

مبانی مهندسی برق

رشته مهندسی مواد

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مراغه

ترم اول 1401-1402

قسمت سوم

فصل هفتم: مغناطیس و الکترومغناطیس

مغناطیس چیست؟

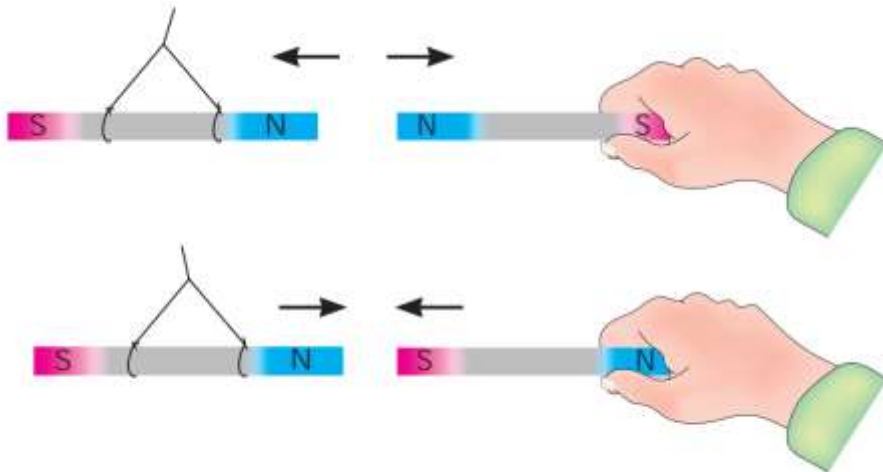
تقریباً از شش قرن پیش از میلاد مسیح یونانیان می دانستند یک نوع سنگ طبیعی وجود دارد تکه های کوچکی را می رباید. (شکل ۷-۱)

چون اولین بار این سنگ در منطقه ای به نام ماگنزی^۱ در آسیای صغیر پیدا شد، آن را «ماگنتیت»^۲ یا «مغناطیس» نامگذاری کرده اند. (شکل ۷-۲)

برای تشخیص قطب های یک آهنربا هر یک از قطب های آن را به ترتیب به قطب های مشخص یک آهنربای دیگر که آویزان است، نزدیک کنید. اگر دو قطب همدیگر را دفع کردند، «هم نام» و اگر دو قطب یکدیگر را جذب کردند، «غیرهم نام» هستند. (شکل ۷-۵)

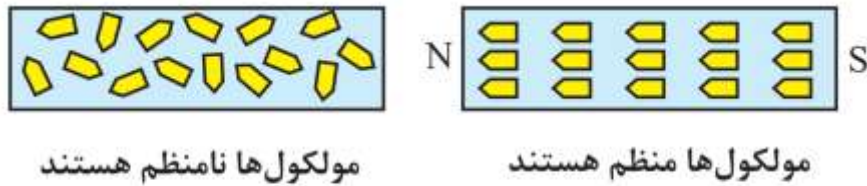


شکل ۷-۱- سنگ مغناطیس طبیعی



شکل ۷-۵- اثر قطب ها بر یکدیگر

سه عنصر آهن، نیکل و کبالت و بعضی از آلیاژهای آن‌ها که به شدت جذب آهنربا می‌شوند، «مواد مغناطیسی یا Ferromagnetic» می‌نامند. موادی مانند مس، برنج، شیشه و ... که جذب آهنربا نمی‌شوند مواد «غیرمغناطیسی» نام دارند. (شکل ۶-۷)



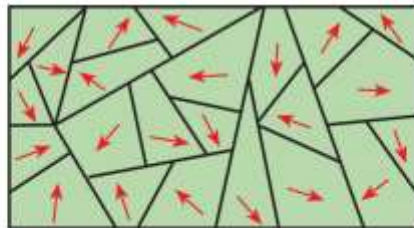
شکل ۷-۷- وضعیت ملکول‌های مواد مغناطیسی و غیرمغناطیسی

مواد مغناطیسی وقتی در کنار یک آهنربا قرار می‌گیرند ملکول‌های آن‌ها منظم شده و خاصیت مغناطیسی پیدا می‌کنند. (شکل ۷-۷)

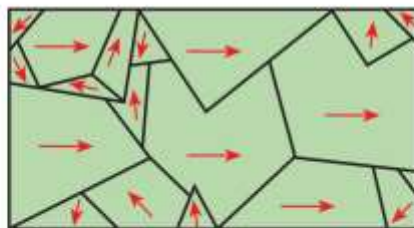
مواد مغناطیسی که در وسایل الکتریکی به کار می‌روند

به دو دسته:

الف - نرم ب - سخت



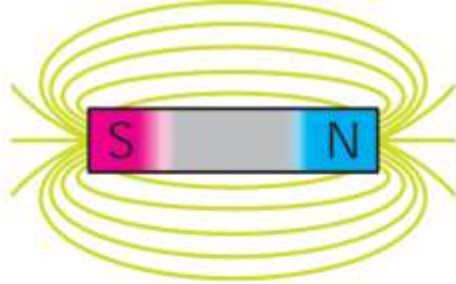
ماده فرومغناطیس آهنربا نشده



ماده فرومغناطیس آهنربا شده

تقسیم می‌شوند. مواد مغناطیسی نرم موادی مانند آهن هستند که خاصیت مغناطیسی ایجاد شده را خیلی زود و آسان از دست می‌هند. مواد مغناطیسی سخت موادی مانند فولاد هستند که خاصیت مغناطیسی تقریباً دائم پیدا می‌کنند و به راحتی از دست نمی‌دهند. هر دو دسته این مواد دارای اهمیت خاصی در صنایع هستند.

شکل ۷-۸- وضعیت ملکول‌های در مواد مغناطیسی مختلف



شکل ۹-۷- نیروی میدان اطراف یک جسم مغناطیسی

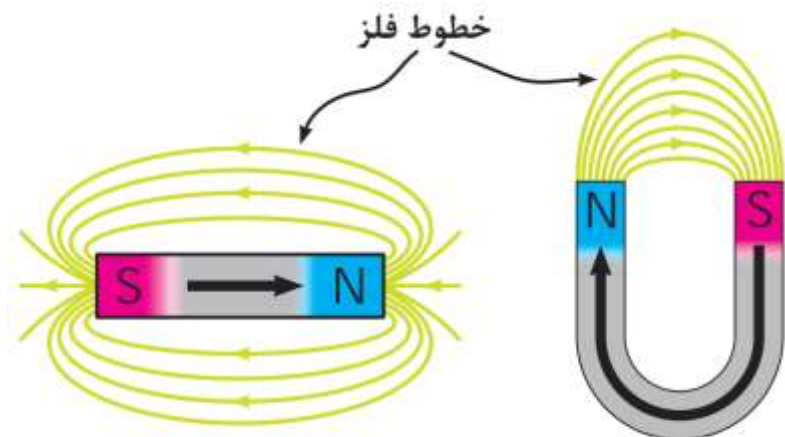
Magnetic Field

میدان مغناطیسی را می توان با خطوطی به نام «خطوط شار مغناطیسی»، «خطوط نیروی میدان مغناطیسی»، «فلوی مغناطیسی» یا «فوران مغناطیسی» نشان داد. فلوی مغناطیسی عبارت است از کلیه خطوط میدان مغناطیسی که از آهنربا خارج می شود. فلوی مغناطیسی را با حرف « Φ - فی» نمایش می دهند و واحد آن بر حسب «wb»^۲ است. یک وبر برابر با 10^8 خط شار مغناطیسی می باشد. در اصطلاح به هر وبر یک ماکسول نیز می گویند. جهت این خطوط در خارج آهنربا از قطب N به سمت قطب S و در داخل آهنربا از قطب S به طرف قطب N است. (شکل ۱۰-۷)

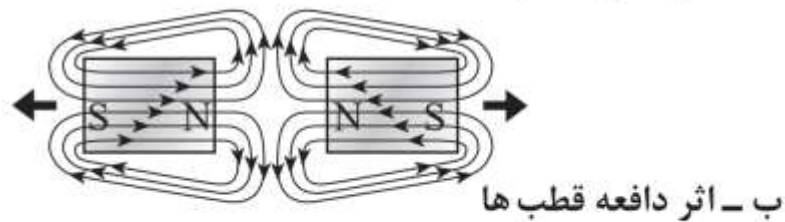
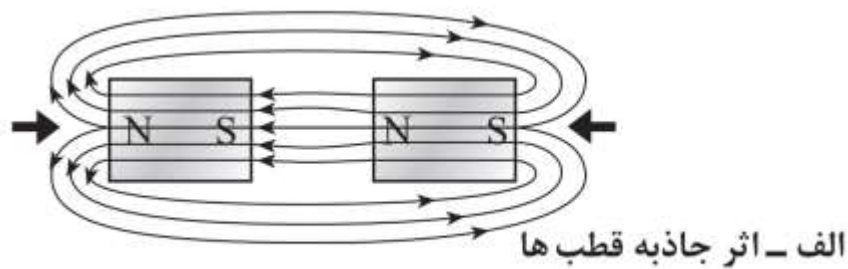
۲-۷- خطوط نیروی مغناطیسی و میدان مغناطیسی

یک آهنربا می تواند بدون اینکه با یک قطعه آهن تماس داشته باشد آن را جذب کند یا از یک فاصله بر روی آهنربای دیگر اثر کند. دلیل این که یک آهنربا از فاصله های کم به آهنربای دیگر نیرو وارد می کند وجود «میدان مغناطیسی»^۱ در اطراف آن است. پس می توان میدان مغناطیسی را به صورت زیر تعریف کرد:

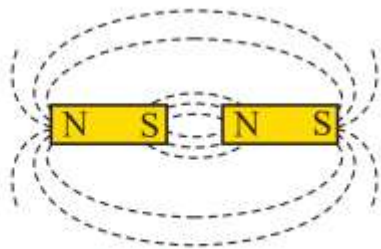
فضایی از اطراف جسم مغناطیسی که می تواند روی اجسام مغناطیسی دیگر اثر بگذارد، «میدان مغناطیسی» می گویند. (شکل ۹-۷)



شکل ۱۰-۷- میدان های مغناطیسی آهنرباها



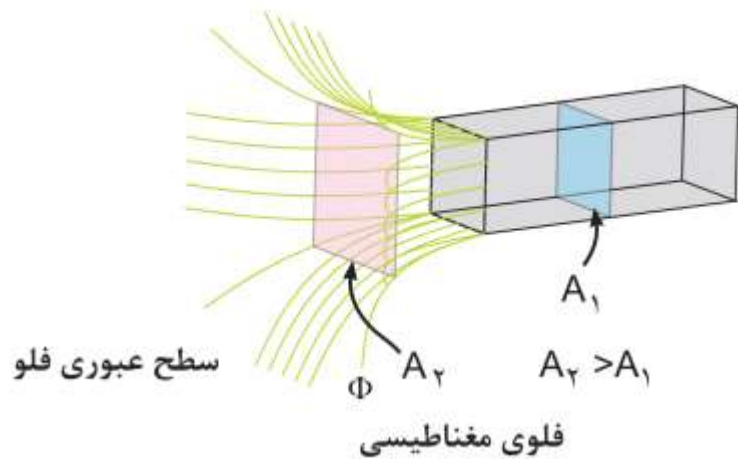
شکل ۷-۱۳- اثر قطب های مغناطیسی بر یکدیگر



شکل ۷-۱۴

اثر جاذبه و دافعه میدان های مغناطیسی دو آهنربا را در شکل ۷-۱۳ مشاهده می کنید. در شکل الف قطب های غیرهم نام یکدیگر را جذب و در شکل ب قطب های هم نام یکدیگر را دفع نموده اند.

اگر یک آهنربا از وسط نصف شود در دو لبه آن مجدداً دو قطب N و S پدید می آید. (شکل ۷-۱۴)



شکل ۷-۱۵

تراکم یا چگالی میدان مغناطیسی به سطحی که فلو از آن عبور می کند، بستگی دارد. در اصطلاح به تعداد خطوط فلوی مغناطیسی که از واحد سطح می گذرد «چگالی میدان مغناطیسی» یا «اندوکسیون مغناطیسی» می گویند. (شکل ۷-۱۵)

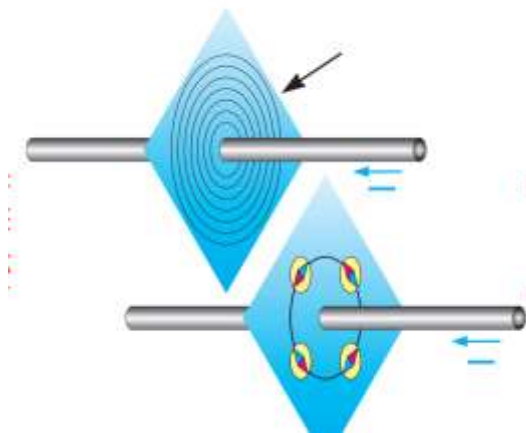
مقدار اندوکسیون مغناطیسی را از رابطه زیر و بر حسب وبر بر متر مربع $\left(\frac{wb}{m^2}\right)$ می توان بدست آورد.

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

$$1 \text{ Tesla} = 10^{-4} \text{ Gauss}$$

$$1 \text{ (G)} = 10^{-4} \text{ (T)}$$

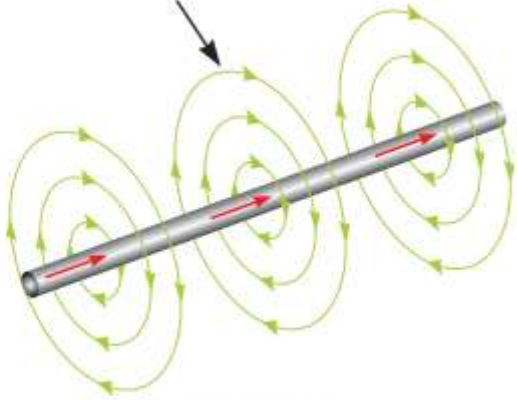
در اصطلاح به واحد $\left(\frac{wb}{m^2}\right)$ تسلا (T) نیز گفته می شود. اندوکسیون مغناطیسی را با واحد کوچک تر به نام گوس نیز بیان می کنند. یک گوس برابر است با:



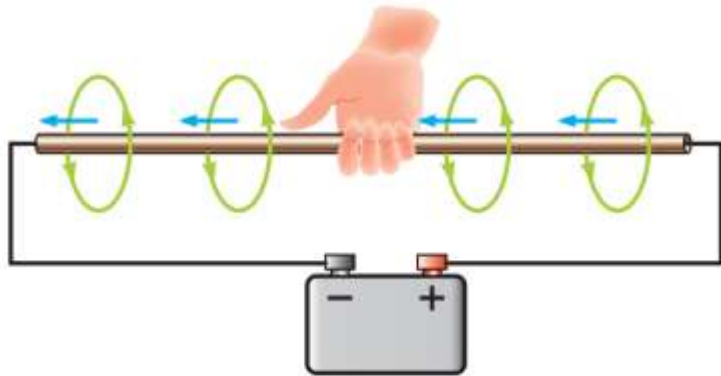
الکترومغناطیس

در فضای اطراف سیم حامل جریان DC میدان مغناطیسی وجود دارد. (شکل ۷-۱۷)

خطوط نیروی مغناطیسی در فضای اطراف سیم



شکل ۷-۱۸



شکل ۷-۱۹



الف) جریان سیم به سمت داخل



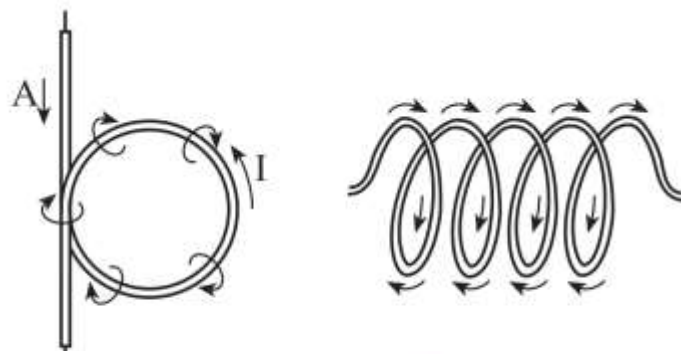
ب) جریان سیم به سمت خارج

هر قدر مقدار جریان عبوری از سیم بیشتر باشد میدان مغناطیسی قوی تر می شود و فلوی مغناطیسی افزایش می یابد. به میدان مغناطیسی که در اثر جریان عبوری از سیم و در فضای اطراف آن به وجود می آید (شکل ۷-۱۸) در اصطلاح «میدان الکترومغناطیسی» می گویند.

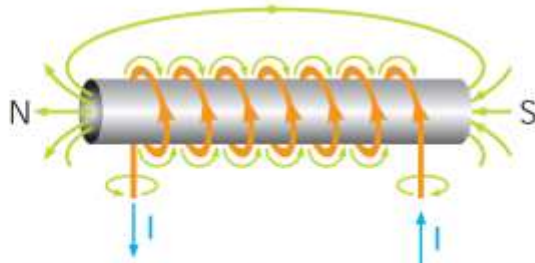
۷-۴- قانون دست راست برای یک هادی جریاندار

جهت میدان الکترومغناطیسی را به کمک قانون دست راست می توان تعیین کرد.

هرگاه سیم حامل جریان را طوری در دست راست بگیریم که انگشت شست جهت جریان را نشان دهد جهت بسته شدن چهار انگشت دیگر جهت میدان مغناطیسی را نشان می دهد. (شکل ۷-۱۹)



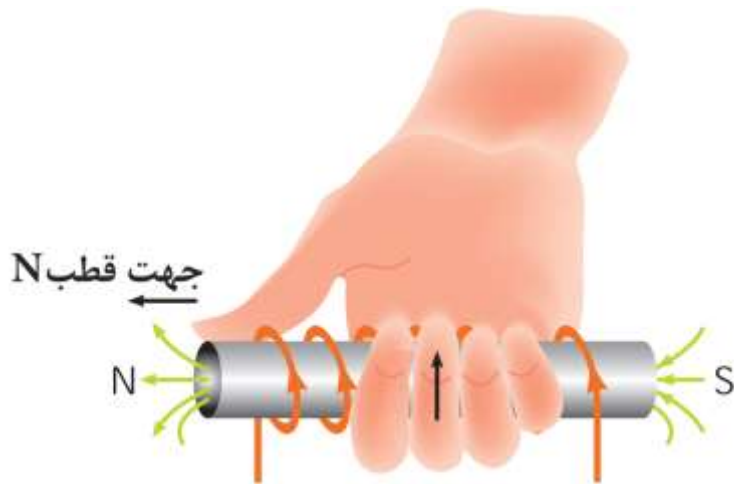
نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اگر رشته سیم مستقیمی را به صورت یک حلقه و یا چند حلقه درآوریم میدان مغناطیسی اطراف هر حلقه با هم جمع می‌شود و تراکم میدان مغناطیسی B را افزایش می‌دهد. (شکل ۷-۲۲)



شکل ۷-۲۳ - جهت جریان و میدان مغناطیسی

جهت میدان مغناطیسی اطراف یک سیم پیچ نیز با «قانون دست راست» قابل تعیین است.

هرگاه سیم پیچ حامل جریانی را طوری در دست راست خود بگیریم که جهت پیچیدن چهار انگشت جهت جریان را نشان دهد انگشت شصت جهت قطب N میدان مغناطیسی اطراف سیم را نشان می‌دهد. (شکل ۷-۲۳)

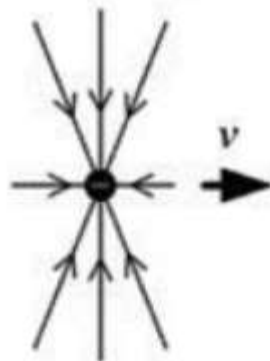


شکل ۷-۲۴

این جهت میدان با توجه به جهت قراردادی جریان تعیین می‌شود. برای افزایش چگالی میدان مغناطیسی علاوه بر تغییر شکل رشته سیم به سیم پیچ می‌توان به موارد زیر را اجرا کرد.

- الف - افزایش تعداد دور سیم پیچ
- ب - افزایش جریان عبوری از سیم
- ج - استفاده از هسته آهنی در داخل سیم پیچ
- د - کاهش فاصله بین حلقه‌های سیم پیچ

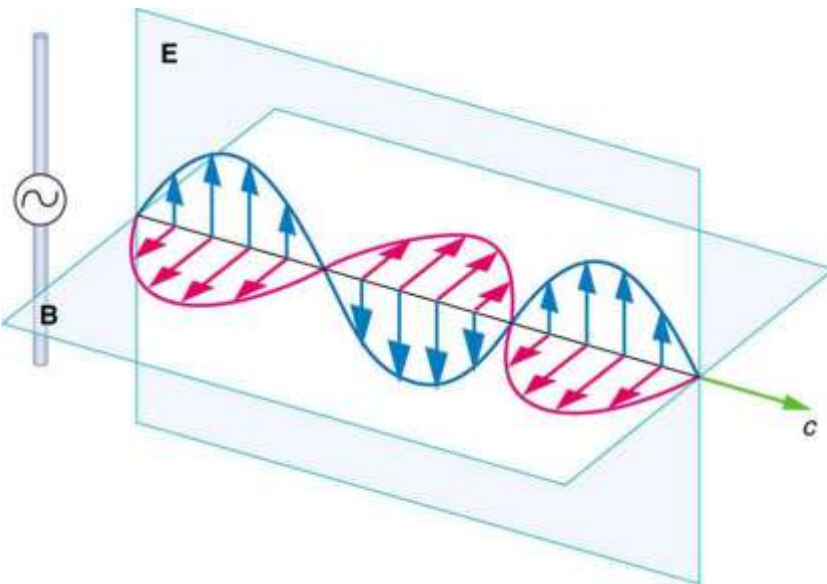
همانطور که در فصل اول فراگرفتید هر ذره باردار ساکن (بارالکترواستاتیکی) در فضای اطراف خود خاصیت یا میدانی را با جهت فرضی دارد. مثلاً بار منفی که جهت میدان آن به سمت داخل است) اصطلاحاً به آن میدان الکتریکی گویند. حال نیز با این مطلب آشنا شدیم، الکترون که دارای بار منفی است هرگاه در حرکت باشد (مانند حرکت وضعی)، در اطراف خود میدانی را تولید می کند که به آن «میدان مغناطیسی» می گویند. معمولاً این میدان را به صورت دایره متحدالمرکز در دور ذره باردار(الکترون) رسم می کنند. در هر نقطه خطوط میدان الکتریکی و خطوط میدان مغناطیسی بر یکدیگر عمودند.



Electric field of a moving electron

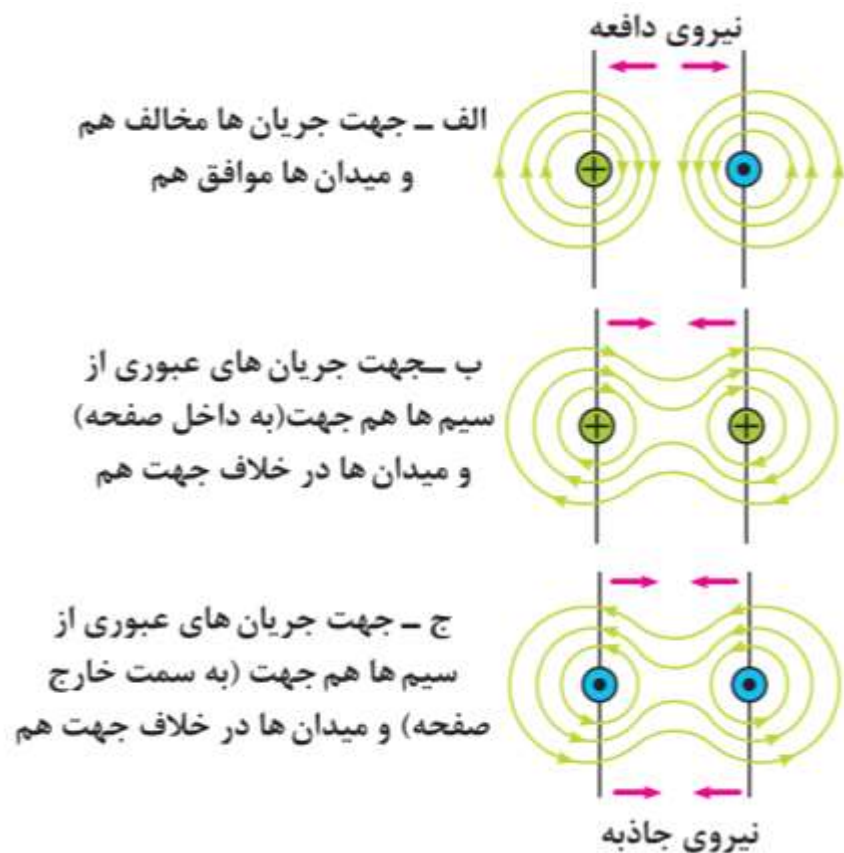


Magnetic field of moving electron



اصطلاحاً به ترکیب این دو میدان « میدان الکترومغناطیسی » می گویند.

۵-۷- نیروی وارد بر دو هادی جریاندار



هرگاه دو سیم حامل جریان در مقابل یکدیگر قرار گیرند متناسب با جهت و مقدار جریان عبوری از آن ها بر یکدیگر نیرو وارد می کنند. اگر جهت میدان های مغناطیسی دو سیم با هم موافق باشند میدان های دو سیم با هم جمع شده و یکدیگر را جذب می کنند. در صورتی که میدان های مغناطیسی دو سیم مخالف هم باشند میدان های دو سیم در مقابل یکدیگر قرار می گیرند و یکدیگر را دفع می کنند. تصاویر الف، ب و ج شکل ۷-۲۷ گویای این مطلب است.

۱-۶-۷- نیروی محرکه مغناطیسی

همان طوری که اشاره شد در مدارهای الکتریکی نیروی باتری سبب جاری شدن الکترون ها در مدار می شود.

مشابه این شرایط در مدارهای مغناطیسی به وجود می آید. نیرویی که باعث جاری شدن فلو در مدارهای مغناطیسی می شود «نیروی محرکه مغناطیسی» می نامند. این نیرو را از رابطه زیر می توان به دست آورد.

(شکل ۷-۲۸)

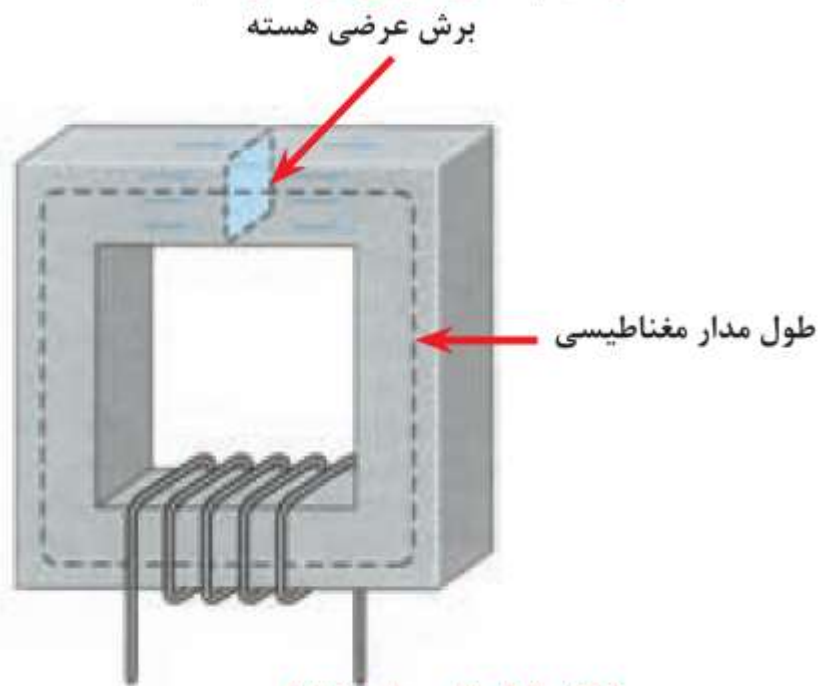
$$F_m = \theta = N.I$$

که در آن:

I - شدت جریان سیم پیچ بر حسب آمپر (A)

N - تعداد دور سیم پیچ

F_m - نیروی محرکه مغناطیسی بر حسب (A)



شکل ۷-۲۸- مدار مغناطیسی

۶-۷-۲- شدت میدان مغناطیسی

مقدار نیروی محرکه مغناطیسی را که به واحد طول سیم پیچ وارد می شود، «شدت میدان مغناطیسی» می گویند. مقدار نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه زیر به دست می آید:

$$H = \frac{Fm}{l} = \frac{\theta}{l} = \frac{N.I}{l}$$

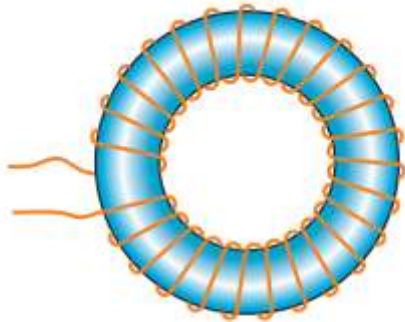
که در آن:

θ - نیروی محرکه مغناطیسی بر حسب آمپر (A)

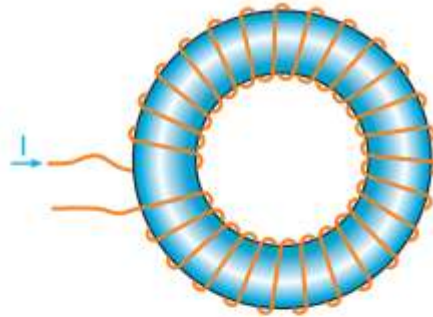
l - طول متوسط مسیر مغناطیسی بر حسب متر (m)

H - شدت میدان مغناطیسی بر حسب آمپر متر است، رابطه (H) نشان می دهد هر قدر طول مسیر مغناطیسی بیشتر باشد شدت میدان مغناطیسی کم تری در هسته به وجود می آید.

به عبارت دیگر اگر تعداد دور یا جریان عبوری از سیم پیچ افزایش یابد، نیروی محرکه مغناطیسی نیز افزایش خواهد یافت. (شکل ۷-۲۹)



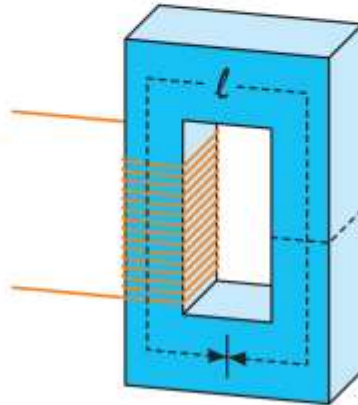
الف - تعداد دور کم



ج- طول مسیر مغناطیسی کم



ب - تعداد دور زیاد



د- طول مسیر مغناطیسی زیاد

شکل ۷-۲۹- مدارهای مغناطیسی با طول متوسط و تعداد دورهای مختلف

۳-۶-۷- ضریب نفوذ مغناطیسی

میزان نفوذپذیری مغناطیسی در اجسام مختلف با هم متفاوت است و به جنس جسم بستگی دارد. ضریب نفوذپذیری را با (مو - μ) نشان می دهند و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

ضریب نفوذپذیری هوا را با (μ_0) نشان می دهند و مقدار آن برابر است با:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

که در آن:

B - چگالی مغناطیسی بر حسب وبر (wb)

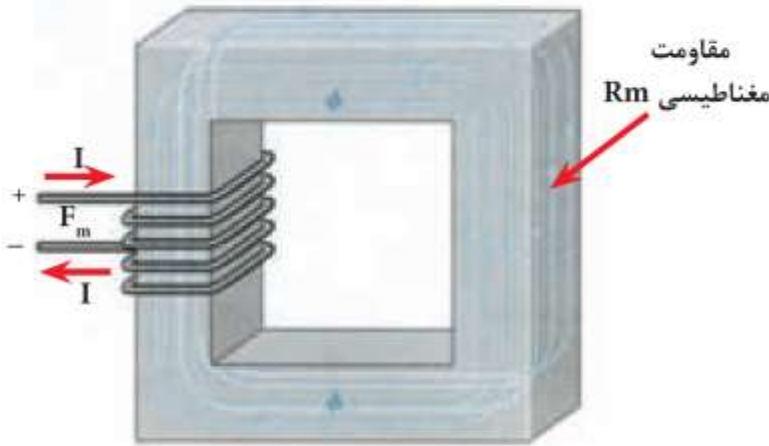
H - شدت میدان مغناطیسی بر حسب آمپر متر $\left[\frac{A}{m}\right]$

μ - ضریب نفوذ مغناطیسی جسم بر حسب وبر بر

آمپر متر $\left[\frac{wb}{A.m}\right]$ است.

۴-۶-۷- مقاومت مغناطیسی

مقدار مخالفتی که اجسام مغناطیسی در برابر عبور فلوی مغناطیسی از خود نشان می دهند، «مقاومت مغناطیسی» یا «رلوکتانس» گویند. (شکل ۷-۳۰) مقاومت مغناطیسی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:



شکل ۷-۳۰

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

$$R_m = \frac{\ell}{\mu A}$$

R_m - مقاومت مغناطیسی بر حسب آمپر برابر $\left[\frac{A}{wb} \right]$ مقدار (μ) معمولاً بر حسب پارامتری به نام «ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی» بیان می شود که آن را چنین تعریف می کنند: نسبت ضریب نفوذ مغناطیسی هر جسم (μ_r) به ضریب نفوذ مغناطیسی هوا (μ_0) را ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی (μ) می گویند و از رابطه مقابل محاسبه می شود.

بر پایه رابطه μ_r می توان نوشت:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

بر همین اساس رابطه رلوکتانس را چنین در نظر

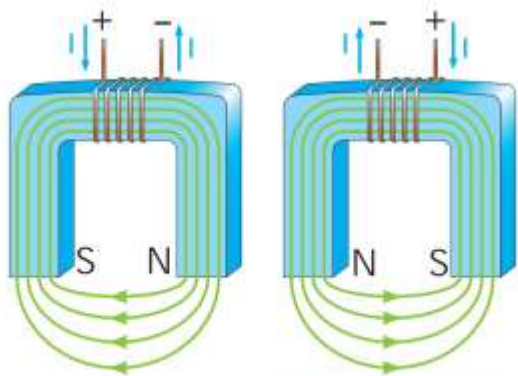
گرفت:

$$R_m = \frac{\ell}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A}$$

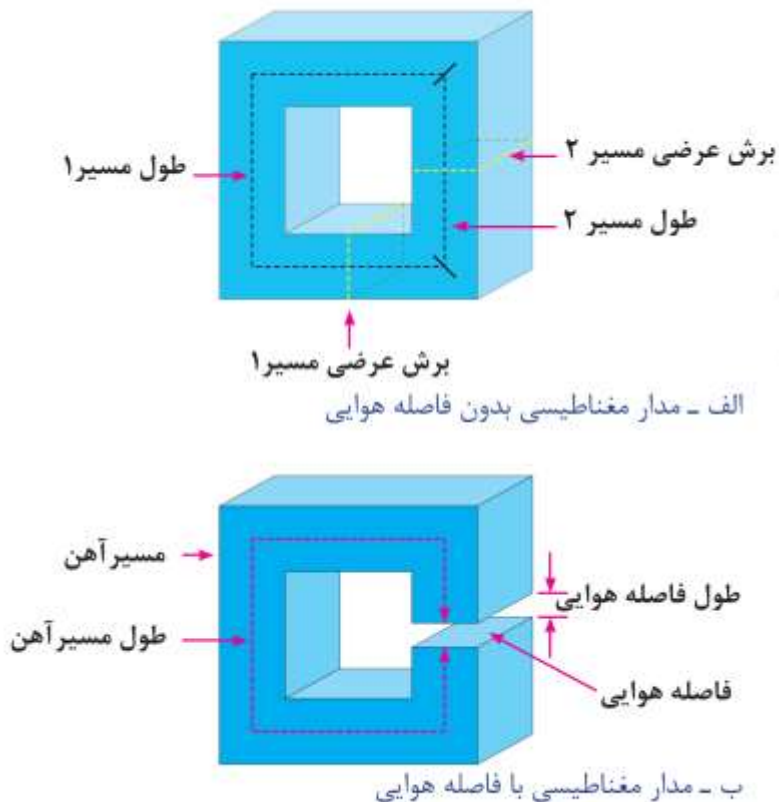
۵-۶-۷- مدارهای مغناطیسی:

مدارهای مغناطیسی از جنس آهن نرم یا آهن سخت هستند. در صورتی که جهت جریان سیم پیچ مدارهای مغناطیسی عوض شود جهت فلوی مغناطیسی (قطب های S و N) عوض خواهد شد. (شکل ۷-۳۱)

اثر تعویض پلاریته های منبع تغذیه بر جهت میدان مغناطیسی هسته را نشان می دهد.



شکل ۷-۳۱- اثر تعویض جهت جریان روی جهت میدان مغناطیسی

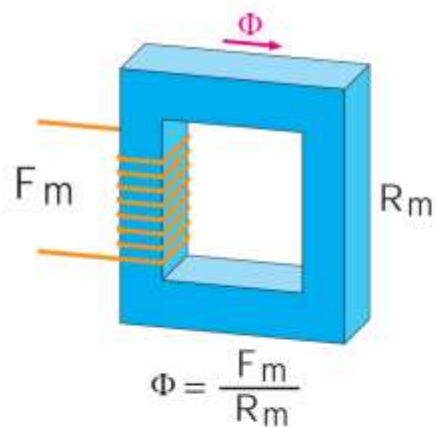


شکل ۷-۳۲

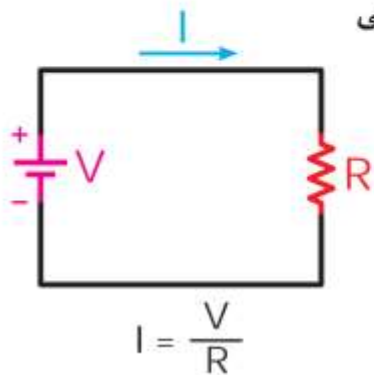
اگر در طول مسیر مدارهای مغناطیسی فاصله هوایی وجود داشته باشد، محیط عبور فولی مغناطیسی تغییر می کند. در این حالت فلوی مغناطیسی با ماده ای روبه رو می شود که ضریب نفوذ مغناطیسی آن کمتر از آهن است. این امر سبب می شود که مقاومت مغناطیسی کل هسته افزایش یابد و در نتیجه کل فوران مغناطیسی کم شود. (شکل ۷-۳۲)

کمیت های مدار مغناطیسی مشابه مدار الکتریکی است و می توانیم این کمیت ها را با هم مقایسه کنیم. (جدول زیر)

θ یا F_m (نیروی محرکه مغناطیسی)	مشابه	V (پتانسیل الکتریکی)
Φ (فلو)	مشابه	I (جریان الکتریکی)
R_m (رلوکتانس)	مشابه	R (مقاومت الکتریکی)



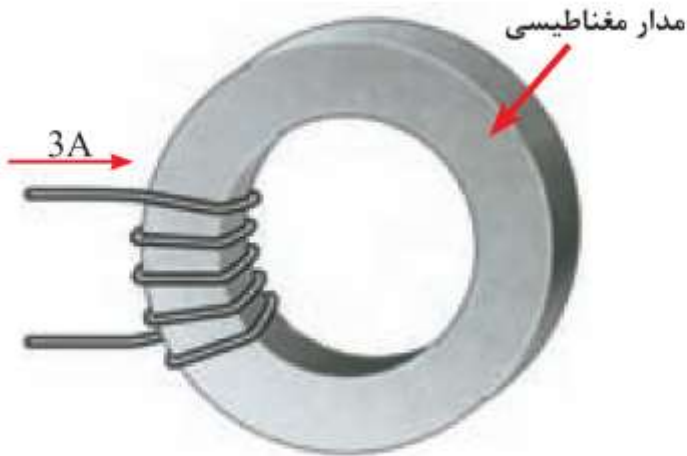
الف-مدار مغناطیسی



ب-مدار الکتریکی

بر همین اساس می توان روابط ساده الکتریکی، مانند قانون اهم را نیز برای مدارهای مغناطیسی نوشت. به عنوان مثال برای محاسبه مقاومت مغناطیسی (شکل ۷-۳۳) می توانیم رابطه دیگری را به صورت زیر بنویسیم:

$$R = \frac{V}{I} \Rightarrow R_m = \frac{\theta}{\Phi}$$



شکل ۷-۳۴- مدار مغناطیسی
به صورت حلقه با تعداد دور کم

مثال: در مدار مغناطیسی شکل (۷-۳۴) اگر مقاومت مدار مغناطیسی برابر $3 \times 10^2 \left(\frac{A}{Wb} \right)$ باشد فوران عبوری از هسته چقدر است؟

حل:

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} = \frac{N.I}{R_m}$$

$$\Phi = \frac{5 \times 3}{30 \times 10^2} = \frac{15}{30 \times 10^2} = .5 \times 10^{-2} \text{ wb} = .5 \text{ mwb}$$

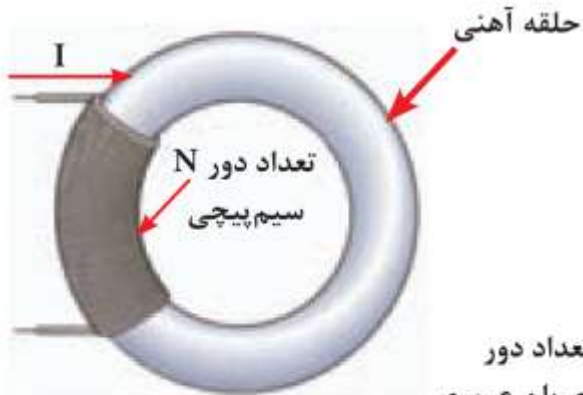
مثال: با توجه به مشخصات (شکل ۷-۳۵) مطلوب

است:

الف - شدت میدان مغناطیسی

ب - فوران جاری در هسته

حل:



شکل ۷-۳۵

تعداد دور $N=3000$
جریان عبوری $I=0.1 \text{ A}$
طول مدار مغناطیسی $l=15 \text{ cm}$
چگالی لازم در هسته $.5 \frac{\text{wb}}{\text{m}^2}$
سطح مقطع هسته $A = 4 \text{ m}^2$

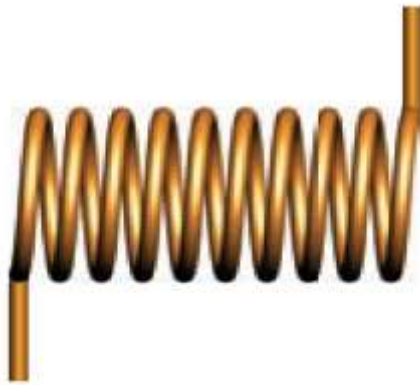
$$H = \frac{N.I}{l} = \frac{3000 \times .1}{15 \times 10^{-2}} = 2000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$B = \frac{\Phi}{A} \Rightarrow \Phi = BA = .5 \times 4 \times 10^{-2}$$

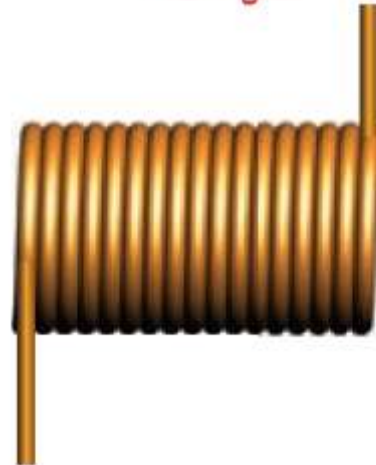
$$\Phi = 2 \times 10^{-2} \text{ wb} = .2 \text{ mwb}$$

۷-۷ سلف (اندوکتانس -L)

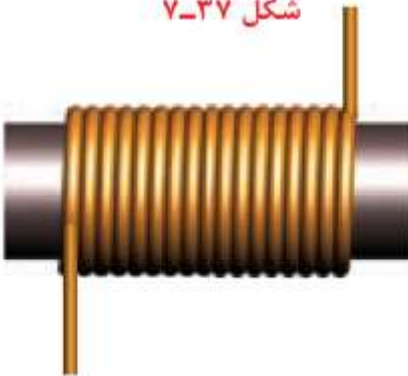
از پیچیدن چند دور سیم به صورت شکل (۷-۳۶) یک سیم پیچ یا سلف ساخته می شود. یک سلف را با اسامی دیگر، مانند خودالقا و چوک نام گذاری می کنند.



شکل ۷-۳۶



شکل ۷-۳۷



شکل ۷-۳۸

یک سلف ممکن است دارای هسته و یا بدون هسته باشد پس بطور کلی می توان گفت اجزاء یک اندوکتانس از دو قسمت کلی الف: سیم پیچ ب: هسته تشکیل شده است. تصاویر شکل های (۷-۳۷) و (۷-۳۸) سلف های بدون هسته و با هسته را نشان می دهد. هسته سلف ها از دو جنس مختلف با زمینه های کاربردی متفاوت ساخته می شود.

الف. سلف با هسته فریت

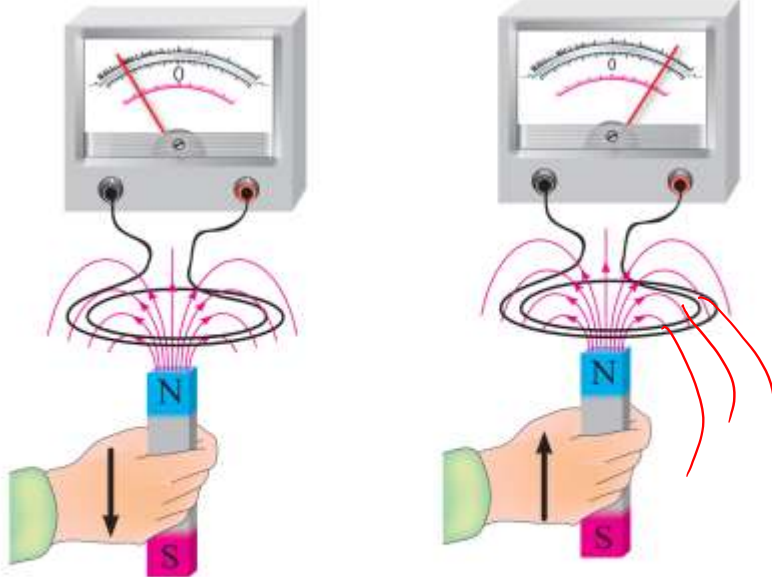
ب. سلف با هسته آهنی



شکل ۷-۳۹

(ب)

(الف)



وجود هسته در داخل سیم پیچ باعث می شود تا فوران مغناطیسی پراکنده نشده و خاصیت سلفی افزایش یابد. در

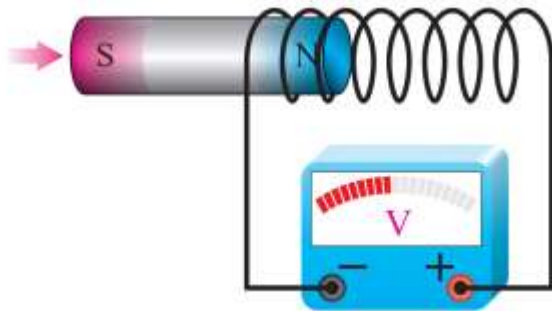
آزمایش هایی مشابه شکل (۷-۴۰) دریافتند که با دور و نزدیک کردن آهنربا به سیم پیچ، عقربه گالوانومتر (میکرو آمپرسنج) منحرف شده و عبور جریان را نشان می دهد مانند وقتی که در یک مدار مولد وجود داشته باشد.

شکل ۷-۴۰- جریان القا می در جهتی است که با حرکت آهنربا به طرف پیچ مخالفت می کند

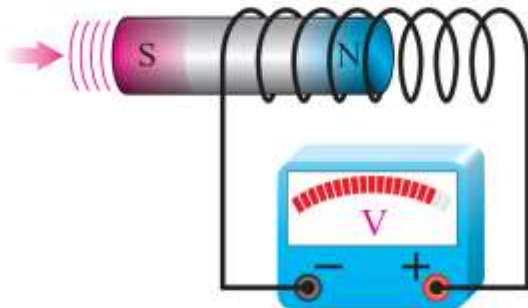
$$E_{\text{nmf}} = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ رابطه فارادی}$$

$$E_{\text{nmf}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \text{ رابطه لنز}$$

فارادی و لنز از جمله فیزیکدانانی بودند که پدیده‌ی القا الکترومغناطیسی را بصورت فرمول‌هایی بیان کردند. بر پایه این قوانین خاصیت خودالقایی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد.



الف) هسته در حال ورود به سیم پیچ و افزایش نیروی محرک



ب) هسته بیشتر در داخل سیم پیچ قرار گرفته و نیروی محرکه القایی افزایش یافته است

به خاصیتی از سیم پیچ که به ازای تغییر جریان یا تغییر فوران در آن حاصل شده و باعث القا یک نیروی محرکه مغناطیسی جدید در سیم پیچ می‌شود «خاصیت خودالقایی» و به مقدار آن «ضریب خودالقایی» یا «اندوکتانس - L » گفته می‌شود و واحد آن بر حسب هانری بیان می‌شود.

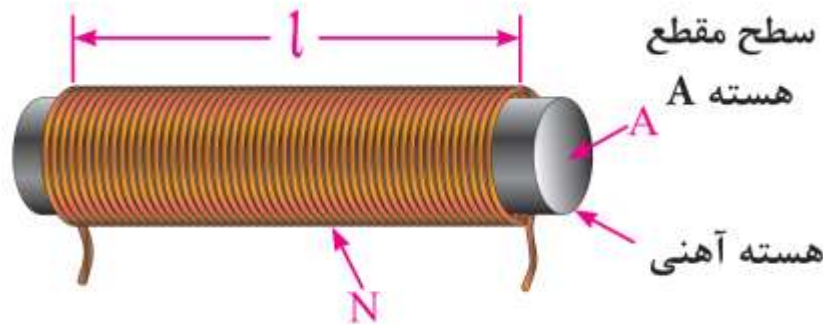
۷-۸ عوامل فیزیکی مؤثر در ضریب خودالقایی

با بهره گیری از تعاریف مغناطیسی و هم چنین رابطه فارادی می توان به یک رابطه دیگر دست یافت که براساس آن می توان خاصیت خودالقایی سیم پیچی را بر پایه عوامل فیزیکی مطابق رابطه مقابل بدست آورد.

μ - ضریب نفوذ مغناطیسی هسته سیم پیچ بر حسب
 وبر بر آمپر متر $\left[\frac{\text{wb}}{\text{A.m}} \right]$
 N - تعداد دور سیم پیچ

A - سطح مقطع سیم پیچ بر حسب مترمربع $[\text{m}^2]$
 l - طول سیم سیم پیچ بر حسب متر $[\text{m}]$

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

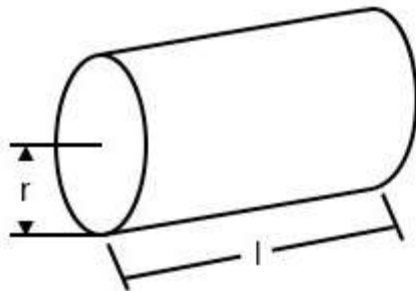


شکل ۷-۴۲

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

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

Where,



L = Inductance of coil in Henrys

N = Number of turns in wire coil (straight wire = 1)

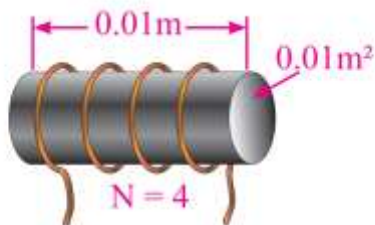
μ = Permeability of core material (absolute, not relative)

μ_r = Relative permeability, dimensionless ($\mu_0 = 1$ for air)

$\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6}$ T-m/At permeability of free space

A = Area of coil in square meters = πr^2

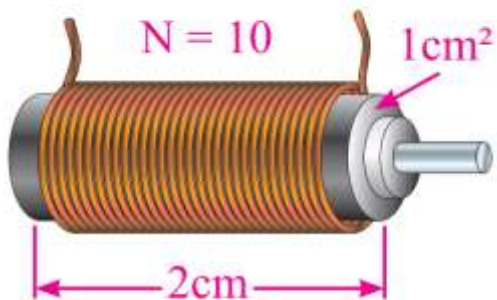
l = Average length of coil in meters



شکل ۷-۴۳

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

$$L = \frac{. / 25 \times 10^{-7} \times (4)^2 \times . / .01}{. / .01} = 4 \cdot \text{mh}$$



شکل ۷-۴۴

$$L = \mu \cdot \frac{N^2 A}{l} = \frac{5000 \times 10^2 \times \pi \times (10^{-2})^2}{2 \times 10^{-2}} = 7830H$$

مثال: اندازه ضریب خودالقایی سیم پیچ نشان داده شده در شکل () چند میلی هانری است. در صورتی که ضریب نفوذ مغناطیسی هسته 0.25×10^{-3} باشد.

مثال: اندازه ضریب خودالقایی سلفی با مشخصات نشان داده شده در شکل (۷-۴۴) چقدر است؟ در صورتیکه ضریب نفوذ نسبی مغناطیسی هسته آن ۵۰۰۰ باشد. (مقدار $\pi=3$ فرض شود).

۷-۹ عملکرد سلف در جریان الکتریکی

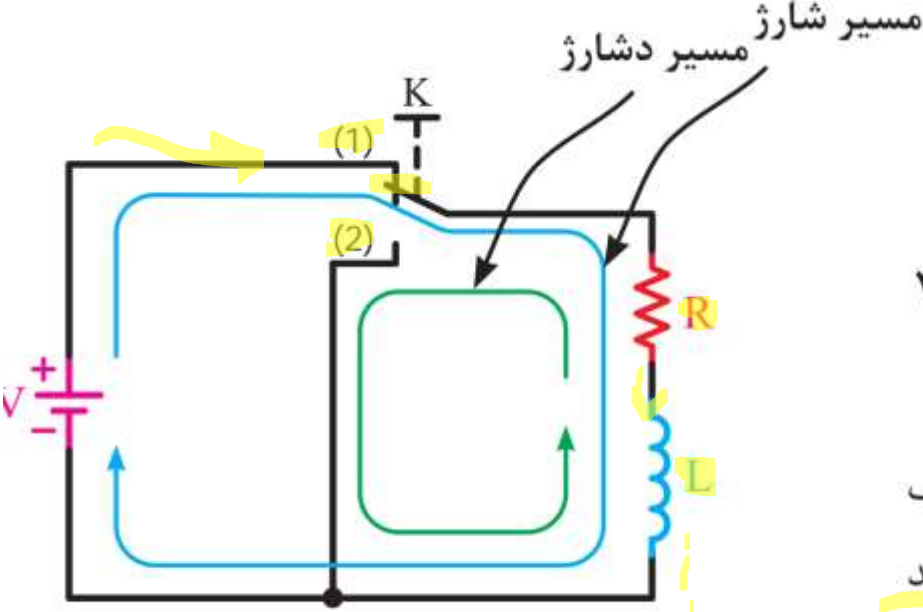
شارژ و دشارژ (ثابت زمانی سلفی)

در شکل (۷-۴۹) حالت ۱ کلید مسیر شارژ و حالت ۲ کلید مسیر دشارژ سلف L را نشان می‌دهد.

اصطلاحاً به مدت زمانیکه طول می‌کشد تا جریان سلف به اندازه $\frac{1}{e} \approx 37\%$ مقدار ماکزیمم خود افزایش یا کاهش یابد «ثابت زمانی» گفته می‌شود و با حرف $(\tau - \text{تاو})$ و بر حسب ثانیه مطابق رابطه مقابل محاسبه می‌کنند.

بر اساس آزمایشات صورت گرفته مشخص شده است در هر سلف پس از گذشت 5τ ثابت زمانی جریان عبوری از آن مقدار به حداکثر (در شرایط شارژ) و به مقدار حداقل (در شرایط دشارژ) می‌رسد.

مدت زمان شارژ یا دشارژ کامل یک سلف را مطابق رابطه مقابل می‌توان چنین بدست آورد.



شکل ۷-۴۹

[h- هانری]

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

[S- ثانیه]

[Ω - اهم]

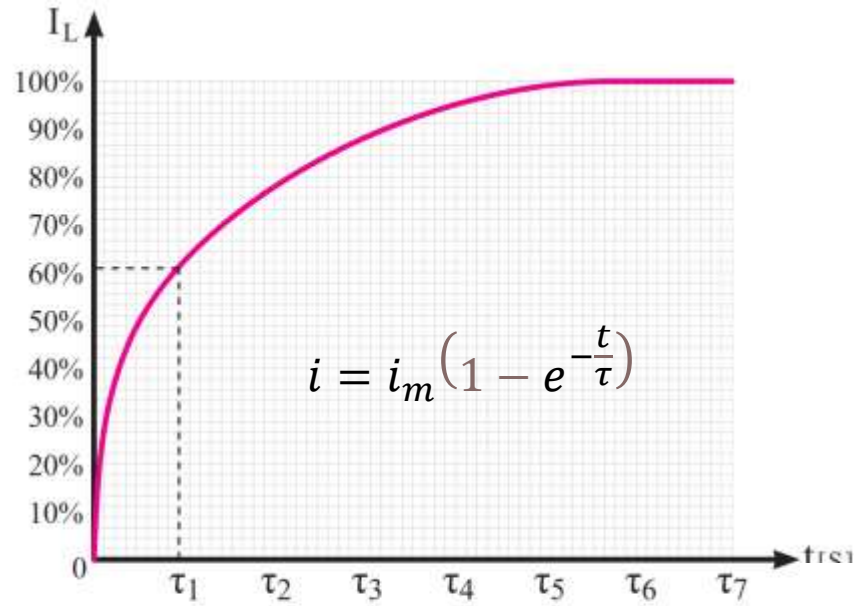
$$T = 5\tau$$

مدت زمان شارژ و دشارژ کامل سلف

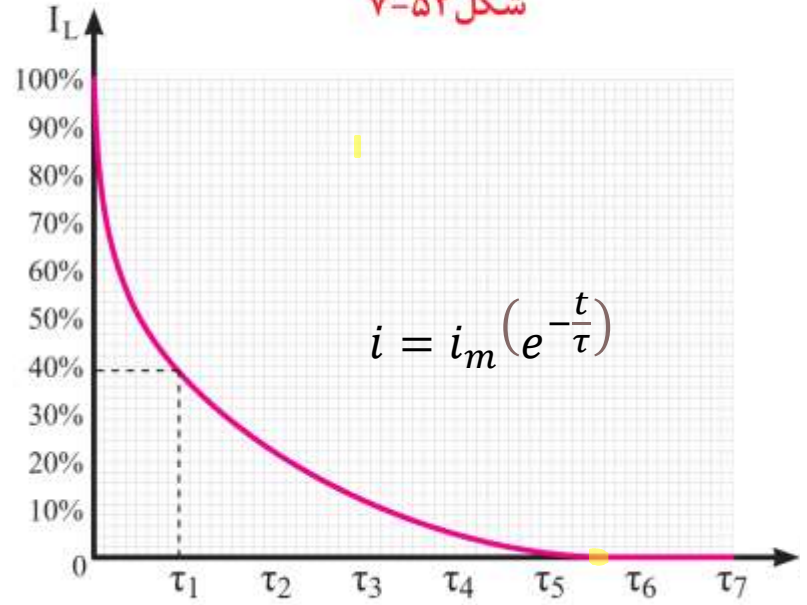
ثابت زمانی سلفی

بر پایه این مطالب پس می توان منحنی های شارژ و دشارژ یک سلف را مطابق شکل های (۷-۵۲) و (۷-۵۳) در شکل کلی رسم کرد.

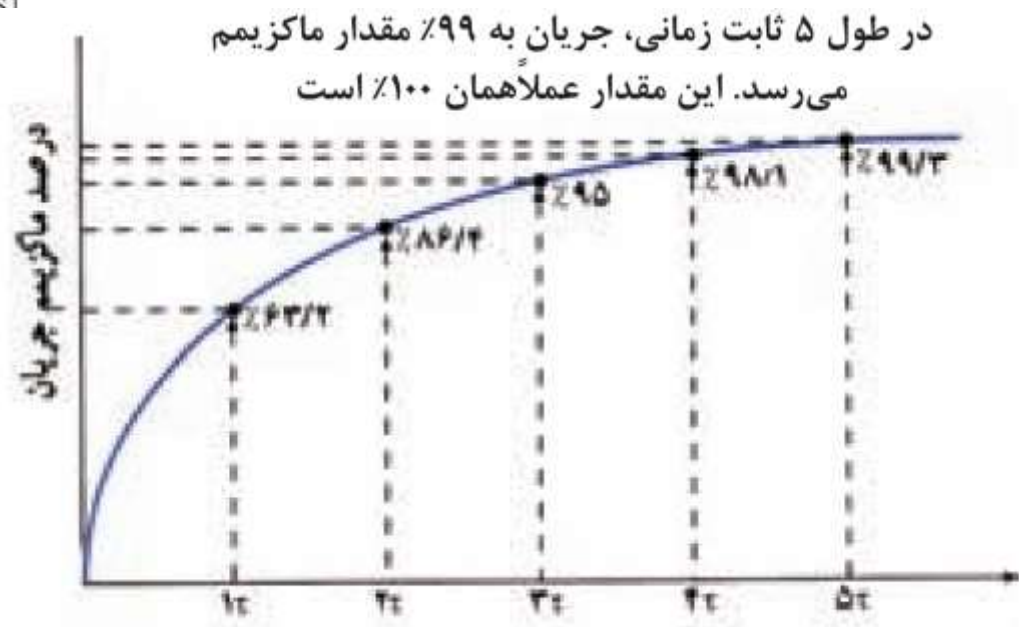
شکل (۷-۵۴) منحنی تغییرات جریان سلف را در حالت شارژ نشان می دهد.



شکل ۷-۵۲

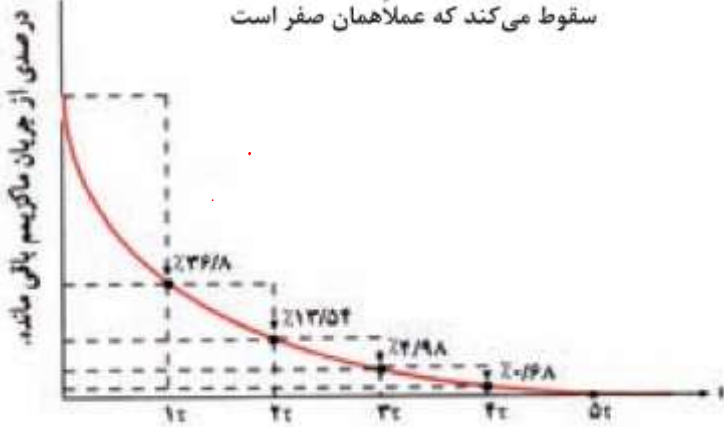


شکل ۷-۵۳



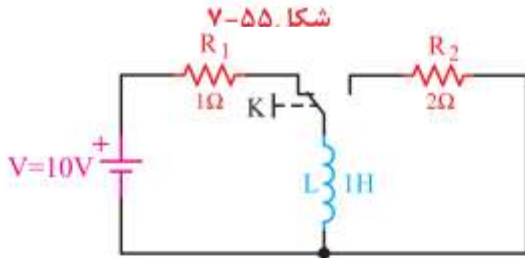
شکل ۷-۵۴ - منحنی شارژ

در طول ۵ ثابت زمانی، جریان به کم‌تر ۱٪ مقدار ماکزیمم سقوط می‌کند که عملاً همان صفر است

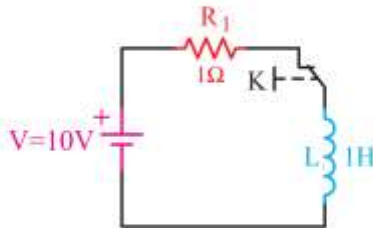


منحنی تغییرات جریان سلف در شرایط دشارژ مطابق شکل (۷-۵۵) خواهد شد.

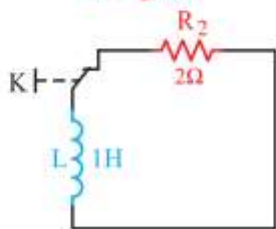
مثال: مدت زمان شارژ و دشارژ کامل سلف نشان داده شده در شکل (۷-۵۶) در صورت تغییر وضعیت کلید K چقدر است؟



شکل ۷-۵۶



شکل ۷-۵۷



شکل ۷-۵۸

حل: در شرایط شارژ وضعیت مدار مطابق شکل (۷-۵۷) است.

$$\tau = \frac{L}{R_1} = \frac{1}{1} = 1s$$

$$T = 5\tau = 5 \times 1 = 5s$$

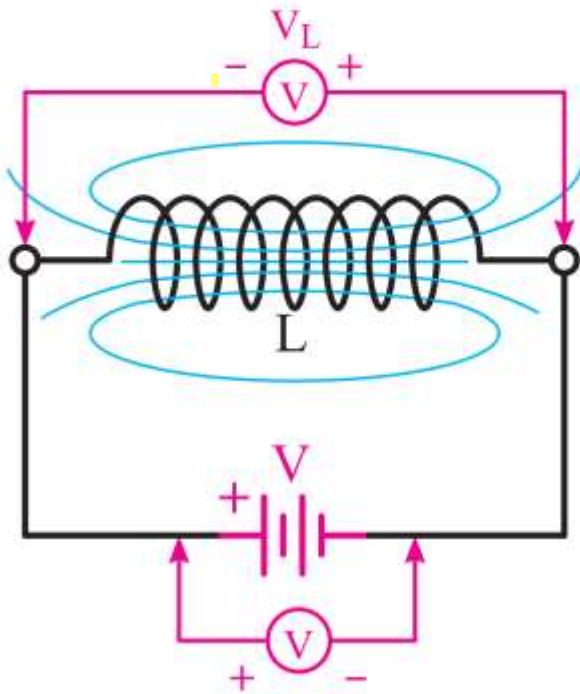
وضعیت مدار در شرایط دشارژ مطابق شکل (۷-۵۸) است.

$$\tau = \frac{L}{R_2} = \frac{1}{2} = 0,5s$$

$$T = 5\tau = 5 \times 0,5 = 2,5s$$

۱۰-۷ نیروی ضد محرکه

اچ.اف.آی. لنز فزیکدان آلمانی تحقیقات تکمیلی را در مورد خاصیت القایی و نیروی محرکه القایی یک سیم پیچ انجام داد دریافت اندازه این نیروی محرکه اولاً به تغییرات جریان جاری در سلف ثانیاً خاصیت اندوکتانسی سلف و ثالثاً جهت این نیروی محرکه القایی (پلاریته دو سر سلف) با جهت نیروی محرکه (ولتاژ) اعمال شده به سلف مخالف است. به همین خاطر لنز در رابطه نهایی خود از یک علامت منفی برای بیان این مطلب استفاده کرد.^۱



شکل ۶۱-۷

Counter-electromotive force

$$V_L = \text{Cemf} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

- علامت نیروی ضد محرکه سلف
- خاصیت اندوکتانسی سلف
- تغییرات جریان نسبت به زمان در سلف

۱۱-۷ خودالقایی از نقطه نظر انرژی

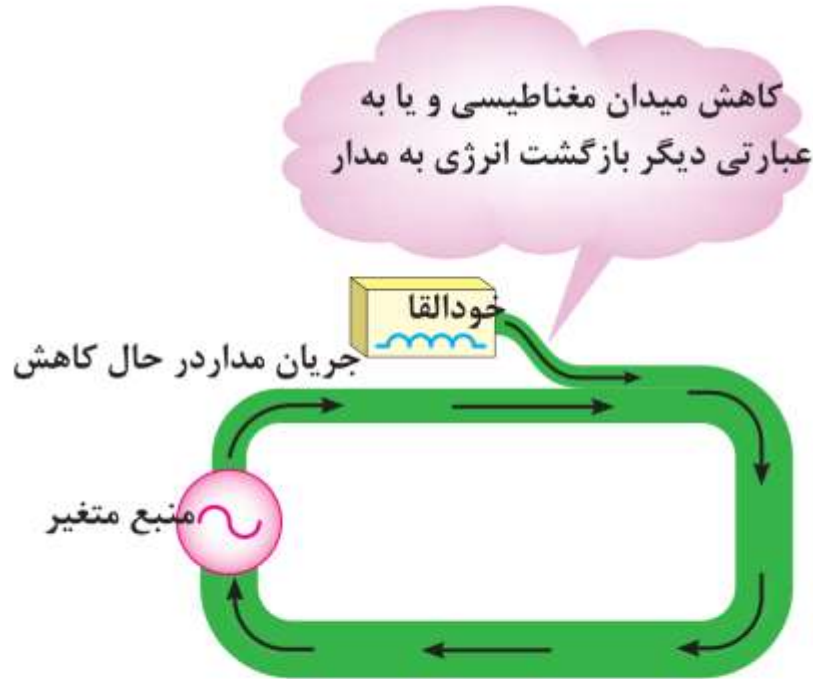
پدیده خودالقایی از نقطه نظر انرژی نیز قابل توصیف است. هنگامی که این عمل اتفاق می افتد ممکن است فرض کرد که میدان مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان با مدار مبادله انرژی می کند. وقتی که جریان مدار زیاد می شود انرژی از مدار خارج شده و در میدان مغناطیسی مطابق شکل (۶۲-۷) در اطراف آن ذخیره می شود. همین امر باعث قوی تر شدن میدان مغناطیسی می گردد. این انتقال انرژی از مدار به صورت افت پتانسیل در دو سر سلف نمایان می شود که منطبق با همان نیروی ضد محرکه القایی است.



وقتی که افزایش جریان متوقف می شود میدان مغناطیسی ثابت می ماند و مبادله انرژی از مدار به میدان قطع می شود و تمام انرژی ایجاد شده بوسیله منبع در مدار مصرف می شود و میدان مغناطیسی تا هنگامی که جریان شروع به کم شدن نکرده است تمام انرژی را که به آن منتقل شده ذخیره می کند.

هنگامی که جریان شروع به کم شدن می کند، میدان مغناطیسی شروع به کم شدن کرد و انرژی ذخیره شده در خود را به مدار از می گرداند. و اثر آن بالا رفتن پتانسیل و خودالقا است.

این یعنی آنکه نیروی محرکه القایی در جهت ولتاژ منبع بوده و بنابراین با آن جمع می شود. شکل ۶۳-۷



شکل ۶۳-۷

از نقطه نظر انرژی، خودالقایی یعنی تبادل انرژی از یک مدار هنگامی که جریان زیادی شود و بازگشت انرژی به مدار هنگامی که جریان کم می شود.

۱۲-۷ انرژی ذخیره شده در سلف

مقدار انرژی ذخیره شده در یک سلف را از رابطه مقابل

می توان بدست آورد.

L - خاصیت اندوکتانسی سلف بر حسب هنری

I_L - جریان عبوری از سلف بر حسب آمپر

W_L - انرژی ذخیره شده در سلف بر حسب ژول

مثال: مقدار انرژی ذخیره شده در سلفی با مشخصات نشان

داده شده در شکل (۷-۶۴) را در صورتی که کلید K برای

مدت زمان طولانی بسته شده باشد چند ژول است؟

حل: در شرایط دایم کار خاصیت سلفی وجود ندارد و

فقط خاصیت اهمی وجود دارد.

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



شکل ۶۴-۷

$$I_L = \frac{V}{r_L} = \frac{10}{10} = 1[A]$$

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

$$W_L = \frac{1}{2} (2) (1)^2$$

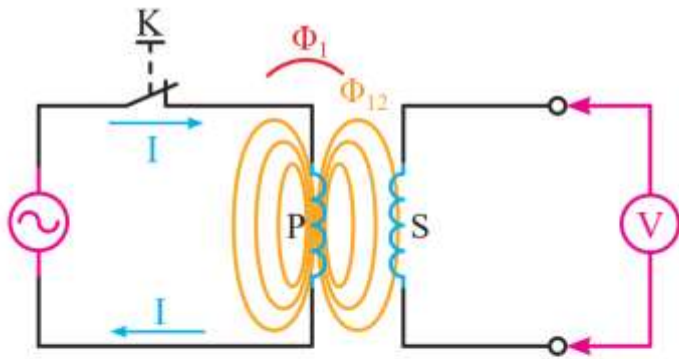
$$W_L = 1[j]$$

۱۳-۷- القا متقابل

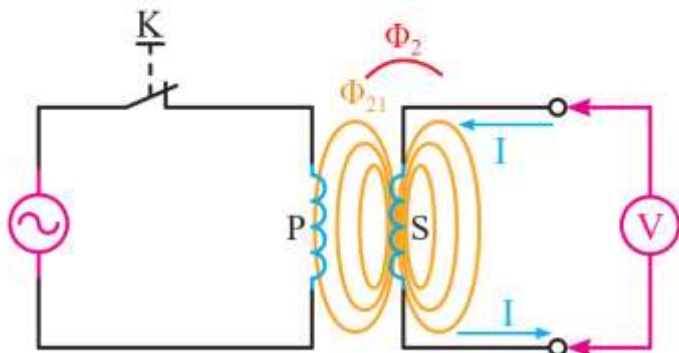
هرگاه مانند شکل (۷-۶۵) سیم پیچ P به یک منبع ولتاژ متغیری متصل شده باشد و در مقابل آن یک سیم پیچ دیگر (مانند سیم پیچ S) قرار گیرد به طوری که به دو سر سیم پیچ یک ولت متر متصل شده باشد مشاهده خواهیم کرد که هرگاه کلید K وصل شده و جریان در سیم پیچ (P) جاری شود ولت متری که در طرف دیگر به سیم پیچ (S) متصل است مقداری را نشان می دهد.

این آزمایش نشان دهنده آن است که هر چند بین سیم پیچ (S) و سیم پیچ (P) ارتباط الکتریکی مداری برقرار نیست اما به ازای تغییر جریانی که در سیم پیچ اول ایجاد شده ولتاژ در سیم پیچ دوم القا شده است. همان گونه که در شکل (۷-۶۶) مشاهده می شود چون مدار سیم پیچ (S) از طریق ولت متر بسته شده است

لذا جریانی از سیم پیچی آن عبور کرده و فورانی در فضای اطراف بویین (S) بوجود می آید که روی سیم پیچ اول اثر مخالف می گذارد. بر همین اساس در مباحث الکتریکی به این پدیده القا متقابل می گویند.



شکل ۷-۶۵

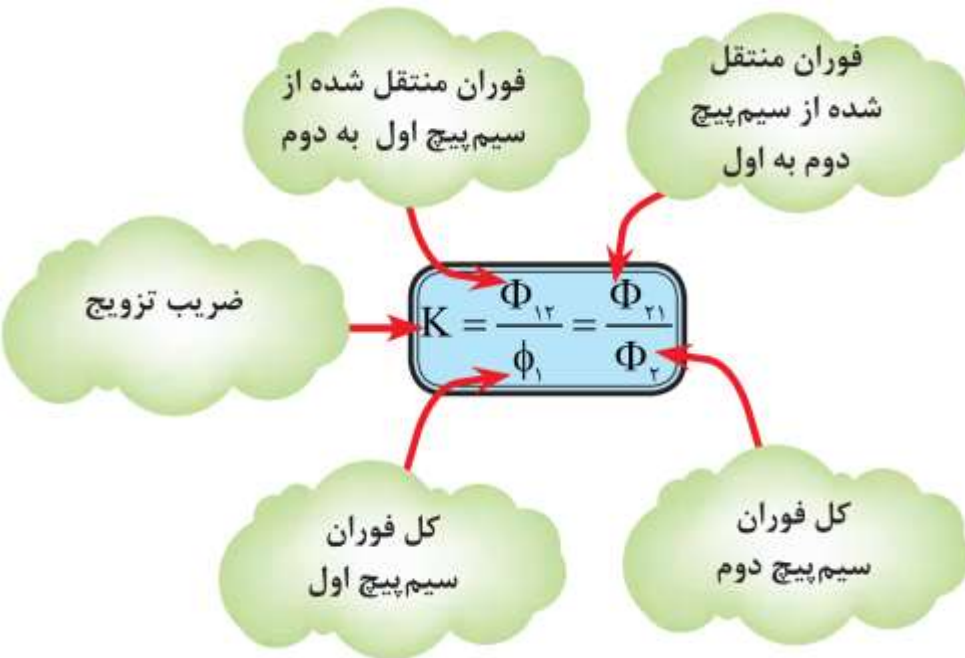


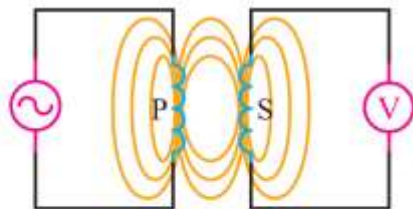
شکل ۷-۶۶

به بیانی دقیق تر القا

متقابل را می توان به منزله مقدار یا درجه القایی که دو سیم پیچ بر یکدیگر اعمال می کنند در نظر گرفت. القا متقابل دو بوبین بر همدیگر به چگونگی اتصال خطوط قوای بین دو بوبین که به نوبه خود بستگی به وضعیت نسبی دو بوبین دارد وابسته است.

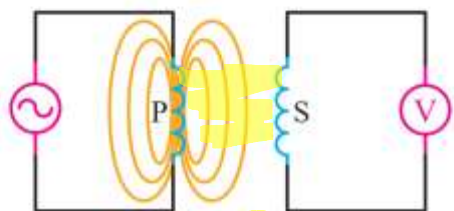
اصطلاحاً به نسبت فوران منتقل شده از سیم پیچ اول به دوم ($\Phi_{۱۲}$) به کل فوران بوجود آمده در سیم پیچ اول (Φ_1) و یا نسبت فوران منتقل شده از سیم پیچ دوم به اول ($\Phi_{۲۱}$) به کل فوران بوجود آمده در سیم پیچ دوم (Φ_2) ضریب تزویج (ضریب پیوست) گفته شده و مقدار آن را بر پایه رابطه مقابل می توان محاسبه کرد.





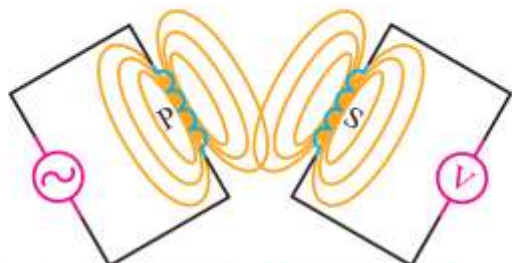
شکل ۶۷-۷

هرگاه درجه اتصال خطوط قوا مانند شکل (۶۷-۷) خوب و کامل باشد مقدار ضریب تزویج ماکزیمم ($K=1$) است.



الف) در صورتی که دو سیم پیچ با فاصله از یکدیگر قرار گیرند فوران سیم پیچ اول روی سیم پیچ دوم اثر نمی گذارد

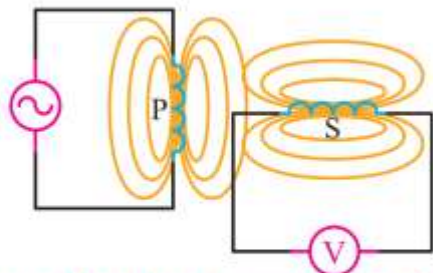
اگر وضعیت قرار گرفتن سیم پیچ ها مانند تصاویر الف و ب و ج شکل (۶۸-۷) دارای فاصله یا زاویه باشد و باعث شود که خطوط قوای سیم پیچ ها یکدیگر را بصورت ناقص و یا کلاً قطع نکنند مقدار ضریب تزویج کاهش خواهد یافت. محدوده تغییرات ضریب تزویج بین صفر تا یک است



ب) اگر دو سیم پیچ نسبت به هم با زاویه قرار گیرند میزان القا و ضریب تزویج کاهش می یابد

$$0 \leq K \leq 1$$

یعنی:



ج) مینیمم کوپلینگ وقتی دو بوبین با هم زاویه ۹۰ درجه می سازند بوجود می آید.

شکل ۶۸-۷

هرگاه اندازه ضریب القا متقابل (کوپلینگ) مابین دو سیم پیچ را بخواهیم از رابطه مقابل می توان بدست آورد.

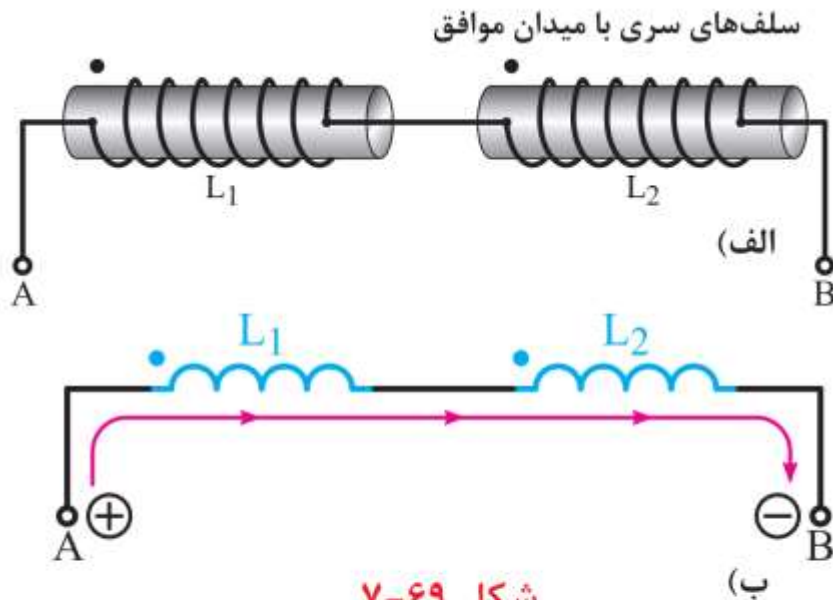
L_1 - ضریب خودالقایی سیم پیچ اول بر حسب هانری [H]

L_2 - ضریب خودالقایی سیم پیچ دوم بر حسب هانری [H]

K - ضریب تزویج

M - ضریب القا متقابل بر حسب هانری [h]

$$M = K\sqrt{L_1 L_2}$$



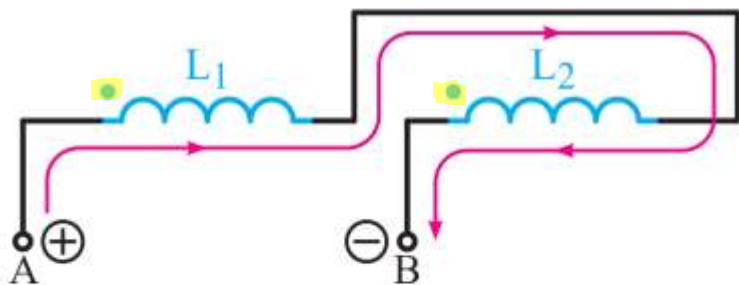
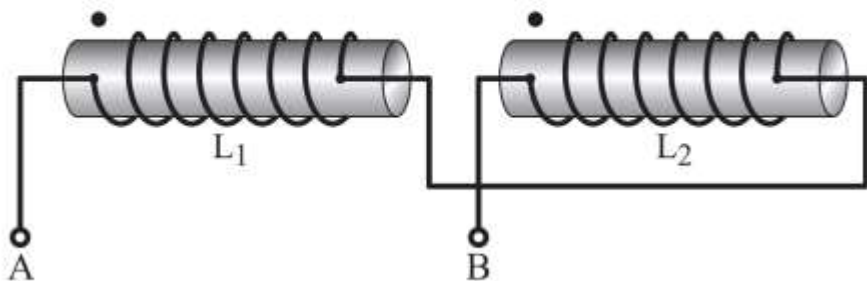
شکل ۶۹-۷

$$L_T = L_1 + L_2 + 2M$$

معمولاً سرهای ورودی جریان یا سرهای شروع پیچش سیم‌ها را با علامت «نقطه» نشان می دهند. اگر دو سلف مطابق شکل (۶۹-۷) با هم سری شده باشند به طوری که جهت پیچش هر دو بوبین یکسان باشد جهت جریان ورودی به سرهای هر دو سیم پیچ با هم موافق بوده و در نتیجه میدان‌های مغناطیسی ایجاد شده دو بوبین یکدیگر را تقویت می کنند.

اندوکتانس کل مدار در حالت تقویت دو میدان را از رابطه مقابل می توان بدست آورد.

سلف‌های سری با میدان مخالف

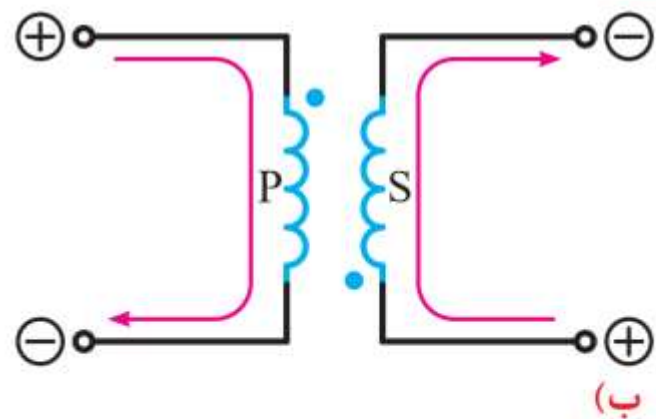
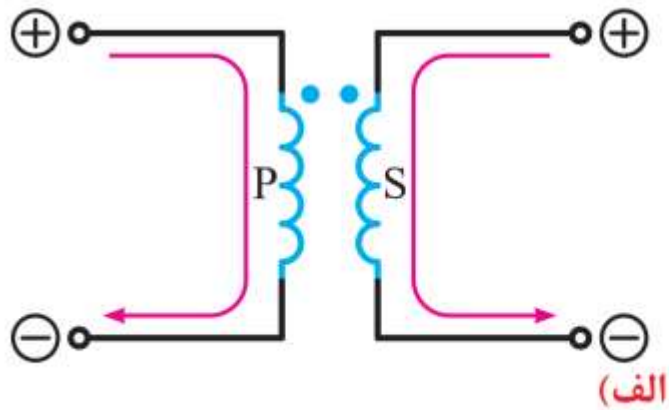


شکل ۷-۷۰

$$L_T = L_1 + L_2 - 2M$$

اگر دو سلف مطابق شکل (۷-۷۰) با هم سری شده باشند بطوری که جهت پیچش هر دو بوبین مخالف هم باشد جهت جریان ورودی به سرهای هر دو سیم پیچ مخالف هم بوده و در نتیجه میدان‌های مغناطیسی ایجاد شده دو بوبین یکدیگر را تضعیف می‌کنند.

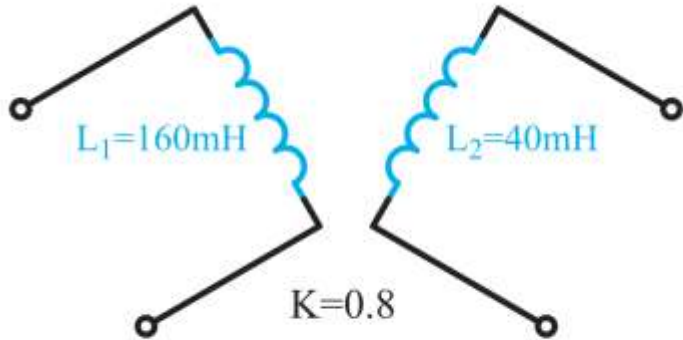
اندوکتانس کل مدار در حالت تضعیف دو میدان را از رابطه مقابل می‌توان بدست آورد.



شکل ۷-۷۱

چگونگی القا نیروی محرکه از یک سیم پیچ به سیم پیچ دیگر که در مقابل هم قرار گرفته اند و وضعیت پلاریته آن ها یکی از دو حالت شکل (۷-۷۱) خواهد بود.

مثال - اندازه ضریب القا متقابل شکل (۷-۷۲) معادل چند هانری است؟



شکل ۷-۷۲

$$M = K\sqrt{L_1 L_2}$$

$$M = .8 \times \sqrt{160 \times 40}$$

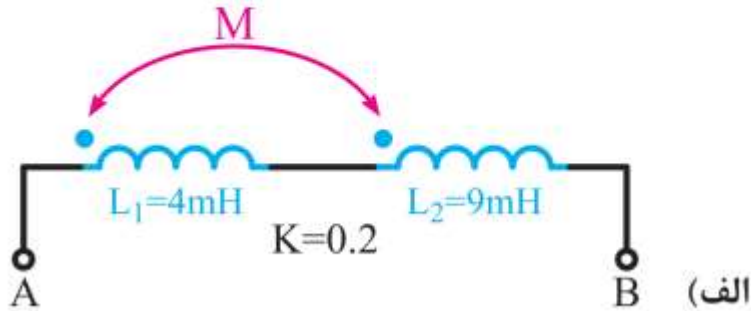
$$M = .8 \times 80 = 64 [\text{mh}]$$

$$M = .064 [\text{h}]$$

حل: با در نظر گرفتن رابطه ضریب القا متقابل مقدار آن را چنین می توان بدست آورد.

مثال - اندازه اندوکتانس کل هر یک از مدارهای نشان داده شده در شکل (۷-۷۳) را بدست آورید.

حل الف)



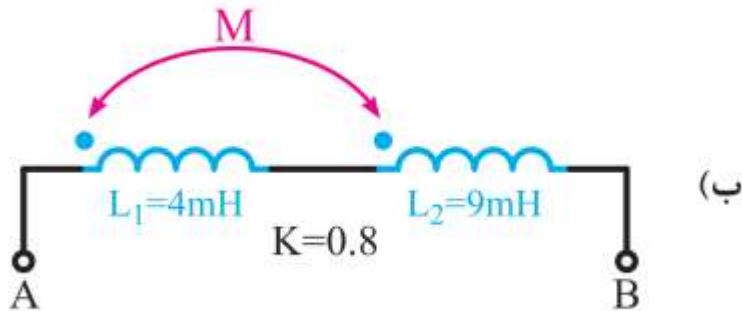
$$M = K\sqrt{L_1 L_2} = .2 \times \sqrt{4 \times 9}$$

$$M = .2 \times 6 = 1.2 \text{ [mh]}$$

$$L_T = L_1 + L_2 + 2M$$

$$L_T = 4 + 9 + (2 \times 1.2) = 15.4 \text{ [mh]}$$

حل ب)



$$M = K\sqrt{L_1 L_2} = .8 \times \sqrt{4 \times 9}$$

$$M = .8 \times 6 = 4.8 \text{ [mh]}$$

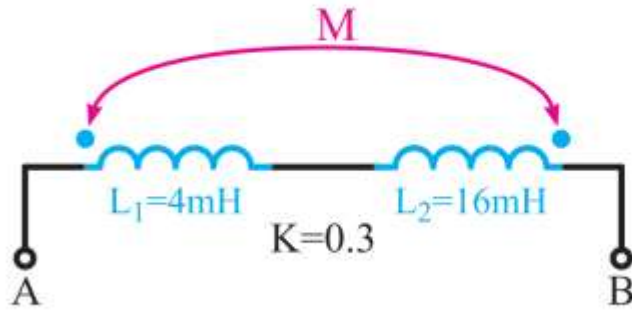
$$L_T = L_1 + L_2 + 2M$$

$$L_T = 4 + 9 + (2 \times 4.8) = 22.6 \text{ [mh]}$$

شکل ۷-۷۳

مثال - اندازه اندوکتانس کل هر یک از مدارهای نشان داده شده در شکل (۷-۷۴) را بدست آورید.

حل الف)



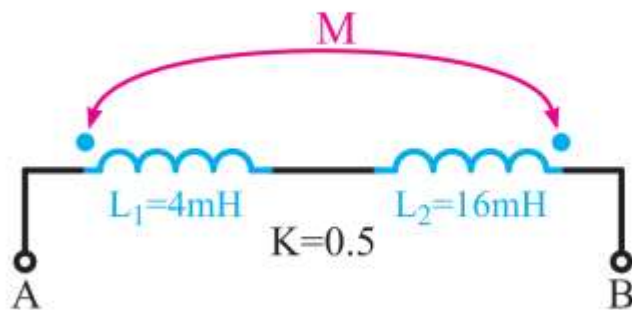
$$M = K\sqrt{L_1 L_2} = .3 \times \sqrt{4 \times 16}$$

$$M = .3 \times 8 = 2.4 \text{ [mh]}$$

$$L_T = L_1 + L_2 - 2M$$

$$L_T = 4 + 16 - (2 \times 2.4) = 15.2 \text{ mH}$$

حل ب)



الف)

$$M = K\sqrt{L_1 L_2} = .5 \times \sqrt{4 \times 16}$$

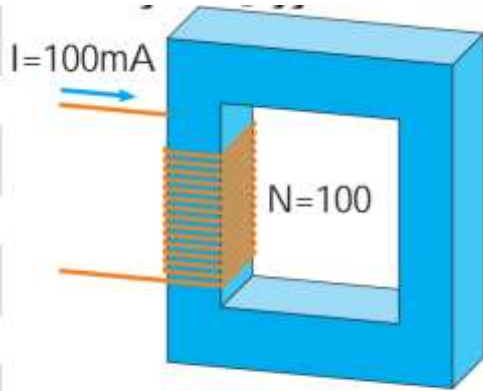
$$M = .5 \times 8 = 4 \text{ [mh]}$$

$$L_T = L_1 + L_2 - 2M$$

$$L_T = 4 + 16 - (2 \times 4) = 12 \text{ [mh]}$$

شکل ۷-۷۴

ب)



شکل ۷-۷۵

1 فوران عبوری از مدار مغناطیسی شکل ۷-۷۵ چقدر است؟
 $R_m = 675/5 \times 10^6 \text{ A/Wb}$



شکل ۷-۷۶

2 شدت میدان مغناطیسی شکل ۷-۷۶ را در صورتی که قطر متوسط حلقه 10cm باشد حساب کنید ($\pi=3$).

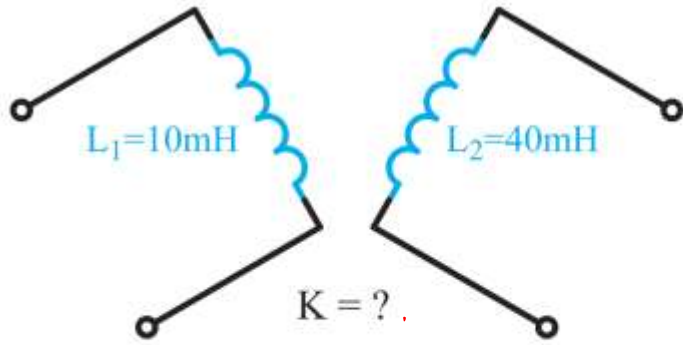
3 سیم پیچی به طول 50 سانتیمتر و سطح مقطع 0.2 مترمربع با هسته ای به ضریب نفوذ 2000 و دارای 1000 دور مطلوبست:

الف) ضریب خودالقایی آن چند میلی هانری است؟

ب) در صورتی که بخواهیم ضریب خودالقایی آن سه برابر شود ضریب نفوذ هسته چقدر باید شود؟

4 ثابت زمانی مداری با یک مقاومت $2/2$ کیلو اهم و سلفی با اندوکتانس 500 میکروهانری چند ثانیه است؟ ضمناً

مدت زمان شارژ را حساب کنید.



شکل ۷-۷۹

5. اگر اندازه ضریب القا متقابل شکل مقابل 10mH باشد

اندازه ضریب تزویجی شکل (۷-۷۹) چقدر است؟

6. هرگاه از سلفی با اندوکتانس 50mH جریانی برابر ۴

آمپر عبور کند انرژی ذخیره شده در سیم پیچ چند ژول است؟

7. اندوکتانس کل هر یک از مدارهای نشان داده شده در شکل (۷-۸۰) چند میلی هانری است؟

