فصل اول

الکترومغناطیس

هدف‌های رفتاری

پس از پایان این فصل از فراگیر انتظار می‌رود که:

- الکترومغناطیس را تعریف کند.
- میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان را تعریف کند.
- رابطه میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان را توضیح دهد.
- میدان مغناطیسی اطراف سیم‌پیچ حامل جریان را تعریف کنید.
- رابطه میدان مغناطیسی اطراف سیم‌پیچ حامل جریان را توضیح دهد.
- کمیت‌های مغناطیسی را نام ببرد.
- نیروی محرکه مغناطیسی را تعریف کند.
- رابطه نیروی محرکه مغناطیسی را توضیح دهد.
- شدت میدان مغناطیسی را تعریف کند.
- رابطه شدت میدان مغناطیسی را توضیح دهد.
- فوران مغناطیسی را تعریف کند و واحدهای آن را نام ببرد.
- چگالی میدان مغناطیسی را تعریف کند و رابطه آن را توضیح دهد.
- ضریب نفوذ میدان مغناطیسی و رابطه آن را توضیح دهد.
- ضریب نفوذ میدان مغناطیسی در خلأ را تعریف کند و عدد خاص آن را بیان کند.
- ضریب نفوذ میدان مغناطیسی نسبی را تعریف کند و رابطه آن را توضیح دهد.
- ضریب نفوذ نسبی را در مواد مختلف با یکدیگر مقایسه کند.
- منحنی مغناطیسی مواد را توضیح دهد و با استفاده از آن، اطلاعات مورد نیاز را استخراج کند.
- پس‌ماند مغناطیسی را تعریف کند.
- اثر و منحنی هیسترزیس را توضیح دهد.
- منحنی هیسترزیس را در مواد مغناطیسی سخت، نرم و فریت توضیح دهد.

- منحنی‌های هیسترزیس را در مواد مغناطیسی سخت، نرم و فریت مقایسه کند.
- مدارهای مغناطیسی را تعریف کند و اجزای آن را نام ببرد.
- مقاومت مغناطیسی را تعریف کند و رابطه آن را توضیح دهد.
- مقاومت مغناطیسی یک مدار مغناطیسی با فاصله هوایی را تعریف کند و رابطه آن را توضیح دهد.
- اجزای یک مدار مغناطیسی ساده را با یک مدار الکتریکی ساده مقایسه کند.
- روابط حاکم بر مدار مغناطیسی ساده را با مدار الکتریکی ساده مقایسه کند.
- یک مدار مغناطیسی ساده را به یک مدار الکتریکی ساده تبدیل و شکل آن را رسم کند.
- روابط حاکم بر مدار مغناطیسی ساده را با کمک قانون نیروی محرکه مغناطیسی تحلیل نماید.
- روابط حاکم بر مدار مغناطیسی ساده با فاصله هوایی را به کمک قانون نیروی محرکه مغناطیسی تحلیل نماید.
- کاربردهایی از الکترومغناطیس را بیان کند.
- پرسش‌های مربوط به این فصل را پاسخ دهد.
- تمرین‌های مربوط به این فصل را حل نماید.

مقدمه

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

در سال ۱۸۲۰ میلادی فیزیک‌دان دانمارکی به نام اورستد[1] برای اولین بار متوجه شد که جریان الکتریکی می‌تواند آثار مغناطیسی بوجود آورد. این کشف مهم دو علم الکتریسیته و مغناطیس را به یکدیگر مربوط ساخت. برای تشریح رابطه بین جریان الکتریکی و مغناطیس نظریه‌ای به‌وجود آمده است که به آن نظریه الکترو مغناطیس[2] می‌گویند. تأثیر میدان مغناطیسی اطراف یک هادی حامل جریان بر عقربه قطب‌نما در شکل (۱ ـ ۱) نشان داده شده است.

شکل ۱ـ۱

مشاهده می‌شود عقربه قطب‌نما، عمود بر هادی

۱. Oersted
۲. Electro Magnets

جریان قرار می‌گیـــرد. وقتی جهت جریان الکتریکی در هادی تغییر داده شـــود عقربه نیز می‌گردد و جهت آن تغییر می‌کند.

یکی از حوزه‌هایی که انتظار می‌رود فناوری نانو[1] اثر فراوانی بر پیشرفت آن داشته باشد، مغناطیس‌ها و مواد مغناطیسی اســـت. با ورود فناوری نانو به علم و صنعت مغناطیس، بهبود زیادی در کیفیت مغناطیس‌ها ایجاد شـــده اســـت و مغناطیس‌هایی با ابعاد کوچک و نیروی مغناطیسی بزرگ ساخته شده‌اند.

هانس کریستن اورستد

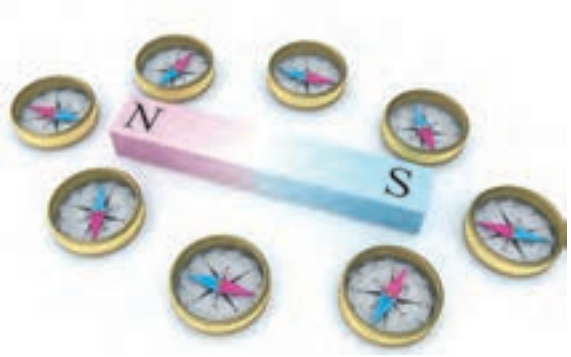
داروساز، فیزیک‌دان و اندیشمند نابغه دانمارکی در سال ۱۷۷۷ دیده به جهان گشـــود. پدرش داروخانه داشت، بنابراین او در کودکی با بسیاری از مواد آشنایی پیدا کرد که این آشـــنایی سبب تحصیل در همین رشته شد. وی در سال ۱۷۹۹ در ســـن ۲۲ ســـالگی به اخذ درجه دکترا در داروشناسی نایل گردید. و در سال ۱۸۰۶ با ســـمت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

منبع: کتاب زندگی‌نامه دانشمندان جهان

۱ ـ ۱ ـ میدان مغناطیسی

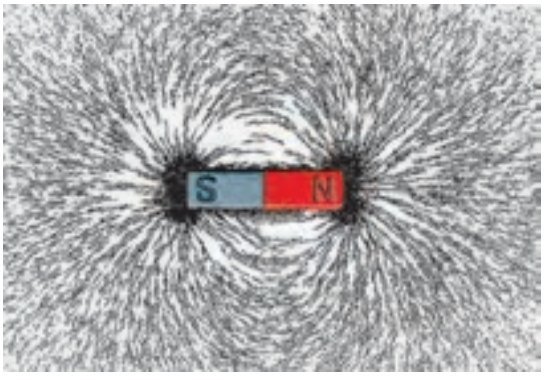
در فضای اطراف یـــک آهن‌ربا یا مغناطیس طبیعی خاصیتـــی وجود دارد که ذرات آهـــن را به خود جذب می‌کند. به این فضا «میدان مغناطیسی»[2] می‌گویند.

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 (شکل۲ ـ ۱).



شکل ۲ ـ ۱

با قرار دادن یک مقوا بر روی یک آهن‌ربا و پاشیدن براده‌هـــای آهن به روی مقوا می‌توان خطوط نـــیروی میـــدان مغناطـــیسی را مشاهـــده کـــرد. شکل (۳ ـ ۱)



شکل ۳ ـ ۱

هر خط نیروی میدان مغناطیســـی را یک ماکسول[3] (max) می‌گویند.

۱. Nano Technology ۲. Magnetic Field ۳. Max well

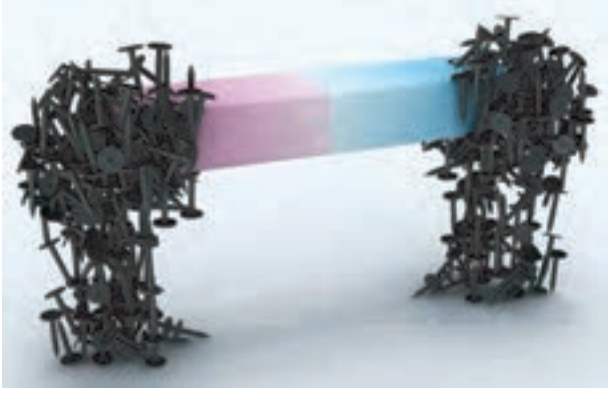
ماکسول

جیمز کلارک ماکسـول در ۱۳ نوامبر سال ۱۸۳۱ در ادینبرای اسکاتلند متولد شـد. از کودکی به ریاضیات و فیزیک علاقه فراوان داشـت، در سال ۱۸۴۷ وارد دانشـگاه ادینبرا شـد و در ۱۸۵۰ به دانشـگاه کمبریج رفت و در سال ۱۸۵۴ از تحصیل فراغت یافت.

ماکسـول 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. ولی عمر وی کوتاه بود و در سال ۱۸۷۹ در سن ۴۹ سالگی وفات یافت.

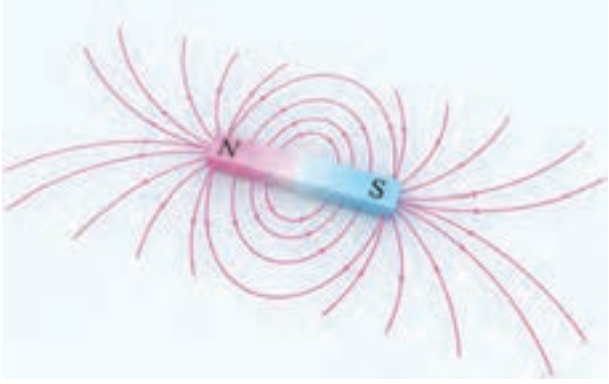
منبع www.roshd.ir

خطوط نیروی میدان مغناطیسی در دو نقطه معین از میدان مغناطیسی دارای فشـردگی بیشتری نسبت به سـایر نقاط است این نقاط را قطب‌های مغناطیسی[۱] می‌نامند و با حروف N و S آنها را نشـان می‌دهند. اثر جذب در قطب‌های میدان مغناطیسـی بسیار قوی‌تر از سایر نقاط میدان مغناطیسی است (شکل ۴ ـ ۱).



شکل ۴ ـ ۱

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 ۵ ـ ۱).



شکل ۵ ـ ۱ خطوط نیروی میدان مغناطیسی

۲ ـ ۱ ـ فوران مغناطیسی

در شـکل (۳ ـ ۱) خطوط نیروی میدان مغناطیسی اطراف یک آهـن‌ربا نمایش داده شده است. به مجموع خطوط نیروی میدان مغناطیسی اطراف یک مغناطیس یا آهن‌ربا «فوران» یا «شـار مغناطیسی[۲]» می‌گویند و آن را با φ نشان می‌دهند[۳].

واحد فوران مغناطیسی ولت.ثانیه ($v.sec$) است که اصطلاحاً به آن وِبر wb می‌گویند. یک وبر[۴] برابر با 10^8

۱. Magnetic poles ۲. Magnetic Flux ۳. در برخی کتب آن را Flow می‌نامند. ۴. Weber

خط نیروی میدان مغناطیسی یا ماکسول است. پس:

$$۱[v.sec] = ۱[wb] = ۱۰^{۸}[max] \qquad (۱-۱)$$

واحد رایج فوران مغناطیسی وبر wb است و واحد کوچک‌تر آن میلی وبر mwb می‌باشد. یک وبر برابر با $۱۰^{۳}$ میلی وبر است. یعنی:

$$۱[wb] = ۱۰^{۳}[mwb] \qquad (۱-۲)$$

ویلهم وبر

ویلهم وبر در سال ۱۷۹۵ میلادی در آلمان به دنیا آمد. وی فیزیک‌دان بود و شهرتش به مطالعات در زمینه مغناطیس مربوط می‌شود. وبر در سال ۱۸۷۸ میلادی دیده از جهان فرو بست.

نیکولا تسلا

نیکولا تسلا در سال ۱۸۵۶ در امپراتوری اتریش ـ مجارستان متولد شد و در سال ۱۸۸۴ به عنوان یک فیزیک‌دان به ایالات متحده آمریکا مهاجرت کرد. 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 که امروزه هنوز جذاب هستند. جهان به افتخار نام او نام واحد چگالی شار مغناطیسی را تسلا گذاشت. نیکولا تسلا در سال ۱۹۴۳ در اتاق یک هتل در شهر نیویورک دیده از جهان فرو بست.

مثال ۱ ـ ۱ ـ فوران مغناطیسی یک آهن‌ربا ۲/۵ میلی وبر $[mwb]$ است. فوران این آهن‌ربا چند ماکسول $[max]$ است؟

حل:

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

$$\frac{۱wb}{\varphi} = \frac{۱۰^{۳}mwb}{۲/۵mwb}$$

$$\varphi = \frac{۲/۵ \times ۱}{۱۰^{۳}}$$

$$\varphi = ۲/۵ \times ۱ \times ۱۰^{-۳}$$

$$\varphi = ۲/۵ \times ۱۰^{-۳}[wb]$$

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

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

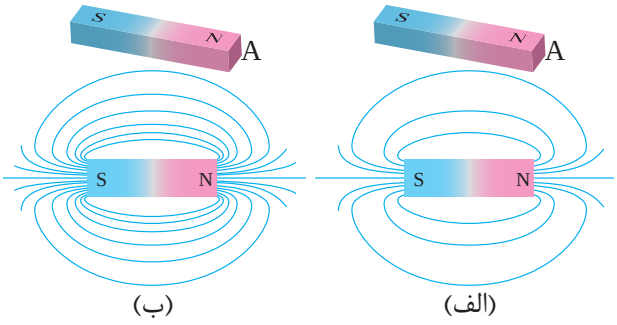
$$\varphi=\frac{2/5\times10^{-3}\times10^8}{1}$$

$$\varphi=2/5\times10^5=250000\,[max]$$

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

۳ ـ ۱ ـ چگالی فوران مغناطیسی

دو آهن‌ربـــا بـــا ابعاد مشـــابه و فوران‌های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ماکسول که سطح مقطع قطب آنها با A مشخص می‌باشد در شکل (۶ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۶ ـ ۱

میدان مغناطیسی آهن‌ربای شکل (الف ـ ۶ ـ ۱) در ســـطح مقطع قطب خود ۱۰۰۰ و میدان مغناطیســـی آهن‌ربای شکل (ب ـ ۶ ـ ۱) در سطح مقطع قطب خود ۲۰۰۰ خط نیرو جای داده اســـت. سطح مقطع قطب A هـــر دو آهـــن‌ربـــا برابر است، اما آهـــن‌ربـــای شـــکل (ب ـ ۶ ـ ۱) خطوط نیروی مغناطیسی یا فوران مغناطیسی بیشتری در سطح مقطع قطب A خود جای داده است. به عبارتی فوران مغناطیسی در سطح مقطع قطب A آهن‌ربای شـــکل (ب ـ ۶ ـ ۱) نسبت به شکل (الف ـ ۶ ـ ۱) فشـــرده 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 مغناطیســـی»[1] تعریف می‌شود و آن را با B نشان می‌دهند.

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

چگالی فوران مغناطیســـی از رابطه (۳ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$B=\frac{\varphi}{A} \qquad (1\text{-}3)$$

در این رابطه:

φ فوران مغناطیسی بر حسب وبر wb

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

B چـــگـــالی فـــوران مـــغناطیسی بـــر حـــســـب وبر بر مترمربع $\left[\frac{wb}{m^2}\right]$

واحد چگالی فوران مغناطیســـی B وبر بر مترمربع $\left[\frac{wb}{m^2}\right]$ است که اصطلاحاً به آن تسلا[2] [T] می‌گویند و واحد کوچک‌تر آن ماکسول بر سانتی‌مترمربع $\left[\frac{max}{cm^2}\right]$ اســـت که اصطلاحاً به آن گاوس[3] [G] گفته می‌شـــود.

پس:

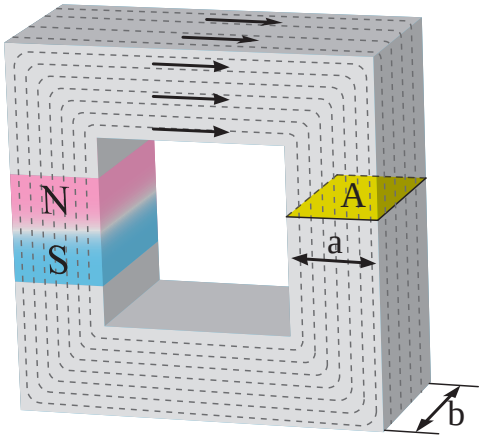
$$1\left[\frac{wb}{m^2}\right]=1\,[T]=10^4\,[G] \qquad (1\text{-}4)$$

۱. Magnetic flux Density
۲. Tesla
۳. Gauss

گاوس

کارل فردریش گاوس در سال ۱۷۷۷ میلادی در آلمان به دنیا آمد. معاصرانش او را سلطان ریاضیدانان می‌نامیدند. استعداد ریاضی گاوس از دوران کودکی ظاهر شـــد. خود او، وقتی دوران کودکی‌اش را به یاد می‌آورد، به شوخی می‌گفت: «من شـــمردن را پیش از حـــرف زدن یاد گرفتم» او آموزش عالی خود را در دانشـــگاه گوتینگن گذراند. بعدها به مدت ۵۰ ســـال، کرســـی استادی همین دانشگاه را به عهده داشت. گاوس در سال ۱۸۵۵ درگذشت.

مثال ۲ ـ ۱ ـ آهـــــن‌ربایی با فوران مغناطیســـی $0/02\ mwb$ مطابق شکل (۷ ـ ۱) در نظر است. چگالی فوران مغناطیسی در سطح مقطع A هسته چند گاوس می‌باشـــد؟ در صورتی‌کـــه $b=20\ mm$ و $a=10\ mm$ باشد.



شکل ۷ ـ ۱

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:

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

$$A = \frac{200 \times 1}{10^6} = 200 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-4}\left[m^2\right]$$

ـ واحد فوران مغناطیسی به وبر تبدیل می‌شود:

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

$$\varphi = \frac{0/02 \times 1}{10^3} = 0/02 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-5}\ [wb]$$

ـ از رابطه (۳ ـ ۱) چگالی فوران مغناطیسی به‌دست می‌آید:

$$B = \frac{\varphi}{A} = \frac{2 \times 10^{-5}}{2 \times 10^{-4}} = 0/1\left[\frac{wb}{m^2}\right] = [T]$$

ـ واحد چگالی فوران مغناطیســـی به گاوس تبدیل می‌شود:

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

$$B = \frac{0/1 \times 10^4}{1} = 0/1 \times 10^4 = 1000\ [G]$$

پرسش ۱ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ـ نظریه الکترومغناطیس رابطه ..... و ..... را تشریح می‌کند.

۲ـ میدان مغناطیسی بر قطب‌نما تأثیر ..... .

۳ـ به مجموع خطوط نیروی مغناطیسی اطراف یک مغناطیس ..... یا ..... گویند.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ـ در فضای اطراف یک آهن‌ربا خاصیتی وجود دارد که ذرات آهن را به خود جذب می‌کند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ـ واحد فوران ولت ثانیه یا تسلا است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ـ قطب‌های مغناطیسی را تعریف کنید.

۲ـ چگالی فوران مغناطیسی را تعریف کنید.

۳ـ واحد هر یک از کمیت‌های زیر را بنویسید.

الف ـ فوران

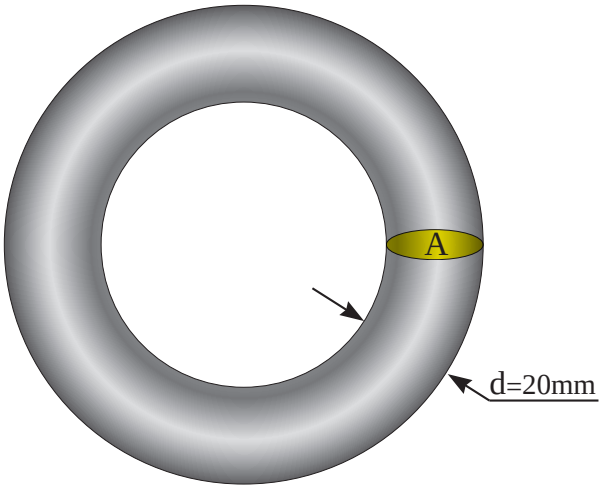
ب ـ چگالی فوران مغناطیسی

ج ـ خطوط نیروی مغناطیسی

تمرین ۱ ـ ۱

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

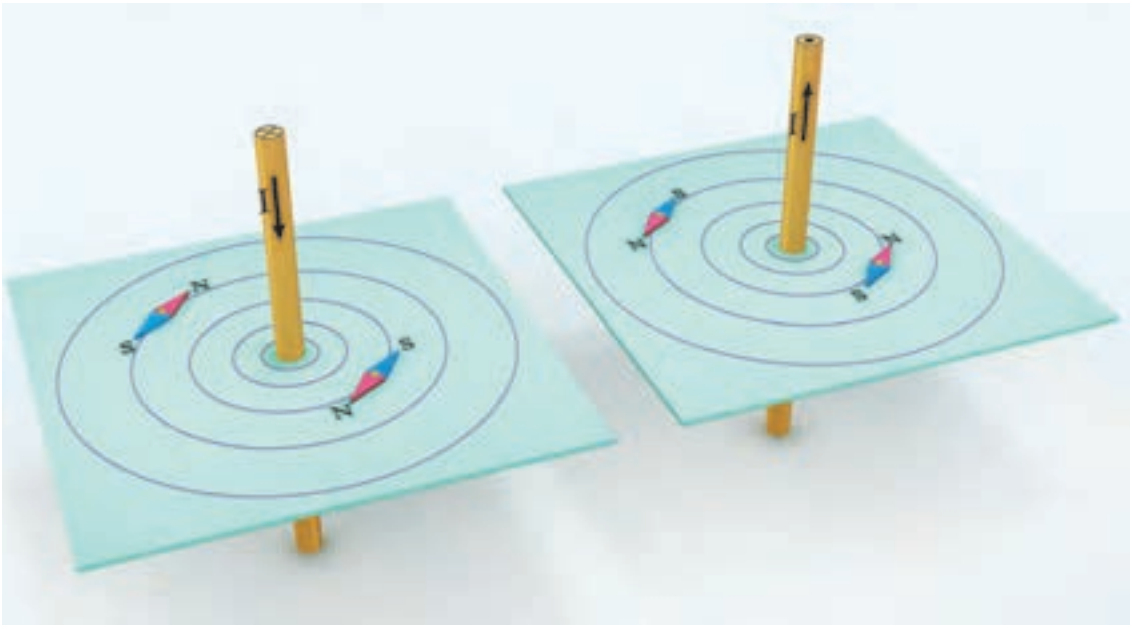
۲ـ آهن‌ربایی با چگالی فوران مغناطیسی G ۱۰۰۰۰ مطابق شکل (۸ ـ ۱) در نظر است. فوران مغناطیسی در سطح مقطع A هسته چند میلی وبر است؟



شکل ۸ ـ ۱

۴ ـ ۱ ـ میدان مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی

جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. اورستد اولین کسی بود که به بررسی ارتباط بنیادی میان جریان الکتریکی و مغناطیس پرداخت و نظریه الکترومغناطیس را ارائه کرد. وی برای تشریح این نظریه با قرار دادن یک عقربه مغناطیسی در تمام نقاط مختلف اطراف یک هادی حامل جریان مطابق شکل (۹ ـ ۱) مشاهده کرد عبور جریان الکتریکی باعث انحراف عقربه مغناطیسی می‌شود و با تغییر جهت جریان الکتریکی در هادی، جهت عقربه‌های مغناطیسی تغییر می‌کند.



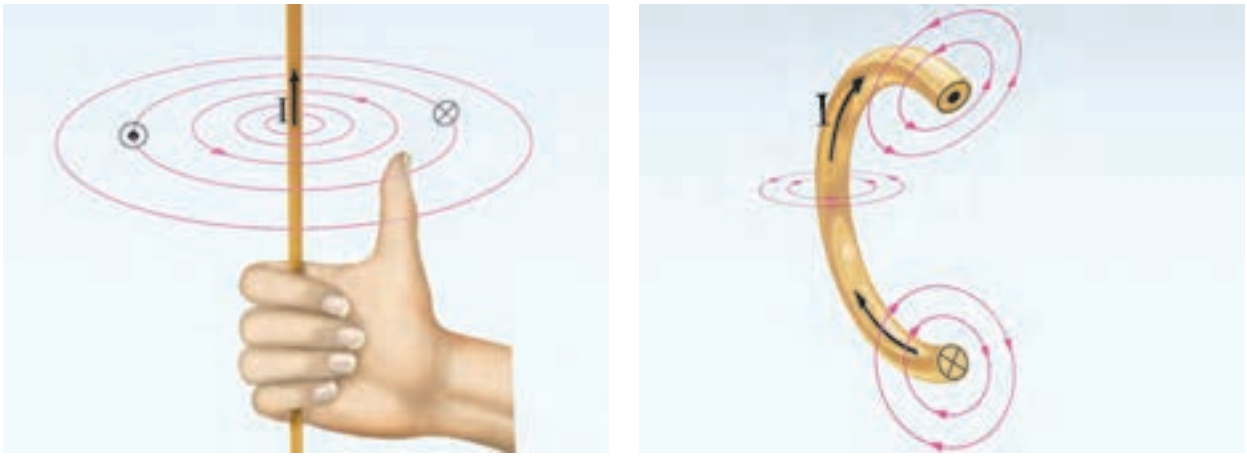
شکل ۹ ـ ۱

جهت میدان الکترومغناطیسی به جهت جریان الکتریکی بستگی دارد.

۵ ـ ۱ ـ جهت میدان الکترو مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی

برای تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی علاوه بر استفاده از عقربه مغناطیسی مطابق شکل (۹ ـ ۱) می‌توان از قانون شست[۱] نیز استفاده کرد. برای این منظور مطابق شکل (۱۰ ـ ۱) 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.

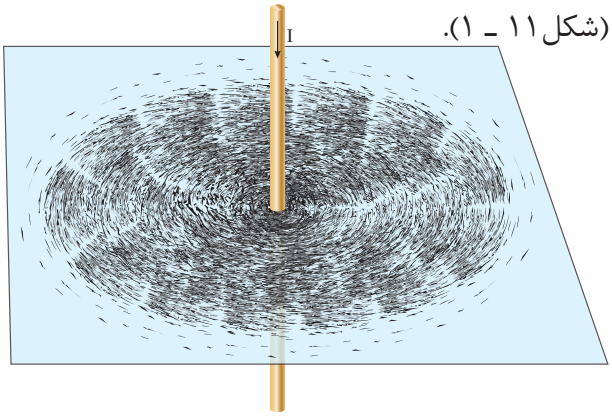


شکل ۱۰ ـ ۱

۱. Thumb Rule

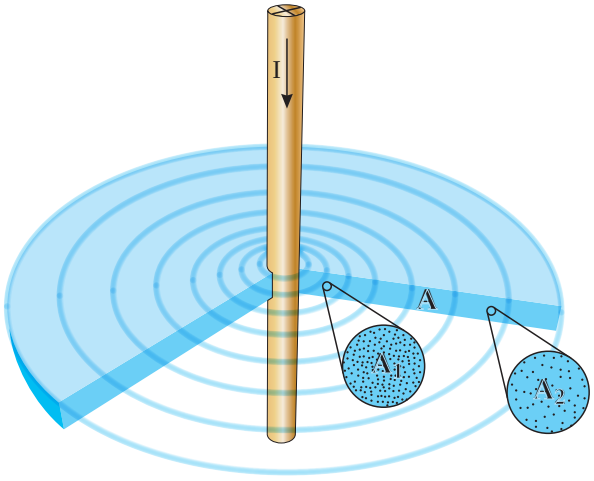
۶ ـ ۱ ـ چگالی فوران مغناطیسی اطراف یک هادی حامل جریان الکتریکی

اورستد در ادامه آزمایش‌های خود، هادی حامل جریان الکتریکی را از میان یک صفحه‌ی مقوایی عبور داد و بر روی صفحه مقوایی براده‌های آهن پاشید (شکل ۱۱ ـ ۱).



شکل ۱۱ ـ ۱

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 (۱۲ ـ ۱) نشان داده شده است.

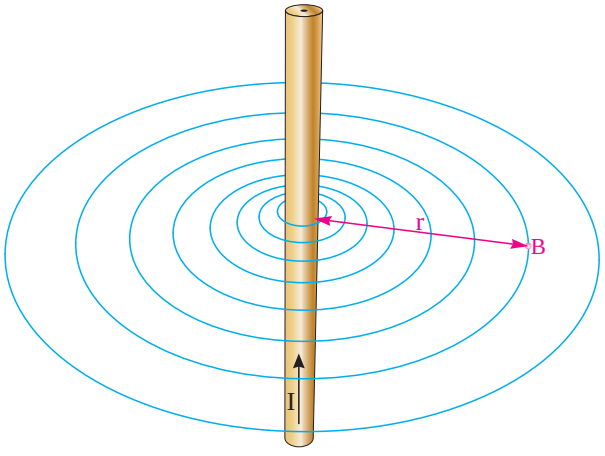


شکل ۱۲ ـ ۱

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.

۷ ـ ۱ ـ مقدار چگالی فوران مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی

آمپر[۱] و 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 (۵ ـ ۱) را برای تعیین مقدار چگالی فوران مغناطیسی B در نقطه‌ای به فاصله r از یک هادی حامل جریان به شدت I را بر اساس شکل (۱۳ ـ ۱) ارائه کردند.



شکل ۱۳ ـ ۱

۱. Ampere

$$B = k\frac{I}{r} \qquad (۱-۵)$$

در این رابطه:

B چگالی فوران میدان مغناطیسی بر حسب $\left[\frac{wb}{m^۲}\right]$

K ضریبی است که به محیط اطراف هادی بستگی دارد و برای هوا مقدار آن ۲×۱۰^{-۷} بر حسب $\left[\frac{wb}{A.m}\right]$ است.

I شدت جریان الکتریکی هادی بر حسب [A]

r فاصله از هادی بر حسب [m]

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

حل:

ـ واحد فاصله بر حسب متر تبدیل می‌شود.

$$\frac{۱m}{r} = \frac{۱۰۰cm}{۱cm}$$

$$r = \frac{۱\times۱}{۱۰۰} = ۰/۰۱m$$

ـ چگالی میدان مغناطیسی از رابطه (۵ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

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

$$B = ۲\times۱۰^{-۷}\times\frac{۱۰}{۰/۰۱} = ۲\times۱۰^{-۴}\left[\frac{wb}{m^۲}\right] = [T]$$

ـ واحد چگالی فوران مغناطیسی به گوس تبدیل می‌شود:

$$\frac{۱T}{۲\times۱۰^{-۴}T} = \frac{۱۰^۴G}{B}$$

$$B = \frac{۲\times۱۰^{-۴}\times۱۰^۴}{۱} = ۲[G]$$

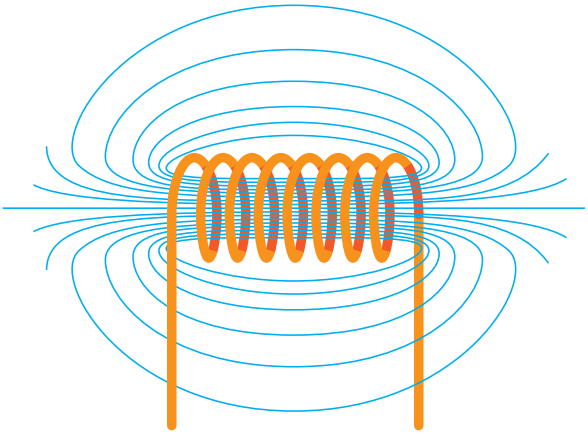
آمپر

آندره آمپر در سال ۱۷۷۵ در شهر لیون فرانسه به دنیا آمد. در سال ۱۸۰۹ سمت استادی آنالیز و مکانیک پلی‌تکنیک را به‌دست آورد. وی در سال ۱۸۳۶ به دنبال کار مداوم که روح و تن او را خسته و فرسوده کرده بود در گذشت.

۸ ـ ۱ ـ میدان الکترومغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی

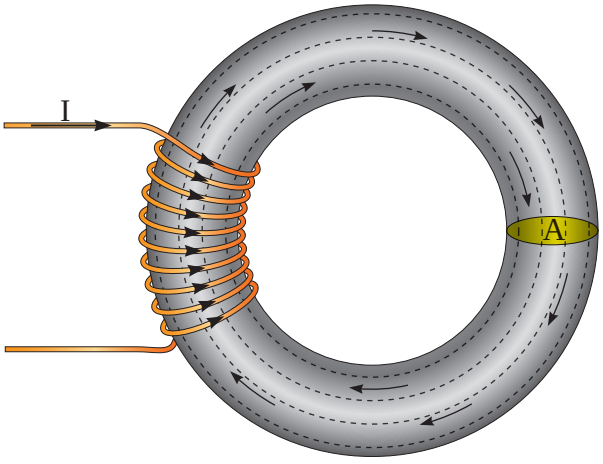
میدان الکترومغناطیسی هادی حامل جریان الکتریکی در سرتاسر دو طرف هادی توزیع می‌شود و متمرکز نیست و مقدار چگالی فوران مغناطیسی B در هر نقطه از اطراف هادی متغیر و کم است. اگر هادی حامل جریان الکتریکی به صورت سیم‌پیچ[۱] در آورده شود ضمن اینکه میدان الکترو مغناطیسی در درون سیم‌پیچ متمرکز می‌شود، چگالی فوران مغناطیسی B نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱۴ ـ ۱).

۱. Winding



شکل ۱۴ ـ ۱

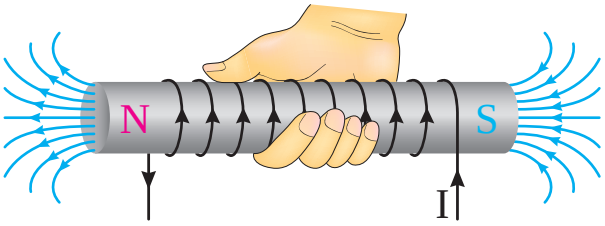
با قرار دادن سیم‌پیچ بر روی یک هسته از جنس مواد فرومغناطیس[1] مطابق شکل (۱۵ ـ ۱) و عبور جریان الکتریکی از آن، میدان الکترومغناطیسی با چگالی B بیشتری نسبت به سیم‌پیچ با هسته هوا ایجاد می‌شود. هسته فرومغناطیس باعث می‌شود، میدان الکترومغناطیسی درون سیم‌پیچ متمرکزتر شود، لذا چگالی فوران مغناطیسی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵ ـ ۱

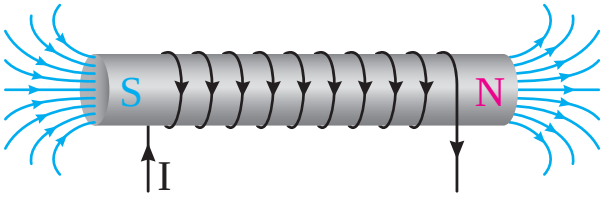
۹ ـ ۱ ـ جهت میدان الکترو مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی

جهت میدان الکترومغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی از قاعده دست راست[2] تعیین می‌شود. بدین منظور مطابق شکل (۱۶ ـ ۱) 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 ۱۶ ـ ۱

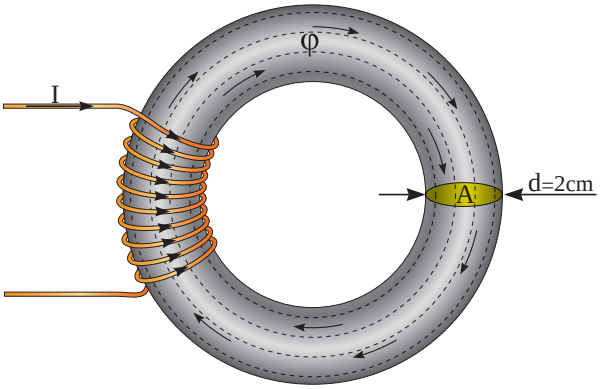
جهت میدان مغناطیسی سیم‌پیچ نیز تابع جهت جریان سیم‌پیچ است و با تغییر جهت جریان، جهت میدان مغناطیسی تغییر می‌کند (شکل ۱۷ ـ ۱).



شکل ۱۷ ـ ۱

مثال ۴ ـ ۱ـ سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی شکل (۱۸ ـ ۱) میدان الکترو مغناطیسی با فوران mwb ۳/۱۴ در هسته تولید می‌کند. چگالی فوران مغناطیسی در هسته چند تسلا است؟

۱. مواد فرومغناطیسی خواص آهن‌ربایی از خود نشان می‌دهند. آهن و آلیاژهای آهن، مواد فرومغناطیس هستند.
۲. Right-Hand Rule



شکل ۱۸ ـ ۱

حل:

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

$$\frac{1wb}{\varphi}=\frac{10^{3}mwb}{3/14}\Rightarrow\varphi=\frac{3/14\times1}{10^{3}}=3/14\times10^{-3}\left[wb\right]$$

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

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

$$\frac{1m^{2}}{A}=\frac{10^{4}cm^{2}}{3/14}\Rightarrow A=\frac{1\times3/14}{10^{4}}=3/14\times10^{-4}\left[m^{2}\right]$$

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

$$B=\frac{3/14\times10^{-3}}{3/14\times10^{-4}}=10\left[\frac{wb}{m^{2}}\right]=\left[T\right]$$

پرسش ۲ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ـ جریان الکتریکی میدان ..... تولید می‌کند.

۲ـ برای تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان علاوه بر استفاده از ..... می‌توان از قانون ..... نیز استفاده کرد.

۳ـ جهت میدان الکترومغناطیس سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی از ..... تعیین می‌شود.

۴ـ محل خروج فوران مغناطیسی را با حرف..... نشان می‌دهند.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ـ جهت میدان الکترومغناطیس به جهت جریان الکتریکی بستگی دارد.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ـ محل ورود فوران مغناطیسی را با حرف N نشان می‌دهند.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ـ جهت میدان الکترومغناطیس سیم‌پیچ، تابع جهت جریان الکتریکی است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ـ رابطه محاسبه چگالی فوران مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی را بنویسید و اجزای آن را تعریف کنید.

۲ـ جهت میدان الکترو مغناطیسی اطراف هادی‌های شکل‌های (۱۹ ـ ۱) و (۲۰ ـ ۱) را به‌دست آورید.

شکل ۱۹ ـ ۱

شکل ۲۰ ـ ۱

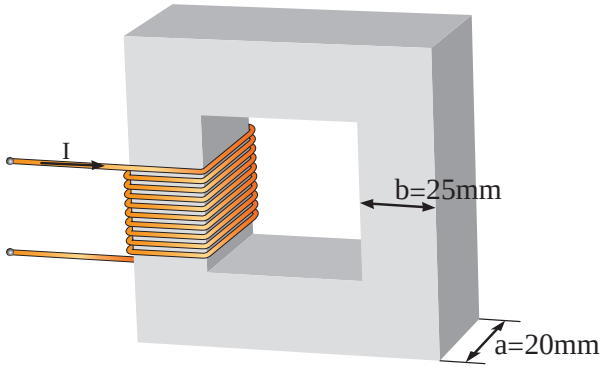
۳ـ میدان مغناطیسی هادی حامل جریان الکتریکی و سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی را با یکدیگر مقایسه کنید.

۴ـ نقش هسته فرومغناطیس را در سیم‌پیچ شرح دهید.

تمرین ۲ ـ ۱

۱ـ چگالی فوران مغناطیسی در فاصله ۲ cm از یک هادی حامل جریان ۳ T است. جریان الکتریکی هادی چند آمپر است؟

۲ـ سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی شکل (۲۱ ـ ۱) چگالی فوران مغناطیسی ۱ تسلا در هسته ایجاد کرده است. فوران مغناطیسی هسته چند میلی وبر است؟



شکل ۲۱ ـ ۱

۱۰ ـ ۱ ـ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی

علت ایجاد میدان الکترومغناطیسی شکل (۱۴ ـ ۱) عبور شدت جریان الکتریکی از حلقه‌های سیم‌پیچ است. میدان الکترومغناطیسی حلقه‌ها با یکدیگر جمع می‌شود و میدان الکترومغناطیسی قوی تولید خواهد شد. حاصل‌ضرب شدت جریان الکتریکی در تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ را نیروی محرکه مغناطیسی[۱] گویند و از رابطه (۶ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$\theta = NI \qquad (۱\text{-}۶)$$

در این رابطه:

θ نیروی محرکه مغناطیسی بر حسب آمپر دور[۲] [A.T]

N تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ بر حسب دور

I شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ بر حسب آمپر [A]

مقدار نیروی محرکه مغناطیسی تابع شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ و تعداد حلقه‌های آن است.

مثال ۵ ـ ۱ـ از یک سیم‌پیچ با ۵۰۰۰ دور، جریان الکتریکی ۰/۱ آمپر می‌گذرد. نیروی محرکه مغناطیسی آن چند آمپر است؟

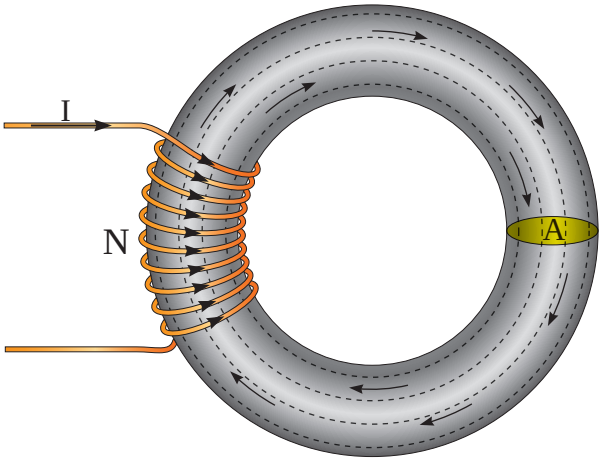
حل:

$$\theta = NI$$
$$\theta = ۵۰۰۰ \times ۰/۱ = ۵۰۰ \left[A.turn\right]$$

۱۱ ـ ۱ ـ شدت میدان مغناطیسی[۳]

فوران میدان مغناطیسی یک سیم‌پیچ حامل جریان از تمام نقاط سطح مقطع هسته آن می‌گذرد. خطوط نیروی میدان مغناطیسی به موازات یکدیگر، طول مسیر هسته را طی می‌کنند و یکدیگر را قطع نمی‌کنند. شکل (۱ ـ ۲۲)

۱. Magneto Motive Force
۲. در برخی کتب دور را به عنوان واحد نمی‌پذیرند و واحد نیروی محرکه مغناطیسی را [A] معرفی می‌کنند.
۳. Magnetic Field Intensity



شکل ۲۲ ـ ۱

نسبت نیروی محرکه مغناطیسی θ به طول متوسط هسته ℓ_C را «شدت میدان مغناطیسی» گویند و آن را با H نمایش می‌دهند و از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$H = \frac{\theta}{\ell_C} = \frac{NI}{\ell_C} \qquad (۱ ـ ۷)$$

در این رابطه:

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

N تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ

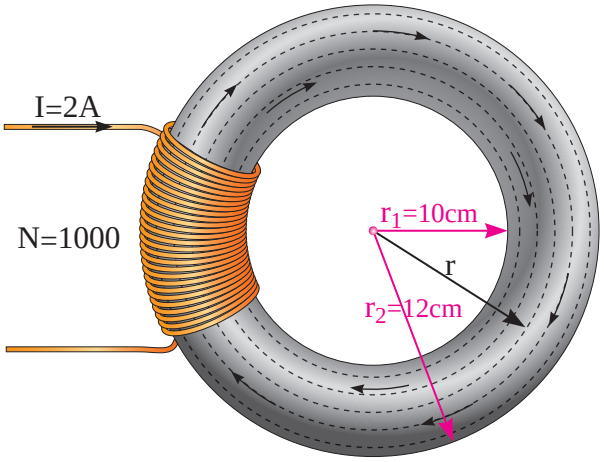
طول متوسط هسته بر حسب متر [m]

در رابطه (۷ ـ ۱) تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ N و طول متوسط هسته ℓ_C مقادیر ثابت هستند و معمولاً این رابطه به‌صورت (۸ ـ ۱) نوشته می‌شود:

$$H = \frac{N}{\ell_C}.I \qquad (۱ ـ ۸)$$

با توجه به رابطه (۸ ـ ۱) در واقع شدت میدان مغناطیسی H معیاری از اثر جریان الکتریکی برای ایجاد میدان مغناطیسی است.

مثال ۶ ـ ۱ ـ شدت میدان مغناطیسی شکل (۲۳ ـ ۱) را به‌دست آورید.



شکل ۲۳ ـ ۱

حل:

ـ شدت میدان مغناطیسی H از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$H = \frac{NI}{\ell_C}$$

ـ طول متوسط هسته ℓ_C به شکل دایره است؛ برای محاسبه آن باید ابتدا شعاع متوسط هسته را به‌دست آورد:

$$r = \frac{r_۱ + r_۲}{۲} = \frac{۱۰+۱۲}{۲} = ۱۱cm$$

ـ محیط دایره از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\ell = ۲\pi r$$

$$\ell_C = ۲\times ۳/۱۴\times ۱۱ = ۶۹/۰۸cm$$

ـ واحد طول متوسط را به متر تبدیل می‌کنیم:

$$\frac{۱m}{\ell_C} = \frac{۱۰۰cm}{۶۹/۰۸cm}$$

$$\ell_C = \frac{۶۹/۰۸\times ۱}{۱۰۰} = ۰/۶۹۰۸m$$

ـ اکنون شـــدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ ـ ۱) قابل محاسبه است.

$$H = \frac{NI}{\ell_C} = \frac{۱۰۰۰ \times ۲}{۰/۶۹۰۸} = ۲۸۹۵/۱۹ \left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

پرسش ۳ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ نیروی محرکه مغناطیسی تابع ..... و ..... سیم‌پیچ است.

۲ ـ خطوط نیروی میدان مغناطیسی به ..... طول مسیر هسته را طی می‌کنند و یکدیگر را قطع ..... .

۳ ـ شـــدت میدان مغناطیســـی از رابطه ..... به‌دست می‌آید.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ حاصل‌ضرب شـــدت جریان الکتریکی در تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ را نیروی محرکه مغناطیسی گویند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ نســـبت نیروی محرکه مغناطیســـی به جریان الکتریکی سیم‌پیچ، شدت میدان مغناطیسی نام دارد.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش تشریحی

۱ ـ رابطه نیروی محرکه مغناطیســـی را بنویسید و کمیت‌های آن را شرح دهید.

۲ ـ شدت میدان مغناطیسی را تعریف کنید.

تمرین ۳ ـ ۱

۱ ـ نیروی محرکه مغناطیسی یک سیم‌پیچ ۱۰۰۰ دوری، ۲۰۰ [A.turn] اســـت. شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ چند آمپر است؟

۲ ـ شدت میـــدان مغناطیسی در هسته بـــه طول ۲۰ cm برابر $\left[\frac{A.turn}{m}\right]$ ۲۰۰۰ اســـت. اگر سیم‌پیچ ایـــن هســـته دارای ۴۰۰۰ دور باشـــد شـــدت جریان الکتریکی آن چند آمپر است؟

۱۲ ـ ۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی

نســـبت چگالی فوران مغناطیسی B به شدت میدان مغناطیســـی H را «ضریب نفوذ مغناطیســـی»[۱] تعریف مـــی‌کنند و آن را با μ نمایـــش مـــی‌دهند و از رابـطه (۹ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mu = \frac{B}{H} \qquad (۹ - ۱)$$

در این رابطه:

μ ضریب نفوذ مغناطیسی بر حسب وبر بر آمپر دور متر $\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$

B چگالی فـــوران مـــغناطیسی بر حسب وبر بر مترمربع $\left[\frac{wb}{m^۲}\right]$

H شـــدت میدان مغناطیسی بر حسب آمپر دور بر متر $\left[\frac{A.turn}{m}\right]$

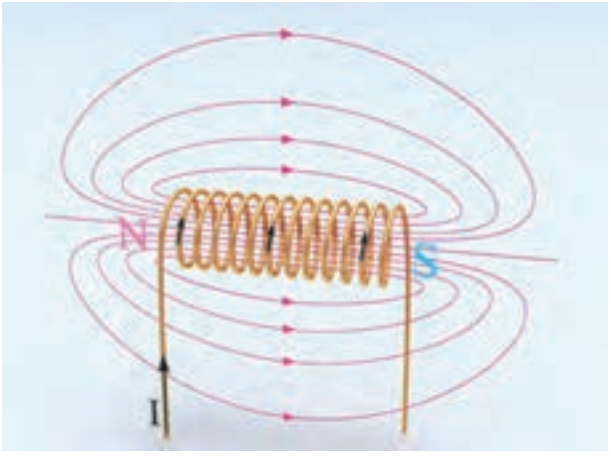
واحد ضریب نفوذ مغناطیســـی μ از نســـبت واحدِ چگالی میدان مغناطیســـی $\left[\frac{wb}{m^۲}\right]$ به واحدِ شـــدت میدان مغناطیسی $\left[\frac{A.turn}{m}\right]$ به‌دست می‌آید.

۱. Permeability

$$[\mu]=\frac{\frac{wb}{m^2}}{\frac{A.turn}{m}}=\frac{wb.m}{A.turn.m^2}=\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$$

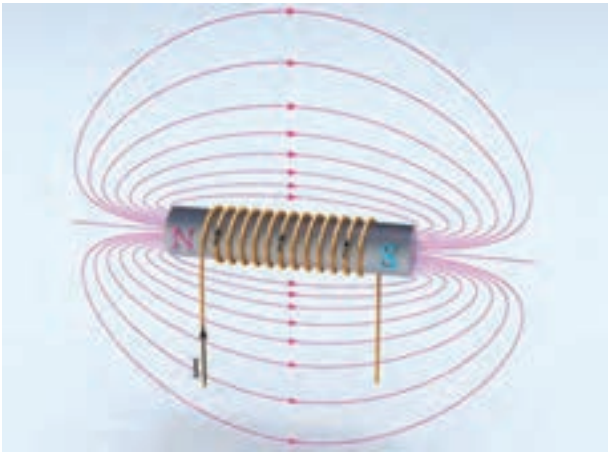
ضریب نفوذ مغناطیسی μ معیاری است که میزان گذردهی هسته را در مقابل خطوط نیروی مغناطیسی نشان می‌دهد. در یک شدت میدان مغناطیسی ثابت، هسته با ضریب نفوذ بزرگ‌تر، خطوط نیروی میدان مغناطیسی بیشتری در خود جای می‌دهد. هرچه ضریب نفوذ هسته بزرگ‌تر باشد شدت میدان مغناطیسی H، چگالی فوران مغناطیسی B قوی‌تری در هسته تولید می‌کند.[1]

میدان مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان I با هسته هوا در شکل (۲۴ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۲۴ ـ ۱

اگر درون این سیم‌پیچ هسته فرومغناطیس قرار داده شود چگالی فوران مغناطیسی B در هسته به شدت افزایش می‌یابد (شکل ۲۵ ـ ۱).



شکل ۲۵ ـ ۱

از مقایسه شکل‌های (۲۴ ـ ۱) و (۲۵ ـ ۱) می‌توان نتیجه گرفت هسته فرومغناطیس نسبت به هسته هوا ضریب نفوذ مغناطیسی μ بزرگ‌تری دارد. فایده استفاده از هسته فرومغناطیس این است که به ازای یک شدت میدان مغناطیسی معین، چگالی فوران مغناطیسی بزرگ‌تری به‌دست می‌آید.

مثال ۷ ـ ۱ ـ چگالی فوران مغناطیسی در هسته فولادی به طول متوسط ۰/۲ متر که روی آن سیم‌پیچ ۱۰۰۰ دوری حامل جریان ۰/۰۰۱ آمپر قرار دارد ۰/۵ وبر بر مترمربع است. ضریب نفوذ مغناطیسی هسته فولادی چقدر است؟

حل:

شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$H=\frac{NI}{\ell_C}=\frac{۱۰۰۰\times ۰/۰۰۱}{۰/۲}=۵\left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

ضریب نفوذ مغناطیسی برای هسته فولادی از رابطه (۹ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mu=\frac{B}{H}=\frac{۰/۵}{۵}=۰/۱\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$$

۱. برای درک بهتر ضریب نفوذ مغناطیسی مناسب است مقایسه‌ای بین عبور نور خورشید از شیشه ساده و رنگی داشته باشید.

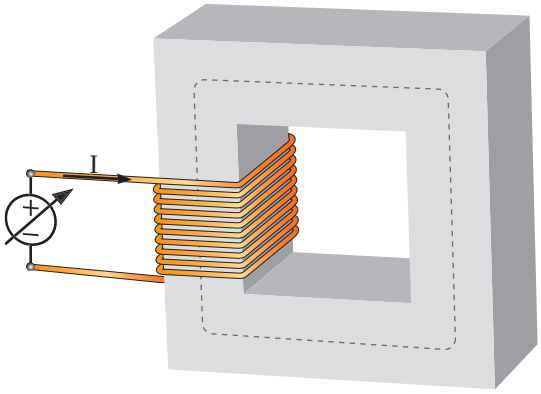
مثال ۸ ـ ۱ ـ اگر هسته سیم‌پیچ مثال ۷ ـ ۱ از هوا انتخاب شود، چگالی فوران مغناطیسی به ۶×۱۰^{-۶} وبر بر مترمربع کاهش می‌یابد. ضریب نفوذ مغناطیسی هوا چقدر است؟ ضریب نفوذ مغناطیسی فولاد را با هوا مقایسه کنید.

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{۶\times۱۰^{-۶}}{۵} = ۱/۲\times۱۰^{-۶}\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$$

با مقایسه پاسخ‌های مثال ۷ ـ ۱ و ۸ ـ ۱ مشاهده می‌شود ضریب نفوذ مغناطیسی فولاد خیلی بزرگ‌تر از ضریب نفوذ هوا می‌باشد.

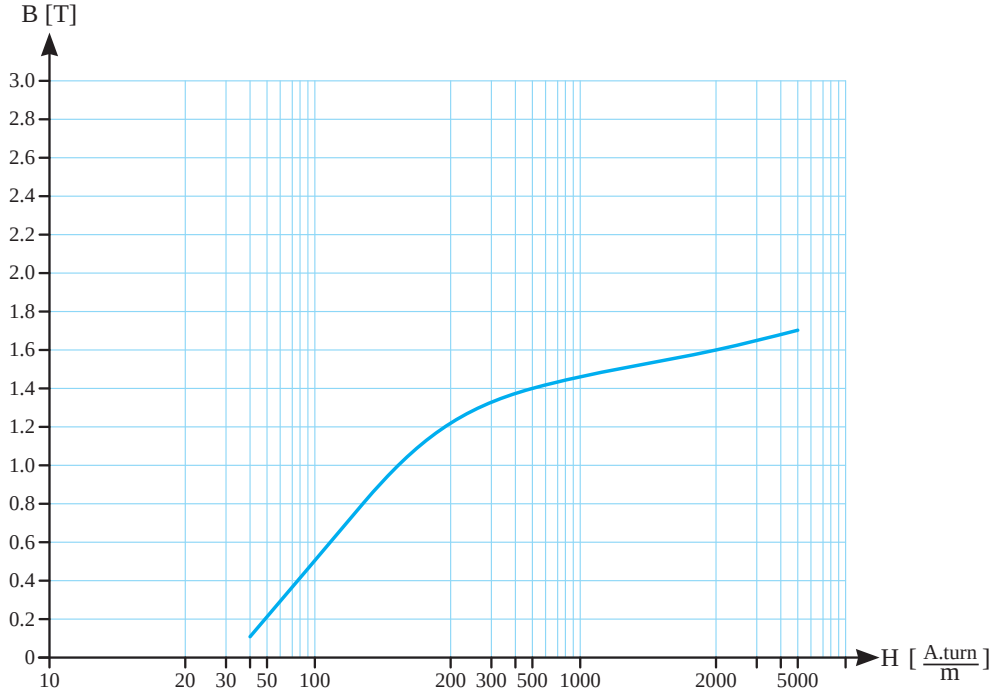
۱۳ ـ ۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ با هسته فرومغناطیس

برای نشان دادن چگونگی رفتار ضریب نفوذ مغناطیسی μ در هسته فرومغناطیس، جریان مستقیم DC از سیم‌پیچ با هسته فرومغناطیسی از جنس فولاد ورق شکل (۲۶ ـ ۱) عبور داده شده است.



شکل ۲۶ ـ ۱

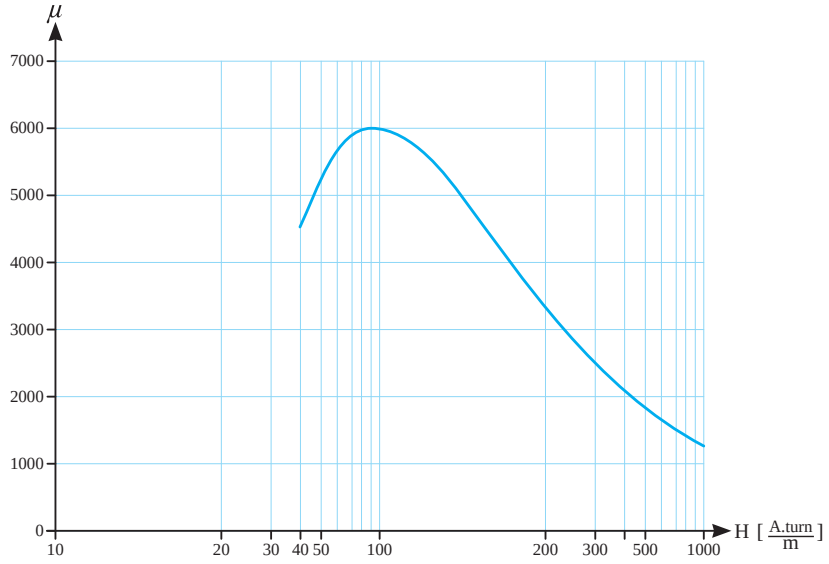
جریان سیم‌پیچ به آهستگی تا حداکثر مجاز افزایش داده می‌شود. افزایش جریان I شدت میدان مغناطیسی H را افزایش می‌دهد. اگر تغییرات چگالی فوران مغناطیسی B نسبت به شدت میدان مغناطیسی H هسته رسم شود، منحنی شکل (۲۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید. این منحنی، «منحنی مغناطیسی[۱]» یا «منحنی اشباع» نام دارد.



شکل ۲۷ ـ ۱ منحنی مغناطیسی فولاد ورق

۱. Magnetization Curve
۲. Gran – Oriented Steel

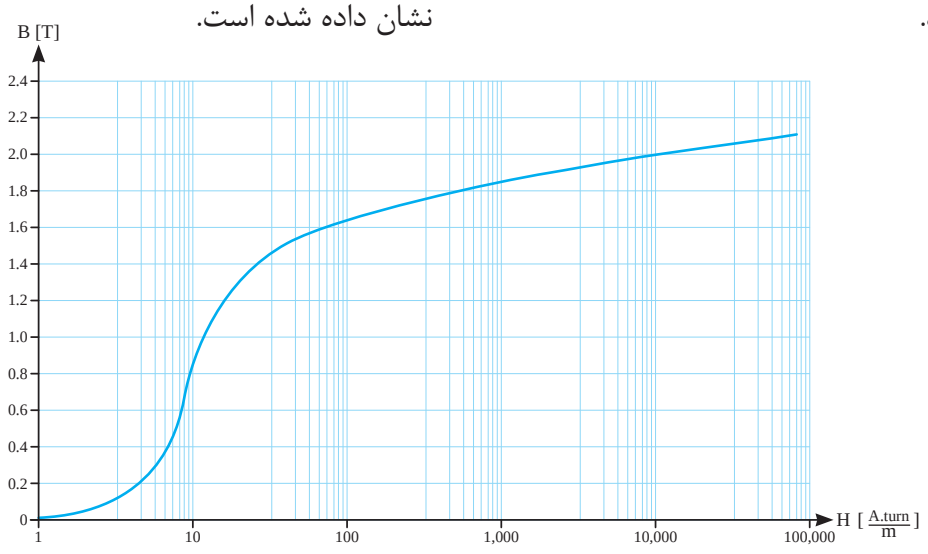
منحنی مغناطیسی تاثیر شدت میدان مغناطیسی H بر چگالی فوران مغناطیسی B هسته را نشان می‌دهد. در هر نقطه از منحنی مغناطیسی مواد فرومغناطیسی نسبت B به H، یعنی ضریب نفوذ مغناطیسی هسته μ عددی ثابت نیست. تاثیر شدت میدان مغناطیسی H بر ضریب نفوذ مغناطیسی μ هسته فرومغناطیس در شکل (۲۸ ـ ۱) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد ضریب نفوذمغناطیسی مواد فرومغناطیس مقدار ثابتی ندارد. منظور از مقدار ضریب نفوذ مغناطیسی μ مواد فرومغناطیس مقدار حداکثر آن μ_{max} است.



شکل ۲۸ ـ ۱

متداول‌ترین مواد فرومغناطیس معمولاً از آهن و آلیاژهای آهن و کبالت، تنگستن، نیکل و فلزات دیگر ساخته می‌شوند و با نام‌های تجاری فولاد الکتریکی[۱] عرضه می‌شوند.

فولاد الکتریکی *M-5* ماده فرومغناطیس متداولی است که در ماشین‌های الکتریکی به کار می‌رود که منحنی مشخصه مغناطیسی آن در شکل (۲۹ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۲۹ ـ ۱ منحنی مشخصه مغناطیسی فولاد الکتریکی M-5

۱. Gran – Oriented Steel

در عمل از منحنی مغناطیسی برای تعیین B بر حسب H یا H بر حسب B می‌توان استفاده کرد. مثال‌های زیر این موضوع را روشن می‌کند.

مثال ۹ ـ ۱ ـ یک سیم‌پیچ ۱۰۰حلقه‌ای حامل جریان الکتریکی ۱ آمپر بر روی یک هسته از جنس فولاد ورق به طول متوسط ۱۰ سانتی‌متر قرار دارد. چگالی فوران مغناطیسی در هسته چند تسلا است؟

حل:

ـ شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$H=\frac{NI}{\ell_C}=\frac{۱۰۰\times ۱}{۱۰\times ۱۰^{-۲}}=۱۰۰۰\left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

ـ از منحنی مغناطیسی شکل (۲۷ ـ ۱) به ازای H=۱۰۰۰ مقدار B به‌دست می‌آید.

$$H=۱۰۰۰\left[\frac{A.turn}{m}\right]\xrightarrow[\text{شکل (۲۷ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}}B=۱/۵[T]$$

مثال ۱۰ ـ ۱ ـ اگر هسته سیم‌پیچ مثال ۹ ـ ۱ از جنس فولاد الکتریکی *M-5* انتخاب شود، چگالی فوران مغناطیسی هسته چند تسلا می‌شود؟ از مقایسه جواب‌های این دو مثال چند نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

حل:

ـ تعداد حلقه، جریان الکتریکی سیم‌پیچ و طول هسته تغییر نکرده است؛ لذا شدت میدان مغناطیسی ثابت می‌ماند. یعنی:

$$H=۱۰۰۰\left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

ـ از منحنی مغناطیسی (۲۹ ـ ۱) به ازای H=۱۰۰۰ مقدار B به‌دست می‌آید:

$$H=۱۰۰۰\left[\frac{A.turn}{m}\right]\xrightarrow[\text{شکل (۲۹ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}}B=۱/۸۵[T]$$

چگالی فوران مغناطیسی هسته از جنس فولاد الکتریکی *M-5* بیشتر از فولاد ورق شده است. در صورتی‌که شدت میدان مغناطیسی در هر دو برابر است. این موضوع مؤید آن است که ضریب نفوذ مغناطیسی فولاد الکتریکی *M-5* نسبت به فولاد ورق بزرگ‌تر است.

مثال ۱۱ ـ ۱ ـ شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ ۱۰۰۰ حلقه‌ای با هسته فولاد ورق به طول متوسط ۱۰ سانتی‌متر و چگالی میدان مغناطیسی ۱/۲ وبر به مترمربع چند آمپر است؟

حل:

ـ از منحنی شکل (۲۷ ـ ۱) شدت میدان مغناطیسی لازم برای تولید چگالی فوران مغناطیسی ۱/۲ وبر بر مترمربع به‌دست می‌آید:

$$B=۱/۲\ [T]\xrightarrow[\text{شکل (۲۷ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}}H=۲۰۰\left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

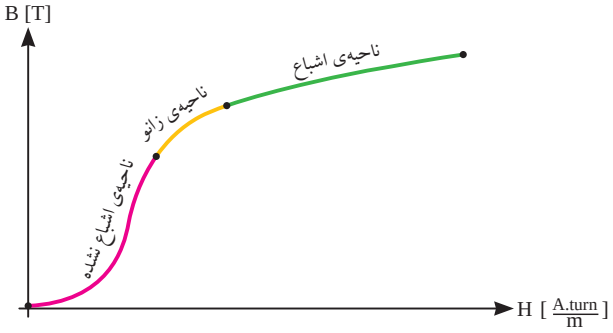
ـ جریان سیم‌پیچ از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$H=\frac{NI}{\ell_C}$$

$$I=\frac{H.\ell_C}{N}=\frac{۲۰۰\times ۱۰\times ۱۰^{-۲}}{۱۰۰۰}=۰/۰۲\ [A]$$

۱۴ ـ ۱ ـ نواحی منحنی مغناطیسی مواد فرومغناطیس

منحنی مغناطیسی دارای سه ناحیه است؛ این نواحی در شکل (۳۰ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۳۰ ـ ۱

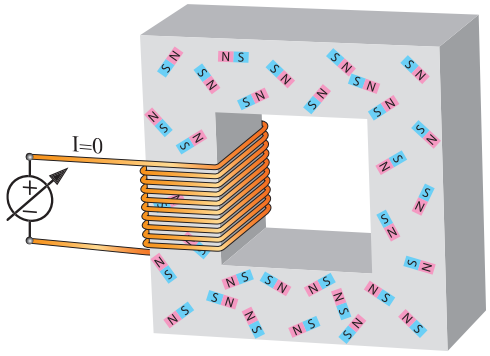
ناحیه اشباع نشده[۱]: در این ناحیه منحنی مغناطیسی تقریباً شکل خطی دارد و با تغییر اندک شدت میدان مغناطیسی H، چگالی فوران مغناطیسی B سریع تغییر می‌کند. در این ناحیه ضریب نفوذ مغناطیسی μ هسته زیاد است.

ناحیه اشباع[۲]: در این ناحیه تغییر شدت میدان مغناطیسی H تاثیر چندانی بر چگالی فوران مغناطیسی B نمی‌گذارد و منحنی مغناطیسی تقریباً تخت می‌شود. در ناحیه اشباع ضریب نفوذ مغناطیسی μ کاهش می‌یابد و به سمت عدد ثابت $۴\pi \times ۱۰^{-۷} \left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$ میل می‌کند.

ناحیه زانو[۳]: ناحیه گذر بین ناحیه اشباع نشده و ناحیه اشباع شده را ناحیه «زانو» منحنی می‌نامند. در این ناحیه به تدریج تاثیر تغییر شدت میدان مغناطیسی H بر چگالی فوران مغناطیسی B کمتر می‌شود. معمولاً مدارهای مغناطیسی برای کار در این ناحیه طراحی می‌شوند.

دلایل ایجاد ناحیه‌های اشباع نشده، زانو و اشباع در منحنی مغناطیسی مواد فرومغناطیس را باید در ساختار مولکولی هسته جستجو کرد. مولکول‌های مواد فرومغناطیس را می‌توان مانند آهن‌رباهای کوچکی با قطب‌های N و S تشبیه کرد. این مولکول‌ها، «مولکول‌های مغناطیسی» نام دارند.

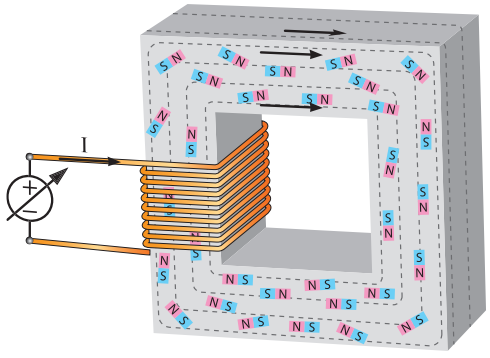
هسته فرومغناطیسی که سیم‌پیچ آن فاقد جریان الکتریکی است در شکل (۳۱ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۳۱ ـ ۱

مولکول‌های مغناطیسی هسته، بدون نظم، هر کدام در یک جهت قرار دارند.

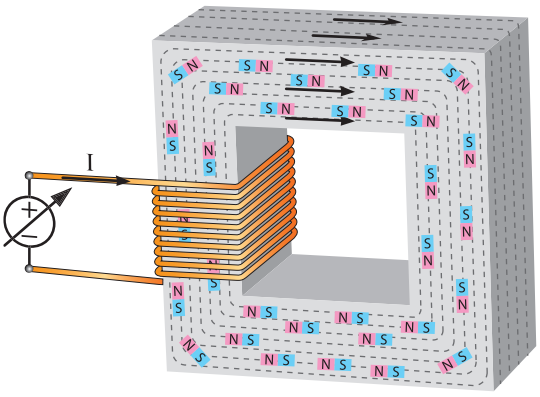
با عبور جریان الکتریکی مستقیم I از سیم‌پیچ، شدت میدان مغناطیسی H، باعث نظم گرفتن تعدادی از مولکول‌های مغناطیسی هسته در جهت میدان مغناطیسی سیم‌پیچ می‌شود. لذا چگالی فوران مغناطیسی B در هسته زیاد می‌شود. شکل (۳۲ ـ ۱)



شکل ۳۲ ـ ۱

۱. Unsaturation Region ۲. Saturation Region ۳. Knee Region

با افزایش بیشتر جریان الکتریکی سیم‌پیچ، شدت میدان مغناطیسی H بیشتر می‌شود و مولکول‌های مغناطیسی بیشتری در هسته منظم می‌شوند تا این‌که لحظه‌ای فرا می‌رسد که تمام مولکول‌های مغناطیسی هسته نظم می‌گیرند. در این لحظه تمام مولکول‌های مغناطیسی در جهت میدان مغناطیسی سیم‌پیچ قرار می‌گیرند و چگالی فوران مغناطیسی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در این حالت هسته در ناحیه اشباع است (شکل ۳۳ ـ ۱).



شکل ۳۳ ـ ۱

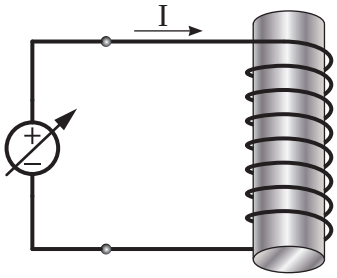
پس از اشباع هسته در صورتی‌که جریان الکتریکی سیم‌پیچ زیاد شود، شدت میدان مغناطیسی H افزایش می‌یابد، اما چگالی فوران مغناطیسی B هسته زیاد نمی‌شود؛ زیرا کلیه مولکول‌های مغناطیسی هسته منظم شده‌اند.

افزایش جریان الکتریکی سیم‌پیچ بعد از اشباع هسته باعث گرم شدن سیم‌پیچ و ایجاد تلفات حرارتی در آن می‌شود.

اگر پس از اشباع هسته جریان الکتریکی سیم‌پیچ به تدریج تا صفر کم شود، شدت میدان مغناطیسی H در هسته صفر می‌شود و چگالی فوران مغناطیسی B کم می‌شود، اما به صفر نمی‌رسد؛ زیرا تعدادی از مولکول‌های مغناطیسی نظم خود را حفظ می‌کنند. به چگالی فوران مغناطیسی B که پس از صفر شدن شدت میدان مغناطیسی H در هسته باقی می‌ماند «پس‌ماند» می‌گویند.

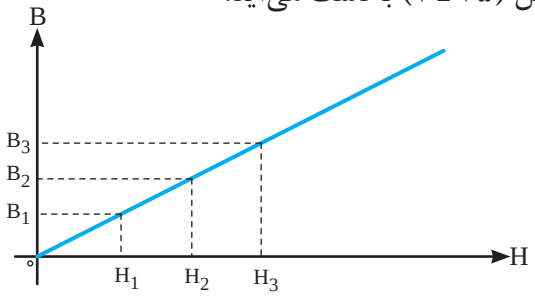
۱۵ ـ ۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ بدون هسته در خلأ

برای نشان دادن ضریب نفوذ مغناطیسی در خلأ، جریان مستقیم dc از سیم‌پیچ بدون هسته شکل (۳۴ ـ ۱) در خلأ عبور داده شده است.



شکل ۳۴ ـ ۱

جریان الکتریکی سیم‌پیچ از صفر به آهستگی تا حداکثر مجاز افزایش داده می‌شود. افزایش جریان I، شدت میدان مغناطیسی سیم‌پیچ را طبق رابطه $I = \frac{NI}{\ell_c}$ افزایش می‌دهد. اگر تغییرات چگالی فوران مغناطیسی B درون سیم‌پیچ نسبت به افزایش شدت میدان مغناطیسی H سیم پیچ رسم شود، نمودار خطی شکل (۳۵ ـ ۱) به‌دست می‌آید.



شکل ۳۵ ـ ۱

در شکل (۳۵ ـ ۱) مشاهده می‌شود تغییرات چگالی فوران مغناطیسی B نسبت به تغییر شدت میدان مغناطیسی H خطی است. شیب این خط مقداری ثابت دارد و بیانگر «ضریب نفوذ مغناطیسی در خلأ» می‌باشد. طبق تعریف، نسبت چگالی فوران مغناطیسی B به شدت میدان مغناطیسی H در هر نقطه از این نمودار را «ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ» گویند و آن را با «μ_o» نشان می‌دهند و از رابطه (۱۰ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$\mu_\circ = \frac{B_\circ}{H_\circ} \qquad (۱۰ ـ ۱)$$

در این رابطه:

$B_\circ$ چگالی فوران مغناطیسی در خلأ

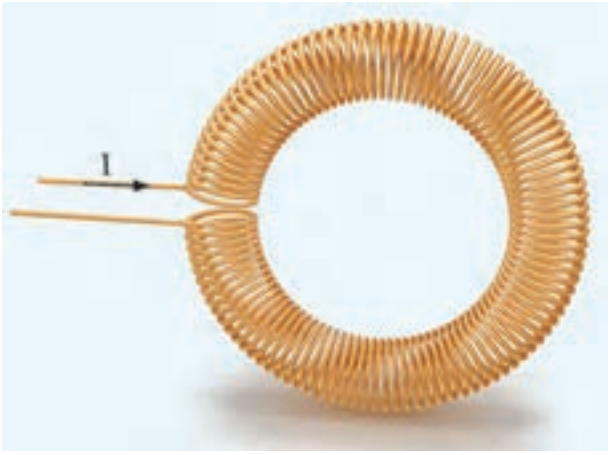
$H_\circ$ شدت میدان مغناطیسی در خلأ

$\mu_\circ$ ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ

ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ همواره مقداری ثابت دارد و برابر است با:

$$\mu_\circ = ۴\pi \times ۱۰^{-۷} \left[\frac{wb}{A.turn.m}\right] \qquad (۱۱ ـ ۱)$$

مثال ۱۲ ـ ۱ ـ سیم‌پیچی بدون هسته در خلأ دارای ۱۰۰۰ حلقه و طول متوسط ۱۰ سانتی‌متر در شکل (۳۶ ـ ۱) نشان داده شده است. چگالی فوران مغناطیسی درون این سیم‌پیچ در خلأ ۰/۶ وبر بر متر مربع اندازه‌گیری شده است. جریان الکتریکی سیم‌پیچ چند آمپر است؟



شکل ۳۶ ـ ۱

حل:

ـ شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۱۰ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$\mu_\circ = \frac{B_\circ}{H_\circ}$$

$$H_\circ = \frac{B_\circ}{\mu_\circ} = \frac{۰/۶}{۴\pi \times ۱۰^{-۷}} = ۵۰۰۰۰۰ \left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

ـ جریان سیم‌پیچ از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$H = \frac{NI}{\ell_C}$$

$$I = \frac{H.\ell_C}{N} = \frac{۵۰۰۰۰۰ \times ۱۰ \times ۱۰^{-۲}}{۱۰۰۰} = ۵۰ \left[A\right]$$

مثال ۱۳ ـ ۱ ـ اگر هسته سیم‌پیچ مثال (۱۲ ـ ۱) از فولاد الکتریکی $M\text{-}5$ فرض شود، جریان الکتریکی سیم‌پیچ چند آمپر می‌شود؟

حل:

ـ ابتدا از منحنی شکل (۲۹ ـ ۱) شدت میدان مغناطیسی برای تولید چگالی میدان ۱/۶ وبر بر مترمربع به‌دست می‌آید.

$$B = ۱/۶ \frac{wb}{m^۲} \xrightarrow[\text{شکل (۲۷ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} H = ۶۰ \left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

ـ جریان الکتریکی سیم‌پیچ از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$H = \frac{NI}{\ell_C}$$

$$I = \frac{H.\ell_C}{N} = \frac{۶۰\times۱۰\times۱۰^{-۲}}{۱۰۰۰} = ۰/۰۰۶\ [A]$$

فعالیت

درباره اختلاف نتایج در جریان الکتریکی سیم‌پیچ مثال‌های (۱۱ ـ ۱) و (۱۲ ـ ۱) بحث کنید.

۱۶ ـ ۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی

ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ $\mu_\circ = ۴\pi\times۱۰^{-۷}\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$ می‌باشد و مقدار آن ثابت است. لذا به‌عنوان شاخص انتخاب شده است و نفوذپذیری مغناطیسی مواد با نفوذپذیری مغناطیسی خلأ مقایسه می‌شود و نسبت به آن سنجیده خواهد شد.

نسبت ضریب نفوذ مغناطیسی μ به ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ $\mu_\circ$ را «ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی[۱]» گویند و آن را با μ_r نمایش می‌دهند که از رابطه (۱۲ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

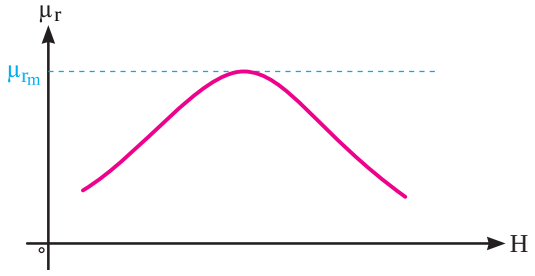
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_\circ} \qquad (۱۲ ـ ۱)$$

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی، نسبت دو ضریب نفوذ مغناطیسی است و بدون واحد است. معمولاً کارخانه‌های تولیدکننده فولاد مغناطیسی، منحنی ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r بر حسب شدت میدان مغناطیسی H تولیدات خود را ارائه می‌کنند تا مصرف‌کننده با استفاده از آن ضریب نفوذ مغناطیسی μ را از رابطه (۱۳ـ۱) به‌دست آورد.

$$\mu = \mu_\circ \mu_r \qquad (۱۳ ـ ۱)$$

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r نشان می‌دهد جسم چند برابر خلأ نفوذپذیری مغناطیسی دارد.

منحنی ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r بر حسب شدت میدان مغناطیسی H برای فولاد ورق در شکل (۳۷ ـ ۱) نشان داده است.



شکل ۳۷ ـ ۱

منحنی شکل (۳۷ ـ ۱) نشان می‌دهد ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r در ناحیه اشباع نشده بزرگ و تقریباً ثابت است و با افزایش شدت میدان مغناطیسی به تدریج کاهش می‌یابد و در ناحیه اشباع کوچک می‌شود.

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r علاوه بر این‌که به شدت میدان مغناطیسی H وابسته است به فرکانس جریان الکتریکی سیم‌پیچ و دمای هسته نیز بستگی دارد. در یک شدت میدان مغناطیسی H ثابت، افزایش فرکانس جریان الکتریکی سیم‌پیچ و دمای هسته، ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r را کاهش می‌دهد.

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r معیار مناسبی برای شناخت رفتار مواد در میدان مغناطیسی است. مواد بر اساس ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی در سه گروه دسته‌بندی می‌شوند:

۱. Relative Permeability

ـ مواد دیامغناطیس[1]

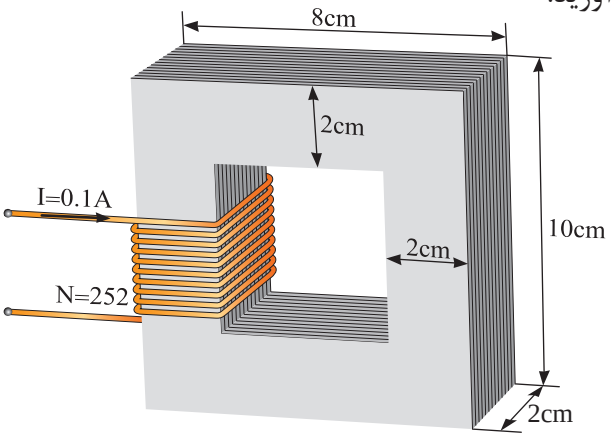
ـ مواد پارامغناطیس[2]

ـ مواد فرومغناطیس[3]

فعالیت

۱ ـ افزایش دمای هسته و فرکانس جریان سیم‌پیچ چگونه باعث کاهش ضریب نفوذ مغناطیسی هسته می‌شوند؟

مثال ۱۴ ـ ۱ ضریب نفوذ مغناطیسی μ هسته شکل (۳۸ ـ ۱) که از جنس فولاد ورق است را به‌دست آورید.



شکل ۳۸ ـ ۱

حل:

محیط بیرونی هسته برابر است با:

$$\ell_{C_1} = ۲(۱۰+۸) = ۳۶\ [cm]$$

محیط درونی هسته برابر است با:

$$\ell_{C_2} = ۲(۶+۴) = ۲۰\ [cm]$$

محیط متوسط برابر است با:

$$\ell_C = \frac{۳۶+۲۰}{۲} = ۲۸\ [cm]$$

شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ ـ ۱) برابر است با:

$$H = \frac{NI}{\ell_C} = \frac{۲۵۲\times ۰/۱}{۲۸\times ۱۰^{-۲}} = ۹۰\left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

از منحنی شکل (۲۸ ـ ۱) ضریب نفوذ نسبی برابر است با:

$$H = ۹۰\left[\frac{A.turn}{m}\right] \xrightarrow{\text{منحنی شکل (۲۸ ـ ۱)}} \mu_r = ۶۰۰۰$$

از رابطه (۱۳ ـ ۱) ضریب نفوذ مغناطیسی برابر است با:

$$\mu = \mu_\circ \mu_r$$

$$\mu = ۴\pi\times ۱۰^{-۷}\times ۶۰۰۰ = ۷/۵\times ۱۰^{-۳}\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$$

پرسش ۴ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ با قرار دادن هسته فرومغناطیس در سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی ..... در هسته ..... می‌یابد.

۲ ـ در ناحیه اشباع تغییر ..... تاثیر چندانی بر ..... نمی‌گذارد.

۳ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ همواره مقدار ..... دارد و برابر است با ..... .

۴ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی معیار مناسبی برای شناخت ..... در ..... است.

۵ ـ واحد ضریب نفوذ مغناطیسی ..... است.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی مواد فرومغناطیس مقدار ثابتی دارد.

☐ صحیح ☐ غلط

۱. Diamagnetic ۲. Paramagnetic ۳. Ferromagnetic

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

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ ناحیه زانو منحنی مغناطیسی، ناحیه گذر بین ناحیه اشباع نشده و ناحیه اشباع شده است.

صحیح ☐ غلط ☐

۴ ـ تغییرات چگالی فوران مغناطیسی نسبت به تغییر شدت میدان مغناطیسی خطی است.

صحیح ☐ غلط ☐

۵ ـ افزایش فرکانس جریان الکتریکی سیم‌پیچ و دمای هسته، ضریب نفوذ نسبی را کاهش می‌دهد.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی را تعریف کنید.

۲ ـ رابطه ضریب نفوذ مغناطیسی را بنویسید. کمیت‌های آن را شرح دهید.

۳ ـ متداول‌ترین مواد فرومغناطیس از چه فلزاتی ساخته می‌شوند؟

۴ ـ منحنی مغناطیسی مواد فرومغناطیسی را رسم کنید و نواحی آن را مشخص کنید.

۵ ـ ناحیه اشباع نشده منحنی مغناطیسی را تعریف کنید.

۶ ـ منحنی مغناطیسی سیم‌پیچ بدون هسته در خلأ را رسم کنید.

۷ ـ رابطه ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ را بنویسید و کمیت‌های آن را تعریف کنید.

۸ ـ مواد بر اساس ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی به چند دسته تقسیم‌بندی می‌شوند؟

تمرین ۴ ـ ۱

۱ ـ هسته فرومغناطیسی با ضریب نفوذ مغناطیسی $۰/۵ \frac{wb}{A.turn.m}$ و طول ۲۰ cm در نظر است. اگر روی این هسته سیم‌پیچ ۲۰۰۰ دوری با شدت جریان الکتریکی ۲۰ mA قرار داده شده باشد، چگالی شار هسته چند تسلا خواهد شد؟

۲ ـ شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ ۵۰۰ حلقه‌ای که بر روی هسته‌ای به طول ۲۰ cm و چگالی فوران ۱ تسلا قرار دارد را در دو حالت زیر محاسبه کنید:

الف ـ هسته با جنس فولاد ورق

ب ـ هسته با جنس فولاد الکتریکی $M\text{-}5$

ج ـ از مقایسه نتایج بندهای الف و ب چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

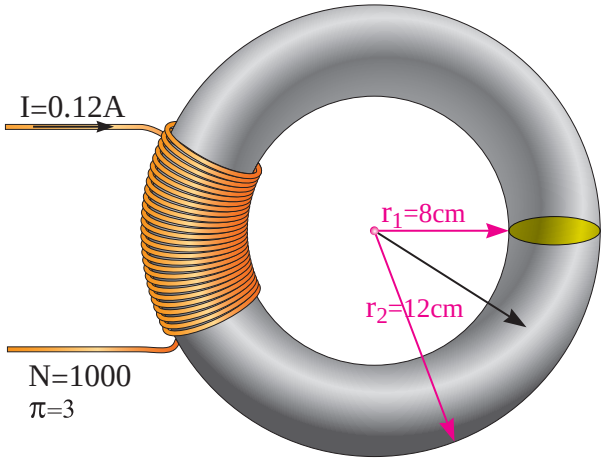
۳ ـ سیم‌پیچی مطابق شکل (۳۸ ـ ۱) دارای ۵۰۰ حلقه و طول متوسط ۲۰ cm و شدت جریان الکتریکی ۴A در نظر است. مطلوب است چگالی فوران مغناطیسی در دو حالت زیر:

الف ـ بدون هسته در خلأ

ب ـ با هسته از جنس فولاد الکتریکی $M\text{-}5$

ج ـ از مقایسه نتایج بندهای الف و ب چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

۴ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی μ هسته شکل (۳۹ ـ ۱) که از جنس فولاد ورق است را به‌دست آورید.



شکل ۳۹ ـ ۱

۱ ـ ۱۶ ـ ۱ ـ مواد دیامغناطیس

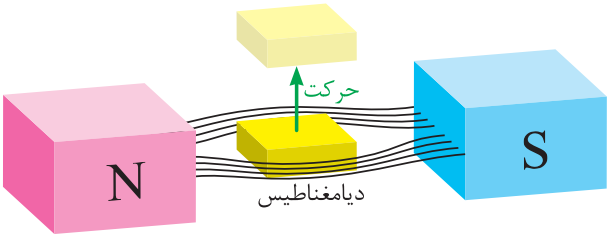
ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r مواد دیامغناطیس کمی کمتر از یک می‌باشد. جیوه، نقره، قلع و آب از این مواد هستند.

در مـــواد دیامغناطیـــس مولکول‌های مغناطیســـی بوجود نمی‌آید. هنگامی که مواد دیامغناطیس در میدان مغناطیســـی آهن‌ربای قوی مطابق شکل (۴۰ ـ ۱) قرار می‌گیرند:

ـ فوران مغناطیسی را از خود عبور نمی‌دهند.

ـ میدان مغناطیسی را غیر یکنواخت می‌کنند.

ـ از طرف میدان مغناطیسی دفع می‌شوند.



شکل ۴۰ ـ ۱

۲ ـ ۱۶ ـ ۱ ـ مواد پارامغناطیس

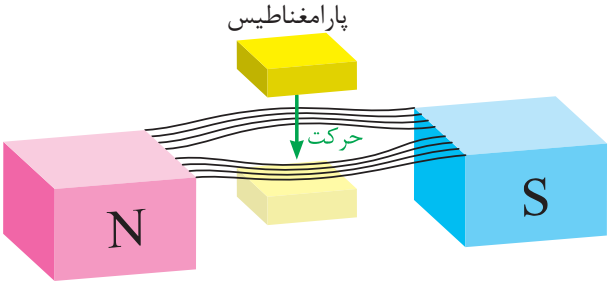
ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r مواد پارامغناطیس کمی از یک بیشـــتر است. آلومینیم، هوا و پلاتین از این مواد هستند.

مواد پارامغناطیس، مولکول‌های مغناطیسی ضعیفی دارنـــد؛ هنگامـــی که مـــواد پارامغناطیـــس در میدان مغناطیســـی آهن‌ربای قوی مطابق شکل (۴۱ ـ ۱) قرار می‌گیرند:

ـ مولکول‌های مغناطیسی آنها می‌کوشند تا در جهت میدان مغناطیسی منظم شوند.

ـ به طرف ناحیه قوی میدان مغناطیســـی کشـــیده می‌شوند. عامل این حرکت نیروی جاذبه بین مولکول‌های مغناطیسی این مواد و میدان مغناطیسی است.

ـ به آهن‌ربا تبدیل می‌شـــوند و با خـــروج از میدان مغناطیســـی، خاصیـــت آهن‌ربایـــی خود را از دســـت می‌دهند.



شکل ۴۱ ـ ۱

۳ ـ ۱۶ ـ ۱ ـ مواد فرومغناطیس

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r مواد فرومغناطیس بین ۲۰۰۰ تا ۸۰۰۰۰ است. آهن و آلیاژهای آن از این مواد هستند.

مواد فرومغناطیســـی مولکول‌های مغناطیسی بسیار قوی دارند. هنگامی که مـــواد فرومغناطیس در میدان مغناطیسی آهن‌ربای قوی قرار می‌گیرند:

ـ مولکول‌های مغناطیسی آنها در جهت میدان مغناطیسی منظم می‌شوند و به بالاترین درجه هم‌سویی می‌رسند.

ـ به طرف ناحیه قوی میدان مغناطیسی کشیده می‌شوند و جذب قطب‌ها می‌شوند.

ـ به آهن‌ربا تبدیل می‌شوند و با خروج از میدان مغناطیسی، خاصیت آهن‌ربایی خود را از دست نمی‌دهند.

اگر دمای مواد فرومغناطیس از یک مقدار معین که دمای «کوری[1]» نامیده می‌شود بالاتر برود هم‌سویی مولکول‌های مغناطیسی از بین می‌رود و این مواد پارامغناطیس می‌شوند.[2]

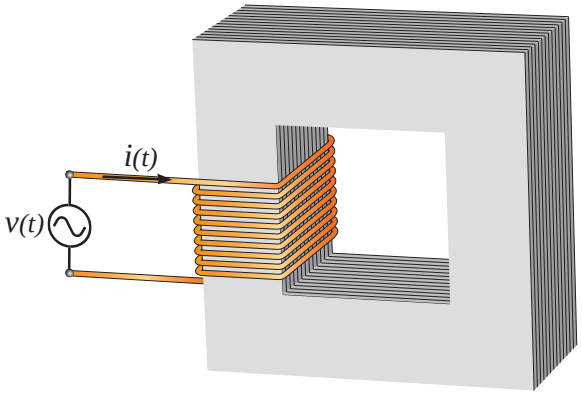
در جدول (۱ ـ ۱) ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r چند نمونه از مواد در ناحیه اشباع نشده با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

مواد فرومغناطیس		مواد پارامغناطیس		مواد دیامغناطیس	
ماده	μ_r	ماده	μ_r	ماده	μ_r
آهن بدون آلیاژ	تا ۶۰۰۰	هوا	۱/۰۰۰۰۰۰۴	جیوه	۰/۹۹۹۷۵
فولاد الکتریکی	تا ۶۵۰۰	اکسیژن	۱/۰۰۰۰۰۰۳	نقره	۰/۹۹۹۹۸۱
آهن نیکل آلیاژ	۳۰۰۰۰۰	آلومینیم	۱/۰۰۰۰۲۲	قلع	۰/۹۹۹۸۸
فریت مغناطیسی	۱۰۰۰۰	پلاتین	۱/۰۰۰۳۶	آب	۰/۸۹۹۹۱

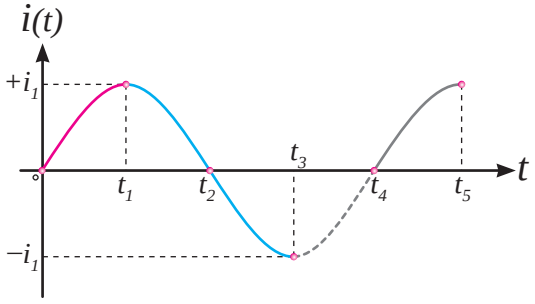
جدول ۱ ـ ۱

۱۷ ـ ۱ ـ حلقه هیسترزیس

سیم‌پیچی با هسته فرومغناطیس متصل به یک منبع متناوب سینوسی در شکل (۴۲ ـ ۱) نشان داده شده است، که از آن جریان الکتریکی متناوب $i(t)$ به شکل موج (۴۳ ـ ۱) می‌گذرد.



شکل ۴۲ ـ ۱

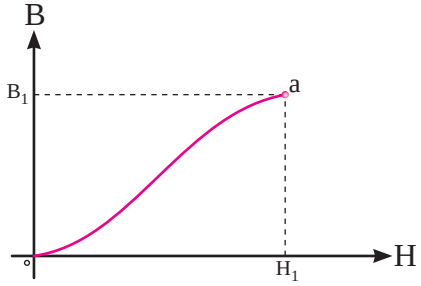


شکل ۴۳ ـ ۱

با فرض اینکه هسته در ابتدا مغناطیس نشده است، شدت میدان H توسط جریان الکتریکی $i(t)$ که به‌آرامی افزایش می‌یابد، زیاد می‌شود؛ لذا چگالی فوران مغناطیسی B هسته مطابق منحنی مغناطیسی oa در شکل (۴۴ ـ ۱) تغییر خواهد کرد. B_1 چگالی فوران مغناطیسی نقطه a مربوط به شدت میدان مغناطیسی H_1 متناظر با i_1 است.

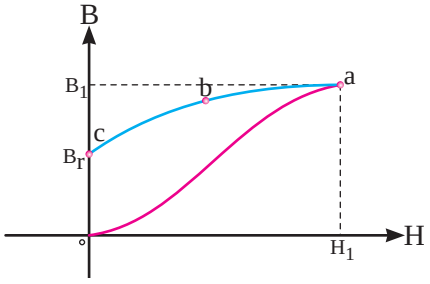
۱. Curie

۲. برای آهن دمای کوری ۱۰۴۳ درجه کلوین است.



شکل ۴۴ ـ ۱

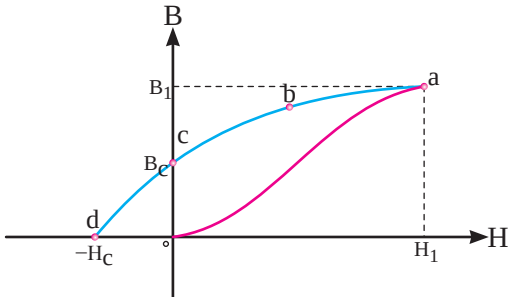
بعد از زمان t_1 جریـــان الکتریکی $i(t)$ رو به کاهش می‌گذارد و متناظر با آن شـــدت میدان مغناطیسی H نیز کاهش می‌یابد و منحنی مغناطیســـی مسیر abc را مطابق شکل (۴۵ ـ ۱) دنبال خواهد کرد.



شکل ۴۵ ـ ۱

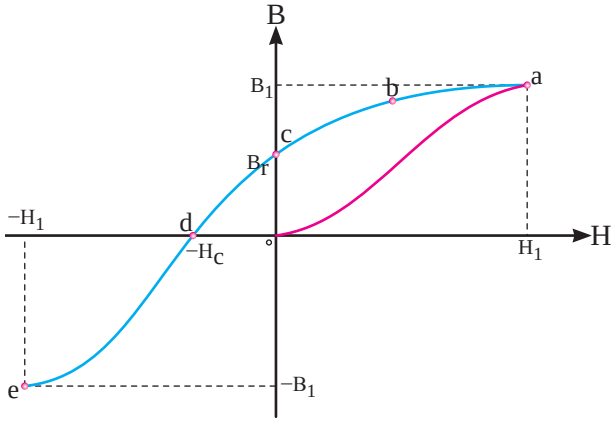
با صفر شدن جریان در t_2، شدت میدان مغناطیسی H صفر می‌شـــود اما چگالی فوران مغناطیسی هسته به B_r می‌رســـد. چگالی فوران مغناطیسی B_r، «پس‌ماند» هسته نامیده می‌شود.

بعد از زمان t_2 جهت جریان الکتریکی $i(t)$ سیم‌پیچ معکوس می‌شود؛ لذا شدت میدان مغناطیسی H وارونه می‌گردد. چگالی فوران مغناطیسی B_r در هسته کاهش می‌یابد و در مقداری از H مثـــلاً $-H_c$ از میان خواهد رفت و صفر می‌شـــود. شـــدت میدان مغناطیسی $-H_c$ که پس‌ماند هســـته B_r را از بین می‌برد، « شدت میدان مغناطیسی خنثی کننده[1]» نـــامیده می‌شود. شـــکل (۴۶ ـ ۱)



شکل ۴۶ ـ ۱

با افزایش شـــدت میدان مغناطیســـی H در جهت وارونـــه، چگالی فوران مغناطیســـی B هســـته مطابق منحنی de در شکل (۴۷ ـ ۱) تغییر خواهد کرد.

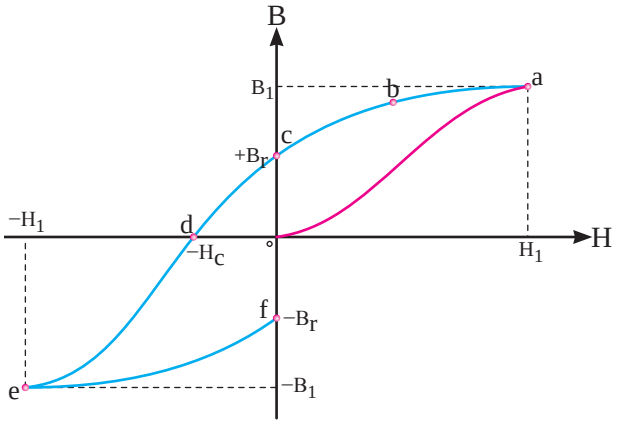


شکل ۴۷ ـ ۱

چگالی فوران مغناطیسی $-B_1$ در نقطه e مربوط به شدت میدان مغناطیسی $-H_1$ متناظر با $-i_1$ است.

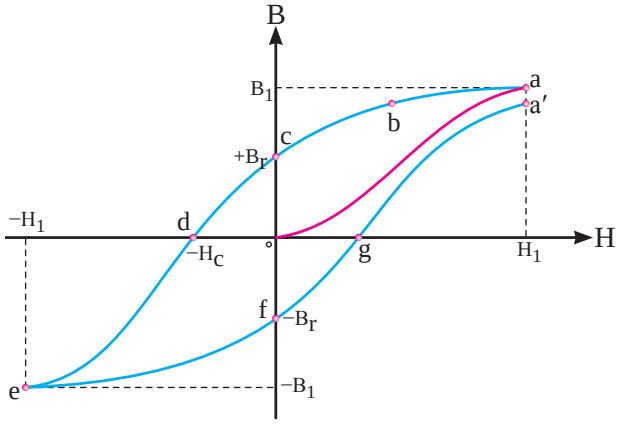
بعد از زمان t_3 با تغییر جریان الکتریکی $i(t)$ شدت میدان مغناطیسی H تغییر خواهد کرد و منحنی B-H مســـیر ef را مطابق شکل (۴۸ ـ ۱) دنبال خواهد کرد. تا با صفر شـــدن جریان الکتریکی در t_4، شـــدت میدان مغناطیسی H صفر می‌شود و چگالی فوران مغناطیسی به $-B_r$ می‌رسد.

۱. Coercive Force



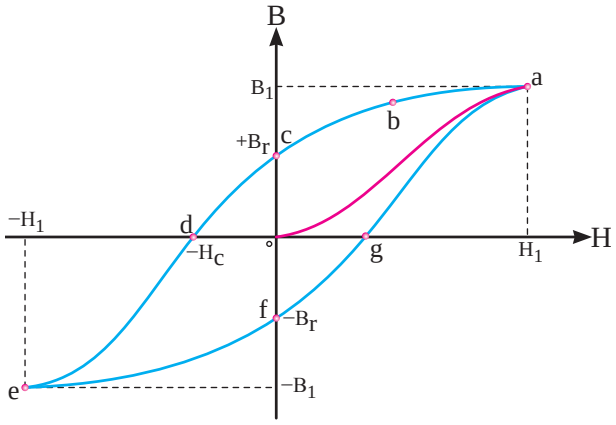
شکل ۴۸ ـ ۱

بعد از زمان t_4 جهت جریان الکتریکی $i(t)$ در سیم‌پیچ معکوس می‌شود و شدت میدان مغناطیسی H نیز وارونه می‌گردد و افزایش می‌یابد در این صورت منحنی B-H مسیر fga′ را طی خواهد کرد (شکل ۴۹ ـ ۱).



شکل ۴۹ ـ ۱

باید دانست حلقه منحنی مغناطیسی بسته نمی‌شود و پس از چند سیکل مغناطیس شدن هسته حلقه تقریباً بسته می‌شود. این شکل به «حلقه پس‌ماند» یا «حلقه هیسترزیس[1]» معروف است (شکل ۵۰ ـ ۱).



شکل ۵۰ ـ ۱

حلقه پس‌ماند یا هیترزیس نشان می‌دهد:

ـ رابطه بین چگالی فوران مغناطیسی B و شدت مغناطیسی H غیر خطی و چند مقداری است.

ـ اگرچه جریان الکتریکی سیم‌پیچ در نقاط C و F صفر است، اما هسته مغناطیس می‌باشد و دارای پس‌ماند مغناطیسی است.

ـ به ازای یک حلقه هیسترزیس، جهت شدت میدان مغناطیسی هسته عوض می‌شود؛ لذا مولکول‌های مغناطیسی هسته می‌گردند و جهت میدان مغناطیسی در هسته تغییر می‌کند.

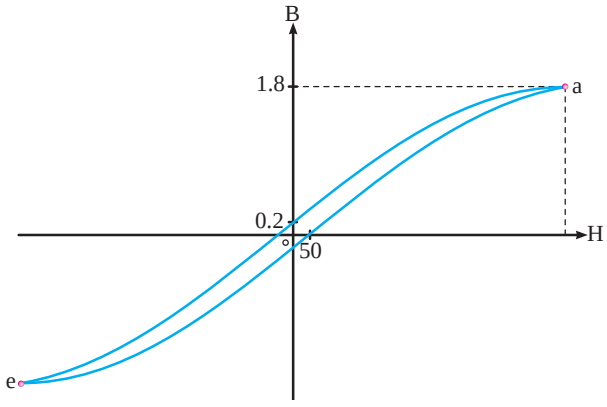
به ازای هر سیکل جریان الکتریکی سیم‌پیچ، یک بار حلقه هیسترزیس تکرار می‌شود. بنابراین در هر ثانیه تعداد حلقه‌های هیسترزیس با فرکانس جریان سیم‌پیچ برابر خواهد شد. بدین ترتیب متناسب با فرکانس جریان سیم‌پیچ، جهت میدان مغناطیسی در هسته تغییر می‌کند. مقدار انرژی که در یک ثانیه صرف تغییر جهت میدان مغناطیسی در هسته می‌شود را «تلفات‌هیسترزیس» تعریف می‌کنند. تلفات هیسترزیس به‌صورت حرارت در هسته ظاهر می‌شود و تابع فرکانس

۱. Hystersis Loop

جریان الکتریکی سیم‌پیچ است و متناسب با مساحت حلقه هیسترزیس می‌باشد. بدیهی است در جریان الکتریکی مستقیم هسته تلفات هیسترزیس ندارد. چرا؟

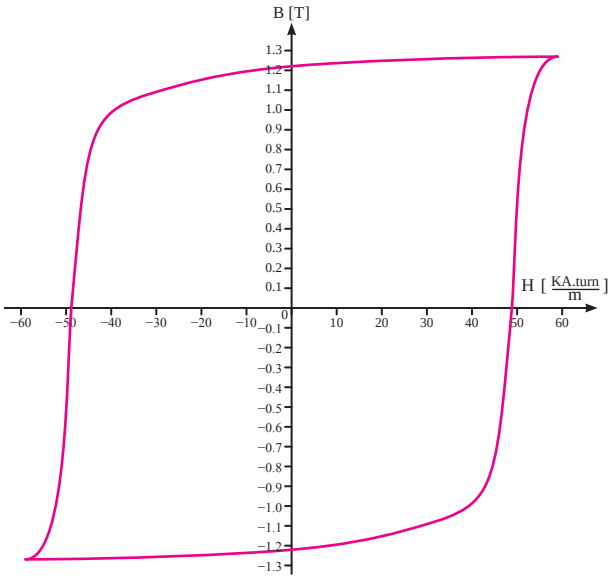
در ماشین‌های الکتریکی، ترانسفورمرها و آهن‌رباهای موقتی جنس هسته از مواد فرومغناطیسی موسوم به «آهن نرم[1]» انتخاب می‌شود.

چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند B_r در آهن نرم بسیار کم است، لذا تلفات هیسترزیس در آنها کاهش می‌یابد. حلقه هیسترزیس آهن نرم وسیع نیست و شدت میدان خنثی‌کننده H_c نسبتاً کوچکی دارند. شکل (۵۱ ـ ۱).



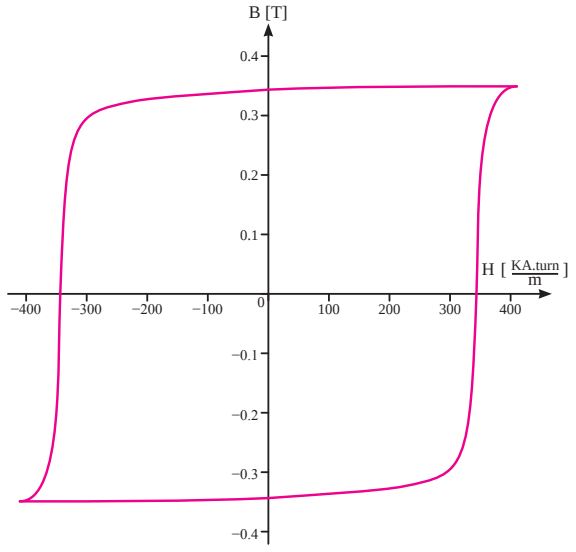
شکل ۵۱ ـ ۱

در آهن‌رباهای دائم[2] جنس هسته غالباً آلیاژی از آهن، نیکل و کبالت موسوم به «آهن سخت»[3] انتخاب می‌شود. یک دسته از این آلیاژها «النیکو»[4] است که چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند B_r آنها بسیار زیاد می‌باشد. حلقه هیسترزیس آهن سخت وسیع است و شدت میدان خنثی‌کننده H_c نسبتاً بزرگی دارند. حلقه هیسترزیس النیکو ۵ در شکل (۵۲ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۵۲ ـ ۱

در مدارهای مغناطیسی که در فرکانس‌های رادیویی و مخابراتی کار می‌کنند، جنس هسته از مواد فرومغناطیس سرامیکی موسوم به «فریت[5]» انتخاب می‌شود. فریت از ترکیب اکسید آهن و پودرهای کربنات باریم یا استرونسیوم ساخته می‌شود. چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند B_r در فریت کمتر از النیکو است، اما شدت میدان خنثی‌کننده H_c در فریت بیشتر از النیکو می‌باشد. حلقه هیسترزیس فریت استرونسیوم در شکل (۵۳ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۵۳ ـ ۱

۱. Soft Iron ۲. Permanent Magnet ۳. Hard Iron ۴. Alnico ۵. Ferrite

پرسش ۵ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی مواد فرومغناطیسی بین ..... تا ..... است.

۲ ـ در ماشین‌های الکتریکی جنس هسته از ..... موسوم به ..... انتخاب می‌شود.

۳ ـ در آهن‌رباهای ..... جنس هسته از ..... انتخاب می‌شود.

۴ ـ در مدارهای مغناطیسی مخابراتی جنس هسته از ..... موسوم به ..... انتخاب می‌شود.

۵ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی مواد دیامغناطیس ..... است.

۶ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی مواد پارامغناطیس ..... است.

۷ ـ تلفات هیسترزیس تابع ..... و ..... سیم‌پیچ است.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ در مواد دیامغناطیس مولکول‌های مغناطیسی به‌وجود نمی‌آیند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ مواد پارامغناطیس، مولکول‌های مغناطیسی ضعیفی ندارند.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ تلفات هیسترزیس به‌صورت حرارت در هسته ظاهر می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ رفتار مواد پارامغناطیس در میدان مغناطیسی را شرح دهید.

۲ ـ رفتار مواد فرومغناطیس در میدان مغناطیسی را شرح دهید.

۳ ـ چند نمونه از مواد دیا، پارا و فرومغناطیس را نام ببرید.

۴ ـ دمای کوری را تعریف کنید.

۵ ـ شدت میدان خنثی‌کننده را تعریف کنید.

۶ ـ چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند را تعریف کنید.

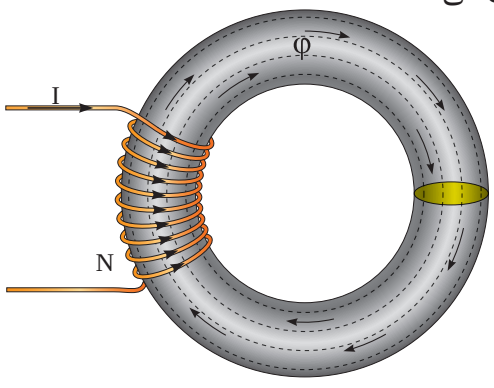
۷ ـ تلفات هیسترزیس را تعریف کنید.

۸ ـ ویژگی‌های مغناطیسی آهن سخت را بنویسید.

۹ ـ حلقه هیسترزیس در مواد مغناطیسی را با یکدیگر مقایسه کنید.

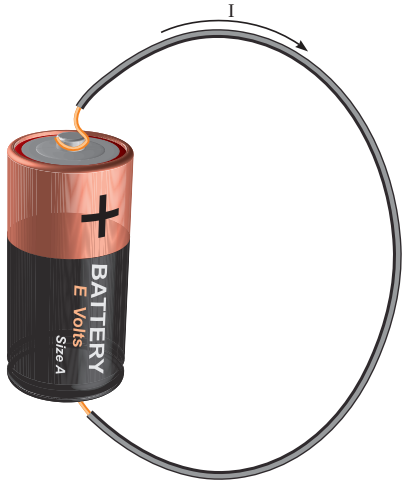
۱۸ ـ ۱ ـ مدارهای مغناطیسی

در شکل (۵۴ ـ ۱) شدت جریان الکتریکی I سیم‌پیچی در هسته فرومغناطیس فوران مغناطیسی φ جاری می‌کند.



شکل ۵۴ ـ ۱ـ مدار مغناطیسی

این پدیده از بعضی‌جهات مشابه جریان الکتریکی است که یک باتری در هادی جاری می‌کند (شکل۵۵ ـ ۱).



شکل ۵۵ ـ ۱ مدار الکتریکی

همان‌طور که اتصال هادی به باتری، مسیر بسته‌ای برای جاری شدن جریان فراهم می‌کند را «مدار الکتریکی[۱]» می‌نامند، مسیر بسته‌ای که فوران مغناطیسی در آن برقرار می‌شود «مدار مغناطیسی[۲]» نامیده می‌شود.

وجه تشابه مدار مغناطیسی شکل (۵۴ ـ ۱) با مدار الکتریکی شکل (۵۵ ـ ۱) عبارت است از:

- «نیروی محرکه الکتریکی[۳]» باتری E عامل جاری شدن جریان الکتریکی در هادی است و «نیروی محرکه مغناطیسی[۴]» سیم‌پیچ θ عامل جاری شدن فوران مغناطیسی در هسته است. بنابراین عملکرد نیروی محرکه مغناطیسی و نیروی محرکه الکتریکی شبیه به یکدیگر است؛ یعنی:

θ مدار مغناطیسی $\xleftarrow{\text{مشابه}}$ E مدار الکتریکی

- جریان الکتریکی I، در هادیِ مدار الکتریکی جاری می‌شود و فوران مغناطیسی φ در هسته مدار مغناطیسی جاری می‌شود. بنابراین رفتار فوران مغناطیسی و جریان الکتریکی نیز شبیه به یکدیگر است؛ یعنی:

φ مدار مغناطیسی $\xleftarrow{\text{مشابه}}$ I مدار الکتریکی

- هادی در مدار الکتریکی مسیری برای عبور جریان الکتریکی است و از خود در مقابل عبور جریان الکتریکی «مقاوت الکتریکی[۵]» نشان می‌دهد و هسته در مدار مغناطیسی نیز مسیری برای عبور فوران مغناطیسی است و از خود در مقابل عبور فوران مغناطیسی «مقاومت مغناطیسی[۶]» نشان می‌دهد. بنابراین مقاومت مغناطیسی $\mathcal{R}$ و مقاومت الکتریکی R شبیه به یکدیگر می‌باشند؛ یعنی:

$\mathcal{R}$ مدار مغناطیسی $\xleftarrow{\text{مشابه}}$ R مدار الکتریکی

بین کمیت‌های ولتاژ، جریان و مقاومت در یک مدار الکتریکی قانون اُهم رابطه (۱۴ ـ ۱) را ارایه کرده است:

$$R = \frac{E}{I} \qquad (۱ - ۱۴)$$

با توجه به شباهت‌های میان کمیت‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌توان قانون اهم را برای یک مدار مغناطیسی به‌صورت رابطه (۱۵ ـ ۱) نوشت:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} \qquad (۱ - ۱۵)$$

در این رابطه:

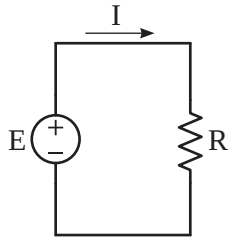
θ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ بر حسب [A.turn]

φ فوران مغناطیسی هسته بر حسب [wb]

$\mathcal{R}$ مقاومت مغناطیسی هسته بر حسب $\left[\frac{A.turn}{wb}\right]$

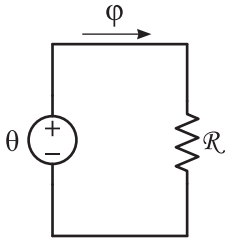
۱. Electric Circuits
۲. Magnetic Circuit
۳. Electro Motive Force (EMF)
۴. Magneto Motive Force(MMF)
۵. Resistance
۶. Reluctance

برای مدار الکتریکی شکل (۵۵ ـ ۱) مدار الکتریکی معادل شکل (۵۶ ـ ۱) ارائه شده است.



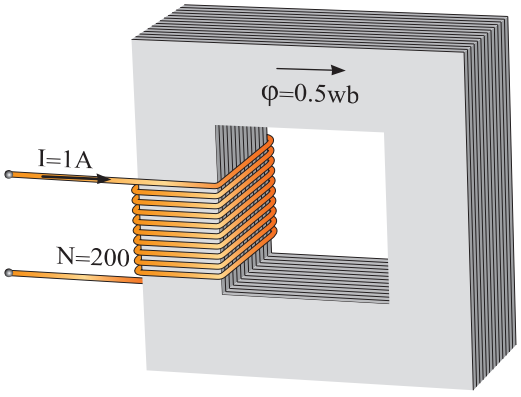
شکل ۵۶ ـ ۱

با توجه به وجه تشـــابه میان مدارهای مغناطیسی با مدارهای الکتریکی می‌توان مدار الکتریکی معادل شکل (۵۷ ـ ۱) را با تقریب مناســـبی برای مدار مغناطیســـی شکل (۵۴ ـ ۱) در نظر گرفت.



شکل ۵۷ ـ ۱

مثال ۱۵ ـ ۱ ـ فوران مغناطیســـی در هسته شکل (۵۸ ـ ۱) برابر ۰/۵ wb اســـت. مقاومت مغناطیســـی هسته چقدر می‌باشد؟



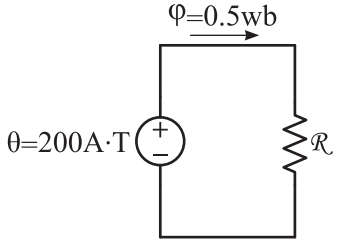
شکل ۵۸ ـ ۱

حل:

ـ نیروی محرکه مغناطیســـی از رابطه (۶ ـ ۱) برابر است با:

$$\theta = NI = ۲۰۰ \times ۱ = ۲۰۰ \left[A.turn\right]$$

ـ مدار الکتریکی معادل با درج مقادیر مغناطیسی بر روی آن به‌صورت شکل زیر است.



مقاومت مغناطیسی از رابطه (۱۵ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} = \frac{۲۰۰}{۰/۵} = ۴۰۰ \left[\frac{A.turn}{wb}\right]$$

برای تعیین رابطه مقاومت مغناطیســـی $\mathcal{R}$ به روش زیر عمل می‌شود:

ـ از رابطه (۳ ـ ۱) مقدار φ برابر است با:

$$B = \frac{\varphi}{A} \Rightarrow \varphi = B.A \qquad (۱ ـ ۱۶)$$

ـ از رابطه (۹ ـ ۱) مقدار B برابر است با:

$$\mu = \frac{B}{H} \Rightarrow B = \mu H \qquad (۱ ـ ۱۷)$$

ـ بـــا جایگزینی مقدار μ از رابطه (۱۳ ـ ۱) در رابطه (۱۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mu = \mu_{\circ} \mu_{r}$$

$$B = \mu_{\circ} \mu_{r} . H \qquad (۱ ـ ۱۸)$$

ـ با جایگزینی رابطه (۱۸ ـ ۱) در (۱۶ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\varphi = \mu_{\circ}\mu_{r}.H.A \qquad (۱۹ ـ ۱)$$

ـ با جایگزینی رابطه (۱۹ ـ ۱) و (۶ ـ ۱) در رابطه (۱۵ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} \Rightarrow \mathcal{R} = \frac{NI}{\mu_{\circ}\mu_{r}.H.A} \qquad (۲۰ ـ ۱)$$

ـ از رابطه رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$H = \frac{NI}{\ell_C} \Rightarrow \ell_C = \frac{NI}{H} \qquad (۲۱ ـ ۱)$$

ـ با جایگزینی رابطه (۲۱ ـ ۱) در رابطه (۲۰ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mathcal{R}_C = \frac{\ell_C}{\mu_{\circ}\mu_{r}A} \qquad (۲۲ ـ ۱)$$

در این رابطه:

ℓ_C طول متوسط هسته بر حسب [m]

μ_o ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ بر حسب $\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$

μ_r ضریب نفوذ نسبی هسته بدون واحد

A سطح مقطع هسته بر حسب [m^۲]

$\mathcal{R}$ مقاومت مغناطیسی هسته بر حسب $\left[\frac{A.turn}{wb}\right]$

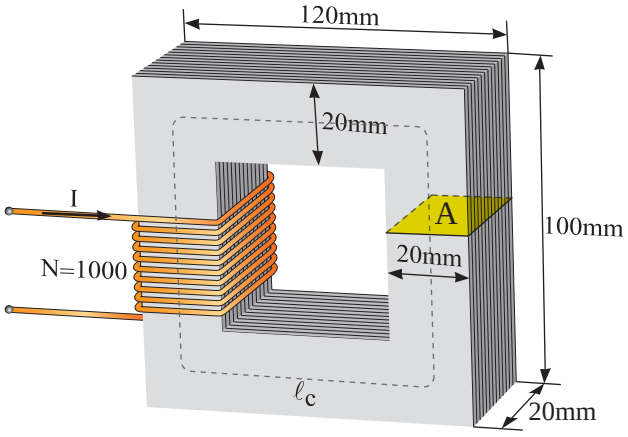
اگر حاصل $\mu_o\,\mu_r$ از رابطه (۱۳ ـ ۱) با μ نشان داده شود رابطه (۲۲ ـ ۱) به‌صورت رابطه (۲۳ ـ ۱) در می‌آید.

$$\mathcal{R} = \frac{\ell_C}{\mu.A}$$

فعالیت

وجه تشابه رابطه مقاومت مغناطیسی $\mathcal{R} = \frac{\ell_C}{\mu.A}$ با رابطه مقاومت الکتریکی $R = \frac{\ell}{x.A}$ چیست؟

مثـــال ۱۶ ـ ۱ ـ اگـــر فوران مغناطیســـی در مدار مغناطیســـی شـــکل (۵۹ ـ ۱) برابر با ۴ mwb باشـــد جریان سیم‌پیچ چند آمپر است؟ در صورتی که $\pi = ۳$ و $\mu_r = ۶۰۰۰$ باشد.



شکل ۵۹ ـ ۱

حل:

ـ محیط بیرونی هسته برابر است با:

$$\ell_۱ = (۱۲۰+۱۰۰)\times ۲ = ۴۴۰\,mm$$

ـ محیط درونی هسته برابر با:

$$\ell_۲ = (۸۰+۶۰)\times ۲ = ۲۸۰\,mm$$

ـ محیط متوسط برابر است با:

$$\ell_C = \frac{\ell_۱ + \ell_۲}{۲} = \frac{۴۴۰+۲۸۰}{۲} = ۳۶۰\,mm$$

سطح مقطع بازوی هسته A که به شکل مربع است برابر است با:

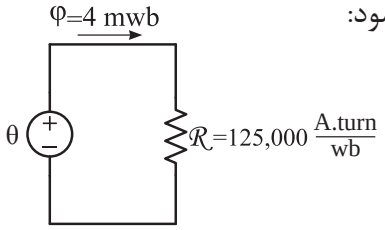
$A_C = ۲۰\times ۲۰ = ۴۰۰\,mm^۲$ سطح مقطع هسته

مقاومت مغناطیسی هسته از رابطه (۲۲ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R}_C = \frac{\ell_C}{\mu_\circ \mu_r A} = \frac{۳۶۰\times۱۰^{-۳}}{۴\pi\times۱۰^{-۷}\times۶۰۰۰\times۴۰۰\times۱۰^{-۶}}$$

$$= ۱۲۵۰۰۰ \left[\frac{A.turn}{wb}\right]$$

ـ مدار الکتریکی معادل رسم و مقادیر بر روی آن درج می‌شود:



ـ نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۱۵ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi}$$

$$\theta = \mathcal{R}_C . \varphi = ۱۲۵۰۰۰\times۴\times۱۰^{-۳} = ۵۰۰ \left[A\right]$$

ـ جریان سیم‌پیچ از رابطه (۶ ـ ۱) برابر است با:

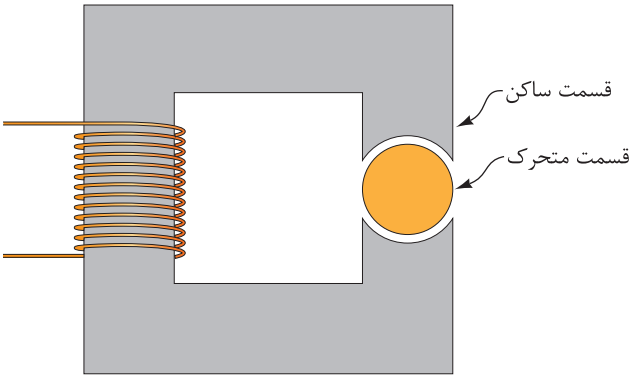
$$\theta = NI$$

$$I = \frac{\theta}{N} = \frac{۵۰۰}{۱۰۰۰} = ۰/۵ \left[A\right]$$

۱۹ ـ ۱ـ مدار مغناطیسی با شکاف هوایی

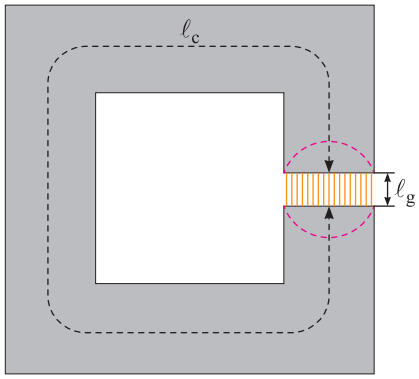
مدارهای مغناطیسی مقدمه تحلیل ماشین‌های الکتریکی اعم از ترانسفورمر و وسایل تبدیل انرژی از قبیل ژنراتورها و موتورهای الکتریکی می‌باشند.

ترانسفورمرها ساختمانی شبیه هسته فرومغناطیسی شکل (۶۰ ـ ۱) دارند. وسایل تبدیل انرژی مانند ژنراتورها و موتورهای الکتریکی که دارای اجزای متحرک می‌باشند، بین قسمت متحرک و ساکن در هسته فرومغناطیس «شکاف هوایی[۱]» ایجاد می‌شود.



شکل ۶۰ ـ ۱

اگر قسمت متحرک به دو نیمه متحرک تقسیم شود و هر یک از این نیمه‌ها به سمت قسمت ساکن سوق داده شود شکل (۶۱ ـ ۱) به‌دست می‌آید.



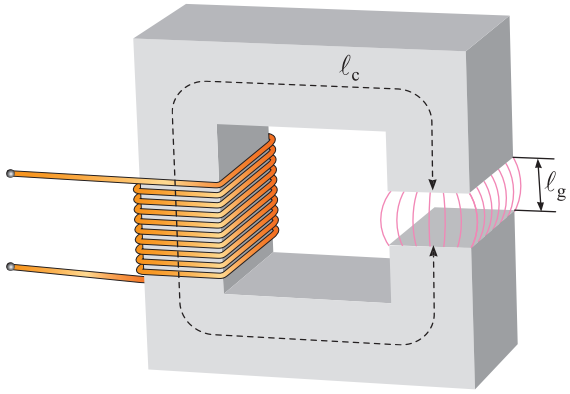
شکل ۶۱ ـ ۱

این شکل یک مدار مغناطیسی با شکاف هوایی را نشان می‌دهد که فوران مغناطیسی φ مسیر هسته و شکاف هوایی را طی می‌کند.

اگر در مدار مغناطیسی طول شکاف هوایی ℓ_g از ابعاد سطح مقطع هسته مغناطیسی بسیار کوچک‌تر باشد، می‌توان با روش مدار الکتریکی معادل آن را تحلیل کرد. در صورتی‌که طول شکاف هوایی ℓ_g از ابعاد سطح مقطع هسته مغناطیسی بزرگ‌تر باشد، فوران مغناطیسی مطابق شکل (۶۲ ـ ۱) به بیرون «نشت»

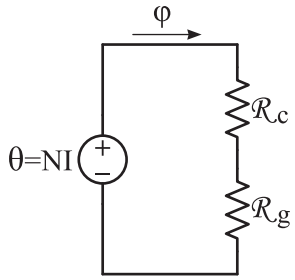
۱. Air Gap

می‌کند و سطح مقطع موثر شکاف هوایی بزرگ‌تر از سطح مقطع هسته مغناطیسی دو طرف آن می‌شود، لذا نمی‌توان با روش مدار الکتریکی معادل آن را تحلیل کرد.



شکل ۶۲ ـ ۱

اکنون با فرض این‌که طول شکاف هوایی ℓ_g در شکل (۶۱ ـ ۱) به حد کافی کوچک است و چگالی فوران مغناطیسی B هسته نیز یکنواخت می‌باشد، می‌توان مدار الکتریکی معادل شکل (۶۳ ـ ۱) را برای تحلیل آن در نظر گرفت. از آنجایی که فوران مغناطیسی، مسیر هسته و شکاف هوایی را طی می‌کند، لذا مقاومت مغناطیسی آنها در مدار الکتریکی معادل با هم سری می‌شوند.



شکل ۶۳ ـ ۱

در شکل (۶۳ ـ ۱) مقاومت مغناطیسی هسته $\mathcal{R}_c$ از رابطه (۲۳ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mathcal{R}_C = \frac{\ell_C}{\mu_\circ \mu_r A} \qquad (۱ - ۲۳)$$

و مقاومت مغناطیسی شکاف هوایی $\mathcal{R}_g$ از رابطه (۲۴ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mathcal{R}_g = \frac{\ell_g}{\mu_\circ \mu_r A} \qquad (۱ - ۲۴)$$

در این رابطه:

ℓ_g طول شکاف هوایی بر حسب [m]

$\mu_\circ = ۴\pi \times ۱۰^{-۷}$ ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ بر حسب $\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$

μ_r ضریب نفوذ نسبی هوا[۱]

A سطح مقطع هسته بر حسب [$m^۲$]

$\mathcal{R}_g$ مقاومت مغناطیسی بر حسب $\left[\frac{A.turn}{wb}\right]$

قوانین سری و موازی شدن مقاومت‌های مغناطیسی همانند مقاومت‌های الکتریکی است. به‌طوری که مقاومت مغناطیسی معادل[۲]، n مقاومت مغناطیسی سری از رابطه (۲۵ ـ ۱) به‌دست می‌آید[۳]:

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_۱ + \mathcal{R}_۲ + \ldots + \mathcal{R}_n \qquad (۱ - ۲۵)$$

مثال ۱۷ ـ ۱ ـ در مدار مغناطیسی شکل (۵۹ ـ ۱) شکاف هوایی به طول ۰/۴۸ mm مطابق شکل (۶۴ ـ ۱) ایجاد شده است. با فرض این‌که طول

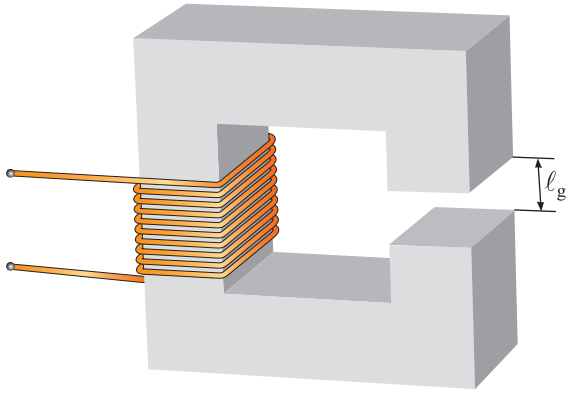
---

۱. برای سهولت در محاسبات معمولاً برای هوا μ_r برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.

۲. Equal Reluctance

۳. مقاومت مغناطیسی معادل، n مقاومت مغناطیسی موازی از رابطه مقابل به‌دست می‌آید: $\mathcal{R}_{eq} = \frac{۱}{\frac{۱}{\mathcal{R}_۱} + \frac{۱}{\mathcal{R}_۲} + \ldots + \frac{۱}{\mathcal{R}_n}}$

متوسط هسته تغییر نکرده است برای داشتن فوران مغناطیسی ۴ mwb جریان سیم‌پیچ چند آمپر است؟



شکل ۶۴ ـ ۱

حل:

ـ مقاومت مغناطیسی هسته تغییر نمی‌کند و برابر است با:

$$\mathcal{R}_C = \frac{\ell_C}{\mu_\circ \mu_r A} = ۱۲۵۰۰۰ \left[\frac{A.turn}{wb}\right]$$

ـ طول شکاف هوایی بر حسب متر برابر است با:

$$\ell_g = ۰/۴۸ \times ۱۰^{-۳} \left[m\right]$$

ـ طول شکاف هوایی بسیار کوچک‌تر از ابعاد سطح مقطع هسته می‌باشد؛ لذا سطح مقطع شکاف هوایی با هسته برابر است؛ یعنی:

$$A_g = A_C = ۴۰۰ \times ۱۰^{-۶} \left[m^۲\right]$$

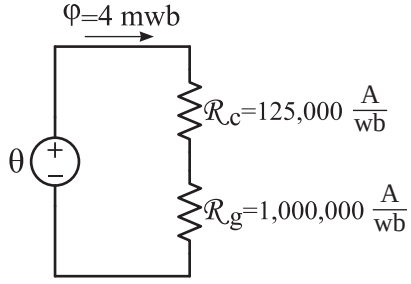
ـ برای سهولت در محاسبات ضریب نفوذ نسبی هوا برابر با: $\mu_r = ۱$

ـ مقاومت مغناطیسی هوا از رابطه (۲۴ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R}_g = \frac{\ell_g}{\mu_\circ \mu_r A} = \frac{۰/۴۸ \times ۱۰^{-۳}}{۴\pi \times ۱۰^{-۳} \times ۱ \times ۴۰۰ \times ۱۰^{-۶}}$$

$$= ۱۰۰۰۰۰۰ \left[\frac{A.turn}{wb}\right]$$

ـ مدار الکتریکی معادل رسم می‌شود و مقادیر در آن نوشته خواهد شد:



ـ مقاومت مغناطیسی معادل از رابطه (۲۵ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_C + \mathcal{R}_g = ۱۲۵۰۰۰ + ۱۰۰۰۰۰۰$$

$$= ۱۱۲۵۰۰۰ \left[\frac{A.turn}{wb}\right]$$

ـ نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۱۵ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} \Rightarrow \theta = \mathcal{R}.\varphi$$

$$\theta = ۱۱۲۵۰۰۰ \times ۴ \times ۱۰^{-۳} = ۴۵۰۰ \left[A.turn\right]$$

ـ جریان سیم‌پیچ از رابطه (۶ ـ ۱) برابر است با:

$$\theta = NI \Rightarrow I = \frac{\theta}{N} = \frac{۴۵۰۰}{۱۰۰۰} = ۴/۵ \left[A\right]$$

فعالیت

چرا با ایجاد شکاف هوایی جریان سیم‌پیچ افزایش یافته است؟

هرچند تحلیل مدارهای مغناطیسی با استفاده از مفهوم مدار الکتریکی معادل، غالباً نتایج رضایت بخشی دارد اما این نتایج به دلایل زیر تقریبی است:

۱ ـ در مدار مغناطیسی فرض می‌شود تمام فوران مغناطیسی در هسته محبوس است. اما جزءِ کوچکی از فوران مغناطیسی هسته به هوای اطراف می‌گریزد. این فوران در بیرون هسته «شار نشتی[۱]» نام دارد.

۲ ـ در محاسبه مقاومت مغناطیسی، برای هسته یک طول مسیر متوسط و یک سطح مقطع مشخص فرض می‌شود. این فرض‌ها، مخصوصاً در مورد گوشه‌ها فرض‌های خیلی خوبی نیستند.

۳ ـ در مواد فرومغناطیسی، با تغییر شدت میدان مغناطیسی هسته، ضریب نفوذ مغناطیسی هسته تغییر می‌کند اما در مدار معادل مغناطیسی ضریب نفوذ مغناطیسی ثابت فرض شده است.

۴ ـ اگر در مسیر فوران مغناطیسی هسته، شکاف هوایی وجود داشته باشد، سطح مقطع موثر فاصله هوایی بزرگ‌تر از سطح مقطع هسته دو طرف آن است که در مدار معادل مغناطیسی سطح مقطع شکاف هوایی برابر سطح مقطع هسته فرض می‌شود.

روش‌های دیگری در تحلیل مدارهای مغناطیسی وجود دارد که به نتایج دقیق‌تری می‌انجامد. تحلیل مدارهای مغناطیسی به کمک « قانون نیروی محرکه مغناطیسی» یکی از این روش‌ها است.

پرسش ۶ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ مسیر بسته‌ای که فوران مغناطیسی در آن برقرار می‌شود ..... نامیده می‌شود.

۲ ـ نیروی محرکه مغناطیسی، مشابه ..... در مدار الکتریکی است.

۳ ـ مقاومت مغناطیسی مشابه..... در مدار الکتریکی است.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ هسته از خود در مقابل فوران مغناطیسی «مقاومت مغناطیسی» نشان می‌دهد.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ جریان الکتریکی مشابه نیروی محرکه مغناطیسی است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ مدار الکتریکی و مدار مغناطیسی را تعریف کنید.

۲ ـ چرا نتایج تحلیل مدارهای مغناطیسی با استفاده از مدار الکتریکی معادل تقریبی است؟

تمرین ۶ ـ ۱

۱ ـ مقاومت و فوران مغناطیسی در هسته یک مدار مغناطیسی به ترتیب $۵۰۰\frac{A.turn}{wb}$ و $۱۰\,mwb$ می‌باشد. اگر جریان سیم‌پیچ روی هسته $۲۰\,mA$ باشد تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ را به‌دست آورید.

۲ ـ بر روی یک هسته فرومغناطیسی مشابه شکل (۲۳ ـ ۱)، ۲۰۰ دور سیم پیچیده شده است. اگر جریان ۲ آمپر از سیم‌پیچ عبور کند. فوران مغناطیسی هسته را محاسبه نمایید. در صورتی که $r_۱=۳۰\,cm$، $r_۲=۴۰\,cm$ و $\mu_r=۱۰۰۰$ باشد.

---

۱. Flux Leakage

۳ ـ اگر در مدار مغناطیسی تمرین ۲ شکاف هوایی به طول ۰/۵ mm ایجاد شود با فرض این‌که طول متوسط هسته تغییر نکرده باشد، فوران مغناطیسی هسته را محاسبه کنید.

۴ ـ بر روی اختلاف نتایج تمرین ۲ و ۳ بحث کنید.

۲۰ ـ ۱ ـ قانون نیروی محرکه مغناطیسی

در مدارهای مغناطیسی فوران مسیر بسته هسته را طی می‌کند. طبق قانون نیروی محرکه مغناطیسی در یک مدار مغناطیسی «حاصل جمع جبری نیروهای محرکه مغناطیسی هسته، برابر نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ است».

قانون نیروی محرکه مغناطیسی با رابطه (۲۶ ـ ۱) نشان داده می‌شود:

$$\theta = \sum_{i=1}^{n} H_i . \ell_i \qquad (۱ - ۲۶)$$

در این رابطه:

θ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ بر حسب $[A.turn]$

H_i شدت میدان مغناطیسی قسمت i ام مدار مغناطیسی بر حسب $\left[\frac{A.turn}{m}\right]$

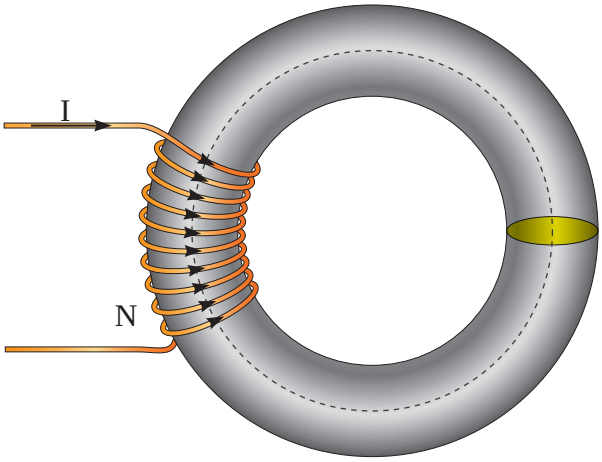
ℓ_i طول متوسط قسمت i ام مدار مغناطیسی برحسب [m]

در حالت کلی اگر مدار مغناطیسی از n قسمت تشکیل شده باشد رابطه قانون نیروی محرکه مغناطیسی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\theta = H_1\ell_1 + H_2\ell_2 + \ldots + H_n\ell_n \qquad (۱ - ۲۷)$$

تحلیل مدارهای مغناطیسی با قانون نیروی محرکه مغناطیسی یکی از روش‌هایی است که غالباً نتایج دقیقی از آن به‌دست می‌آید.

قانون نیروی محرکه مغناطیسی برای مدار مغناطیسی شکل (۶۵ ـ ۱) به‌صورت رابطه (۲۸ ـ ۱) در می‌آید.



شکل ۶۵ ـ ۱

$$\theta = H_C . \ell_C \qquad (۱ - ۲۸)$$

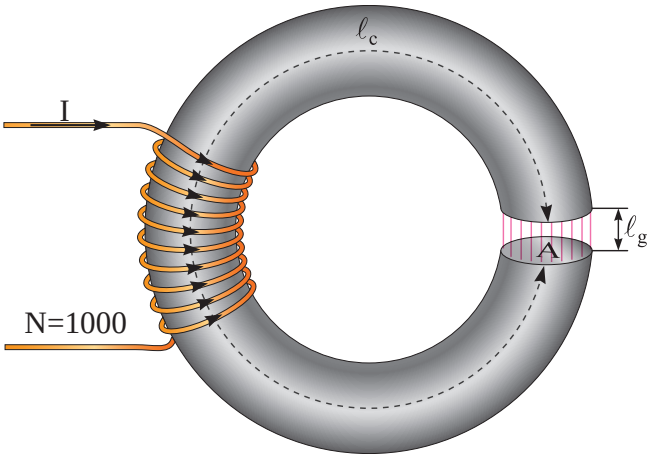
در این رابطه:

H_C شدت میدان مغناطیسی هسته برحسب $\left[\frac{A.turn}{m}\right]$

ℓ_C طول متوسط هسته بر حسب m

θ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ بر حسب $[A.turn]$

اگر چنانچه هسته مدار مغناطیسی دارای شکاف هوایی به طول ℓ_g و شدت میدان مغناطیسی H_g و ماده فرومغناطیس به طول ℓ_C و شدت میدان مغناطیسی H_C مطابق شکل (۶۶ ـ ۱) باشد رابطه قانون نیروی محرکه مغناطیسی به‌صورت رابطه (۲۹ ـ ۱) نوشته می‌شود.



شکل ۶۶ ـ ۱

$$\theta_{eq} = H_g \ell_g + H_C \ell_C \qquad (۱ ـ ۲۹)$$

شدت میدان مغناطیسی هسته فرومغناطیسی H_C از منحنی مغناطیسی شکل‌های (۲۷ ـ ۱) و (۲۹ ـ ۱) باتوجه به جنس هسته و شدت میدان مغناطیسی شکاف هوایی H_g از رابطه (۱۰ ـ ۱) به‌صورت $H_g = \frac{B_\circ}{\mu_\circ}$ پس از تعیین B به‌دست می‌آیند. مقادیر ℓ_g و ℓ_C با توجه به شکل هندسی مدار مغناطیسی محاسبه می‌شوند.

مثال ۱۸ ـ ۱ ـ مدار مغناطیسی مطابق شکل (۶۶ ـ ۱) دارای هسته فرومغناطیسی از جنس فولاد ورق به طول متوسط ℓ_C=۵۰cm و سطح مقطع A_C=۶۴cm^۲ دارای یک شکاف هوایی به‌طول ℓ_g=۱/۱mm و فوران مغناطیسی هسته φ_C =۹/۲۸ mwb می‌باشد. جریان سیم‌پیچ را به کمک قانون نیروی محرکه مغناطیسی تعیین کنید.

حل:

فوران مغناطیسی هسته فرومغناطیسی و شکاف هوایی برابر است زیرا این دو قسمت با یکدیگر سری هستند.

$$\varphi = \varphi_C = \varphi_g = ۸ \left[mwb\right]$$

سطح مقطع هسته A_C با سطح مقطع شکاف هوایی A_g با هم برابر فرض می‌شوند؛ زیرا طول شکاف هوایی در مقابل سطح مقطع هسته بسیار کوچک‌تر است. چگالی فوران مغناطیسی هسته از رابطه (۳ ـ ۱) برابر است با:

$$A = A_C = A_g = ۶۴ \left[cm^۲\right]$$

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

$$B = \frac{۹/۲۸ \times ۱۰^{-۳}}{۶۴ \times ۱۰^{-۴}} = ۱/۴۵ \left[T\right]$$

با توجه به مقدار B از منحنی مغناطیسی شکل (۲۷ ـ ۱) تعداد H_C برای فولاد ورق به‌دست می‌آید:

$$B = ۱/۴۵ \xrightarrow[\text{شکل (۲۷ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} H_C = ۸۰۰ \left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

با فرض اینکه هوا مشابه خلأ است، شدت میدان مغناطیسی شکاف هوایی از رابطه (۱۰ ـ ۱) برابر است با:

$$H_g = \frac{B}{\mu_\circ} = \frac{۱/۴۵}{۴\pi \times ۱۰^{-۷}} = ۱۱۵۴۴۵۸ \left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۲۹ ـ ۱) محاسبه می‌شود:

$$\theta = H_g \ell_g + H_C \ell_C$$

$$\theta = ۱۱۵۴۴۵۸ \times ۱/۱ \times ۱۰^{-۳} + ۸۰۰ \times ۵۰ \times ۱۰^{-۲}$$

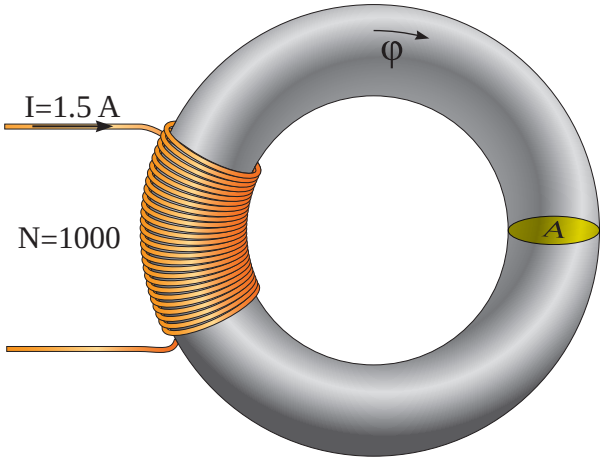
$$= ۱۶۷۰ \left[A\right]$$

از رابطه (۶ ـ ۱) شدت جریان به‌دست می‌آید.

$$\theta = NI$$

$$I = \frac{\theta}{N} = \frac{۱۶۷۰}{۱۰۰۰} = ۱/۶ \left[A.turn\right]$$

مثال ۱۹ ـ ۱ ـ اگر در مثال ۱۸ ـ ۱ شکاف هوایی مدار مغناطیسی با به هم رساندن هسته مغناطیسی مطابق شکل (۶۷ ـ ۱) از بین برود و جریان سیم‌پیچ ثابت بماند، فوران مغناطیسی هسته چند میلی وبر می‌شود؟



شکل ۶۷ ـ ۱

حل:

ـ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ از رابطه (۶ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\theta = NI = ۱۰۰۰ \times ۱ = ۱۰۰۰\,[A.turn]$$

ـ شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$H_C = \frac{\theta}{\ell_C} = \frac{۱۰۰۰}{۵۰ \times ۱۰^{-۲}} = ۲۰۰۰ \left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

ـ با توجه به مقدار H_C از منحنی مغناطیس شکل (۲۷ ـ ۱) مقدار B برای فولاد ورق به‌دست می‌آید:

$$H_C = ۲۰۰۰ \xrightarrow[\text{شکل (۲۷ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیس}} B = ۱/۶[T]$$

ـ فوران مغناطیسی از رابطه (۳ ـ ۱) محاسبه می‌شود:

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

$$\varphi = B.A = ۱/۶ \times ۶۴ \times ۱۰^{-۴} = ۰/۰۱wb$$

ـ واحد فوران مغناطیسی به میلی وبر تبدیل می‌شود:

$$\frac{۱wb}{۰/۰۱} = \frac{۱۰۰۰mwb}{\varphi} \Rightarrow \varphi = \frac{۰/۰۱ \times ۱۰۰۰}{۱}$$

$$= ۱۰\,[mwb]$$

ـ با از بین رفتن شکاف هوایی، مقاومت مغناطیسی کمتر می‌شود و فوران مغناطیسی هسته افزایش می‌یابد.

مدارهای مغناطیسی به گونه‌ای طراحی می‌شوند که دارای حداقل فاصله شکاف هوایی یا در صورت امکان فاقد شکاف هوایی باشند تا با جریان الکتریکی کمتر، فوران مغناطیسی بیشتری تولید شود.

تمرین ۷ ـ ۱

۱ ـ هسته مغناطیسی از جنس فولاد الکتریکی *M-5* بدون فاصله هوایی به طول متوسط ۴۰ cm و سطح مقطع ۵۰ cm^2 دارای فوران مغناطیسی ۱۰mwb می‌باشد. به روی این هسته یک سیم‌پیچ با ۴۰۰۰ حلقه قرار دارد. مطلوب است:

الف ـ شدت جریان سیم‌پیچ

ب ـ اگر یک فاصله هوایی ۱ mm در هسته ایجاد شود شدت جریان سیم‌پیچ چند آمپر خواهد شد؟ درصورتی‌که بخواهیم فوران هسته ثابت بماند.

۲ ـ یک مدار مغناطیسی با مقاومت مغناطیسی $۴۵۰۰۰\left[\frac{A.turn}{wb}\right]$ دارای فوران مغناطیسی ۱۰ mwb می‌باشد. اگر تعداد دور سیم‌پیچ ۱۰۰۰ و طول متوسط

هسته cm ۹۰ باشد مطلوب است:

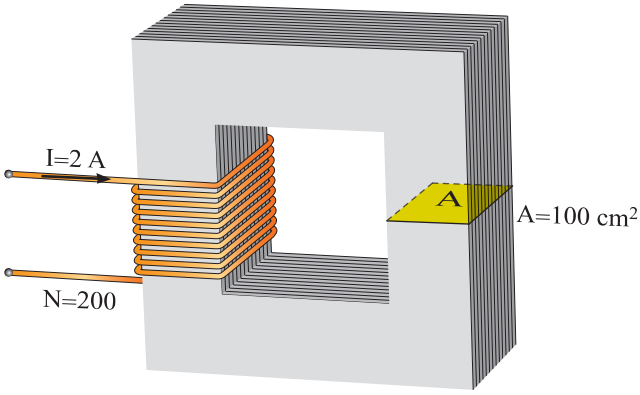
الف ـ جریان سیم‌پیچ

ب ـ شدت میدان هسته

۳ ـ در مـــدار مغناطیســـی شـــکل (۶۸ ـ ۱) فوران مغناطیسی هسته mwb ۱۰ است؛ مطلوب است:

الف ـ مقاومت مغناطیسی هسته

ب ـ اگر یک فاصله هوایی ۱/۲mm در هسته ایجاد شـــود و بخواهیم فوران هسته همان مقدار قبلی بماند، جریان سیم‌پیچ را چند آمپر باید افزایش دهیم.(π=۳)

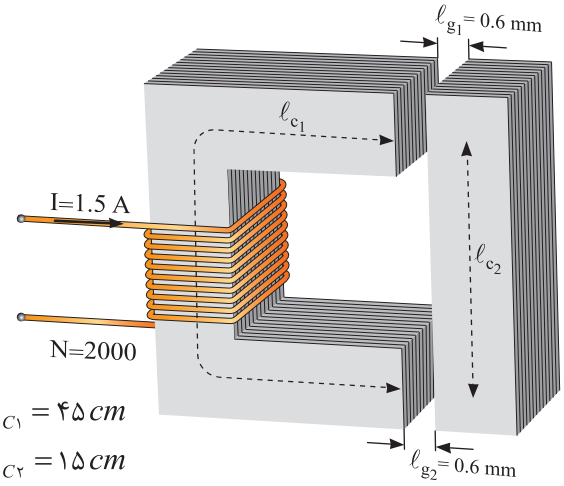


شکل ۶۸ ـ ۱

۴ ـ در مدار مغناطیســـی شـــکل (۶۹ ـ ۱) مطلوب است محاسبه:

الـــف ـ مقاومـــت مغناطیســـی در صورتی‌که فوران مغناطیسی هسته mwb ۱۲ باشد.

ب ـ ضریب نفوذ نسبی هسته



$\ell_{C_1} = ۴۵\,cm$

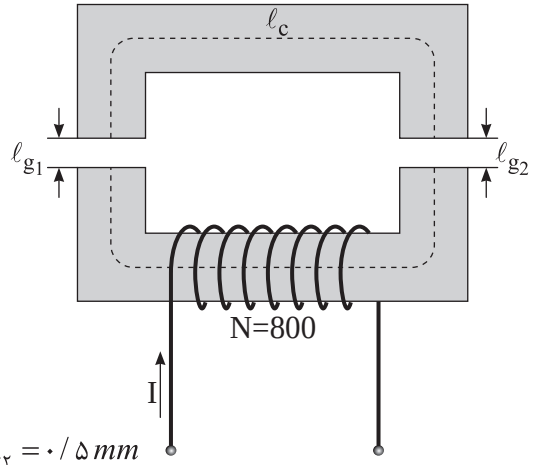
$\ell_{C_2} = ۱۵\,cm$

$A = ۵۰\,cm^۲$

$\pi = ۳$

شکل ۶۹ ـ ۱

۵ ـ یک هسته مغناطیسی از جنس فولاد الکتریکی $M\text{-}5$ مطابق شکل (۷۰ ـ ۱) مفروض است. در صورتی‌که بخواهیم فوران مغناطیسی mwb ۰/۴ در هسته برقرار شود شدت جریان سیم‌پیچ باید چند آمپر باشد؟



$\ell_{g_1} = \ell_{g_2} = ۰/۵\,mm$

$A_g = A_C = ۴\,cm^۲$

$\ell_C = ۳۰\,cm$

شکل ۷۰ ـ ۱