشی از دو قطب N و S یک آهنربای قوی در شکل ۵۵ نشان داده شده است. حلقه در جهت نشان داده شده از درون میدان مغناطیسی عبور داده می‌شود.

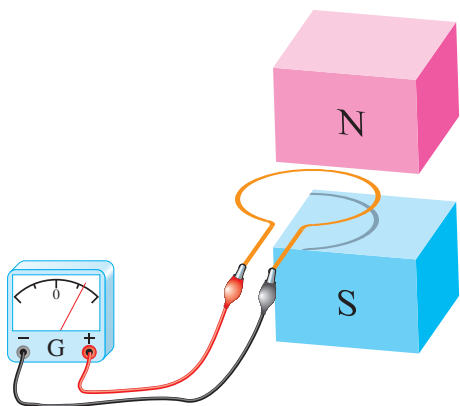


شکل ۵۶

با حرکت حلقه در هنگام ورود به میدان مغناطیسی، فورانی که از سطح حلقه می‌گذرد افزایش می‌یابد و هنگام خروج از میدان مغناطیسی، فورانی که از سطح حلقه می‌گذرد کاهش می‌یابد و به صفر می‌رسد. این تغییر فوران طبق قانون القای الکترومغناطیسی فاراده در حلقه نیروی محرکه القا می‌کند و گالوانومتر منحرف می‌شود.

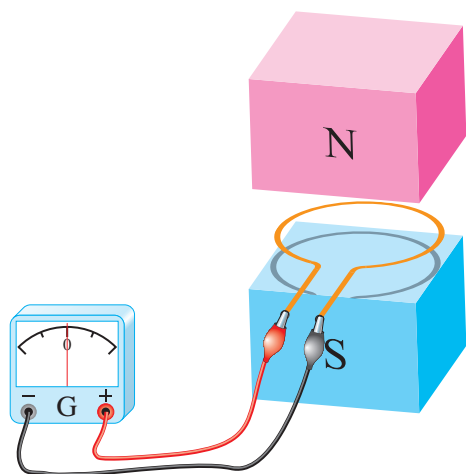
لحظه ورود حلقه به درون میدان مغناطیسی را شکل ۵۶ نشان می‌دهد.

در این لحظه فوران مغناطیسی بخشی از سطح حلقه را می‌پوشاند. تصویر حلقه روی قطب S این موضوع را نشان می‌دهد.



شکل ۵۷

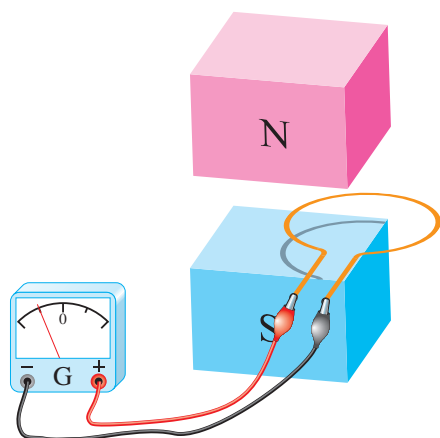
هرچه حلقه بیشتر وارد میدان مغناطیسی می‌شود فوران بیشتری سطح حلقه را می‌پوشاند. شکل (۵۷)



شکل ۵۸

این تغییر فوران طبق قانون فاراده نیروی محرکه القایی در حلقه ایجاد می‌کند. لذا گالوانومتر منحرف می‌شود.

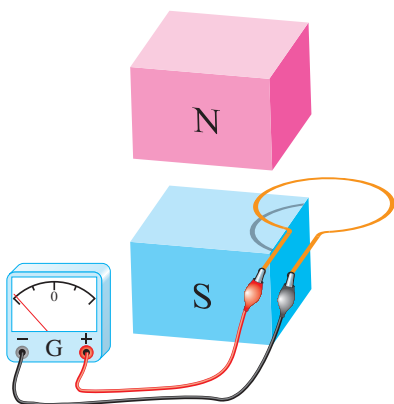
شکل ۵۸ لحظه‌ای را نشان می‌دهد که حلقه به صورت کامل وارد میدان مغناطیسی شده است. تصویر حلقه روی قطب S این موضوع را نشان می‌دهد. با اینکه تمام فوران مغناطیسی سطح حلقه را پوشانده است اما حرکت حلقه در این لحظه موجب تغییر فوران در سطح حلقه نخواهد شد. لذا در آن نیروی محرکه القا نمی‌شود و گالوانومتر صفر را نشان می‌دهد.



شکل ۵۹

لحظه خروج حلقه در شکل ۵۹ نشان داده شده است. در این لحظه فوران مغناطیسی بخشی از سطح حلقه را می‌پوشاند و دوباره تغییرات فوران در سطح حلقه ایجاد می‌شود. بنابراین در حلقه نیروی محرکه القا می‌شود و گالوانومتر را در جهت مخالف منحرف می‌کند.

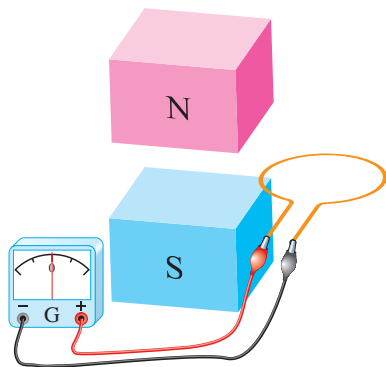
در لحظه خروج حلقه از میدان مغناطیسی فورانی که سطح حلقه را می‌پوشاند رو به کاهش است در صورتی که در زمان ورود حلقه به میدان مغناطیسی فورانی که سطح حلقه را می‌پوشاند رو به افزایش بوده است. لذا گالوانومتر به هنگام خروج حلقه از میدان مغناطیسی، برخلاف جهت ورود حلقه به میدان مغناطیسی، منحرف می‌شود.



شکل ۶۰

لحظه خروج حلقه از میدان مغناطیسی در شکل ۶۰ نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود سطحی از حلقه که توسط فوران پوشانده شده است رو به کاهش است. لذا تغییرات فوران در سطح حلقه، در آن نیروی محرکه القا می‌کند و عقربه گالوانومتر را منحرف خواهد کرد.



شکل ۶۱

خروج کامل حلقه از میدان مغناطیسی در شکل ۶۱ نشان داده شده است. در این لحظه فورانی از سطح حلقه نمی‌گذرد و تغییرات فوران آن به صفر رسیده است لذا در آن نیروی محرکه القا نمی‌شود و گالوانومتر صفر را نشان می‌دهد.

## قانون لنز

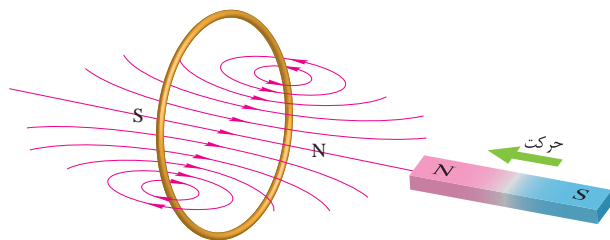
در پدیده القای الکترومغناطیسی پلاریته نیروی محرکه القایی و جهت جریان القایی مشخص نشد. پلاریته نیروی محرکه القایی و جهت جریان القایی با استفاده از «اصل بقای انرژی» تعیین خواهد شد. در این مبحث اصل بقای انرژی به صورت «قانون لنز» بیان می‌شود که توسط آقای لنز در سال ۱۸۳۴ میلادی ارائه گردید. طبق این قانون:

«جریان القایی در جهتی برقرار می‌شود که با عامل به وجود آورنده خود مخالفت کند».

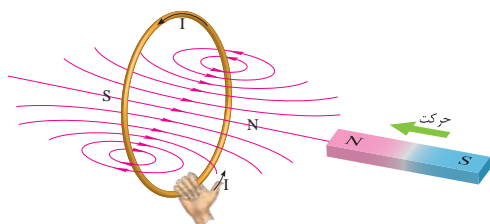
قانون لنز در مورد جریان‌های القایی به کار می‌رود. از آنجایی که جریان در مدار بسته جاری می‌شود، لذا قانون لنز در مدارهای بسته کاربرد پیدا می‌کند.

در شکل ۶۲ مقطع یک حلقه هادی و یک آهنربا نشان داده شده است. هنگامی که قطب N آهنربا به طرف حلقه «حرکت» داده می‌شود، مطابق آزمایش ۱ فازده، جریان القایی در حلقه جاری می‌شود. این جریان، میدان مغناطیسی در اطراف حلقه تولید خواهد نمود. طبق قانون لنز جهت جریان القایی به گونه‌ای است که با عامل به وجود آورنده‌اش مخالفت می‌کند؛ بدین

معنی که میدان مغناطیسی ناشی از جریان القایی با حرکت آهنربا به سمت حلقه مخالفت خواهد کرد. یعنی قطب N میدان حلقه مقابل قطب N آهنربا قرار می‌گیرد تا با ایجاد نیروی دافعه مانع حرکت آهنربا به سمت حلقه شود.



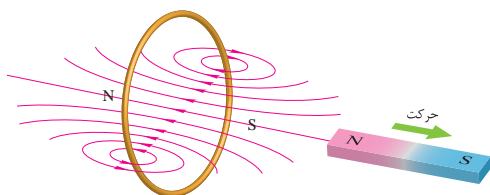
شکل ۶۲



شکل ۶۳

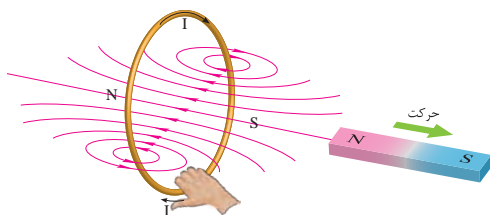
با مشخص شدن محل قطب‌های N و S اطراف حلقه جهت میدان مغناطیسی آن تعیین می‌شود. اکنون بنا به قانون شست مطابق شکل ۶۳ جهت جریان القایی تعیین می‌شود.

وقتی آهنربا به طرف حلقه «حرکت» می‌کند، جریان القایی ظاهر می‌شود. به بیان قانون القای الکترومغناطیسی فاراده، این «حرکت دادن» همان «تغییر فوران» است که جریان القایی را تولید می‌کند و طبق قانون لنز میدان مغناطیسی ناشی از جریان القایی با این «حرکت دادن» مخالفت خواهد کرد.



شکل ۶۴

اگر آهنربا مطابق شکل ۶۴ به عقب حرکت داده شود، مطابق آزمایش ۱ فاراده نیز در این حالت جریان القایی در حلقه جاری می‌شود و طبق قانون لنز، میدان مغناطیسی ناشی از این جریان القایی نیز با عامل به وجود آورنده‌اش که همان «حرکت رو به عقب» آهنربا است مخالفت خواهد کرد؛ یعنی میدان حلقه، قطب S خود را در مقابل قطب N آهنربا قرار می‌دهد تا با ایجاد نیروی جاذبه مانع حرکت آهنربا شود.



شکل ۶۵

با مشخص شدن محل قطب‌های N و S اطراف حلقه، جهت میدان مغناطیسی آن تعیین می‌شود. اکنون بنا به قانون شست مطابق شکل ۶۵ جهت جریان القایی حلقه تعیین می‌شود.

با توجه به شکل‌های ۶۳ و ۶۵ مشاهده می‌شود جهت میدان مغناطیسی حلقه ناشی از جریان القایی همواره به گونه‌ای است که با «حرکت» آهنربا مخالفت می‌کند.

«حرکت» آهنربا به سمت حلقه یا دور شدن از حلقه همیشه تحت تأثیر نیروی مقاوم میدان مغناطیسی حلقه قرار می‌گیرد. از این رو لازم است نیرویی که صرف حرکت آهنربا می‌گردد کار انجام دهد.

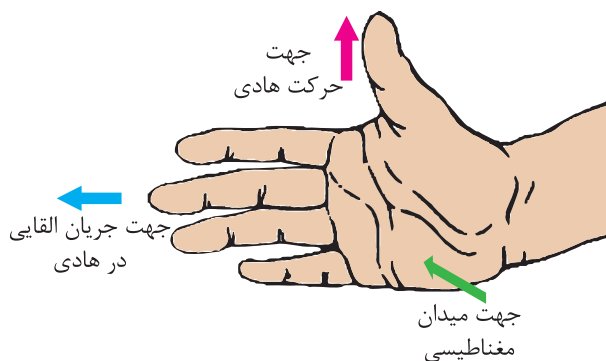
به نظر شما کار انجام شده برای حرکت آهنربا به چه انرژی‌ای تبدیل می‌شود؟ جهت میدان مغناطیسی جریان القایی به گونه‌ای است که همواره با عامل به‌وجودآورنده‌اش، «حرکت آهنربا» مخالفت می‌کند. این مخالفت در رابطه قانون القای الکترومغناطیسی فاراده با یک علامت منفی به‌صورت رابطه زیر نشان داده می‌شود.

$$e = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

علامت منفی بیانگر همان قانون لنز است که در محاسبات دخالت داده نمی‌شود. لذا  $e$  به‌عنوان «نیروی ضدحرکه القایی» معرفی می‌شود تا مخالفت آن بر اساس قانون لنز در نام آن گنجانیده شده باشد. نیروی ضدحرکه القایی را به اختصار با  $Cemf$  نشان می‌دهند.

## قانون دست راست

تعیین جهت جریان القایی با قانون بقای انرژی که به‌صورت قانون لنز مطرح شد در برخی مواقع دشوار است. روش ساده‌تر برای تعیین جهت جریان القایی «قانون دست راست» است که آن را نیز می‌توان به‌کار برد. طبق این قانون اگر دست راست را مطابق شکل ۶۶ طوری نگه داشت که فوران مغناطیسی از قطب  $N$  به کف دست وارد شود و شست جهت حرکت هادی را نشان دهد، انگشتان جهت جریان القایی هادی را نشان خواهند داد.

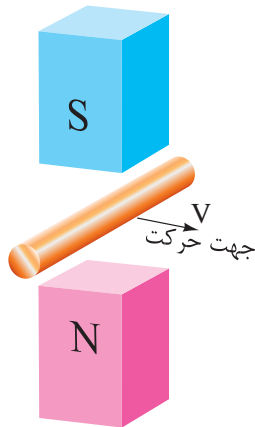


شکل ۶۶ - قانون دست راست

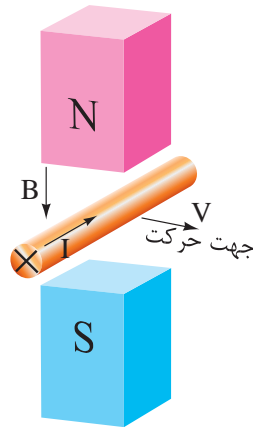
### فعالیت ۹-۱

۱- جهت جریان القایی هادی شکل‌های ۶۹ و ۷۰ را با استفاده از قانون دست راست تعیین کنید.

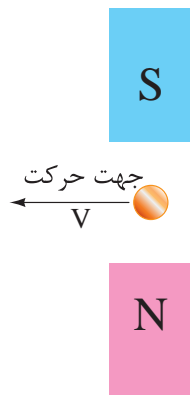
جهت جریان القایی یک هادی متحرک در میدان مغناطیسی توسط قانون دست راست در شکل‌های ۶۷ و ۶۸ تعیین شده است.



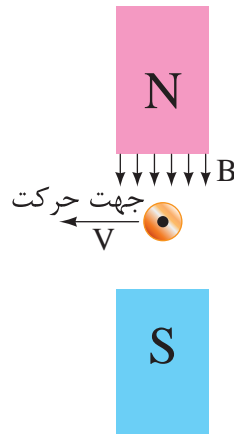
شکل ۶۹



شکل ۶۷



شکل ۷۰



شکل ۶۸

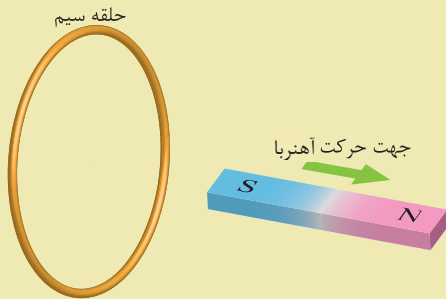
۲- از جواب‌های به دست آمده در شکل‌های ۶۷ الی ۷۰ چه نتیجه‌ای به دست می‌آید؟

## پرسش‌های کامل کردنی

- ۱ - طرز کار وسایل الکتریکی که ..... در آنها نقش دارد به کمک قانون القای الکترومغناطیس فاراده قابل فهم است.
- ۲ - طبق قانون لنز ..... به گونه‌ای است که با عامل به وجود آورنده اش ..... می‌کند.
- ۳ - برای تعیین جهت جریان القایی از روش ..... استفاده می‌شود.

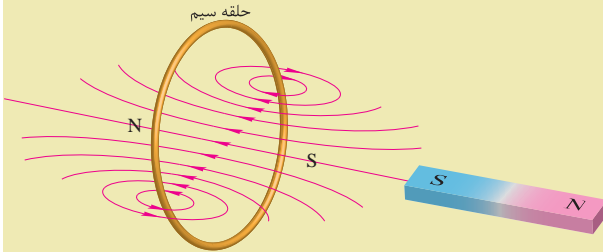
## پرسش‌های تشریحی

- ۱ - با توجه به شکل ۷۱ جهت جریان القایی در حلقه را مشخص کنید.



شکل ۷۱

- ۲ - برگشت پذیری فرایند تبدیل انرژی در ماشین‌های الکتریکی یعنی چه؟
- ۳ - قانون لنز را تعریف کنید.
- ۴ - با توجه به شکل ۷۲ جهت حرکت آهنربا را مشخص کنید.

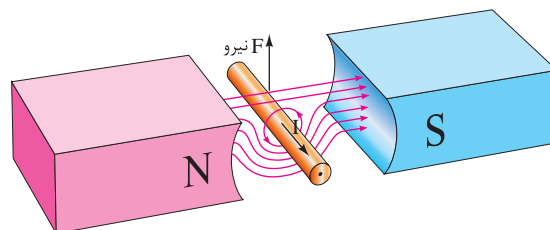


شکل ۷۲

- ۵ - قانون دست راست را توضیح دهید و کاربرد آن را بنویسید.

## نیروی مغناطیسی وارد بر هادی حامل جریان الکتریکی

یک هادی حامل جریان الکتریکی در میدان مغناطیسی قطب‌های N و S آهنربایی قوی در نظر گرفته شده است. شکل (۷۳)



شکل ۷۳



میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را شرح و تفصیل داده است، «نیروی لورنس» می‌گویند. مقدار نیروی مغناطیسی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F = BIL$$

در این رابطه:

$F$  نیروی مغناطیسی بر حسب نیوتن [N]  
 $B$  چگالی فوران مغناطیسی بر حسب  $\left[\frac{wb}{m^2}\right]$   
 $I$  شدت جریان الکتریکی هادی بر حسب [A]  
 $L$  طول مؤثر هادی که تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد بر حسب [m]

**مثال ۵:** هادی به طول مؤثر  $20\text{ cm}$  در میدان مغناطیسی با چگالی فوران  $0.8 \left[\frac{wb}{m^2}\right]$  به طور عمود بر خطوط میدان مغناطیسی قرار دارد. اگر از این هادی جریان  $10\text{ A}$  عبور کند، نیروی مغناطیسی وارد بر این هادی چند نیوتن است؟

**حل:**

از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F = BIL$$

$$F = 0.8 \times 10 \times 20 \times 10^{-2} = 1.6$$

جهت میدان مغناطیسی قطب‌ها از سوی قطب N به سمت قطب S می‌باشد. میدان مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی با قانون شست تعیین شده است. مشاهده می‌شود در پایین هادی، جهت میدان مغناطیسی قطب‌ها و جهت میدان مغناطیسی اطراف هادی هم‌جهت می‌باشد و یکدیگر را تقویت می‌کنند؛ اما در بالای هادی جهت میدان مغناطیسی آنها مخالف یکدیگر می‌باشد و همدیگر را تضعیف می‌کنند. لذا «نیروی مغناطیسی» به هادی از سوی میدان قوی‌تر به سمت میدان ضعیف‌تر وارد می‌شود و هادی را به سمت بالا حرکت می‌دهد.

## فعالیت ۲ - ۹

اگر جهت جریان الکتریکی هادی شکل ۷۳ عوض شود با رسم خطوط میدان مغناطیسی قطب‌ها و اطراف هادی، جهت نیروی مغناطیسی وارد به هادی را تعیین کنید. همان‌طور که توضیح داده شد می‌توان نتیجه گرفت:

«به هر هادی حامل جریان در میدان مغناطیسی، نیروی مغناطیسی وارد می‌شود»، به طوری که «نیروی مغناطیسی سعی به بیرون راندن هادی از درون میدان مغناطیسی دارد».

به نیروی مغناطیسی وارد به هادی حامل جریان الکتریکی به احترام «لورنس» که مفاهیم

## قانون دست چپ

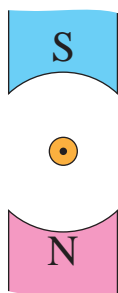
برای تعیین جهت نیروی مغناطیسی، «قانون دست چپ» ارائه شده است. طبق این قانون اگر دست چپ خود را مطابق شکل ۷۴ به گونه‌ای نگه دارید که فوران مغناطیسی از قطب N به

### فعالیت ۳ - ۹

۱ - جهت نیروی مغناطیسی شکل‌های ۷۷ و ۷۸ را با استفاده از قانون دست چپ تعیین کنید.



شکل ۷۷



شکل ۷۸

۲ - با مقایسه جهت نیروی مغناطیسی شکل‌های زیر، چه نتیجه‌ای به دست می‌آید:

(الف) شکل ۷۵ با شکل ۷۶:

.....  
 .....

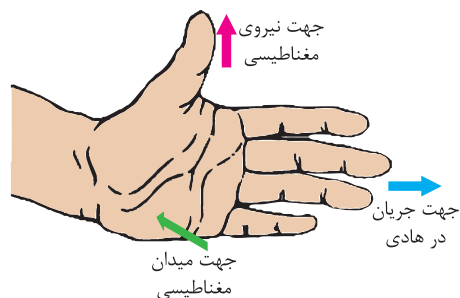
(ب) شکل ۷۵ با شکل ۷۷:

.....  
 .....

(پ) شکل ۷۵ با شکل ۷۸:

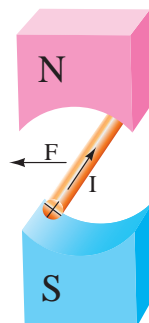
.....  
 .....

کف دست وارد شود و انگشتان، جهت جریان الکتریکی هادی را نشان دهند، انگشت شست جهت نیروی مغناطیسی وارد به هادی را نشان می‌دهد.



شکل ۷۴

جهت نیروی مغناطیسی هادی حامل جریان، درون میدان مغناطیسی، توسط قانون دست چپ در شکل‌های ۷۵ و ۷۶ تعیین شده است.

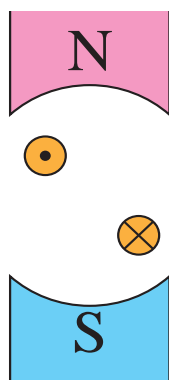


شکل ۷۵



شکل ۷۶

۳- جهت نیروی مغناطیسی وارد به هادی‌های حامل جریان شکل‌های ۷۹ و ۸۰ را با کمک قانون دست چپ تعیین کنید.



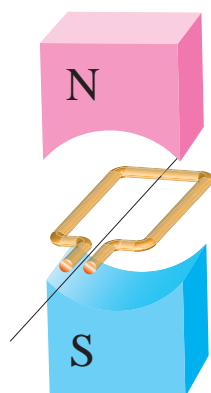
شکل ۸۰



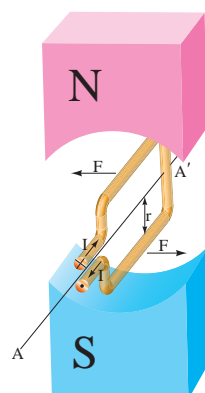
شکل ۷۹

### گشتاور نیروی مغناطیسی وارد بر حلقه جریان کامل

حلقه حامل جریان الکتریکی، معلق در میان میدان مغناطیسی دو قطب آهنربایی قوی که می‌تواند آزادانه حول محور  $AA'$  بگردد، فرض شده است شکل (۸۱). به بازوهای حامل جریان این حلقه، نیروی مغناطیسی در دو جهت مخالف، با مقدار مساوی وارد می‌شود. این نیروها در حلقه حامل جریان الکتریکی، «گشتاور» ایجاد می‌کنند و آن را حول محور می‌گردانند، لذا حلقه جابه‌جا می‌شود. شکل (۸۲)



شکل ۸۲



شکل ۸۱

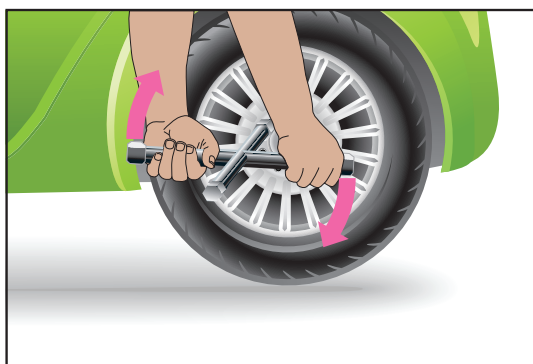
#### فعالیت ۴ - ۹

۱ - چگونگی گشتاور در شکل ۸۵ را بررسی کنید.



شکل ۸۵

گشتاور عامل گردش است. به‌طور مثال هنگامی که مکانیک برای باز کردن پیچ‌های چرخ اتومبیل از «آچارچرخ» استفاده می‌کند، وی با دستان خود، دو نیرو در جهت مخالف به آچارچرخ اعمال می‌کند. این نیروها حول محور آچارچرخ گشتاور ایجاد می‌کنند تا آن بگردد. شکل (۸۳)



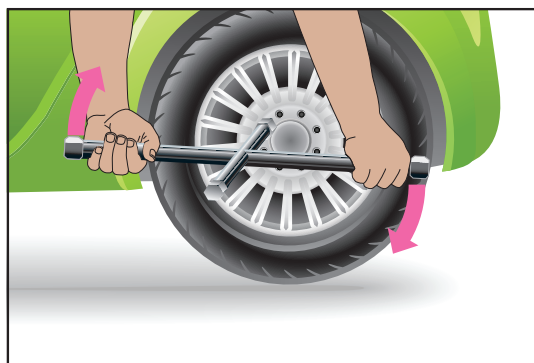
شکل ۸۳

۲ - دو فرمان اتومبیل در شکل ۸۶ نشان داده شده است. گرداندن کدام یک راحت است؟ برای پاسخ خود دلیل بیاورید.



شکل ۸۶

در صورتی که مکانیک نتواند این آچارچرخ را بگرداند، آچاری که طول بازوهای آن بلندتر است را به‌کار می‌برد تا گشتاور آچار افزایش یابد و بگردد. شکل (۸۴)



شکل ۸۴

## خودالقایی

برای تبدیل تناسب به تساوی در رابطه زیر از ضریبی به نام «ضریب خودالقایی» که با حرف  $L$  نشان داده می‌شود استفاده می‌شود.

$$e = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

واحد ضریب خودالقایی  $\frac{\text{ولت ثانیه}}{\text{آمپر}}$  می‌باشد و آن را «هانری» گویند و با  $H$  نشان می‌دهند. یک هانری ضریب خودالقایی هادی یا سیم پیچی است که هرگاه در مدت یک ثانیه جریان آن یک آمپر تغییر کند نیروی محرکه خودالقایی یک ولت ایجاد شود.

**مثال ۶:** جریان یک سیم پیچ با ضریب خودالقایی  $0.5$  هانری در مدت  $0.2$  ثانیه از صفر به  $2$  آمپر می‌رسد. نیروی محرکه خودالقایی چند ولت است؟

**حل:**

تغییرات جریان برابر است با:

$$\Delta i = 2 - 0 = 2 \text{ [A]}$$

تغییرات زمان برابر است با:

$$\Delta t = 0.2 \text{ (s)}$$

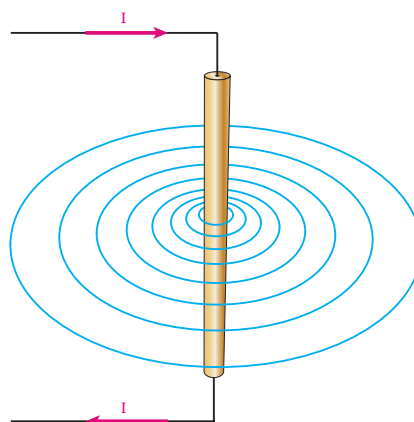
از رابطه زیر نیروی محرکه خودالقایی به دست می‌آید.

$$e = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

$$e = 0.5 \times \frac{2}{0.2} = 5 \text{ [V]}$$

**مثال ۷:** در مدار شکل زیر در صورت باز شدن کلید مقدار نیروی محرکه خودالقایی سیم پیچ در مدت  $0.5$  ثانیه چند ولت است؟

خودالقایی القای الکترومغناطیسی ناشی از تغییرات فوران خود هادی می‌باشد. پدیده خودالقایی ناشی از تغییرات جریان نسبت به زمان ایجاد می‌شود. با عبور جریان از یک هادی در اطراف آن میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. شکل (۸۷)



شکل ۸۷

تغییر جریان هادی باعث تغییر میدان مغناطیسی اطراف آن خواهد شد. تغییر میدان مغناطیسی طبق قانون القای الکترومغناطیسی فاراده درون هادی نیروی محرکه القا می‌نماید. که آن را نیروی محرکه خودالقایی گویند. طبق قانون لنز «نیروی محرکه خودالقایی» با عامل به وجود آورنده‌اش، تغییرات جریان مخالفت می‌نماید. پدیده خودالقایی در سیم پیچ‌ها نیز همانند پدیده خودالقایی توضیح داده می‌شود. نیروی محرکه خودالقایی متناسب با تغییرات جریان نسبت به زمان است و به رابطه زیر بیان می‌شود.

$$e \propto \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

که در این رابطه:

$L$  ضریب خودالقایی سیم پیچ [H]

$\mu$  ضریب نفوذ مغناطیسی  $\left[ \frac{\text{Wb}}{\text{A.m}} \right]$

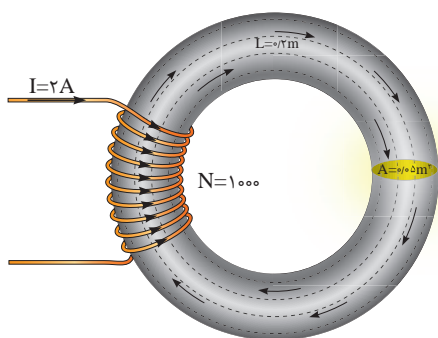
$N$  تعداد حلقه‌های سیم پیچ

$A$  سطح مقطع هسته سیم پیچ [ $\text{m}^2$ ]

$\ell$  طول متوسط هسته [m] است.

مثال ۸: ضریب خودالقایی سیم پیچ شکل ۸۹

را به دست آورید. ( $\mu = 2 \times 10^{-5} \frac{\text{Wb}}{\text{A.m}}$ )



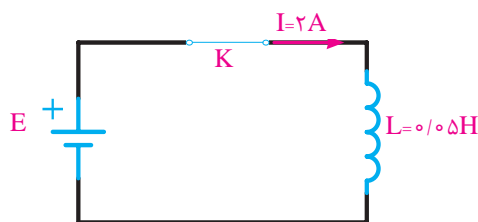
شکل ۸۹

حل:

از رابطه فوق داریم.

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

$$L = \frac{2 \times 10^{-5} \times 1000^2 \times 0.005}{0.2} = 1 \text{H}$$



شکل ۸۸

حل: تغییرات جریان برابر است با:

$$\Delta i = 0 - 2 = -2 \text{ [A]}$$

تغییرات زمان برابر است با:

$$\Delta t = 0.05 \text{ [s]}$$

از رابطه فوق نیروی محرکه خودالقایی به دست

می‌آید:

$$e = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

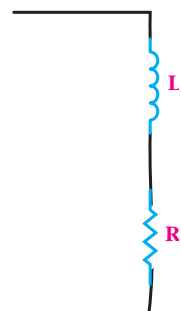
$$e = 0.05 \times \frac{-2}{0.05} = -2 \text{ [V]}$$

برای محاسبه ضریب خودالقایی سیم پیچ از

رابطه زیر استفاده می‌شود.

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

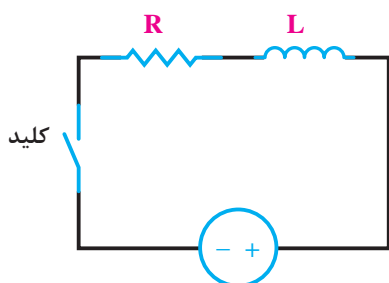
## مدار الکتریکی معادل سیم پیچ



شکل ۹۰

سیم پیچ علاوه بر ضریب خودالقایی  $L$ ، مقاومت الکتریکی اهمی  $R$  نیز دارد. مقاومت الکتریکی اهمی ناشی از طول و سطح مقطع هادی سیم پیچ است و ضریب خودالقایی ناشی از نیروی محرکه خودالقایی می‌باشد که در اثر تغییرات جریان به وجود می‌آید. برای سیم پیچ مدار الکتریکی شامل اتصال سری مقاومت الکتریکی اهمی  $R$  و ضریب خودالقایی  $L$  معادل می‌نمایند. شکل (۹۰)

## سیم‌پیچ در جریان مستقیم



شکل ۹۱

سیم‌پیچ در جریان مستقیم از خود فقط مقاومت الکتریکی اهمی R نشان می‌دهد اما با قطع و وصل جریان و یا تغییرات جریان علاوه بر مقاومت الکتریکی نیروی محرکه خودالقایی نیز در آن ایجاد می‌شود لذا ضریب خودالقایی L نیز ظاهر می‌شود. مدار الکتریکی معادل یک سیم‌پیچ که توسط منبع جریان مستقیم تغذیه می‌شود در شکل ۹۱ نشان داده شده است.

با بستن کلید، جریان سعی دارد به‌طور آنی افزایش یابد اما نیروی محرکه خودالقایی ایجادشده با افزایش آنی جریان مخالفت می‌کند. در نتیجه، مدت زمانی طول می‌کشد تا جریان به بیشترین مقدار یا مقدار نهایی خود برسد. با قطع کلید نیز جریان به‌طور آنی به صفر نمی‌رسد؛ زیرا نیروی محرکه خودالقایی تولیدشده، با این تغییر سریع مخالفت می‌کند. لذا جریان به تدریج به صفر می‌رسد.

مدت زمانی که طول می‌کشد تا جریان در یک سیم‌پیچ به  $\frac{63}{100}$  درصد مقدار نهایی خود برسد را ثابت زمانی می‌گویند. مقدار ثابت زمانی در یک سیم‌پیچ به مقدار مقاومت الکتریکی (R) و ضریب خودالقایی (L) بستگی دارد و از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

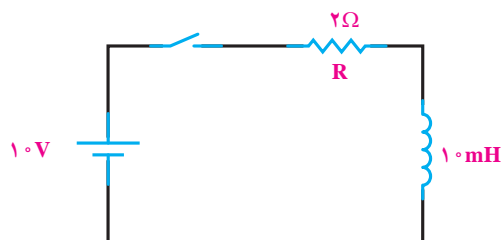
که در این رابطه :

$\tau$  ثابت زمانی [s]

L ضریب خودالقایی [H]

R مقاومت الکتریکی [ $\Omega$ ] است.

تقریباً ۵ ثابت زمانی طول می‌کشد تا جریان در یک سیم‌پیچ به مقدار نهایی خود برسد. کلید



شکل ۹۲

**مثال ۹:** در مدار شکل ۹۲ پس از بستن کلید، مدت زمانی که شدت جریان به مقدار نهایی خود می‌رسد را حساب کنید.

حل:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{10}{2} = 5 \text{ [ms]}$$

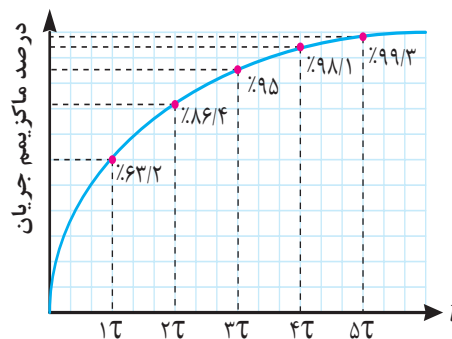
$$t = 5\tau = 5 \times 5 = 25 \text{ [ms]}$$

مثال ۱۰: در مثال ۹ اگر بوبینی با اندوکتانس ۱۰ mH به جای بوبین ۱۰ mH قرار گیرد، ثابت زمانی چگونه تغییر می‌کند؟

حل:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{20}{2} = 10 \text{ [ms]}$$

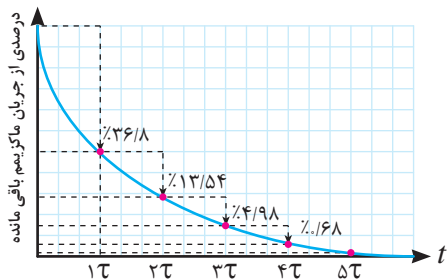
مشاهده می‌شود ثابت زمانی دو برابر می‌شود. با بسته شدن کلید در ثابت زمانی اول جریانی به اندازه ۶۳/۲ درصد کل جریان نهایی از سیم‌پیچ می‌گذرد. در ثابت زمانی دوم، جریان به ۸۶/۴ درصد می‌رسد. در ثابت‌های زمانی سوم، چهارم و پنجم نیز به همین ترتیب، به طوری که در ثابت زمانی پنجم تقریباً به مقدار نهایی خود می‌رسد. منحنی شکل ۹۳ روند تغییرات جریان تا رسیدن به مقدار نهایی خود به هنگام بستن کلید مدار شکل ۹۱ را در هر ثابت زمانی نشان می‌دهد.



شکل ۹۳

رفتار سیم‌پیچ در این ۵ ثابت زمانی را «حالت گذرا» و هنگامی که جریان پس از پنج ثابت زمانی به مقدار نهایی خود می‌رسد را «حالت پایدار» سیم‌پیچ گویند.

با باز شدن کلید مدار شکل ۹۱ تغییرات جریان تا رسیدن به مقدار نهایی خود در هر ثابت زمانی در شکل ۹۴ نشان داده شده است. در ثابت زمانی اول جریان به اندازه ۶۳/۲ درصد از مقدار ماکزیمم کاهش پیدا می‌کند و به ۳۶/۸ درصد می‌رسد. در ثابت‌های زمانی ۱۳/۶، سوم، چهارم و پنجم کاهش جریان به همین منوال ادامه پیدا می‌کند و در ثابت زمانی پنجم تقریباً به صفر می‌رسد.



شکل ۹۴

رفتار سیم‌پیچ در این ۵ ثابت زمانی را «حالت گذرا» گویند. بعد از ۵ ثابت زمانی جریان سیم‌پیچ به مقدار نهایی خود می‌رسد و ثابت می‌شود ضریب خودالقایی نیز صفر می‌شود لذا در مقدار جریان بی‌تأثیر می‌شود و سیم‌پیچ به «حالت پایدار» می‌رسد.



## سیم‌پیچ در حالت متناوب

سیم‌پیچ در جریان متناوب علاوه بر مقاومت الکتریکی اهمی  $R$ ، به دلیل تغییرات جریان ناشی از فرکانس نیروی محرکه خودالقایی نیز در آن به وجود می‌آید. جریان متناوب باعث ایجاد فوران در سیم‌پیچ می‌شود و نیروی محرکه خودالقایی ایجاد می‌کند. این نیروی محرکه خودالقایی با جاری شدن جریان در سیم‌پیچ مخالفت می‌نماید. مخالفت سیم‌پیچ در مقابل عبور جریان متناوب الکتریکی ناشی از اثر خودالقایی را «مقاومت القایی» گویند و با  $X_L$  نشان می‌دهند و واحد آن اهم است. مقاومت القایی با ضریب خودالقایی ارتباط دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید. در این رابطه:

$$X_L = 2\pi fL$$

$X_L$  مقاومت القایی  $[\Omega]$

$f$  فرکانس  $[HZ]$

$L$  ضریب خودالقایی  $[H]$  است.

**مثال ۱۱:** مقاومت القایی یک سلف  $10 \text{ mH}$  در فرکانس  $50^\circ$  و  $60^\circ$  هرترز چند اهم است؟  
حل:

از رابطه زیر داریم:

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = 2 \times 3.14 \times 50 \times 10 \times 10^{-3} = 3.14 [\Omega]$$

$$X_L = 2 \times 3.14 \times 60 \times 10 \times 10^{-3} = 3.768 [\Omega]$$

## سلف

سلف، سیم‌پیچی است که از مقاومت الکتریکی  $R$  در مقایسه با مقاومت القایی  $X_L$  آن صرف نظر شده است. در مدارات الکتریکی سلف‌ها به صورت سری یا موازی با یکدیگر اتصال پیدا می‌کنند.

## الف) اتصال سری سلف‌ها :

در اتصال سری سلف‌ها، ضریب خودالقایی کل برابر مجموع همه ضریب خودالقایی‌های موجود در مدار است که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

**مثال ۱۲:** سه سلف با ضریب خودالقایی  $2$ ،  $4$ ،  $6$  میلی‌هنری به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند. ضریب خودالقایی کل را به دست آورید.

حل: از رابطه زیر داریم:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + L_3$$

$$L_{eq} = 2 + 4 + 6 = 12 [\text{ms}]$$

### ب) اتصال موازی سلف‌ها :

در اتصال موازی سلف‌ها ضریب خودالقایی کل از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

**مثال ۱۳:** سه سلف با ضریب خودالقایی ۴، ۶، ۱۲ میلی‌هانری به صورت موازی به یکدیگر متصل شده‌اند. ضریب خودالقایی کل را به دست آورید.

**حل:**

از رابطه زیر داریم:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{1}{12}$$

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{3+2+1}{12}$$

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{6}{12}$$

$$L_{eq} = \frac{1 \times 12}{6} = 2\text{mH}$$

همچنین، برای محاسبه مقاومت القایی معادل در مدارهای سری و موازی نیز می‌توان مشابه محاسبه ضریب خودالقایی معادل سلف عمل کرد. روابط محاسبه مقاومت القایی معادل، در مدار سری و موازی به صورت زیر است.

مدار سری

$$X_{L_{eq}} = X_{L_1} + X_{L_2} + \dots + X_{L_n}$$

مدار موازی

$$\frac{1}{X_{L_{eq}}} = \frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{X_{L_2}} + \dots + \frac{1}{X_{L_n}}$$

**مثال ۱۴:** دو سلف به اتصال سری در یک مدار الکتریکی دارای مقاومت القایی ۳ و ۶ اهم می‌باشد. مقاومت القایی کل چند اهم است؟

**حل:**

از رابطه زیر داریم :

$$X_{L_{eq}} = X_{L_1} + X_{L_2}$$

$$X_{L_{eq}} = 3 + 6 = 9[\Omega]$$

**مثال ۱۵:** دو سلف با اتصال موازی در یک مدار الکتریکی دارای مقاومت القایی ۳ و ۶ اهم می‌باشند. مقاومت القایی کل چند اهم است؟

**حل:**

از رابطه زیر داریم:

$$\frac{1}{X_{L_{eq}}} = \frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{X_{L_2}}$$

$$\frac{1}{X_{L_{eq}}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6}$$

$$X_{L_{eq}} = 2[\Omega]$$

**منحنی جریان و ولتاژ سلف در جریان متناوب**  
جریان سلف از ولتاژ دو سر آن  $90^\circ$  عقب‌تر است لذا سلف را یک عنصر «پس‌فاز» می‌شناسند. منحنی ولتاژ و جریان یک سلف در اتصال به منبع متناوب سینوسی در شکل ۹۵ نشان داده شده است که در آن  $\theta_1 = -90^\circ$  و  $\theta_2 = 0$  می‌باشد.

حل :

الف) از رابطه  $X_L$  داریم.

$$X_L = 2\pi fL = \omega L$$

$$X_L = 1000 \times 10 \times 10^{-3} = 10 [\Omega]$$

ب) از قانون اهم داریم :

$$\text{ولتاژ} = \text{مقاومت} \times \text{جریان}$$

$$I_m = \frac{V_m}{X_L} = \frac{50}{10} = 5 [A]$$

از رابطه جریان مؤثر به دست می آید.

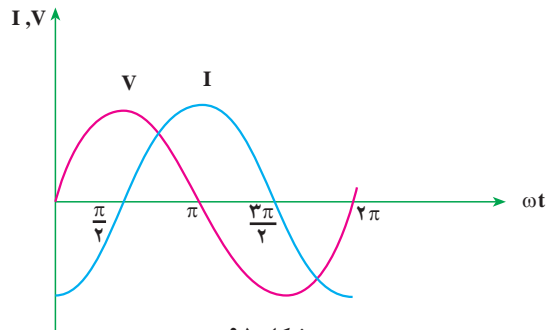
$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3.54 [A]$$

شکل ۹۷

ج) جریان سلف از ولتاژ دو سر آن عقب تر است و داریم :

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \theta_i)$$

$$i(t) = 5 \sin(1000t + 90^\circ)$$



با توجه به شکل ۹۵ معادلات زمانی ولتاژ و جریان به صورت زیر خواهد شد.

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \phi)$$

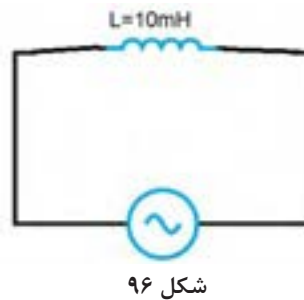
$$i(t) = I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

و زاویه اختلاف فاز برابر خواهد شد :

$$\phi = \theta_V - \theta_i$$

$$\phi = 0 - (-90) = +90$$

مثال ۱۶: در مدار شکل ۹۶ مطلوب است :



شکل ۹۶

$$V(t) = 50 \sin(1000t)$$

الف) مقاومت القایی سلف

ب) جریان سلف

ج) معادله زمانی جریان سلف

## انرژی سلف

**مثال ۱۷:** از یک سلف با ضریب خودالقایی  $0.2$  هانری جریان متناوب سینوسی به معادله زمانی  $i(t) = 4 \sin(50^\circ \text{t} - 9^\circ)$  می‌گذرد. ماکزیمم انرژی ذخیره شده در سلف چند ژول است؟

$$W_L = \frac{1}{2} L I_m^2$$

$$W_L = \frac{1}{2} (0.2)(4)^2 = 1.6 \text{ [J]}$$

**حل:** از رابطه داریم:

سلف انرژی الکتریکی را به صورت میدان مغناطیسی در خود ذخیره می‌سازد و ماکزیمم انرژی ذخیره شده در سلف از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$W_L = \frac{1}{2} L I_m^2$$

که در این رابطه:

$W_L$  ماکزیمم انرژی ذخیره شده در سلف [J]

$L$  ضریب خودالقایی [H]

$I_m$  ماکزیمم جریان سلف [A] است.

## توان الکتریکی سلف

توان الکتریکی سلف صرف ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی می‌شود، مقدار انرژی ذخیره شده در واحد زمان در سلف را «توان الکتریکی سلف» می‌گویند. توان الکتریکی سلف قادر به تبدیل کردن انرژی الکتریکی نیست لذا آن را «توان غیرمؤثر» یا «توان راکتیو» نیز می‌گویند و با حرف  $Q_L$  نشان می‌دهند و واحد آن «ولت آمپر راکتیو» «VAR» است. توان الکتریکی سلف از رابطه زیر به دست می‌آید و آن را با علامت مثبت نشانه‌گذاری می‌کنند.

$$Q_L = +X_L I_L^2$$

که در این رابطه:

$Q_L$  توان الکتریکی سلف [VAR]

$X_L$  مقاومت القایی سلف [ $\Omega$ ]

$I_L$  جریان سلف [A] است.

**مثال ۱۸:** یک سلف با مقاومت القایی  $4$  اهم با جریان مؤثر  $3$  آمپر مفروض است. توان الکتریکی سلف چقدر است؟

**حل:**

از رابطه توان الکتریکی سلف داریم:

$$Q_L = +X_L I_L^2$$

$$Q_L = +4 \times 3^2 = +36 \text{ [VAR]}$$

- ۱- مقدار نیروی مغناطیسی از رابطه ..... به دست می آید.
- ۲- برای تعیین ..... قانون دست چپ ارائه شده است.
- ۳- خودالقایی و ضریب خودالقایی را تعریف کنید.
- ۴- تغییرات جریان چه اثراتی بر سیم پیچ می گذارد؟
- ۵- عوامل مؤثر بر مقدار ضریب خودالقایی کدام است؟
- ۶- انرژی ذخیره شده در سلف یعنی چه؟
- ۷- رابطه فازی بین ولتاژ و جریان یک سلف چیست؟
- ۸- موقعیت جریان و ولتاژ سلف چگونه است؟
- ۹- توان الکتریکی سلف را تعریف کنید.
- ۱۰- چرا سلف را یک عنصر پس فاز می نامند؟
- ۱۱- مقاومت القایی سلف را تعریف کنید. رابطه آن را بنویسید. عوامل مؤثر بر آن را نام ببرید.
- ۱۲- ثابت زمانی سلف را تعریف کنید. چه مدت طول می کشد تا جریان سلف به مقدار نهایی خود برسد؟
- ۱۳- نشان دهید واحد ثابت زمانی بر حسب ثانیه می باشد.

- ۱- نیروی وارد به یک هادی حامل جریان الکتریکی ۲ آمپر در میدان مغناطیسی  $0.5$  تسلا برابر  $1/0$  نیوتن است. طول مؤثر هادی چند متر است؟
- ۲- سیم پیچی به طول  $50$  سانتی متر و سطح مقطع  $0.2/0$  متر مربع با هسته هوا دارای  $1000$  دور است اولاً ضریب خودالقایی آن تقریباً چند میلی هانری است؟ ثانیاً اگر بخواهیم ضریب خودالقایی دو برابر شود، تعداد دور سیم پیچ باید چند دور شود؟
- ۳- دو بوبین با ضریب خودالقایی  $100$  میلی هانری را یک بار به طور سری و بار دیگر به طور موازی به هم وصل می کنیم. ضریب خودالقایی کل در هر دو حالت چقدر می شود؟
- ۴- ضریب خودالقایی سیم پیچی  $20$  mH و جریان عبوری از آن  $10$  آمپر است. چه مقدار انرژی در سیم پیچ ذخیره می شود؟
- ۵- چهار سلف با ضریب های خودالقایی  $50$ ،  $25$ ،  $100$  و  $25$  میلی هانری را یک بار به طور سری و بار دیگر به طور موازی ببندید. ضریب خودالقایی کل را در هر حالت به دست آورید.
- ۶- از یک سلف با ضریب خودالقایی  $10$  mH جریان متناوبی با فرکانس  $50$  هرتز عبور می کند. مقاومت القایی سلف چند اهم است؟ اگر فرکانس به یک کیلو هرتز تغییر یابد، مقاومت القایی سلف چند اهم می شود؟
- ۷- در یک سلف با ضریب خودالقایی  $3$  میلی هانری، جریان در مدت دو ثانیه از یک آمپر به  $7$  آمپر افزایش می یابد ولتاژ خودالقایی در سلف چند میلی ولت است؟ اگر ضریب خودالقایی  $3$  هانری باشد، ولتاژ القایی چند میلی ولت می شود؟
- ۸- یک سلف با ضریب خودالقایی  $2$  هانری و مقاومت اهمی  $0.5$  اهمی در دست است. اگر این سلف را به ولتاژ  $1/5$  ولت مستقیم وصل کنید، ماکزیمم جریان مدار چند آمپر می شود؟ چه مدت زمانی طول می کشد تا جریان ماکزیمم شود؟
- ۹- توان الکتریکی یک سلف VAR  $10$  می باشد در صورتی که جریان سلف  $2A$  باشد مقاومت القایی سلف را به دست آورید.