واحد یادگیری ۹

الکترومغناطیس

مقدمه

در جهـان امـروز، بشـر بـه طـرز عجیبـی بـه الکتریسـیته وابسـته می‌باشـد و بـدون آن، زندگـی بشـر متمـدن تقریبـاً غیرممکـن اسـت. امـا بایـد خاطـر نشـان سـاخت کـه پدیـده مغناطیـس نیـز نقـش بسـیار عمـده‌ای در زندگـی بشـر ایفـا می‌کنـد. بـدون پدیـده مغناطیـس لـوازم الکتریکـی و الکترومکانیکـی ازقبیـل موتورهای‌الکتریکـی، ترانسـفورمرها و ژنراتورهـا دسـتگاه هـای اندازه‌گیـری آنالـوگ قـادر بـه‌کار نخواهنـد بـود. به‌طـور کلـی می‌تـوان گفـت بـا آنکـه بشـر بـه الکتریسـیته وابسـتگی شـدید پیـدا کـرده اسـت ولـی در بیشـتر مـوارد بـدون پدیـده مغناطیـس قـادر بـه اسـتفاده از الکتریسـیته نخواهـد بـود و بـدون پدیـده مغناطیـس زندگـی بشـر متمـدن غیرممکـن خواهـد بـود.

در سـال ۱۸۲۰میـلادی فیزیـک‌دان دانمارکـی بـه نـام اورسـتد[۱] بـرای اولیـن بـار متوجـه شـد کـه جریـان الکتریکـی می‌توانـد آثـار مغناطیسـی به‌وجـود آورد. ایـن کشـف مهـم دو علـم الکتریسـیته و مغناطیـس را بـه یکدیگـر مربـوط سـاخت. بـرای تشـریح رابطـه بیـن جریـان الکتریکـی و مغناطیـس نظریـه‌ای به‌وجـود آمـده اسـت کـه بـه آن نظریـه الکترومغناطیـس[۲] می‌گوینـد. تأثیـر میـدان مغناطیسـی اطـراف یـک هـادی حامـل جریـان بـر عقربـه قطب‌نمـا در شـکل (۲۷) نشـان داده شـده اسـت.

شکل ۲۷

مشـاهده می‌شـود عقربـه قطب‌نمـا، عمـود بـر هـادی جریـان قـرار می‌گیـرد. وقتـی جهـت جریـان الکتریکـی در هـادی تغییـر داده شـود عقربـه و جهـت آن نیـز تغییـر می‌کنـد.

یکـی از حوزه‌هایـی کـه انتظـار مـی‌رود فنـاوری نانـو اثـر فراوانـی بـر پیشـرفت آن داشـته باشـد، مغناطیس‌هـا و مـواد مغناطیسـی اسـت. بـا ورود فنـاوری نانـو بـه علـم و صنعـت مغناطیـس، بهبـود زیـادی در کیفیـت مغناطیس‌هـا ایجـاد شـده اسـت و مغناطیس‌هایـی بـا ابعـاد کوچـک و نیـروی مغناطیسـی بـزرگ سـاخته شـده‌اند.

۱- Oersted

۲-Electro Magnets

تحقیق کنید

فناوری نانو در برق در چه زمینه هایی نوآوری داشته است؟

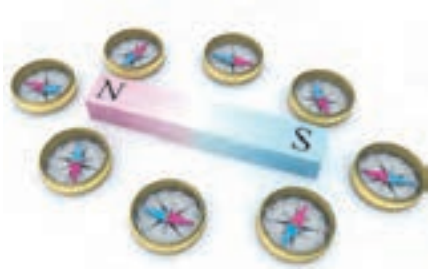
هانس کریستن اورستد

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

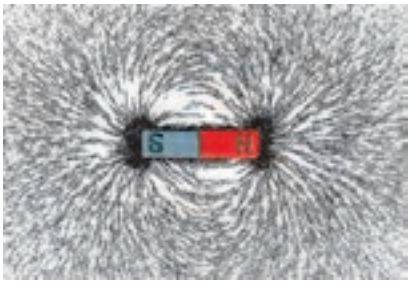
در فضای اطراف یک آهنربا یا مغناطیس طبیعی خاصیتی وجود دارد که ذرات آهن را به خود جذب می‌کند به این فضا «میدان مغناطیسی»[۱] می‌گویند.

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).



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[۲] (max) می گویند.

۱-Magnetic field

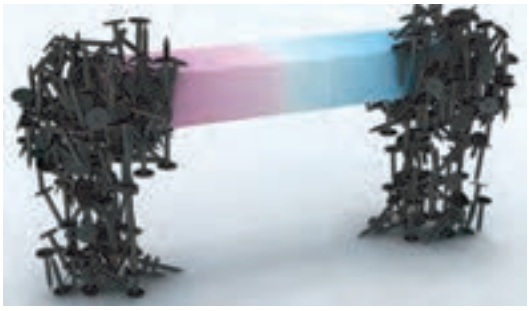
۲-Max Well

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.

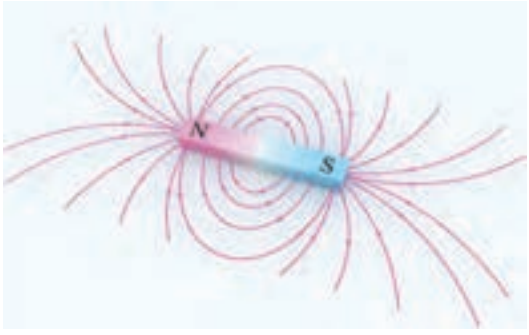
خطوط نیروی میدان مغناطیسی در دو نقطه معین از میدان مغناطیسی دارای فشردگی بیشتری نسبت به سایر نقاط است این نقاط را قطب‌های مغناطیسی[۱] می‌نامند و با حروف N و S آنها را نشان می‌دهند. اثر جذب در قطب‌های میدان مغناطیسی بسیار قوی‌تر از سایر نقاط میدان مغناطیسی است شکل (۳۰).



شکل ۳۰

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.



شکل۳۱ـ خطوط نیروی میدان مغناطیسی

۱-Magnetic poles

فوران مغناطیسی

به مجموع خطوط نیروی میدان مغناطیسی اطراف یک مغناطیسی یا آهنربا «فوران» یا «شار مغناطیسی[1]» می‌گویند و آن را با φ نشان می‌دهند[2].
واحد فوران مغناطیسی ولت.ثانیه ($v.sec$) است که اصطلاحاً به آن وِبر wb می‌گویند. یک وبر[3] برابر با 10^8 خط نیروی میدان مغناطیسی یا ماکسول است. پس:

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

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

$$1[web]=10^3[mwb]$$

ویلهم وبر

ویلهم وبر در سال ۱۷۹۵ میلادی در آلمان به دنیا آمد. وی فیزیکدان بود که شهرت‌اش به مطالعات در زمینه مغناطیس مربوط می‌شود. وبر 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؟

مثال ۱: فوران مغناطیسی یک آهنربا ۲/۵ میلی وبر است. فوران این آهن‌ربا چند ماکسول max است؟

حل:

ـ با استفاده از تناسب، واحد فوران به وبر تبدیل می‌شود.

ـ یک وبر برابر با 10^8 خط نیروی میدان مغناطیسی یا ماکسول max است.

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

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

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

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

۱-Magnetic Flux

۲- در برخی کتب آن را Flow می‌نامند.

۳-Weber

$$\frac{1\text{wb}}{2/5\times10^{-3}}=\frac{10^{8}\,\text{max}}{\varphi}$$

$$\varphi=\frac{2/5\times10^{-3}\times10^{8}}{1}$$

$$\varphi=2/5\times10^{-5}=250000\,[\text{max}]$$

یا به عبارتی در اطراف این آهنربا ۲۵۰۰۰۰ خط نیروی میدان مغناطیسی وجود دارد.

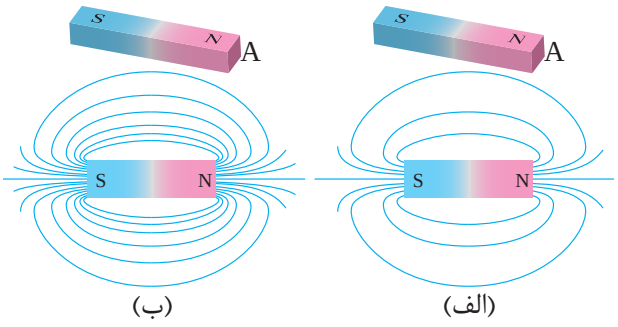
نیکولا تسلا

نیکولا تسلا در سال ۱۸۵۶ در امپراتوری اتریش ـ 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 زندگی‌اش 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 می‌باشد.

چگالی فوران مغناطیسی

دو آهنربا با ابعاد مشابه و فوران‌های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ماکسول که سطح مقطع قطب آنها با A مشخص می‌باشد در شکل نشان داده شده است. میدان مغناطیسی آهنربای شکل ۳۲ـالف در سطح مقطع قطب خود ۱۰۰۰ و میدان مغناطیسی آهنربای شکل۳۲ـ ب در سطح مقطع خود ۲۰۰۰ خط نیرو جای 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



(ب) (الف)

شکل ۳۲

عبارتی فوران مغناطیسی در سطح مقطع قطب A آهنربای شکل ۳۲ـ ب نسبت به شکل ۳۲ـ 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»[۱] 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 به‌دست می‌آید.

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

در این رابطه:

φ فوران مغناطیسی بر حسب وبر wb

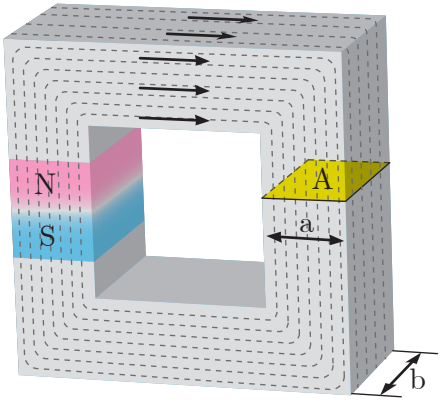
A مساحت مقطعی که فوران مغناطیسی φ از آن می‌گذرد بر حسب مترمربع m^2

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[۲] [T] می‌گویند و واحد کوچک‌تر آن ماکسول بر سانتی‌مترمربع $\left[\frac{max}{cm^2}\right]$ است که اصطلاحاً به آن گاوس[۳] [G] گفته می‌شود. پس:

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

مثال ۲: آهنربایی با فوران مغناطیسی ۰/۰۲ mwb مطابق شکل ۳۳ در نظر است. چگالی فوران مغناطیسی در سطح مقطع A هسته چند گاوس می‌باشد؟ در صورتی‌که a=۱۰ mm و b=۲۰ mm باشد.



شکل ۳۳

حل:

ـ سطح مقطع A برابر است با:

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

ـ واحد سطح مقطع به متر مربع تبدیل می‌شود:

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

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

۱- Magnetic flux Density ۲- Tesla ۳- Gauss

ـ واحد فوران مغناطیسی به وبر تبدیل می‌شود:

$$\frac{1\text{wb}}{\varphi}=\frac{10^{3}\text{mwb}}{0/02\text{mwb}}$$

$$\varphi=\frac{0/02\times1}{10^{3}}=0/02\times10^{-3}=2\times10^{-5}[\text{wb}]$$

ـ از رابطه زیر چگالی فوران مغناطیسی به‌دست می‌آید:

$$B=\frac{\varphi}{A}=\frac{2\times10^{-5}}{2\times10^{-4}}=0/1\left[\frac{\text{wb}}{\text{m}^{2}}\right]=0/1[\text{T}]$$

ـ واحد چگالی فوران مغناطیسی به گاوس تبدیل می‌شود:

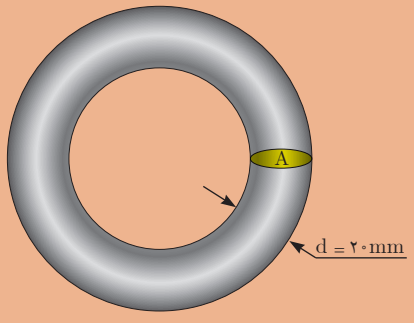
$$\frac{1\text{T}}{0/1\text{T}}=\frac{10^{4}\text{G}}{B}$$

$$B=\frac{0/1\times10^{4}}{1}=0/1\times10^{4}=1000[\text{G}]$$

تمرین

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

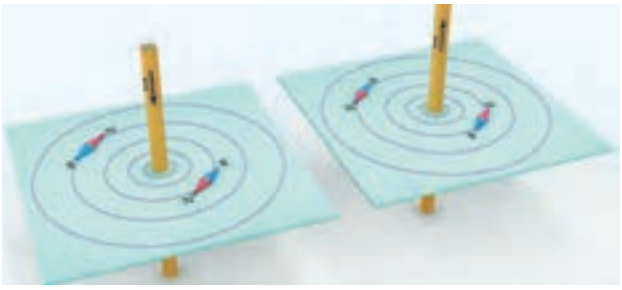
۲ـ آهنربایی با چگالی فوران مغناطیسی ۱۰۰۰۰ G مطابق شکل (۳۴) در نظر است. فوران مغناطیسی در سطح مقطع A هسته چند میلی وبر است.



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 شکل۳۵ مشاهده کرد عبور جریان الکتریکی باعث انحراف عقربه مغناطیسی می‌شود. و با تغییر جهت جریان الکتریکی در هادی جهت عقربه‌های مغناطیسی تغییر می‌کند.



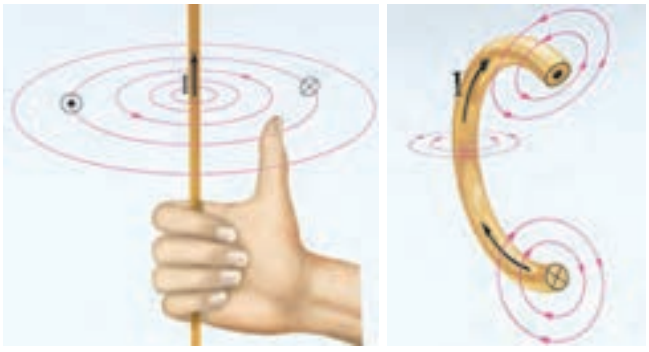
شکل ۳۵

جهت میدان الکترومغناطیسی به جهت جریان الکتریکی بستگی دارد.

جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی

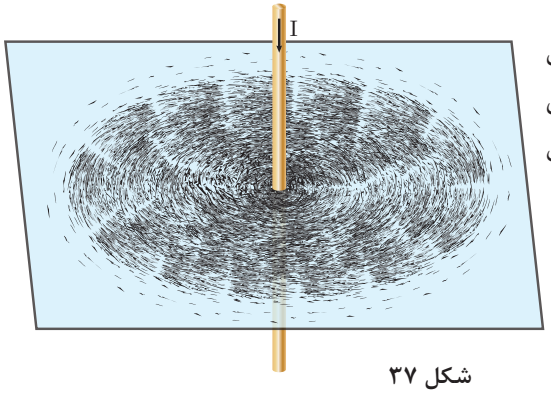
برای تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی علاوه بر استفاده از عقربه مغناطیسی مطابق شکل ۳۶ می‌توان از قانون شست[۱] نیز استفاده کرد. برای این منظور مطابق شکل ۳۶ باید شست دست راست را در جهت جریان الکتریکی هادی قرار داد تا بقیه انگشتان به‌صورت بسته جهت میدان الکترومغناطیسی را نشان دهند.

مشاهده می‌کنید مانند جهت جریان می‌توان جهت میدان مغناطیسی را نیز به کمک نقطه (•) و ضربدر(×) مشخص کرد.



شکل ۳۶

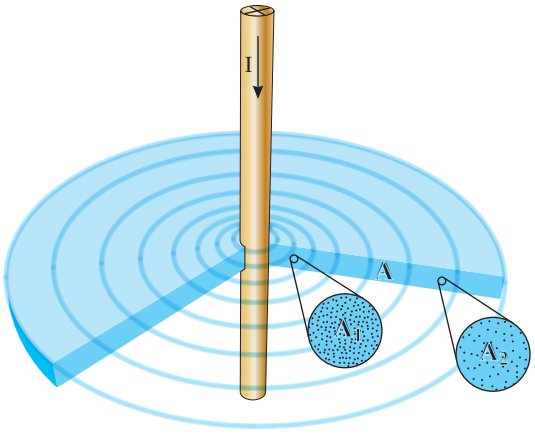
چگالی فوران مغناطیسی اطراف یک هادی حامل جریان الکتریکی



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)

۱-Thumb Rule



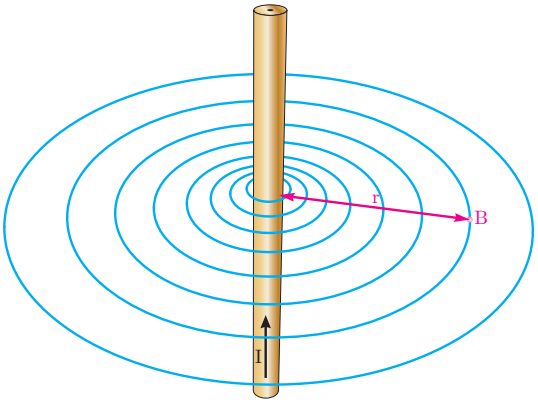
شکل ۳۸

وی مشاهده کرد براده‌های آهن در مسیرهای 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

آمپرو 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 2×10^{-7} برحسب $\left[\frac{wb}{A.m}\right]$ است.

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

مثـال ۳ : چگالـی فـوران میـدان مغناطیسـی در نقطـه‌ای بـه فاصلـه ۱ cm از هـادی حامـل جریـان ۱۰A چند گاوس اسـت؟

حل:

ـ واحد فاصله بر حسب متر تبدیل می‌شود.

$$\frac{1m}{r}=\frac{100cm}{1cm}$$
$$r=\frac{1\times1}{100}=0/01m$$

ـ چگالی میدان مغناطیسی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$B=k\frac{I}{r}$$
$$B=2\times10^{-7}\times\frac{10}{0/01}=2\times10^{-4}\left[\frac{wb}{m^2}\right]$$

یا

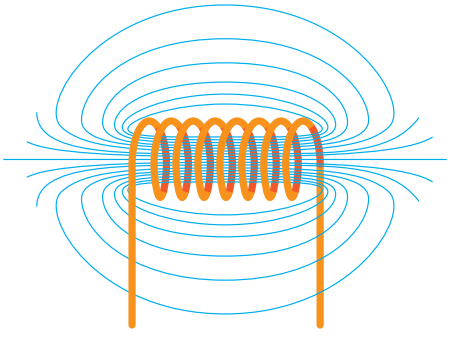
$$2\times10^{-4}[T]$$

ـ واحد چگالی فوران مغناطیسی به گاوس تبدیل می‌شود:

$$\frac{1T}{2\times10^{-4}T}=\frac{10^4G}{B}$$
$$B=\frac{2\times10^{-4}\times10^4}{1}=2[G]$$

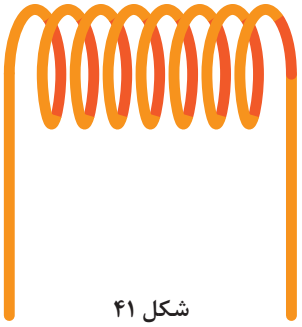
میدان مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی

میـدان الکترومغناطیسـی هـادی حامـل جریـان الکتریکـی در سرتاسـر دو طـرف هـادی توزیـع می‌شـود و متمرکـز نیسـت و مقـدار چگالـی فـوران مغناطیسـی B در هـر نقطـه از اطـراف هـادی متغیـر و کـم اسـت. اگـر هـادی حامـل جریـان الکتریکـی بـه صـورت سـیم‌پیچ در آورده شـود ضمـن اینکـه میـدان الکتـرو مغناطیسـی در درون سـیم‌پیچ متمرکـز می‌شـود، چگالـی فـوران مغناطیسـی B نیـز افزایـش می‌یابـد شـکل (۴۰).



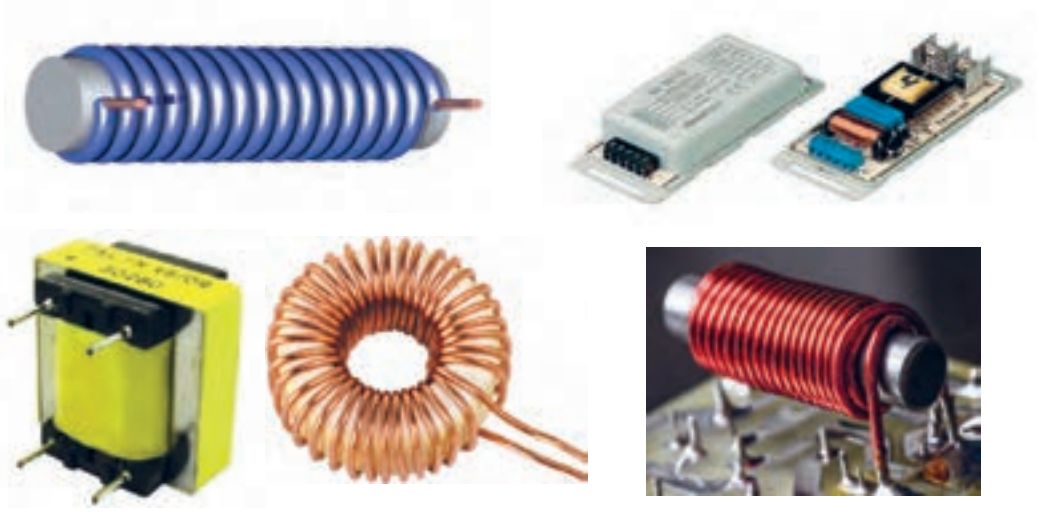
شکل ۴۰

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



شکل ۴۱

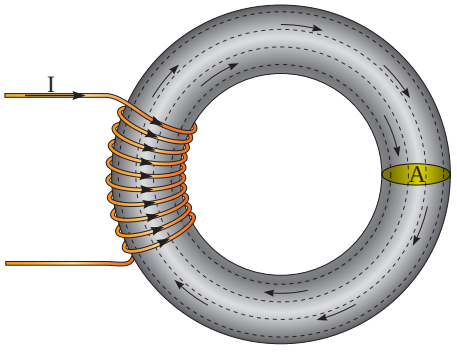
سیم پیچ را بوبین نیز می‌گویند. انواع سیم‌پیچ در شکل ۴۲ نشان داده شده است.



شکل ۴۲

با قرار دادن سیم‌پیچ بر روی یک هسته از جنس مواد فرومغناطیس[۱] 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.

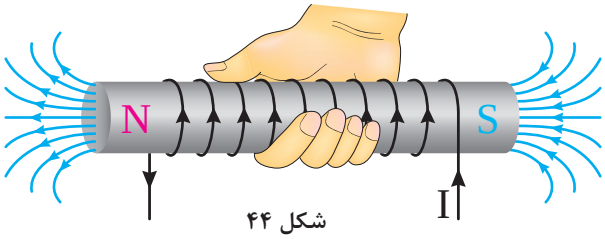


شکل ۴۳

۱- Ferro magnetic

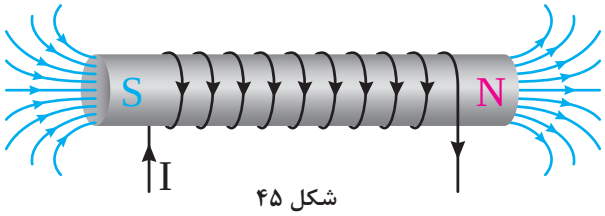
جهت میدان الکترومغناطیس سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی

جهت میدان الکترومغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی از قاعده دست راست[1] 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

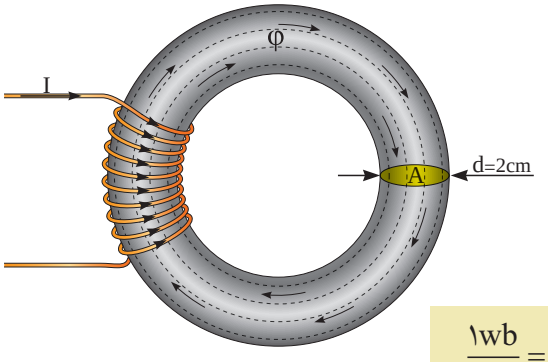
جهت میدان مغناطیسی سیم‌پیچ نیز تابع جهت جریان سیم‌پیچ است و با تغییر جهت جریان جهت میدان مغناطیسی تغییر می‌کند شکل (۴۵) .



شکل ۴۵

مثال ۴: سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی شکل۴۶ میدان الکترومغناطیسی با فوران ۳/۱۴ mwb در هسته تولید می‌کند. چگالی فوران مغناطیسی در هسته چند تسلا است؟

حل:



شکل ۴۶

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

$$\frac{1wb}{\varphi} = \frac{10^{3}mwb}{3/14} \Rightarrow \varphi = \frac{3/14}{10^{3}} = 3/14\times10^{-3}\,[wb]$$

[1]-Right-hand rule

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

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

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

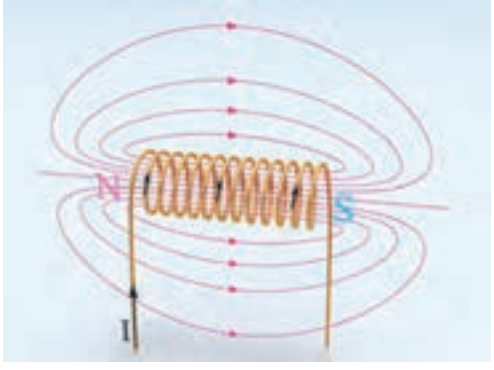
$$B = \frac{\varphi}{A}$$

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

ضریب نفوذ مغناطیسی

ضریب نفوذ مغناطیسی μ معیاری است که میزان گذردهی هسته را در مقابل خطوط نیروی مغناطیسی نشان می‌دهد.

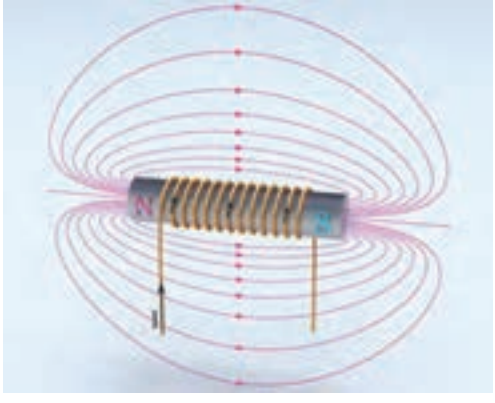
میدان مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان I با هسته هوا در شکل ۴۷ نشان داده شده است.



شکل ۴۷

اگر درون این سیم‌پیچ هسته فرومغناطیس قرار داده شود چگالی فوران مغناطیسی B در هسته به شدت افزایش می‌یابد شکل (۴۸).

از مقایسه شکل‌های۴۷و ۴۸ می‌توان نتیجه گرفت. هسته فرومغناطیس نسبت به هسته هوا ضریب نفوذ مغناطیسی μ بزرگ‌تری دارد و چگالی فوران مغناطیسی بزرگ‌تری به‌دست می‌آید.



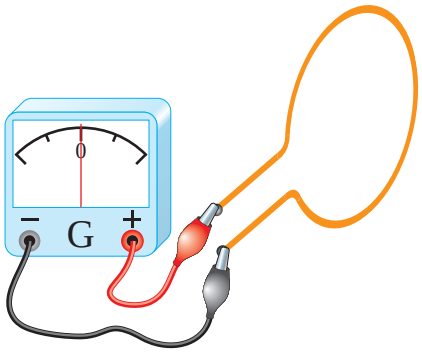
شکل ۴۸

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 الکترومغناطیس فاراده در تحلیل طرز کار وسایل تبدیل انرژی الکترومکانیکی اعم از موتور یا ژنراتور کاربرد فراوان دارد.

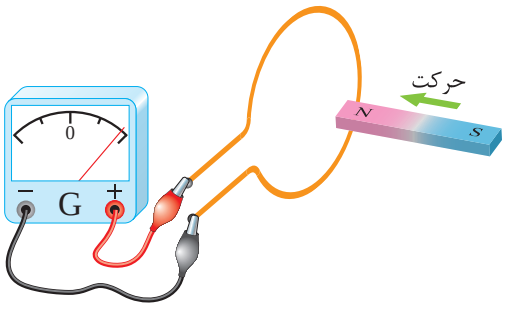
قانون القای الکترومغناطیسی فاراده و روابط حاکم بر آن را می‌توان با انجام چند آزمایش به‌دست آورد.

آزمایش ۱ ـ مداری متشکل از یک حلقه هادی که دو سر آن به یک گالوانومتر[1] متصل است در شکل ۴۹ نشان داده شده است.



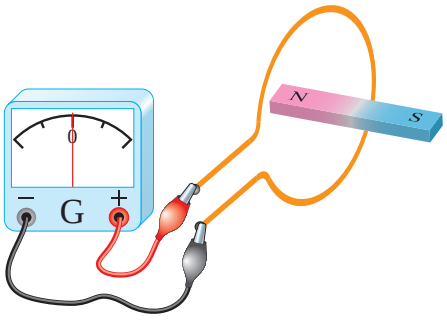
شکل ۴۹

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 ۵۰

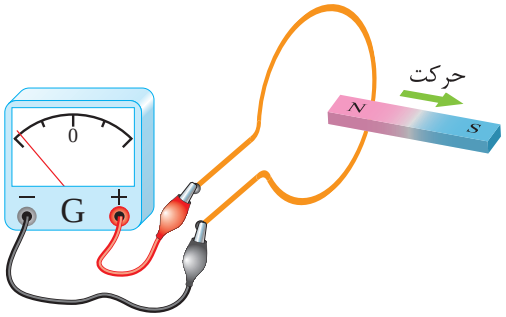
در صورتی‌که آهنربای دائم نسبت به حلقه، مطابق شکل ۵۱ حرکتی نداشته باشد، عقربه گالوانومتر منحرف نخواهد شد.



شکل ۵۱

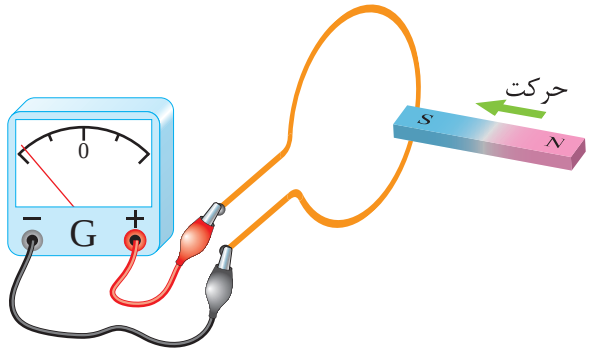
۱- گالوانومتر یک آمپرمتر بسیار دقیق است که می‌تواند جریان‌های خیلی کم را اندازه بگیرد.

وقتی‌که آهنربای دائم از حلقه، مطابق شکل۵۲ دور شود، عقربه گالوانومتر در جهت عکس حالت قبل منحرف می‌شود. یعنی جهت جریان در حلقه تغییر کرده است.



شکل۵۲

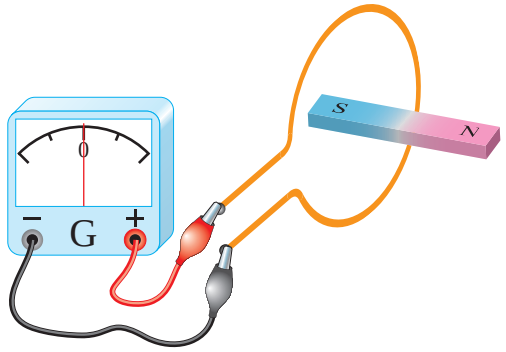
در ادامه آزمایش اگر قطب S آهنربای دائم مطابق شکل ۵۳ داخل حلقه شود، عقربه گالوانومتر بر خلاف حالتی که قطب N وارد حلقه شد منحرف می‌گردد.



شکل ۵۳

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

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



شکل ۵۴

در آزمایش ۱ جریانی که در حلقه برقرار می‌شود را «جریان القایی[۱]» 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[۲]» می‌نامند. نیروی محرکه القایی را به اختصار با EMF نشان می‌دهند.

۱-Induced Current

۲-Electro Motive Force

فـاراده بـا آزمایش‌هایـی نظیـر ایـن آزمایـش، توانسـت قانونـی به‌دسـت آورد کـه بـه «قانـون القـای الکترومغناطیسـی فـاراده» مشـهور شـد. وی بـر اسـاس ایـن آزمایش‌هـا متوجـه شـد کـه تغییـر فـوران مغناطیسـی عامـل ایجـاد نیـروی محرکـه القایـی اسـت؛ لـذا قانـون القـای الکترومغناطیـس فـاراده را چنیـن تعریـف کـرد:

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

فـاراده بـه کمـک ایـن قانـون بـرای محاسـبه مقـدار نیـروی محرکـه القایـی رابطـه ریاضـی زیـر را ارائـه کـرد. ایـن رابطـه بیـان ریاضـی قانـون القـای الکترومغناطیسـی فـاراده اسـت.

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

در این رابطه:

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

Δt مدت زمان وقوع تغییرات فوران مغناطیسی بر حسب ثانیه (s)

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

نیـروی محرکـه القایـی e در عمـل بسـیار حائـز اهمیـت اسـت. چراغ‌هـای اتاقـی کـه در آن، ایـن کتـاب را می‌خوانیـد بـا اسـتفاده از نیـروی محرکـهٔ القایـی حاصـل از یـک ژنراتـور روشـن می‌شـوند.

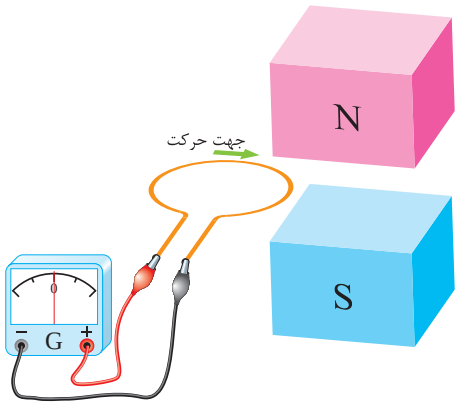
اگـر به‌جـای اسـتفاده از یـک حلقـه سـیم، از سـیم‌پیچی بـا N حلقـه، آزمایـش فـاراده تکـرار شـود، در هـر حلقـه سـیم‌پیچ نیـروی محرکـه القایـی ایجـاد می‌شـود و ایـن نیروهـای محرکـه بـا یکدیگـر جمـع می‌شـوند تـا نیـروی محرکـه القایـی سـیم‌پیچ به‌دسـت آیـد؛ لـذا مقـدار نیـروی محرکـه القایـی در سـیم‌پیچ از رابطـه زیـر تعییـن می‌شـود.

$$e = \mathrm{N}\frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$$

نیـروی محرکـه القایـی e جریـان القایـی در سـیم‌پیچ جـاری می‌کنـد کـه از رابطـه زیـر به‌دسـت می‌آیـد:

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

آزمایش ۲ـ 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.

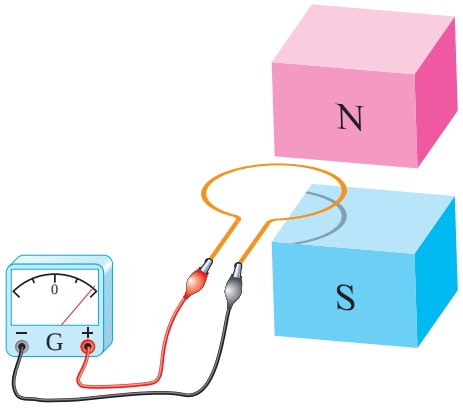


شکل ۵۵

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.

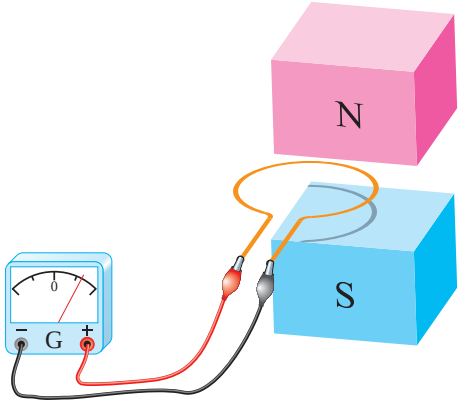
لحظه ورود حلقه به درون میدان مغناطیسی را شکل ۵۶ نشان می‌دهد.

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



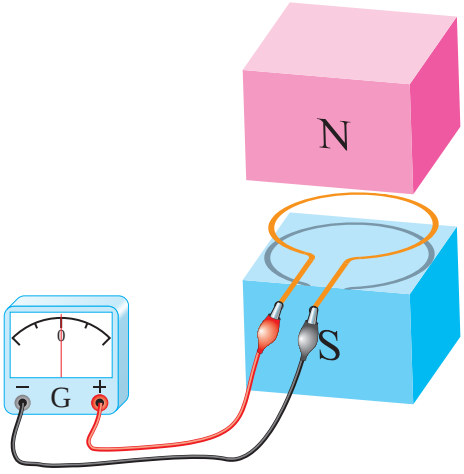
شکل ۵۶

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



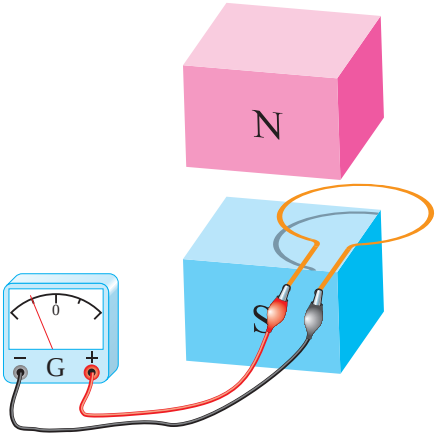
شکل ۵۷

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 به‌صورت 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 می دهد.



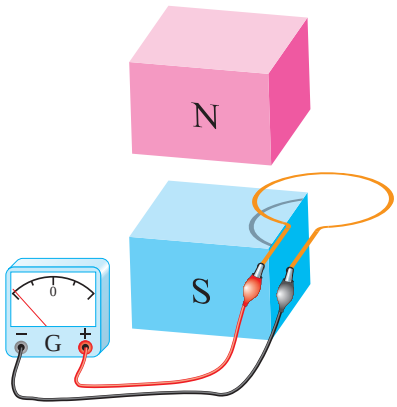
شکل ۵۸

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.



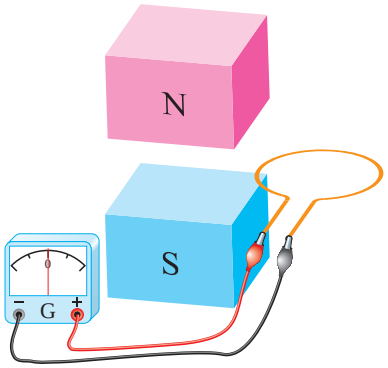
شکل ۵۹

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 ۶۰

خـروج کامـل حلقـه از میـدان مغناطیسـی در شـکل ۶۱ نشـان داده شـده اسـت. در ایـن لحظـه فورانـی از سـطح حلقـه نمی‌گـذرد و تغییـرات فـوران آن بـه صفـر رسـیده اسـت لـذا در آن نیـروی محرکـه القـا نمی‌شـود و گالوانومتـر صفـر را نشـان می‌دهـد.



شکل ۶۱

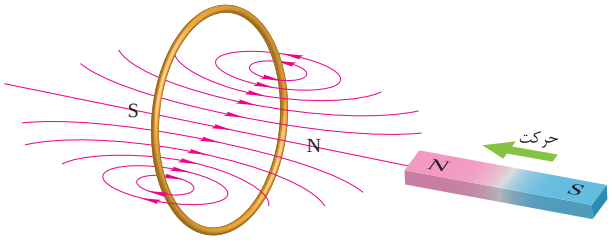
قانون لنز

در پدیـده القـای الکترومغناطیسـی پلاریتـه نیـروی محرکـه القایـی و جهـت جریـان القایی مشـخص نشـد. پلاریتـه نیـروی محرکـه القایـی و جهـت جریـان القایـی بـا اسـتفاده از «اصـل بقـای انـرژی» تعییـن خواهـد شـد. در ایـن مبحـث اصـل بـقای انـرژی به‌صـورت «قانـون لنـز» بیـان می‌شـود کـه توسـط آقـای لنـز در سـال ۱۸۳۴ میـلادی ارائـه گردیـد. طبـق ایـن قانـون:

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

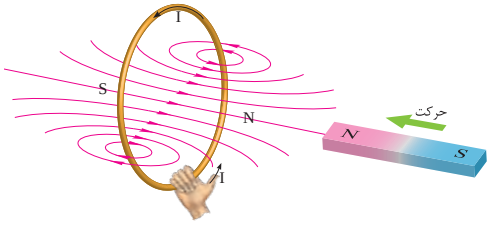
قانـون لنـز در مـورد جریان‌هـای القایـی بـه کار مـی‌رود. از آنجایـی کـه جریـان در مـدار بسـته جـاری می‌شـود، لـذا قانـون لنـز در مدارهـای بسـته کاربـرد پیـدا می‌کنـد.

در شـکل ۶۲ مقطـع یـک حلقـه هـادی و یـک آهنربـا نشـان داده شـده اسـت. هنگامی‌کـه قطـب N آهنربـا بـه طـرف حلقـه «حرکـت» داده می‌شـود، مطابـق آزمایـش ۱ فـاراده، جریـان القایـی در حلقـه جـاری می‌شـود. ایـن جریـان، میـدان مغناطیسـی در اطـراف حلقـه تولیـد خواهـد نمـود. طبـق قانـون لنـز جهـت جریـان القایـی بـه گونـه‌ای اسـت کـه بـا عامـل به‌وجودآورنـده‌اش مخالفـت می‌کنـد؛ بدیـن معنـی کـه میـدان مغناطیسـی ناشـی از جریـان القایـی بـا حرکـت آهنربـا بـه سـمت حلقـه مخالفـت خواهـد کـرد. یعنـی قطـب N میـدان حلقـه مقابـل قطـب N آهنربـا قـرار می‌گیـرد تـا بـا ایجـاد نیـروی دافعـه مانـع حرکـت آهنربـا بـه سـمت حلقـه شـود.



شکل ۶۲

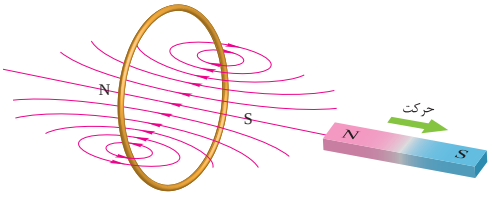
با مشخص شدن محل قطب‌های N و S اطراف حلقه جهت میدان مغناطیسی آن تعیین می‌شود. اکنون بنا به قانون شست مطابق شکل ۶۳ جهت جریان القایی تعیین می‌شود.



شکل ۶۳

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.

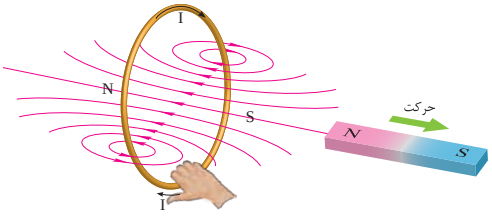
اگر آهنربا مطابق شکل ۶۴ به عقب حرکت داده شود، مطابق آزمایش ۱ فاراده نیز در این حالت جریان القایی در حلقه جاری می‌شود و طبق قانون لنز، میدان مغناطیسی ناشی از این جریان القایی نیز با عامل به‌وجودآورنده‌اش که همان «حرکت رو به عقب» آهنربا است مخالفت خواهد کرد؛ یعنی میدان حلقه، قطب S خود را در مقابل قطب N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



شکل ۶۴

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 به‌گونه‌ای است که با «حرکت» آهنربا مخالفت می‌کند.



شکل ۶۵

«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 انجام‌شده برای حرکت آهنربا به چه انرژی‌ای تبدیل می‌شود؟

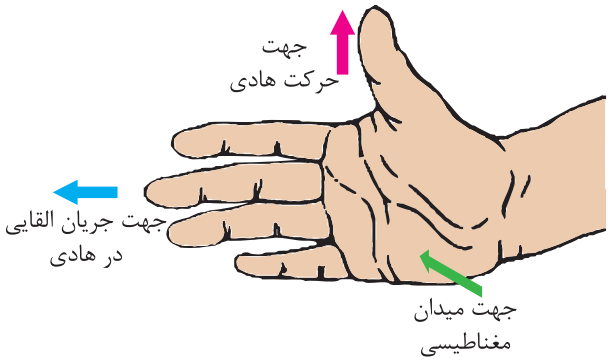
جهت میدان القایی به گونه‌ای است که همواره با عامل به‌وجودآورنده‌اش، «حرکت آهنربا» مخالفت می‌کند. این مخالفت در رابطه قانون القای الکترومغناطیسی فاراده با یک علامت منفی به‌صورت رابطه زیر نشان داده می‌شود.

$$e = -\mathrm{N}\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

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

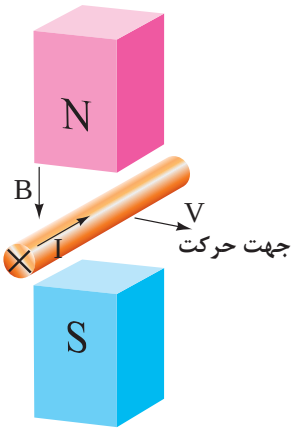
قانون دست راست

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.

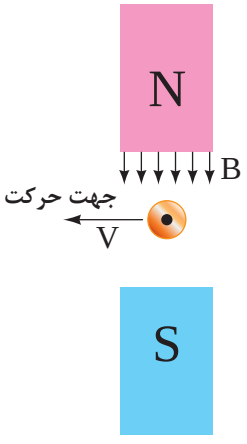


شکل ۶۶ - قانون دست راست

جهت جریان القایی یک هادی متحرک در میدان مغناطیسی توسط قانون دست راست در شکل‌های ۶۷ و۶۸ تعیین شده است.



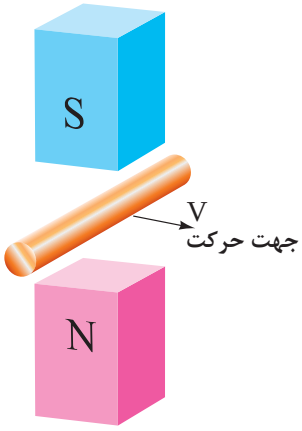
شکل ۶۷



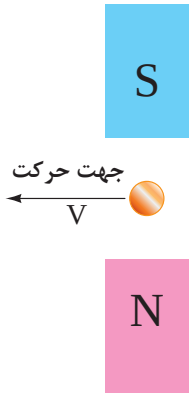
شکل ۶۸

فعالیت ۱ ـ ۹

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



شکل ۶۹



شکل ۷۰

۲ ـ از جواب‌های به‌دست آمده در شکل‌های ۶۷ الی ۷۰ چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

پرسش

پرسش‌های کامل کردنی

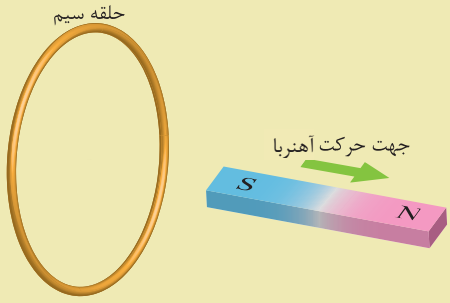
۱ ـ طرز کار وسایل الکتریکی که ..... در آنها نقش دارد به کمک قانون القای الکترومغناطیس فاراده قابل فهم است.

۲ ـ طبق قانون لنز ..... به گونه‌ای است که با عامل به‌وجودآورنده‌اش ..... می‌کند.

۳ ـ برای تعیین جهت جریان القایی از روش ..... استفاده می‌شود.

پرسش‌های تشریحی

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

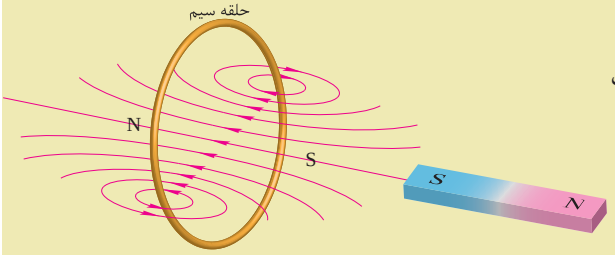


شکل ۷۱

۲ ـ برگشت‌پذیری فرایند تبدیل انرژی در ماشین‌های الکتریکی یعنی چه؟

۳ ـ قانون لنز را تعریف کنید.

۴ ـ با توجه به شکل ۷۲ جهت حرکت آهنربا را مشخص کنید.

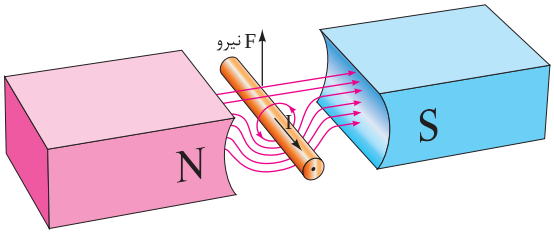


شکل ۷۲

۵ ـ 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

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 به‌سمت میدان ضعیف‌تر وارد می‌شود و هادی را به‌سمت بالا حرکت می‌دهد.

فعالیت ۲ ـ 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»، به‌طوری‌که «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 میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را شرح و تفصیل داده است، «نیروی لورنس» می‌گویند.

مقدار نیروی مغناطیسی از رابطه زیر به‌دست 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]

مثال۵: هادی به طول مؤثر ۲۰[cm] در میدان مغناطیسی با چگالی فوران $۰/۸\left[\frac{wb}{m^2}\right]$ به طور عمود بر خطوط میدان مغناطیسی قرار دارد. اگر از این هادی جریان [A] ۱۰ عبور کند، نیروی مغناطیسی وارد بر این هادی چند نیوتن است؟

حل:

از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

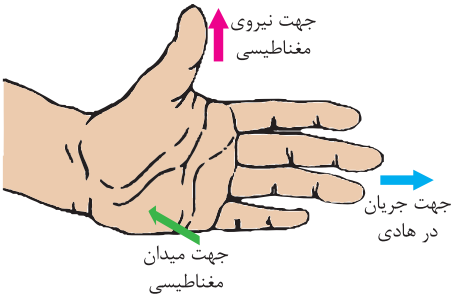
$$F = BIL$$

$$F = ۰/۸ \times ۱۰ \times ۲۰ \times ۱۰^{-۲} = ۱/۶$$

قانون دست چپ

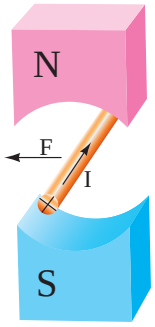
برای تعیین جهت نیروی مغناطیسی، «قانون دست چپ» ارائه شده است. طبق این قانون اگر دست چپ خود را مطابق شکل ۷۴ به گونه‌ای نگه دارید که فوران مغناطیسی از قطب N به

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

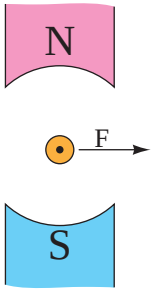


شکل ۷۴

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



شکل ۷۵

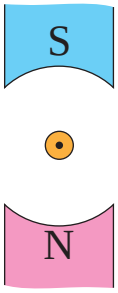


شکل ۷۶

فعالیت ۳ ـ ۹

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

شکل ۷۷



شکل ۷۸

۲ ـ با مقایسه جهت نیروی مغناطیسی شکل‌های زیر، چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید:

الف) شکل ۷۵ با شکل ۷۶:

.....

.....

.....

ب) شکل ۷۵ با شکل ۷۷:

.....

.....

.....

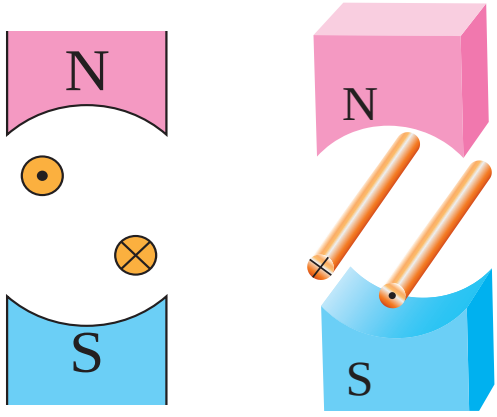
پ) شکل ۷۵ با شکل ۷۸:

.....

.....

.....

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

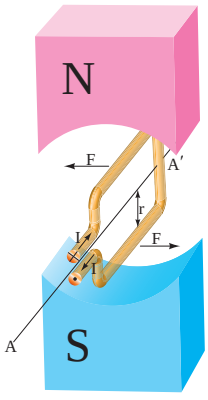


شکل ۷۹

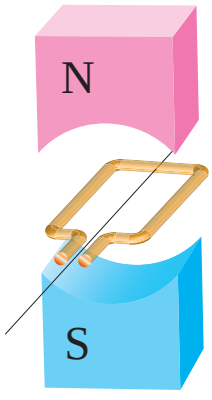
شکل ۸۰

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[۱]» ایجاد می‌کنند و آن را حول محور می‌گردانند، لذا حلقه جابه‌جا می‌شود. شکل (۸۲)



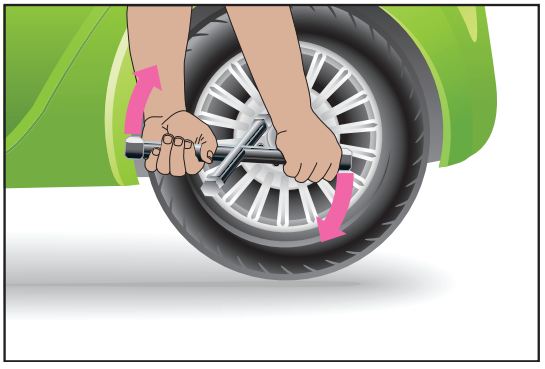
شکل ۸۱



شکل ۸۲

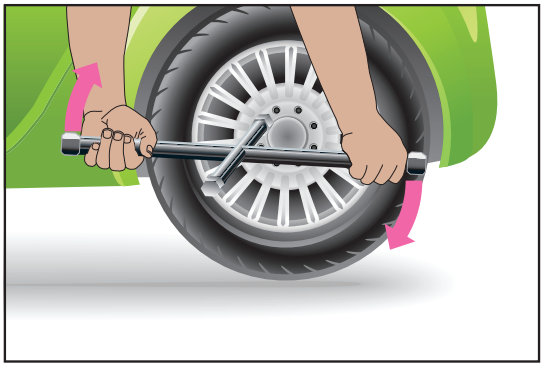
۱- Torque

گشـتاور عامـل گـردش اسـت. به‌طـور مثـال هنگامی‌کـه مکانیـک بـرای بازکـردن پیچ‌هـای چـرخ اتومبیـل از «آچارچـرخ» اسـتفاده می‌کنـد، وی بـا دسـتان خـود، دو نیـرو در جهـت مخالـف بـه آچارچـرخ اعمـال می‌کنـد. ایـن نیروهـا حـول محـور آچارچـرخ گشـتاور ایجـاد می‌کننـد تـا آن بگـردد. شـکل (۸۳)



شکل ۸۳

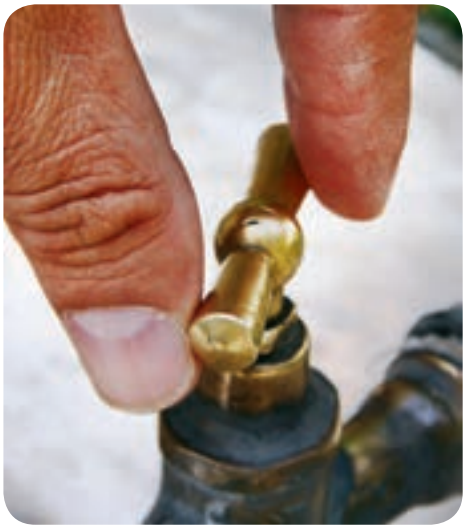
در صورتی‌کـه مکانیـک نتوانـد ایـن آچارچـرخ را بگردانـد، آچـاری کـه طـول بازوهـای آن بلندتـر اسـت را بـه‌کار می‌بـرد تـا گشـتاور آچـار افزایـش یابـد و بگـردد. شـکل (۸۴)



شکل ۸۴

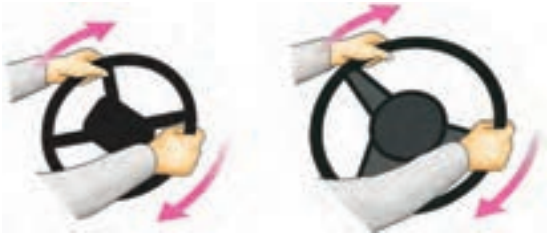
فعالیت ۴ ـ ۹

۱ ـ چگونگی گشتاور در شکل ۸۵ را بررسی کنید.



شکل ۸۵

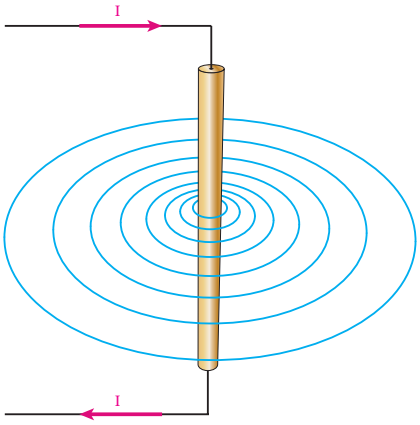
۲ ـ دو فرمـان اتومبیـل در شـکل ۸۶ نشـان داده شـده اسـت. گردانـدن کدام‌یـک راحـت اسـت؟ بـرای پاسـخ خـود دلیـل بیاوریـد.



شکل ۸۶

خودالقایی

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 به‌وجود آورنده‌اش، تغییرات جریان مخالفت می‌نماید. پدیده خودالقایی در سیم‌پیچ‌ها نیز همانند پدیده خودالقایی توضیح داده می‌شود. نیروی محرکه خودالقایی متناسب با تغییرات جریان نسبت به زمان است و به رابطه زیر بیان می‌شود.

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

برای تبدیل تناسب به تساوی در رابطه زیر از ضریبی به‌نام «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 سیم‌پیچ با ضریب خودالقایی ۰/۵ هانری در مدت ۰/۲ ثانیه از صفر به ۲ آمپر می‌رسد. نیروی محرکه خودالقایی چند ولت است؟

حل:

تغییرات جریان برابر است با :

$$\Delta i = ۲ - ۰ = ۲[A]$$

تغییرات زمان برابر است با :

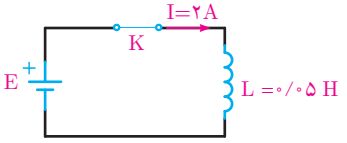
$$\Delta t = ۰/۲(s)$$

از رابطه زیر نیروی محرکه خودالقایی به‌دست می‌آید.

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

$$e = ۰/۱ \times \frac{۲}{۰/۲} = ۱[v]$$

مثال ۷: در مدار شکل زیر در صورت بازشدن کلید مقدار نیروی محرکه خودالقایی سیم‌پیچ در مدت ۰/۵ ثانیه چند ولت است؟



شکل ۸۸

حل : تغییرات جریان برابر است با :

$$\Delta i = ۰ - ۲ = -۲[A]$$

تغییرات زمان برابر است با:

$$\Delta t = ۰/۵[s]$$

از رابطه فوق نیروی محرکه خودالقایی به‌دست می‌آید:

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

$$e = ۰/۵ \times \frac{-۲}{۰/۵} = -۲[v]$$

برای محاسبه ضریب خودالقایی سیم‌پیچ از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$L = \frac{\mu N^۲ A}{\ell}$$

که در این رابطه:

L ضریب خودالقایی سیم‌پیچ [H]

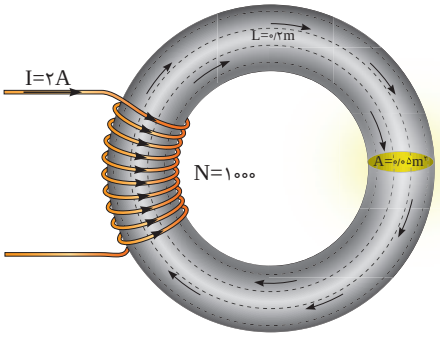
μ ضریب نفوذ مغناطیسی $\left[\frac{Wb}{A.m}\right]$

N تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ

A سطح مقطع هسته سیم‌پیچ $[m^۲]$

ℓ طول متوسط هسته [m] است.

مثال ۸ : ضریب خودالقایی سیم‌پیچ شکل ۸۹ را به‌دست آورید. $(\mu = ۲\times ۱۰^{-۵}\ \frac{Wb}{A.m})$



شکل ۸۹

حل:

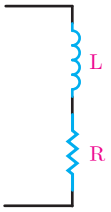
از رابطه فوق داریم.

$$L = \frac{\mu N^۲ A}{\ell}$$

$$L = \frac{۲\times ۱۰^{-۵} \times ۱۰۰۰^۲ \times ۰/۰۰۵}{۰/۲} = ۱H$$

مدار الکتریکی معادل سیم پیچ

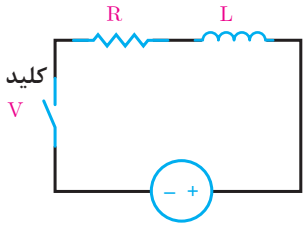
سیم‌پیچ علاوه بر ضریب خودالقایی L، مقاومت الکتریکی اهمی R نیز دارد. مقاومت الکتریکی اهمی ناشی از طول و سطح مقطع هادی سیم‌پیچ است و ضریب خودالقایی ناشی از نیروی محرکه خودالقایی می‌باشد که در اثر تغییرات جریان به‌وجود می‌آید. برای سیم‌پیچ مدار الکتریکی شامل اتصال سری مقاومت الکتریکی اهمی R و ضریب خودالقایی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



شکل ۹۰

سیم‌پیچ در جریان مستقیم

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.



شکل ۹۱

مدار الکتریکی معادل یک سیم‌پیچ که توسط منبع جریان مستقیم تغذیه می شود 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 به طور 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 سیم پیچ به ۶۳/۲ 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 :

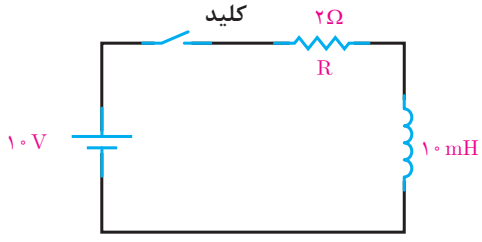
τ ثابت زمانی [s]

L ضریب خودالقایی [H]

R مقاومت الکتریکی [Ω] است.

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

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



شکل ۹۲

حل:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{۱۰}{۲} = ۵[ms]$$

$$t = ۵\tau = ۵ \times ۵ = ۲۵[ms]$$

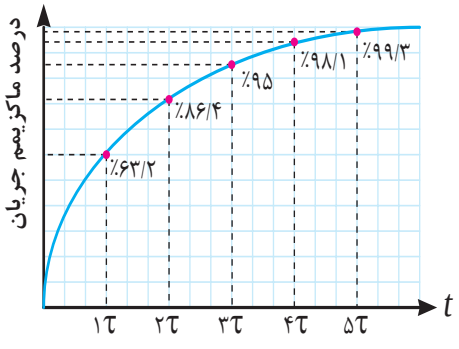
مثـال ۱۰: در مثـال ۹ اگـر بوبینـی بـا اندوکتانس ۲۰mH بـه جـای بوبیـن ۱۰ mH قـرار گیـرد، ثابـت زمانـی چگونـه تغییـر می‌کنـد؟

حل:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{۲۰}{۲} = ۱۰[ms]$$

مشاهده می‌شود ثابت زمانی دو برابر می‌شود.

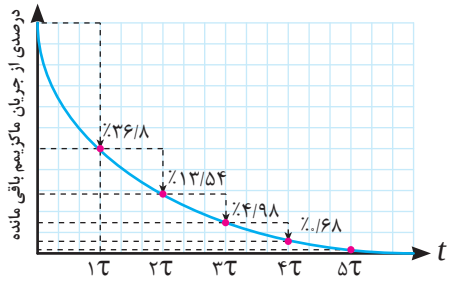
بـا بسـته شـدن کلیـد در ثابـت زمانـی اول جریانـی بـه انـدازه ۶۳/۲ درصـد کل جریـان نهایـی از سـیم‌پیچ می‌گـذرد. در ثابـت زمانـی دوم، جریـان بـه ۸۶/۴ درصـد می‌رسـد. در ثابت‌هـای زمانـی سـوم، چهـارم و پنجـم نیـز بـه همیـن ترتیـب، به‌طـوری کـه در ثابـت زمانـی پنجـم تقریبـاً بـه مقـدار نهایـی خـود می‌رسـد. منحنـی شـکل ۹۳ رونـد تغییـرات جریـان تـا رسـیدن بـه مقـدار نهایـی خـود بـه هنـگام بسـتن کلیـد مـدار شـکل ۹۱ را در هـر ثابـت زمانـی نشـان می‌دهـد.



شکل ۹۳

رفتـار سـیم‌پیچ در ایـن ۵ ثابـت زمانـی را «حالـت گـذرا» و هنگامی‌کـه جریـان پـس از پنـج ثابـت زمانـی بـه مقـدار نهایـی خـود می‌رسـد را «حالـت پایـدار» سـیم‌پیچ گوینـد.

بـا بـاز شـدن کلیـد مـدار شـکل ۹۱ تغییـرات جریـان تـا رسـیدن بـه مقـدار نهایـی خـود در هـر ثابـت زمانـی در شـکل ۹۴ نشـان داده شـده اسـت. در ثابـت زمانـی اول جریـان بـه انـدازهٔ ۶۳/۲ درصـد از مقـدار ماکزیمـم کاهـش پیـدا می‌کنـد و بـه ۳۶/۸ درصـد می‌رسـد. در ثابـت زمانـی دوم بـه ۱۳/۶ درصـد می‌رسـد. در ثابت‌هـای زمانـی سـوم، چهـارم و پنجـم کاهـش جریـان بـه همیـن منـوال ادامـه پیـدا می‌کنـد و در ثابـت زمانـی پنجـم تقریبـاً بـه صفـر می‌رسـد.



شکل ۹۴

رفتـار سـیم‌پیچ در ایـن ۵ ثابـت زمانـی را «حالـت گـذرا» گوینـد. بعـد از ۵ ثابـت زمانـی جریـان سـیم‌پیچ بـه مقـدار نهایـی خـود می‌رسـد و ثابـت می‌شـود ضریـب خودالقایـی نیـز صفـر می‌شـود لـذا در مقـدار جریـان بی‌تأثیـر می‌شـود و سـیم‌پیچ بـه «حالـت پایـدار» می‌رسـد.

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 به‌وجود 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 به‌دست می‌آید. در این رابطه:

$$X_L = ۲\pi fL$$

X_L مقاومت القایی $[\Omega]$
f فرکانس $[HZ]$
L ضریب خودالقایی $[H]$ است.

مثال ۱۱: مقاومت القایی یک سلف ۱۰ mH در فرکانس ۵۰ و ۶۰ هرتز چند اهم است؟
حل:
از رابطه زیر داریم:

$$X_L = ۲\pi fL$$

$$X_L = ۲\times ۳/۱۴\times ۵۰\times ۱۰\times ۱۰^{-۳} = ۳/۱۴[\Omega]$$
$$X_L = ۲\times ۳/۱۴\times ۶۰\times ۱۰\times ۱۰^{-۳} = ۳/۷۶۸[\Omega]$$

سلف

سلف، سیم‌پیچی است که از مقاومت الکتریکی R در مقایسه با مقاومت القایی X_L آن صرف‌نظر 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 به‌دست می‌آید.

$$L_{eq} = L_۱ + L_۲ + ... + L_n$$

مثال ۱۲: سه سلف با ضریب خودالقایی ۲، ۴، ۶ میلی هانری به‌صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند. ضریب خودالقایی کل را به‌دست آورید.
حل: از رابطه زیر داریم:

$$L_{eq} = L_۱ + L_۲ + L_۳$$
$$L_{eq} = ۲+۴+۶ = ۱۲[ms]$$

ب) اتصال موازی سلف‌ها :

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

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

مثال ۱۳: سه سلف با ضریب خودالقایی ۴، ۶، ۱۲ میلی هانری به‌صورت موازی به یکدیگر متصل شده‌اند. ضریب خودالقایی کل را به‌دست آورید.

حل:

از رابطه زیر داریم:

$$\frac{1}{L_{eq}}=\frac{1}{L_1}+\frac{1}{L_2}+\frac{1}{L_3}$$
$$\frac{1}{L_{eq}}=\frac{1}{4}+\frac{1}{6}+\frac{1}{12}$$
$$\frac{1}{L_{eq}}=\frac{3+2+1}{12}$$
$$\frac{1}{L_{eq}}=\frac{6}{12}$$
$$L_{eq}=\frac{1\times12}{6}=2mH$$

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

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

مدار موازی

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

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؟

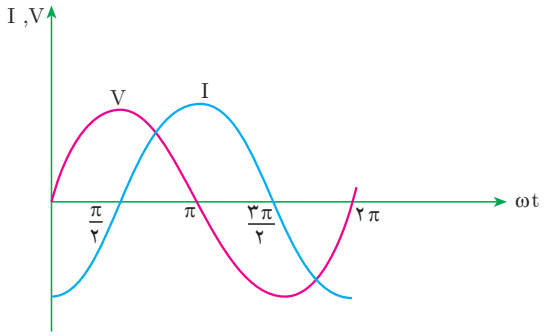
حل:

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° عقب‌تر است لذا سلف را یک عنصر«پس فاز» می‌شناسند. منحنی ولتاژ و جریان یک سلف در اتصال به منبع متناوب سینوسی در شکل ۹۵ نشان داده شده است که در آن $\theta_i=-90^\circ$ و $\theta_V=0$ می‌باشد.



شکل ۹۵

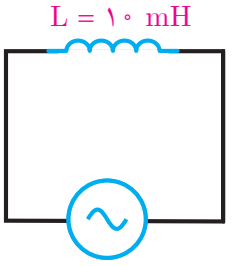
با توجه به شکل ۹۵ معادلات زمانی ولتاژ و جریان به‌صورت زیر خواهد شد.

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + ۰)$$
$$i(t) = I_m \sin(\omega t - ۹۰^\circ)$$

و زاویه اختلاف فاز برابر خواهد شد :

$$\varphi = \theta_V - \theta_i$$
$$\varphi = ۰ - (-۹۰) = +۹۰$$

مثال ۱۶: در مدار شکل ۹۶ مطلوب است :



شکل ۹۶

$$v(t) = ۵۰ \sin(۱۰۰۰t)$$

الف) مقاومت القایی سلف

ب) جریان سلف

ج) معادله زمانی جریان سلف

حل :

الف) از رابطه x_L داریم.

$$x_L = ۲\pi fL = \omega L$$
$$x_L = ۱۰۰۰ \times ۱۰ \times ۱۰^{-۳} = ۱۰[\Omega]$$

ب) از قانون اهم داریم :

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

$$I_m = \frac{V_m}{x_L} = \frac{۵۰}{۱۰} = ۵[A]$$

از رابطه جریان مؤثر به‌دست می‌آید.

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{۲}} = \frac{۵}{\sqrt{۲}} = ۳/۵۴[A]$$

شکل ۹۷

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

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \theta i)$$
$$i(t) = ۵\sin(۱۰۰۰t + ۹۰^\circ)$$

انرژی سلف

سلف انرژی الکتریکی را به‌صورت میدان مغناطیسی در خود ذخیره می‌سازد و ماکزیمم انرژی ذخیره شده در سلف از رابطه زیر به‌دست 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.

مثال ۱۷: از یک سلف با ضریب خودالقایی ۰/۲ هانری جریان $i(t) = 4\sin(500t - 90^\circ)$ زمانی می‌گذرد. ماکزیمم انرژی ذخیره شده در سلف چند ژول است؟

حل : از رابطه داریم:

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

$$W_L = \frac{1}{2}(0/2)(4)^2 = 1/6[j]$$

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 آمپرراکتیو » «VAR» است. توان الکتریکی سلف از رابطه زیر به‌دست 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[Ω]

I_L جریان سلف [A] است.

مثال ۱۸: یک سلف با مقاومت القایی ۴ اهم با جریان مؤثر ۳ آمپر مفروض است. توان الکتریکی سلف چقدر است ؟

حل:

از رابطه توان الکتریکی سلف داریم:

$$Q_L = +X_L I_L^2$$

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

پرسش

۱ـ مقدار نیروی مغناطیسی از رابطه ..... به‌دست می‌آید.
۲ ـ برای تعیین ..... قانون دست چپ ارائه شده است.
۳ـ خودالقایی و ضریب خودالقایی را تعریف کنید.
۴ـ تغییرات جریان چه اثراتی بر سیم‌پیچ می‌گذارد؟
۵ـ عوامل مؤثر بر مقدار ضریب خودالقایی کدام است؟
۶ـ انرژی ذخیره‌شده در سلف یعنی چه؟
۷ـ رابطه فازی بین ولتاژ و جریان یک سلف چیست؟
۸ـ موقعیت جریان و ولتاژ سلف چگونه است؟
۹ـ توان الکتریکی سلف را تعریف کنید.
۱۰ـ چرا سلف را یک عنصر پس‌فاز می‌نامند؟
۱۱ـ مقاومت القایی سلف را تعریف کنید. رابطه آن را بنویسید. عوامل مؤثر بر آن را نام ببرید.
۱۲ـ ثابت زمانی سلف را تعریف کنید. چه مدت طول می‌کشد تا جریان سلف به مقدار نهایی خود برسد؟
۱۳ـ نشان دهید واحد ثابت زمانی برحسب ثانیه می‌باشد.

تمرین

۱ـ نیروی وارد به یک هادی حامل جریان الکتریکی ۲ آمپر در میدان مغناطیسی ۰/۵ تسلا برابر ۰/۱ نیوتن است. طول مؤثر هادی چند متر است؟

۲ـ سیم‌پیچی به طول ۵۰ سانتی‌متر و سطح مقطع ۰/۰۲ متر مربع با هسته هوا دارای ۱۰۰۰ دور است اولاً ضریب خودالقایی آن تقریباً چند میلی هانری است؟ ثانیاً اگر بخواهیم ضریب خودالقایی دو برابر شود، تعداد دور سیم‌پیچ باید چند دور شود؟

۳ـ دو بوبین با ضریب خودالقایی ۱۰۰ میلی هانری را یک بار به طور سری و بار دیگر به طور موازی به هم وصل می‌کنیم. ضریب خودالقایی کل در هر دو حالت چقدر می‌شود؟

۴ـ ضریب خودالقایی سیم‌پیچی ۲۰ mH و جریان عبوری از آن ۱۰ آمپر است. چه مقدار انرژی در سیم‌پیچ ذخیره می‌شود؟

۵ـ چهار سلف با ضریب‌های خودالقایی ۵۰، ۲۵، ۱۰۰ و ۲۵ میلی هانری را یک بار به طور سری و بار دیگر به طور موازی ببندید. ضریب خودالقایی کل را در هر حالت به‌دست آورید.

۶ ـ از یک سلف با ضریب خودالقایی ۱۰ mH جریان متناوبی با فرکانس ۵۰ هرتز عبور می‌کند. مقاومت القایی سلف چند اهم است؟ اگر فرکانس به یک کیلو هرتز تغییر یابد، مقاومت القایی سلف چند اهم می‌شود؟

۷ـ در یک سلف با ضریب خودالقایی ۳ میلی هانری، جریان در مدت دو ثانیه از یک آمپر به ۷ آمپر افزایش می‌یابد ولتاژ خودالقایی در سلف چند میلی‌ولت است؟ اگر ضریب خودالقایی ۳ هانری باشد، ولتاژ القایی چند میلی ولت می‌شود؟

۸ـ یک سلف با ضریب خودالقایی ۲ هانری و مقاومت اهمی ۰/۵ اهمی در دست است. اگر این سلف را به ولتاژ ۱/۵ ولت مستقیم وصل کنید، ماکزیمم جریان مدار چند آمپر می‌شود؟ چه مدت زمانی طول می‌کشد تا جریان ماکزیمم شود؟

۹ـ توان الکتریکی یک سلف ۱۰ VAR می‌باشد در صورتی که جریان سلف ۲A باشد مقاومت القایی سلف را به‌دست آورید.

۱۰ـ بیشترین انرژی ذخیره شده در یک سلف باضریب خود القایی ۵۰ میلی هانری که جریان مؤثر عبوری از آن $۲\sqrt{۲}$ آمپر است را محاسبه کنید.