

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 هیستریزیس را توضیح دهد.
- منحنی هیستریزیس را در مواد مغناطیسی سخت، نرم و فریت توضیح دهد.

- منحنی‌های هیستریزیس 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

دو علم الکتریسیته و مغناطیس را به یکدیگر مربوط ساخت. برای تشریح رابطه بین جریان الکتریکی و مغناطیس نظریه‌ای به وجود آمده است که به آن نظریه الکترو مغناطیس^۲ می‌گویند. تأثیر میدان مغناطیسی اطراف یک هادی حامل جریان بر عقربه قطب‌نما در شکل (۱ - ۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱

مشاهده می‌شود عقربه قطب‌نما، عمود بر هادی

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^۱ برای اولین بار متوجه شد که جریان الکتریکی می‌تواند آثار مغناطیسی بوجود آورد. این کشف مهم

مغناطیسی است. با ورود فناوری نانو به علم و صنعت مغناطیس، بهبود زیادی در کیفیت مغناطیس‌ها ایجاد شده است و مغناطیس‌هایی با ابعاد کوچک و نیروی مغناطیسی بزرگ ساخته شده‌اند.

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

یکی از حوزه‌هایی که انتظار می‌رود فناوری نانو^۱ اثر فراوانی بر پیشرفت آن داشته باشد، مغناطیس‌ها و مواد

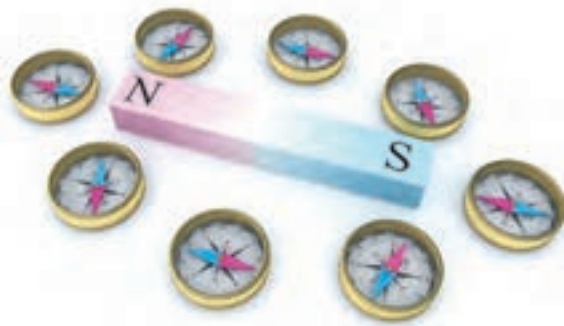
هانس کریستن اوستد



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

منبع: کتاب زندگی‌نامه دانشمندان جهان

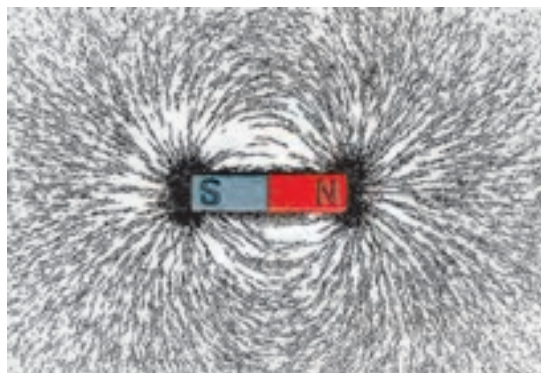
۱-۱- میدان مغناطیسی



شکل ۱-۲

در فضای اطراف یک آهن‌ربا یا مغناطیس طبیعی خاصیتی وجود دارد که ذرات آهن را به خود جذب می‌کند. به این فضا «میدان مغناطیسی»^۲ می‌گویند. میدان مغناطیسی بر قطب‌نما تأثیر می‌گذارد و باعث انحراف آن می‌شود پس با حرکت دادن یک قطب‌نما در اطراف یک آهن‌ربا می‌توان به وجود میدان مغناطیسی پی برد (شکل ۱-۲).

با قرار دادن یک مقوا بر روی یک آهن‌ربا و پاشیدن براده‌های آهن به روی مقوا می‌توان خطوط نیروی میدان مغناطیسی را مشاهده کرد. (شکل ۱-۳)
هر خط نیروی میدان مغناطیسی را یک ماکسول^۳ (max) می‌گویند.

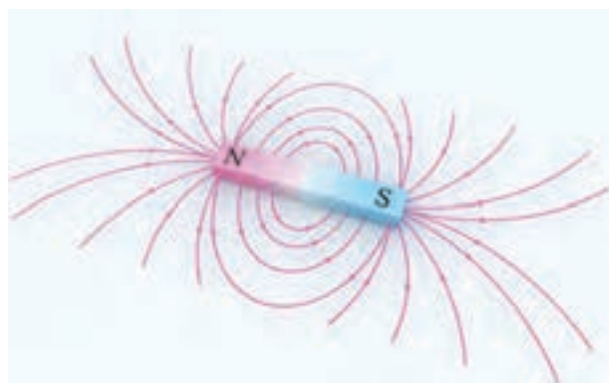


شکل ۱-۳



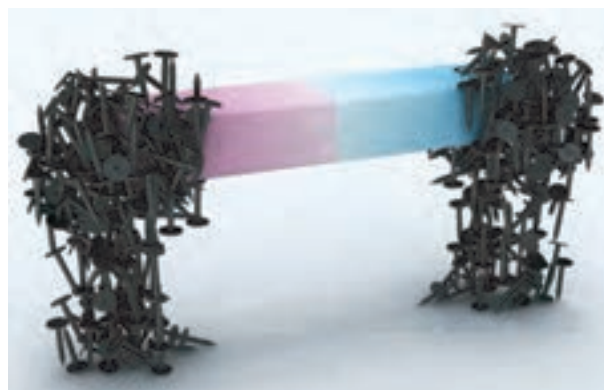
جیمز کلارک ماکسول در ۱۳ نوامبر سال ۱۸۳۱ در ادینبرای اسکاتلند متولد شد. از کودکی به ریاضیات و فیزیک علاقه فراوان داشت، در سال ۱۸۴۷ وارد دانشگاه ادینبرا شد و در ۱۸۵۰ به دانشگاه کمبریج رفت و در سال ۱۸۵۴ از تحصیل فراغت یافت.

ماکسول از سال ۱۸۵۶ تا ۱۸۶۵ استاد کالج مارشال در آبردین و کالج کینگ لندن بود، وی در سال ۱۸۷۳ کتابی به نام دوره الکتریسیته و مغناطیس منتشر کرد و بلافاصله به سمت استاد کرسی فیزیک دانشگاه انتخاب شد. وی عمر وی کوتاه بود و در سال ۱۸۷۹ در سن ۴۹ سالگی وفات یافت.
منبع www.roshd.ir



شکل ۵-۱ خطوط نیروی میدان مغناطیسی

خطوط نیروی میدان مغناطیسی در دو نقطه معین از میدان مغناطیسی دارای فشردگی بیشتری نسبت به سایر نقاط است این نقاط را قطب‌های مغناطیسی^۱ می‌نامند و با حروف N و S آنها را نشان می‌دهند. اثر جذب در قطب‌های میدان مغناطیسی بسیار قوی‌تر از سایر نقاط میدان مغناطیسی است (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱

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 ۵-۱).

۲-۱- فوران مغناطیسی

در شکل (۳-۱) خطوط نیروی میدان مغناطیسی اطراف یک آهن‌ربا نمایش داده شده است. به مجموع خطوط نیروی میدان مغناطیسی اطراف یک مغناطیس یا آهن‌ربا «فوران» یا «شار مغناطیسی^۲» می‌گویند و آن را با Φ نشان می‌دهند^۳.

واحد فوران مغناطیسی ولت.ثانیه ($V \cdot sec$) است که اصطلاحاً به آن وِبر wb می‌گویند. یک وِبر^۴ برابر با 10^8

۴. Weber

۳. در برخی کتب آن را Flow می‌نامند.

۲. Magnetic Flux

۱. Magnetic poles

خط نیروی میدان مغناطیسی یا ماکسول است. پس: کوچک‌تر آن میلی وبر mwb می‌باشد. یک وبر برابر با 10^3 میلی وبر است. یعنی:

$$1[v.sec] = 1[wb] = 10^9[max] \quad (1-1)$$

واحد رایج فوران مغناطیسی وبر wb است و واحد

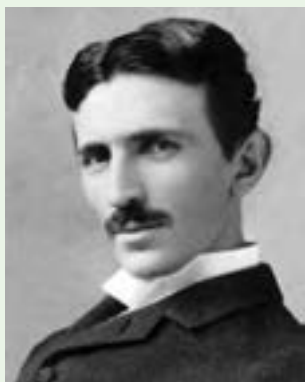
$$1[wb] = 10^9[mwb] \quad (1-2)$$

ویلهلم وبر



ویلهلم 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 - 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 ۱-۱ - فوران مغناطیسی یک آهن‌ربا

$2/5$ میلی وبر $[mwb]$ است. فوران این آهن‌ربا چند ماکسول $[max]$ است؟

حل:

- با استفاده از تناسب، واحد فوران را به وبر تبدیل

می‌کنیم.

$$\frac{1wb}{\phi} = \frac{10^9 mwb}{2/5 mwb}$$

$$\phi = \frac{2/5 \times 1}{10^9}$$

$$\phi = 2/5 \times 1 \times 10^{-9}$$

$$\phi = 2/5 \times 10^{-9} [wb]$$

- یک وبر برابر با 10^6 خط نیروی میدان مغناطیسی یا ماکسول max است.

$$\frac{1wb}{2/5 \times 10^{-3}} = \frac{10^6 max}{\varphi}$$

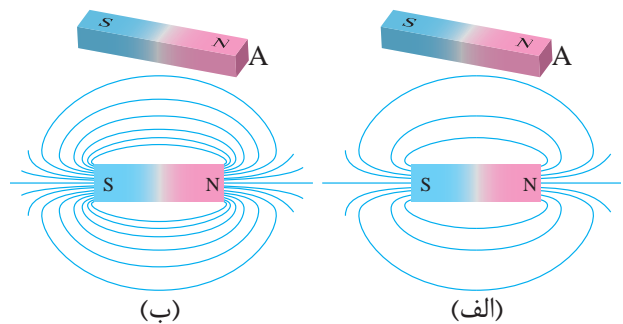
$$\varphi = \frac{2/5 \times 10^{-3} \times 10^6}{1}$$

$$\varphi = 2/5 \times 10^5 = 250000 [max]$$

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

۳-۱- چگالی فوران مغناطیسی

دو آهنربا با ابعاد مشابه و فوران‌های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ماکسول که سطح مقطع قطب آنها با A مشخص می‌باشد در شکل (۶-۱) نشان داده شده است.



شکل ۶-۱

میدان مغناطیسی آهنربای شکل (الف - ۶-۱) در سطح مقطع قطب خود ۱۰۰۰ و میدان مغناطیسی آهنربای شکل (ب - ۶-۱) در سطح مقطع قطب خود ۲۰۰۰ خط نیروی وجود دارد. اما آهنربای شکل (ب - ۶-۱) 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 شکل (ب - ۶-۱) نسبت به شکل (الف - ۶-۱) فشرده و متراکمتر می‌باشد، لذا میدان مغناطیسی آن قوی‌تر است. در واقع میدان مغناطیسی این دو آهنربا با یکدیگر تفاوت دارند. برای نشان دادن این تفاوت، کمیتی به نام «چگالی فوران مغناطیسی»^۱ تعریف می‌شود و آن را با B نشان می‌دهند.

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

چگالی فوران مغناطیسی از رابطه (۳-۱) به دست می‌آید.

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

در این رابطه:

φ فوران مغناطیسی بر حسب وبر wb

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

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

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

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

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 شد. خود او، وقتی دوران کودکی‌اش را به یاد می‌آورد، به شوخی می‌گفت: «من شمردن را پیش از حرف زدن یاد گرفتم» او آموزش عالی خود را در دانشگاه گوتینگن گذراند. بعدها به مدت ۵۰ سال، کرسی استادی همین دانشگاه را به عهده داشت. گاوس در سال ۱۸۵۵ درگذشت.

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

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

- واحد فوران مغناطیسی به وبر تبدیل می‌شود:

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

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

- از رابطه (۳ - ۱) چگالی فوران مغناطیسی به دست می‌آید:

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

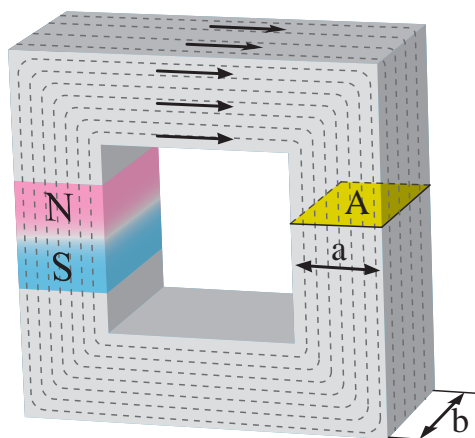
- واحد چگالی فوران مغناطیسی به گاوس تبدیل می‌شود:

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

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

مثال ۱-۲ - آهن‌ربایی با فوران مغناطیسی

$200 mwb$ مطابق شکل (۷ - ۱) در نظر است. چگالی فوران مغناطیسی در سطح مقطع A هسته چند گاوس می‌باشد؟ در صورتی که $b=20 mm$ و $a=10 mm$ باشد.



شکل ۷-۱

حل:

- سطح مقطع A برابر است با:

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

- واحد سطح مقطع به متر مربع تبدیل می‌شود:

پرسش ۱-۱

پرسش‌های کامل کردنی

- ۱- نظریه الکترومغناطیس رابطه و را تشریح می‌کند.
- ۲- میدان مغناطیسی بر قطب‌نما تأثیر
- ۳- به مجموع خطوط نیروی مغناطیسی اطراف یک مغناطیس یا گویند.

پرسش‌های صحیح، غلط

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

☐ صحیح ☐ غلط

- ۲- واحد فوران ولت ثانیه یا تسلا است.

☐ صحیح ☐ غلط

پرسش‌های تشریحی

- ۱- قطب‌های مغناطیسی را تعریف کنید.
- ۲- چگالی فوران مغناطیسی را تعریف کنید.
- ۳- واحد هر یک از کمیت‌های زیر را بنویسید.

الف - فوران

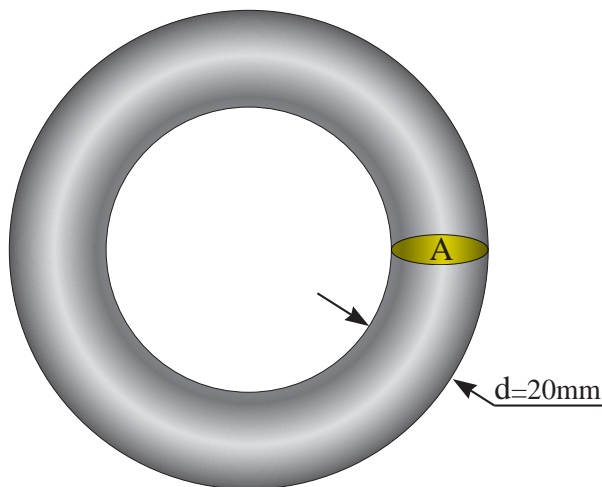
ب - چگالی فوران مغناطیسی

ج - خطوط نیروی مغناطیسی

تمرین ۱-۱

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

- ۲- آهن‌ربایی با چگالی فوران مغناطیسی 10000 G مطابق شکل (۸ - ۱) در نظر است. فوران مغناطیسی در سطح مقطع A هسته چند میلی وبر است؟

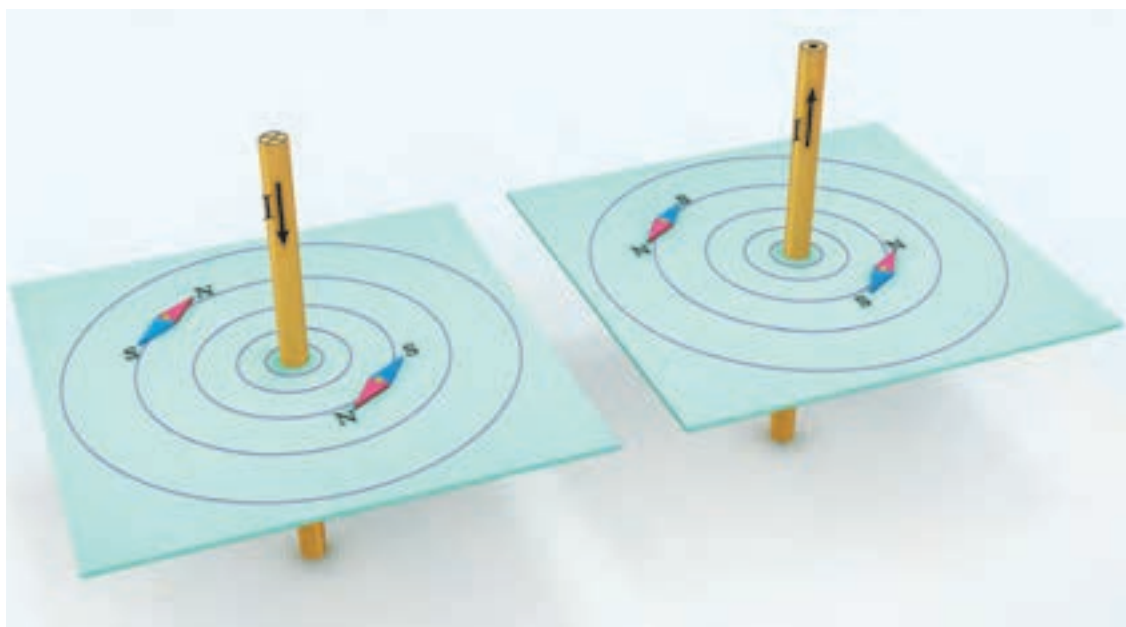


شکل ۸ - ۱

۴ - ۱ - میدان مغناطیسی اطراف هادی حامل

جریان الکتریکی

جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. اوستد 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 - 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 ۹-۱

شست^۱ نیز استفاده کرد. برای این منظور مطابق شکل (۱۰-۱) باید شست دست راست را در جهت جریان الکتریکی هادی قرار داد تا بقیه انگشتان به صورت بسته، جهت میدان الکترومغناطیسی را نشان دهند.

مشاهده می کنید مانند جهت جریان می توان جهت میدان مغناطیسی را نیز به کمک نقطه (•) و ضربدر (X) مشخص کرد.

جهت میدان الکترومغناطیسی به جهت جریان الکتریکی بستگی دارد.

۵-۱ - جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی

برای تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی علاوه بر استفاده از عقربه مغناطیسی مطابق شکل (۹-۱) می توان از قانون

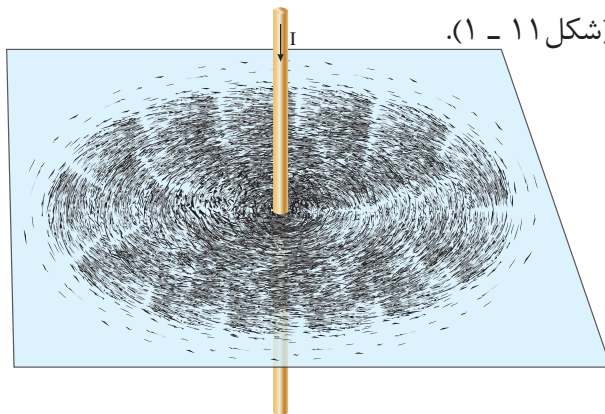


شکل ۱۰-۱

۶-۱- چگالی فوران مغناطیسی اطراف یک

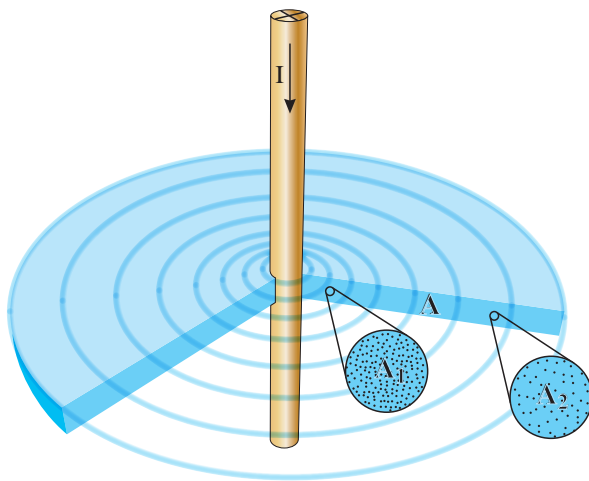
هادی حامل جریان الکتریکی

اگرستد 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 ۱۱-۱).



شکل ۱۱-۱

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 (۱۲-۱) نشان داده شده است.



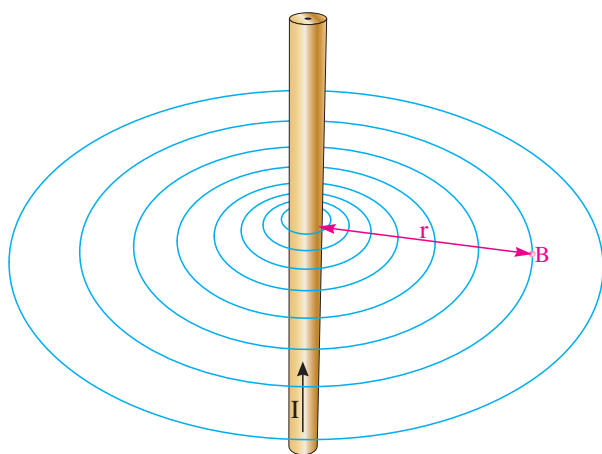
شکل ۱۲-۱

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.

۷-۱- 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 (۵-۱) را برای تعیین مقدار چگالی فوران مغناطیسی B نقطه‌ای به فاصله r از یک هادی حامل جریان به شدت I را بر اساس شکل (۱۳-۱) ارائه کردند.



شکل ۱۳-۱

$$B = k \frac{I}{r} \quad (۱-۵)$$

حل:

- واحد فاصله بر حسب متر تبدیل می‌شود.

$$\frac{1m}{r} = \frac{100cm}{1cm}$$

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

- چگالی میدان مغناطیسی از رابطه (۵ - ۱) به دست می‌آید:

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

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

- واحد چگالی فوران مغناطیسی به گوس تبدیل

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

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

در این رابطه:

B چگالی فوران میدان مغناطیسی

بر حسب $\left[\frac{wb}{m^2} \right]$

K ضریبی است که به محیط اطراف هادی بستگی

دارد و برای هوا مقدار آن 2×10^{-7} 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 - ۱ - چگالی فوران میدان مغناطیسی در

نقطه‌ای به فاصله ۱ cm از هادی حامل جریان ۱۰ A

چند گوس است؟

می‌شود:

آمپر



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

۸ - ۱ - میدان الکترومغناطیسی سیم پیچ

حامل جریان الکتریکی

هر نقطه از اطراف هادی متغیر و کم است. اگر هادی

حامل جریان الکتریکی به صورت سیم پیچ^۱ در آورده

شود ضمن اینکه میدان الکترو مغناطیسی در درون

سیم پیچ متمرکز می‌شود، چگالی فوران مغناطیسی B

نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱۴ - ۱).

میدان الکترومغناطیسی هادی حامل جریان

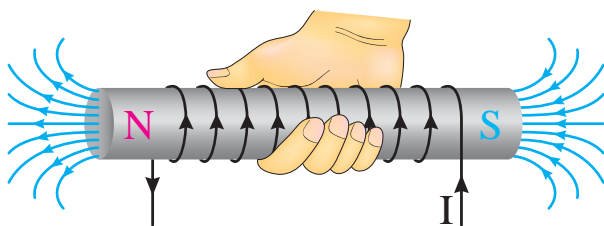
الکتریکی در سرتاسر دو طرف هادی توزیع می‌شود و

متمرکز نیست و مقدار چگالی فوران مغناطیسی B در

۱. Winding

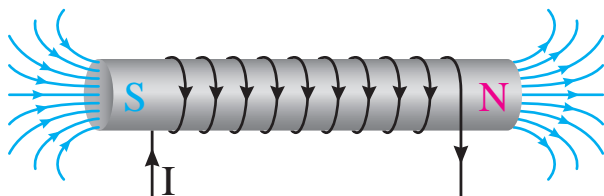
۹-۱- جهت میدان الکترومغناطیسی سیم پیچ حامل جریان الکتریکی

جهت میدان الکترومغناطیسی سیم پیچ حامل جریان الکتریکی از قاعده دست راست^۲ تعیین می شود. بدین منظور مطابق شکل (۱۶-۱) اگر انگشتان دست راست در جهت جریان الکتریکی سیم پیچ قرار گیرد، شست، جهت میدان الکترومغناطیسی را نشان می دهد. با تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی محل قطب های N و S مشخص می شود. طبق قرارداد محل خروج فوران مغناطیسی را با حرف N و محل ورود آن را با حرف S نشان می دهند.



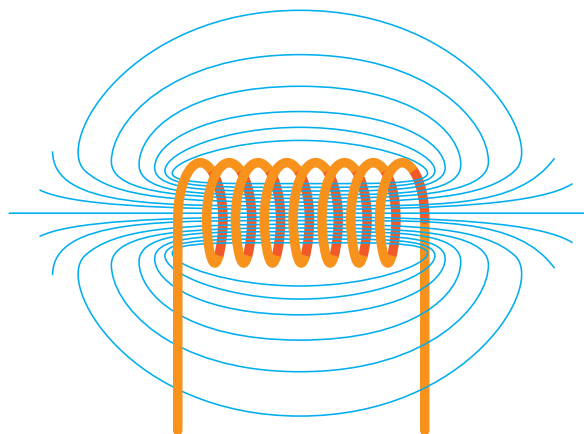
شکل ۱۶-۱

جهت میدان مغناطیسی سیم پیچ نیز تابع جهت جریان سیم پیچ است و با تغییر جهت جریان، جهت میدان مغناطیسی تغییر می کند (شکل ۱۷-۱).



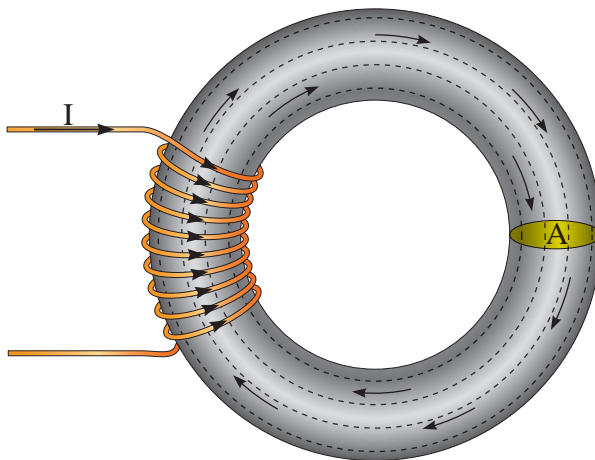
شکل ۱۷-۱

مثال ۴-۱- سیم پیچ حامل جریان الکتریکی شکل (۱۸-۱) میدان الکترومغناطیسی با فوران mwb^۳ در هسته تولید می کند. چگالی فوران مغناطیسی در هسته چند تسلا است؟



شکل ۱۴-۱

با قرار دادن سیم پیچ بر روی یک هسته از جنس مواد فرومغناطیسی^۱ مطابق شکل (۱۵-۱) و عبور جریان الکتریکی از آن، میدان الکترومغناطیسی با چگالی B بیشتری نسبت به سیم پیچ با هسته هوا ایجاد می شود. هسته فرومغناطیس باعث می شود، میدان الکترومغناطیسی درون سیم پیچ متمرکزتر شود، لذا چگالی فوران مغناطیسی افزایش می یابد.



شکل ۱۵-۱

۱. مواد فرومغناطیسی خواص آهن ربایی از خود نشان می دهند. آهن و آلیاژهای آهن، مواد فرومغناطیس هستند. ۲. Right-Hand Rule

- ۳- جهت میدان الکترومغناطیس سیم پیچ حامل جریان الکتریکی از تعیین می شود.
- ۴- محل خروج فوران مغناطیسی را با حرف نشان می دهند.

پرسش های صحیح، غلط

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

☐ صحیح ☐ غلط

- ۲- محل ورود فوران مغناطیسی را با حرف N نشان می دهند.

☐ صحیح ☐ غلط

- ۳- جهت میدان الکترومغناطیس سیم پیچ، تابع جهت جریان الکتریکی است.

☐ صحیح ☐ غلط

پرسش های تشریحی

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

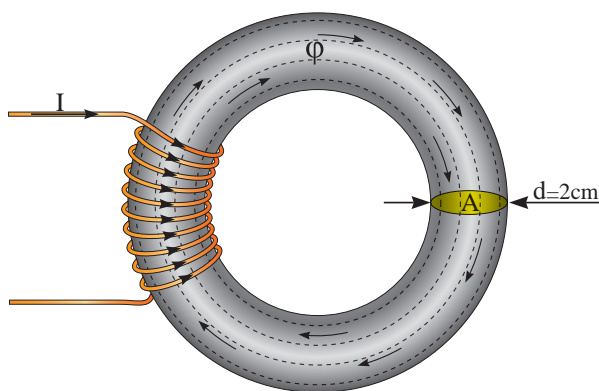
- ۲- جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی های شکل های (۱۹ - ۱) و (۲۰ - ۱) را به دست آورید.



شکل ۲۰ - ۱



شکل ۱۹ - ۱



شکل ۱۸ - ۱

حل:

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

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

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

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

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

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

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

پرسش ۲ - ۱

پرسش های کامل کردنی

- ۱- جریان الکتریکی میدان تولید می کند.
- ۲- برای تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان علاوه بر استفاده از می توان از قانون نیز استفاده کرد.

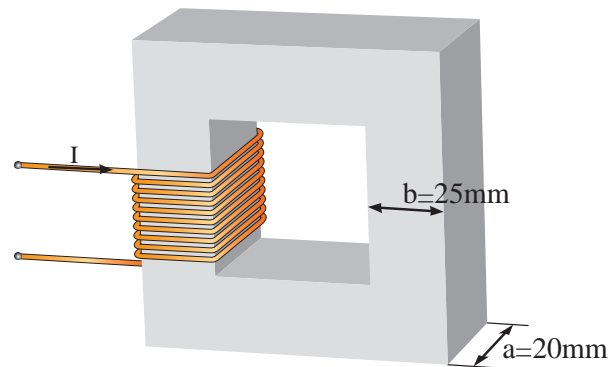
۳- میدان مغناطیسی هادی حامل جریان الکتریکی و سیم پیچ حامل جریان الکتریکی را با یکدیگر مقایسه کنید.

۴- نقش هسته فرومغناطیس را در سیم پیچ شرح دهید.

تمرین ۲-۱

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

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



شکل ۲۱-۱

۱۰-۱ نیروی محرکه مغناطیسی سیم پیچ

حامل جریان الکتریکی

علت ایجاد میدان الکترومغناطیسی شکل (۱۴-۱) عبور شدت جریان الکتریکی از حلقه های سیم پیچ است. میدان الکترومغناطیسی حلقه ها با یکدیگر جمع می شود و میدان الکترومغناطیسی قوی تولید خواهد شد. حاصل ضرب شدت جریان الکتریکی در

تعداد حلقه های سیم پیچ را نیروی محرکه مغناطیسی^۱ گویند و از رابطه (۶-۱) به دست می آید.

$$\theta = NI \quad (۶-۱)$$

در این رابطه:

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

N تعداد حلقه های سیم پیچ بر حسب دور

I شدت جریان الکتریکی سیم پیچ بر حسب آمپر [A]

مقدار نیروی محرکه مغناطیسی تابع شدت جریان الکتریکی سیم پیچ و تعداد حلقه های آن است.

مثال ۵-۱ از یک سیم پیچ با ۵۰۰۰ دور، جریان الکتریکی ۰/۱ آمپر می گذرد. نیروی محرکه مغناطیسی آن چند آمپر است؟
حل:

$$\theta = NI$$

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

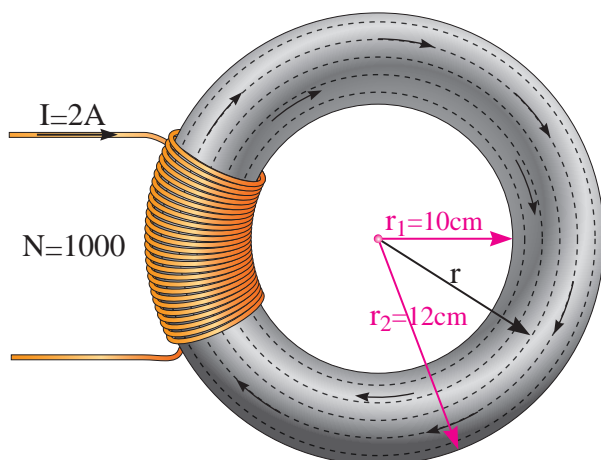
۱۱-۱ شدت میدان مغناطیسی^۳

فوران میدان مغناطیسی یک سیم پیچ حامل جریان از تمام نقاط سطح مقطع هسته آن می گذرد. خطوط نیروی میدان مغناطیسی به موازات یکدیگر، طول مسیر هسته را طی می کنند و یکدیگر را قطع نمی کنند. شکل (۲۲-۱)

۲. در برخی کتب دور را به عنوان واحد نمی پذیرند و واحد نیروی محرکه مغناطیسی را [A] معرفی می کنند.

۱. Magneto Motive Force
۳. Magnetic Field Intensity

مثال ۶-۱ - شدت میدان مغناطیسی شکل (۲۳-۱) را به دست آورید.



شکل ۲۳-۱

حل:

- شدت میدان مغناطیسی H از رابطه (۷-۱)

به دست می آید:

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

- طول متوسط هسته ℓ_C به شکل دایره است؛ برای محاسبه آن باید ابتدا شعاع متوسط هسته را به دست

آورد:

$$r = \frac{r_1 + r_2}{2} = \frac{10 + 12}{2} = 11 \text{ cm}$$

- محیط دایره از رابطه زیر به دست می آید:

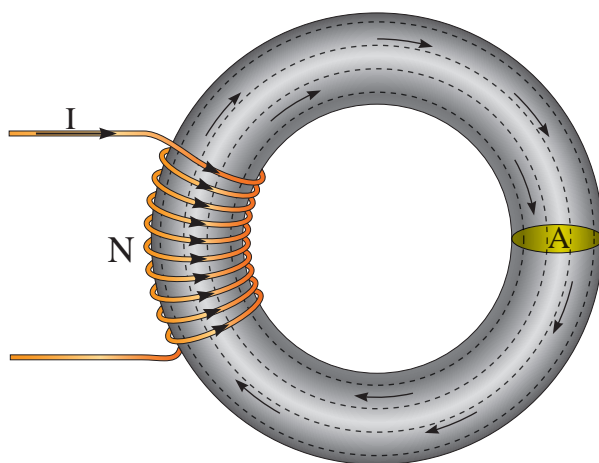
$$\ell = 2\pi r$$

$$\ell_C = 2 \times 3.14 \times 11 = 69.08 \text{ cm}$$

- واحد طول متوسط را به متر تبدیل می کنیم:

$$\frac{1 \text{ m}}{\ell_C} = \frac{100 \text{ cm}}{69.08 \text{ cm}}$$

$$\ell_C = \frac{69.08 \times 1}{100} = 0.6908 \text{ m}$$



شکل ۲۲-۱

نسبت نیروی محرکه مغناطیسی θ به طول متوسط هسته ℓ_C را «شدت میدان مغناطیسی» گویند و آن را با H نمایش می دهند و از رابطه (۷-۱) به دست می آید.

$$H = \frac{\theta}{\ell_C} = \frac{NI}{\ell_C} \quad (۷-۱)$$

در این رابطه:

H شدت میدان مغناطیسی بر حسب آمپر دور بر متر $\left[\frac{\text{A.turn}}{\text{m}} \right]$
N تعداد حلقه های سیم پیچ

طول متوسط هسته بر حسب متر [m]

در رابطه (۷-۱) تعداد حلقه های سیم پیچ N و طول متوسط هسته ℓ_C مقادیر ثابت هستند و معمولاً این رابطه به صورت (۸-۱) نوشته می شود:

$$H = \frac{N}{\ell_C} \cdot I \quad (۸-۱)$$

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

- اکنون شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ - ۱) قابل محاسبه است.

$$H = \frac{NI}{\ell_c} = \frac{1000 \times 2}{0.6908} = 2895/19 \left[\frac{A.turn}{m} \right]$$

پرسش ۳ - ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ - نیروی محرکه مغناطیسی تابع و سیم‌پیچ است.

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

۳ - شدت میدان مغناطیسی از رابطه به‌دست می‌آید.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ - حاصل ضرب شدت جریان الکتریکی در تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ را نیروی محرکه مغناطیسی گویند.

☐ غلط ☐ صحیح

۲ - نسبت نیروی محرکه مغناطیسی به جریان الکتریکی سیم‌پیچ، شدت میدان مغناطیسی نام دارد.

☐ غلط ☐ صحیح

پرسش تشریحی

۱ - رابطه نیروی محرکه مغناطیسی را بنویسید و کمیت‌های آن را شرح دهید.

۲ - شدت میدان مغناطیسی را تعریف کنید.

تمرین ۳ - ۱

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

۲ - شدت میدان مغناطیسی در هسته به طول ۲۰ cm برابر $\left[\frac{A.turn}{m} \right]$ ۲۰۰۰ است. اگر سیم‌پیچ این هسته دارای ۴۰۰۰ دور باشد شدت جریان الکتریکی آن چند آمپر است؟

۱۲ - ۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی

نسبت چگالی فوران مغناطیسی B به شدت میدان مغناطیسی H را «ضریب نفوذ مغناطیسی»^۱ تعریف می‌کنند و آن را با μ نمایش می‌دهند و از رابطه (۹ - ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (۹ - ۱)$$

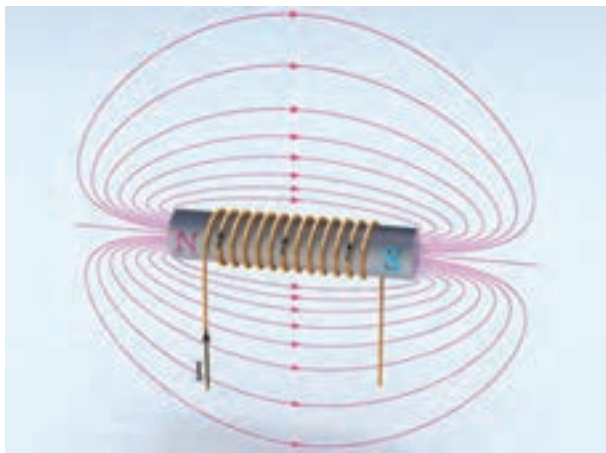
در این رابطه:

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

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

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

واحد ضریب نفوذ مغناطیسی μ از نسبت واحد چگالی میدان مغناطیسی $\left[\frac{wb}{m^2} \right]$ به واحد شدت میدان مغناطیسی $\left[\frac{A.turn}{m} \right]$ به‌دست می‌آید.



شکل ۲۵-۱

از مقایسه شکل‌های (۲۴-۱) و (۲۵-۱) 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 به دست می‌آید.

مثال ۷-۱ - 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 (۷-۱) به دست

$$H = \frac{NI}{\ell_c} = \frac{1000 \times 0.001}{0.2} = 5 \left[\frac{A.turn}{m} \right] \quad \text{می‌آید:}$$

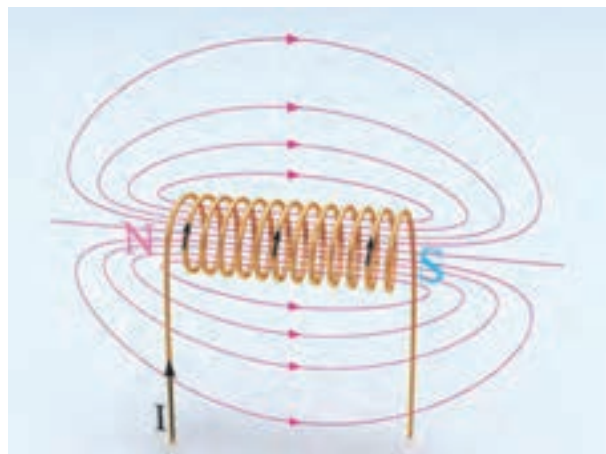
ضریب نفوذ مغناطیسی برای هسته فولادی از رابطه (۹-۱) به دست می‌آید:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{0.5}{5} = 0.1 \left[\frac{wb}{A.turn.m} \right]$$

$$[\mu] = \frac{\frac{wb}{m^3}}{\frac{A.turn}{m}} = \frac{wb.m}{A.turn.m^3} = \left[\frac{wb}{A.turn.m} \right]$$

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.^۱

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

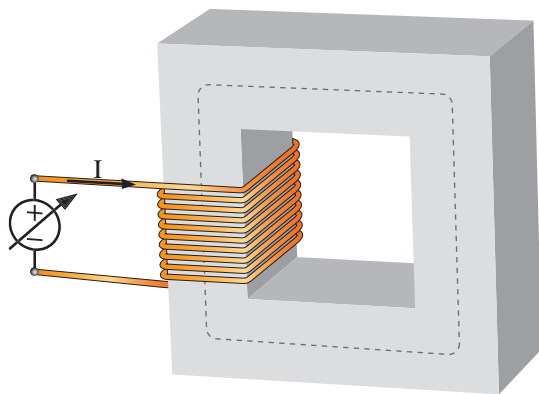


شکل ۲۴-۱

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

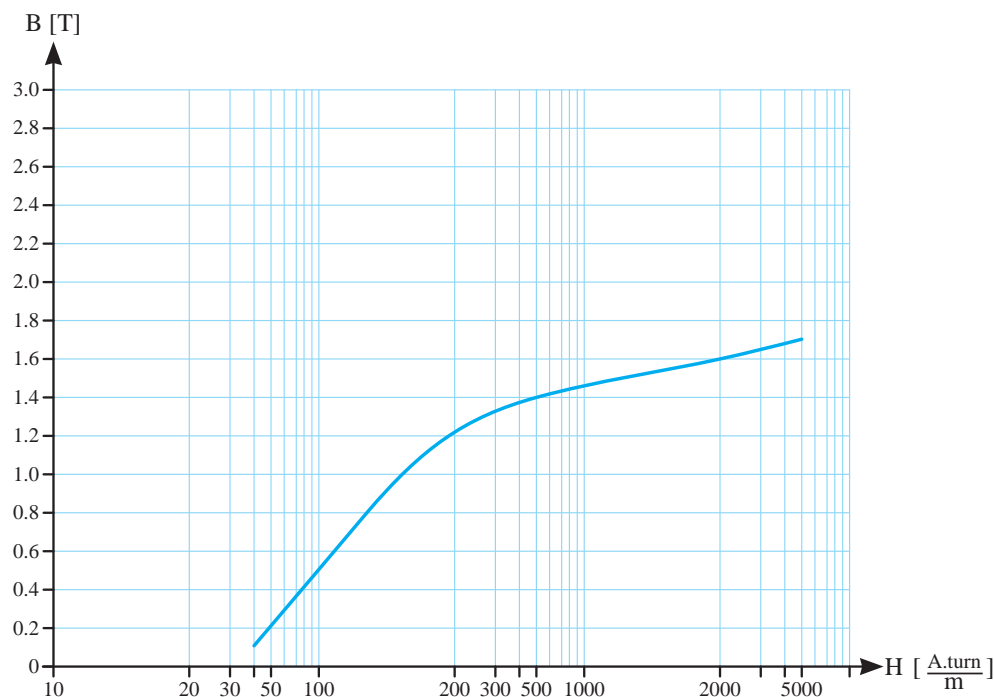
۱. برای درک بهتر ضریب نفوذ مغناطیسی مناسب است مقایسه‌ای بین عبور نور خورشید از شیشه ساده و رنگی داشته باشید.

ورق شکل (۲۶ - ۱) عبور داده شده است.



شکل ۲۶ - 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 - ۱) به دست می‌آید. این منحنی، «منحنی مغناطیسی^۱» یا «منحنی اشباع» نام دارد.



شکل ۲۷ - ۱ منحنی مغناطیسی فولاد ورق

مثال ۸ - ۱ اگر هسته سیم‌پیچ مثال ۷ - ۱ از

هوا انتخاب شود، چگالی فوران مغناطیسی به 6×10^{-6} وبر بر مترمربع کاهش می‌یابد. ضریب نفوذ مغناطیسی هوا چقدر است؟ ضریب نفوذ مغناطیسی فولاد را با هوا مقایسه کنید.

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{6 \times 10^{-6}}{5} = 1/2 \times 10^{-6} \left[\frac{wb}{A.turn.m} \right]$$

با مقایسه پاسخ‌های مثال ۷ - ۱ و ۸ - ۱ مشاهده

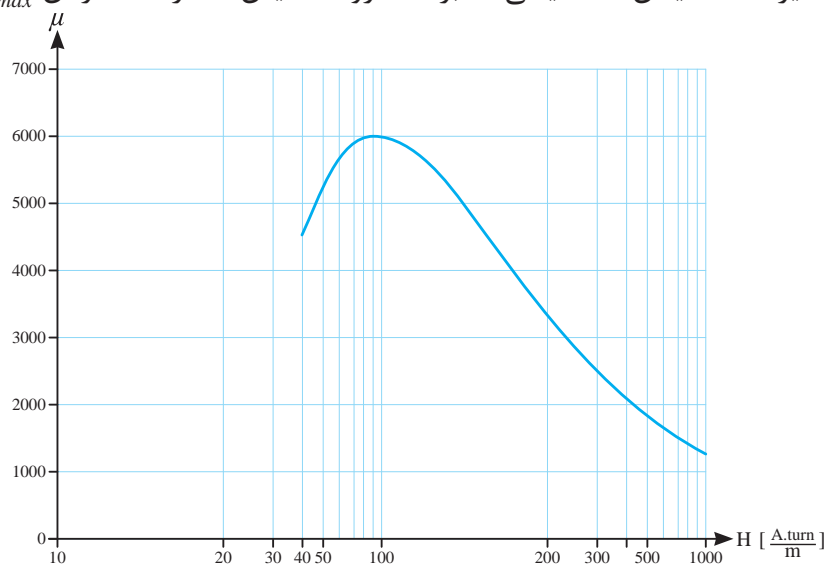
می‌شود ضریب نفوذ مغناطیسی فولاد خیلی بزرگ‌تر از ضریب نفوذ هوا می‌باشد.

۱۳ - ۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ با

هسته فرومغناطیس

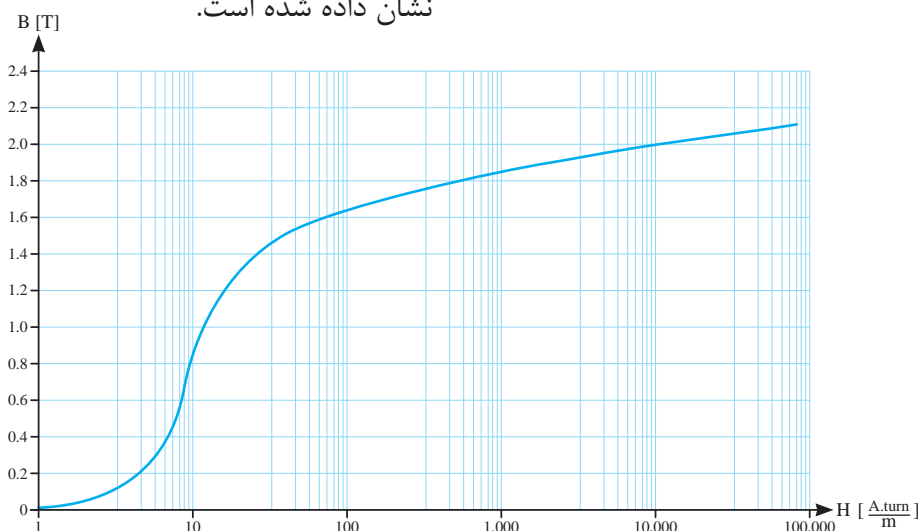
برای نشان دادن چگونگی رفتار ضریب نفوذ مغناطیسی μ در هسته فرومغناطیس، جریان مستقیم DC از سیم‌پیچ با هسته فرومغناطیسی از جنس فولاد

ضریب نفوذ مغناطیسی μ هسته فرومغناطیس در شکل (۲۸ - ۱) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد ضریب نفوذ مغناطیسی مواد فرومغناطیس مقدار ثابتی ندارد. منظور از مقدار ضریب نفوذ مغناطیسی μ مواد فرومغناطیس مقدار حداکثر آن μ_{max} است.



شکل ۲۸ - ۱

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



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

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

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.

مقدار B به دست می آید:

$$H = 1000 \left[\frac{A \cdot \text{turn}}{m} \right] \xrightarrow[\text{شکل (۱-۲۹)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} B = 1/85 [T]$$

چگالی فوران مغناطیسی هسته از جنس فولاد الکتریکی M-5 بیشتر از فولاد ورق شده است. در صورتی که 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 ۱۱-۱ - شدت جریان الکتریکی سیم پیچ ۱۰۰۰ حلقه ای با هسته فولاد ورق به طول متوسط ۱۰ سانتی متر و چگالی میدان مغناطیسی ۱/۲ وبر به مترمربع چند آمپر است؟
حل:

- از منحنی شکل (۱-۲۷) شدت میدان مغناطیسی لازم برای تولید چگالی فوران مغناطیسی ۱/۲ وبر بر مترمربع به دست می آید:

$$B = 1/2 [T] \xrightarrow[\text{شکل (۱-۲۷)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} H = 200 \left[\frac{A \cdot \text{turn}}{m} \right]$$

- جریان سیم پیچ از رابطه (۱-۷) به دست می آید.

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

$$I = \frac{H \cdot \ell_c}{N} = \frac{200 \times 10 \times 10^{-2}}{1000} = 0.02 [A]$$

در عمل از منحنی مغناطیسی برای تعیین B بر حسب H یا H بر حسب B می توان استفاده کرد. مثال های زیر این موضوع را روشن می کند.

مثال ۹-۱ - یک سیم پیچ ۱۰۰ حلقه ای حامل جریان الکتریکی ۱ آمپر بر روی یک هسته از جنس فولاد ورق به طول متوسط ۱۰ سانتی متر قرار دارد. چگالی فوران مغناطیسی در هسته چند تسلا است؟
حل:

- شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۱-۷) به دست می آید:

$$H = \frac{NI}{\ell_c} = \frac{100 \times 1}{10 \times 10^{-2}} = 1000 \left[\frac{A \cdot \text{turn}}{m} \right]$$

- از منحنی مغناطیسی شکل (۱-۲۷) به ازای H=۱۰۰۰ مقدار B به دست می آید.

$$H = 1000 \left[\frac{A \cdot \text{turn}}{m} \right] \xrightarrow[\text{شکل (۱-۲۷)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} B = 1/5 [T]$$

مثال ۱۰-۱ - اگر هسته سیم پیچ مثال ۹-۱ از جنس فولاد الکتریکی M-5 انتخاب شود، چگالی فوران مغناطیسی هسته چند تسلا می شود؟ از مقایسه جواب های این دو مثال چند نتیجه ای به دست می آید؟
حل:

- تعداد حلقه، جریان الکتریکی سیم پیچ و طول هسته تغییر نکرده است؛ لذا شدت میدان مغناطیسی ثابت می ماند. یعنی:

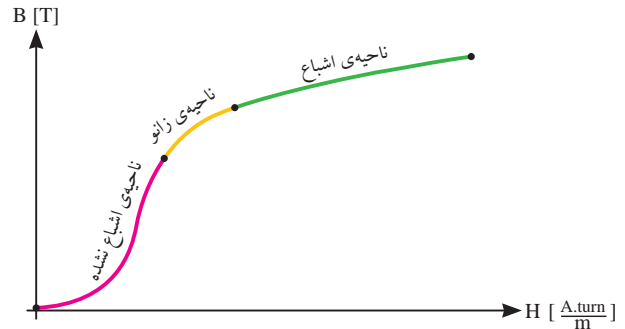
$$H = 1000 \left[\frac{A \cdot \text{turn}}{m} \right]$$

- از منحنی مغناطیسی (۱-۲۹) به ازای H=۱۰۰۰

۱۴-۱- نواحی منحنی مغناطیسی مواد

فرومغناطیس

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



شکل ۱-۳۰

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.

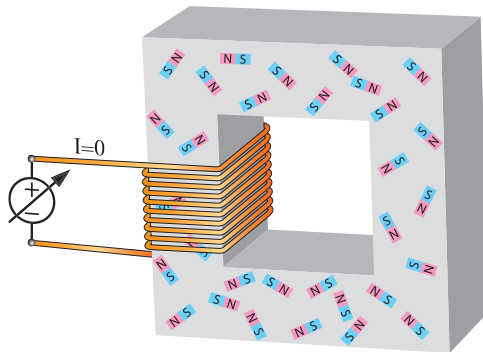
ناحیه اشباع^۲: در این ناحیه تغییر شدت میدان مغناطیسی H تاثیر چندانی بر چگالی فوران مغناطیسی B نمی‌گذارد و منحنی مغناطیسی تقریباً تخت می‌شود. در ناحیه اشباع ضریب نفوذ مغناطیسی μ کاهش می‌یابد و به سمت عدد ثابت $\frac{wb}{A \cdot \text{turn} \cdot m} \times 10^{-7} \times 4\pi$ میل می‌کند.

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.

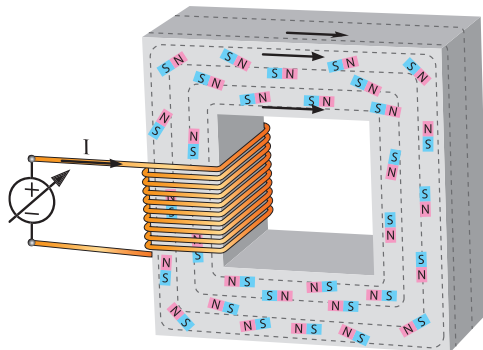
هسته فرومغناطیسی که سیم‌پیچ آن فاقد جریان الکتریکی است در شکل (۱-۳۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۳۱

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 (۱-۳۲)

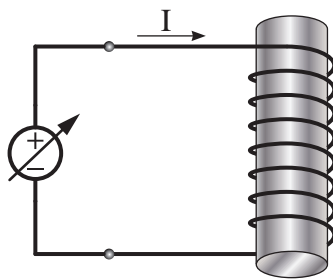


شکل ۱-۳۲

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.

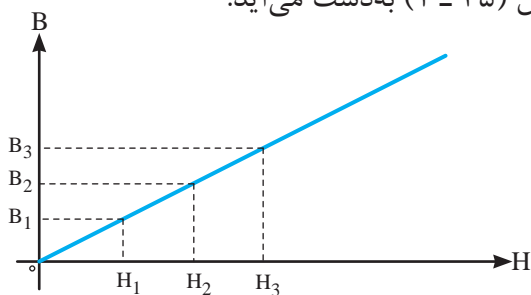
۱۵-۱- ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ بدون هسته در خلأ

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



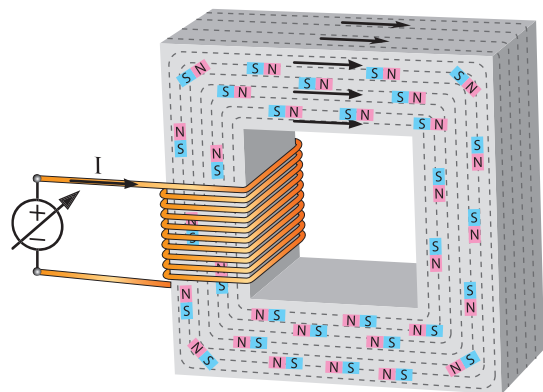
شکل ۳۴-۱

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 سیم‌پیچ رسم شود، نمودار خطی شکل (۳۵-۱) به دست می‌آید.



شکل ۳۵-۱

با افزایش بیشتر جریان الکتریکی سیم‌پیچ، شدت میدان مغناطیسی H بیشتر می‌شود و مولکول‌های مغناطیسی بیشتری در هسته منظم می‌شوند تا این که 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 ۳۳-۱).

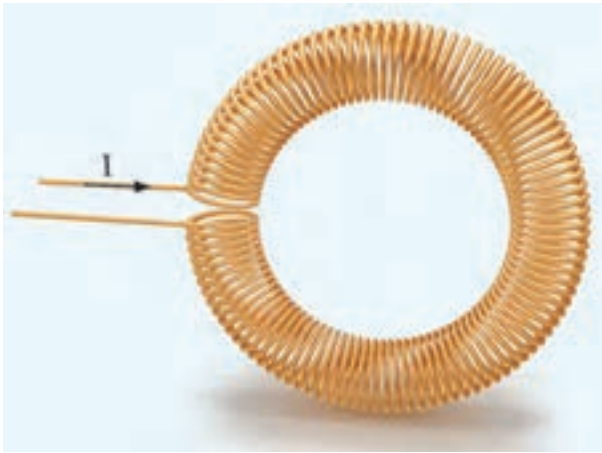


شکل ۳۳-۱

پس از اشباع هسته در صورتی که 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



شکل ۳۶-۱

حل:

- شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۱۰ - ۱) به دست

$$\mu_o = \frac{B_o}{H} \quad \text{می آید.}$$

$$H_o = \frac{B_o}{\mu_o} = \frac{0.6}{4\pi \times 10^{-7}} = 50000 \left[\frac{A.turn}{m} \right]$$

- جریان سیم پیچ از رابطه (۷ - ۱) به دست می آید.

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

$$I = \frac{H \cdot \ell_c}{N} = \frac{50000 \times 10 \times 10^{-2}}{1000} = 50 [A]$$

مثال ۱۳-۱ - اگر هسته سیم پیچ مثال (۱۲ - ۱)

از فولاد الکتریکی M-5 فرض شود، جریان الکتریکی سیم پیچ چند آمپر می شود؟

حل:

- ابتدا از منحنی شکل (۲۹ - ۱) شدت میدان مغناطیسی برای تولید چگالی میدان ۱/۶ وبر بر مترمربع

به دست می آید.

$$B = 1/6 \frac{wb}{m^2} \xrightarrow[\text{شکل (۲۷-۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} H = 60 \left[\frac{A.turn}{m} \right]$$

در شکل (۳۵ - ۱) مشاهده می شود 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» می باشد. 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 می دهند و از رابطه (۱۰ - ۱) به دست می آید.

$$\mu_o = \frac{B_o}{H_o} \quad (10 - 1)$$

در این رابطه:

B چگالی فوران مغناطیسی در خلأ

H شدت میدان مغناطیسی در خلأ

μ_o ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ

ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ همواره مقداری ثابت

دارد و برابر است با:

$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \left[\frac{wb}{A.turn.m} \right] \quad (11 - 1)$$

مثال ۱۲-۱ - سیم پیچی بدون هسته در خلأ

دارای ۱۰۰۰ حلقه و طول متوسط ۱۰ سانتی متر در شکل (۳۶ - ۱) نشان داده شده است. چگالی فوران مغناطیسی درون این سیم پیچ در خلأ ۰/۶ وبر بر متر مربع اندازه گیری شده است. جریان الکتریکی سیم پیچ چند آمپر است؟

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

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

$$I = \frac{H \cdot \ell_c}{N} = \frac{60 \times 10 \times 10^{-2}}{1000} = 0.006 [A]$$

فعالیت

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

۱۶ - ۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی

ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ 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 μ_0 را «ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی»^{۱)} گویند و آن را با μ_r نمایش می‌دهند که از رابطه (۱۲ - ۱) به‌دست می‌آید.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (12 - 1)$$

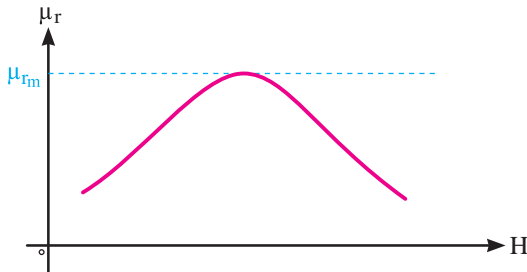
ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی، نسبت دو ضریب نفوذ مغناطیسی است و بدون واحد است. معمولاً کارخانه‌های تولیدکننده فولاد مغناطیسی، منحنی ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r بر حسب شدت میدان مغناطیسی H تولیدات خود را ارائه می‌کنند تا مصرف‌کننده با استفاده از آن ضریب نفوذ مغناطیسی

μ را از رابطه (۱۳ - ۱) به‌دست آورد.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (13 - 1)$$

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 - ۱) نشان داده است.



شکل ۳۷ - ۱

منحنی شکل (۳۷ - 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 این که 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:

- مواد دیامغناطیس^۱

- مواد پارامغناطیس^۲

- مواد فرومغناطیس^۳

است با:

$$H = \frac{NI}{\ell_C} = \frac{252 \times 0.1}{28 \times 10^{-2}} = 90 \left[\frac{A.turn}{m} \right]$$

از منحنی شکل (۲۸ - ۱) ضریب نفوذ نسبی برابر

است با:

$$H = 90 \left[\frac{A.turn}{m} \right] \xrightarrow{\text{منحنی شکل (۲۸ - ۱)}} \mu_r = 6000$$

از رابطه (۱۳ - ۱) ضریب نفوذ مغناطیسی برابر

است با:

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} \times 6000 = 7.5 \times 10^{-3} \left[\frac{wb}{A.turn.m} \right]$$

پرسش ۴ - ۱

پرسش‌های کامل کردنی

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

۲ - در ناحیه اشباع تغییر تاثیر چندانی بر نمی‌گذارد.

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

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

۵ - واحد ضریب نفوذ مغناطیسی است.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی مواد فرومغناطیس مقدار ثابتی دارد.

☐ غلط

☐ صحیح

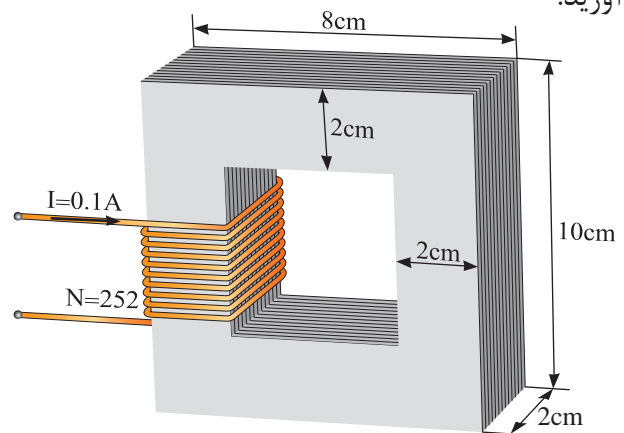
فعالیت

۱ - افزایش دمای هسته و فرکانس جریان سیم‌پیچ

چگونه باعث کاهش ضریب نفوذ مغناطیسی هسته می‌شوند؟

مثال ۱۴ - ۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی μ هسته

شکل (۳۸ - ۱) که از جنس فولاد ورق است را به دست آورید.



شکل ۳۸ - ۱

حل:

محیط بیرونی هسته برابر است با:

$$\ell_{C_1} = 2(10 + 8) = 36 [cm]$$

محیط درونی هسته برابر است با:

$$\ell_{C_2} = 2(6 + 4) = 20 [cm]$$

محیط متوسط برابر است با:

$$\ell_C = \frac{36 + 20}{2} = 28 [cm]$$

شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ - ۱) برابر

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

☐ غلط ☐ صحیح

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

☐ غلط ☐ صحیح

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

☐ غلط ☐ صحیح

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

☐ غلط ☐ صحیح

پرسش‌های تشریحی

۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی را تعریف کنید.

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

۳ - متداول‌ترین مواد فرومغناطیس از چه فلزاتی ساخته می‌شوند؟

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

۵ - ناحیه اشباع نشده منحنی مغناطیسی را تعریف کنید.

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

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

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

تمرین ۴ - ۱

۱ - هسته فرومغناطیسی با ضریب نفوذ مغناطیسی $\frac{wb}{A \cdot \text{turn.m}} = 0.5$ 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 - 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 - هسته با جنس فولاد ورق

ب - هسته با جنس فولاد الکتریکی M-5

ج - از مقایسه نتایج بندهای الف و ب چه نتیجه‌ای به دست می‌آید؟

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

الف - بدون هسته در خلأ

ب - با هسته از جنس فولاد الکتریکی M-5

ج - از مقایسه نتایج بندهای الف و ب چه نتیجه‌ای به دست می‌آید؟

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

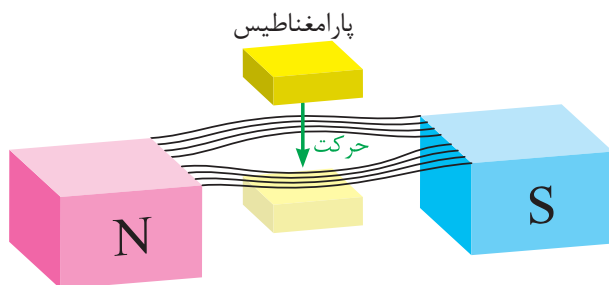
کمی از یک بیشتر است. آلومینیم، هوا و پلاتین از این مواد هستند.

مواد پارامغناطیس، مولکول‌های مغناطیسی ضعیفی دارند؛ هنگامی که مواد پارامغناطیس در میدان مغناطیسی آهن‌ربای قوی مطابق شکل (۴۱ - ۱) قرار می‌گیرند:

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

- به طرف ناحیه قوی میدان مغناطیسی کشیده می‌شوند. عامل این حرکت نیروی جاذبه بین مولکول‌های مغناطیسی این مواد و میدان مغناطیسی است.

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

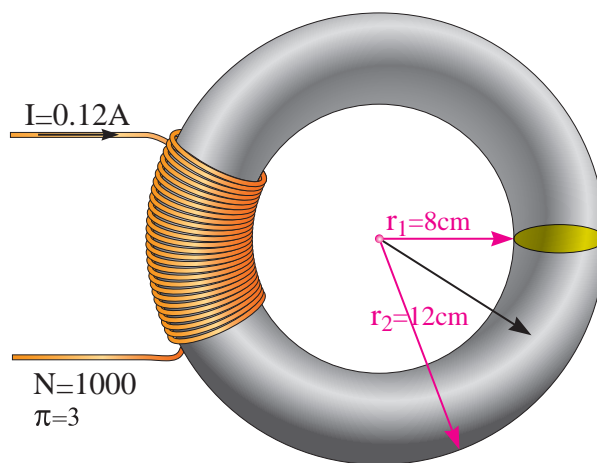


شکل ۴۱ - ۱

۳ - ۱۶ - ۱ - مواد فرومغناطیس

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

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



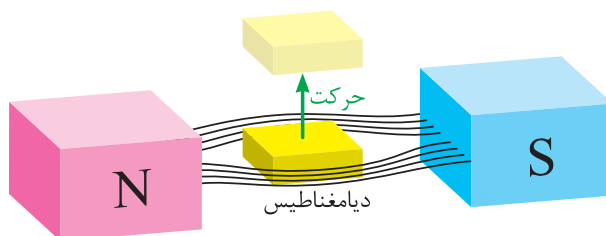
شکل ۳۹ - ۱

۱ - ۱۶ - ۱ - 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 مواد دیامغناطیس مولکول‌های مغناطیسی بوجود نمی‌آید. هنگامی که مواد دیامغناطیس در میدان مغناطیسی آهن‌ربای قوی مطابق شکل (۴۰ - ۱) قرار می‌گیرند:

- فوران مغناطیسی را از خود عبور نمی‌دهند.
- میدان مغناطیسی را غیر یکنواخت می‌کنند.
- از طرف میدان مغناطیسی دفع می‌شوند.



شکل ۴۰ - ۱

۲ - ۱۶ - ۱ - مواد پارامغناطیس

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r مواد پارامغناطیس

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

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

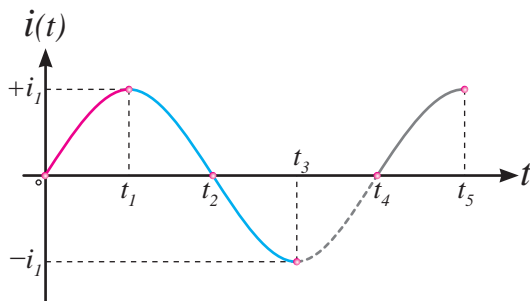
- به آهن‌ربا تبدیل می‌شوند و با خروج از میدان مغناطیسی، خاصیت آهن‌ربایی خود را از دست نمی‌دهند.

اگر دمای مواد فرومغناطیس از یک مقدار معین که دمای «کوری»^۱ نامیده می‌شود بالاتر برود هم‌سویی مولکول‌های مغناطیسی از بین می‌رود و این مواد پارامغناطیس می‌شوند.^۲

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

مواد دیامغناطیس		مواد پارامغناطیس		مواد فرومغناطیس	
μ_r	ماده	μ_r	ماده	μ_r	ماده
۰/۹۹۹۷۵	جیوه	۱/۰۰۰۰۰۰۰۴	هوا	تا ۶۰۰۰	آهن بدون آلیاژ
۰/۹۹۹۹۸۱	نقره	۱/۰۰۰۰۰۰۰۳	اکسیژن	تا ۶۵۰۰	فولاد الکتریکی
۰/۹۹۹۸۸	قلع	۱/۰۰۰۰۰۰۲۲	آلومینیم	۳۰۰۰۰۰	آهن نیکل آلیاژ
۰/۸۹۹۹۱	آب	۱/۰۰۰۰۰۰۳۶	پلاتین	۱۰۰۰۰۰	فریت مغناطیسی

جدول ۱-۱

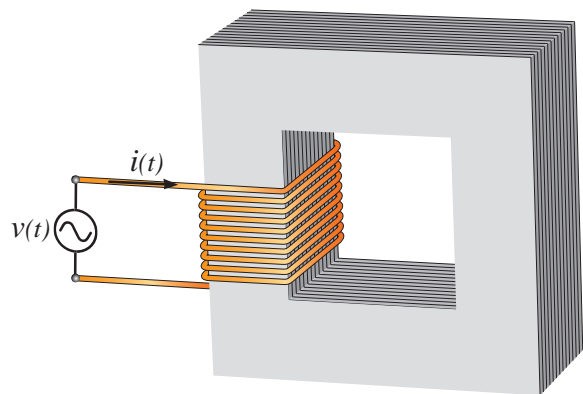


شکل ۱-۴۳

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

۱۷-۱ - حلقه هیستریزیس

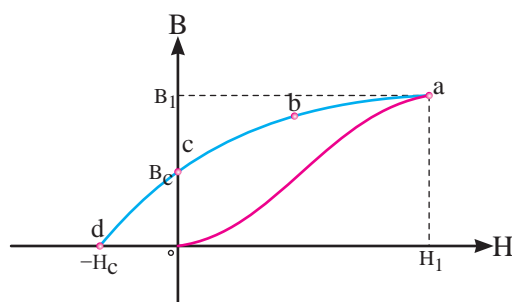
سیم‌پیچی با هسته فرومغناطیس متصل به یک منبع متناوب سینوسی در شکل (۴۲ - ۱) نشان داده شده است، که از آن جریان الکتریکی متناوب $i(t)$ به شکل موج (۴۳ - ۱) می‌گذرد.



شکل ۱-۴۲

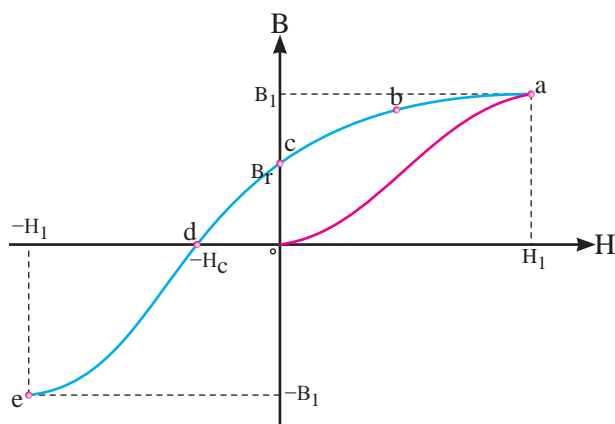
۲. برای آهن دمای کوری ۱۰۴۳ درجه کلون است.

۱. Curie



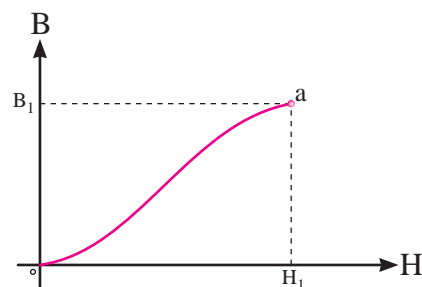
شکل ۱-۴۶

با افزایش شدت میدان مغناطیسی H در جهت وارونه، چگالی فوران مغناطیسی B هسته مطابق منحنی de در شکل (۱-۴۷) تغییر خواهد کرد.



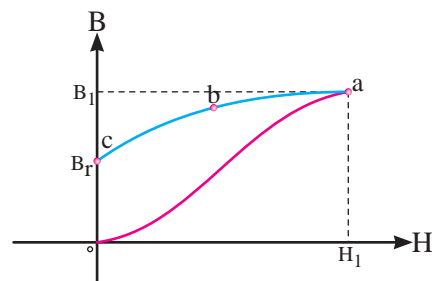
شکل ۱-۴۷

چگالی فوران مغناطیسی $-B_1$ در نقطه e مربوط به شدت میدان مغناطیسی $-H_1$ متناظر با $-i_1$ است. بعد از زمان t_p با تغییر جریان الکتریکی $i(t)$ شدت میدان مغناطیسی H تغییر خواهد کرد و منحنی $B-H$ مسیر ef را مطابق شکل (۱-۴۸) دنبال خواهد کرد. تا با صفر شدن جریان الکتریکی در t_p ، شدت میدان مغناطیسی H صفر می شود و چگالی فوران مغناطیسی به $-B_r$ می رسد.



شکل ۱-۴۴

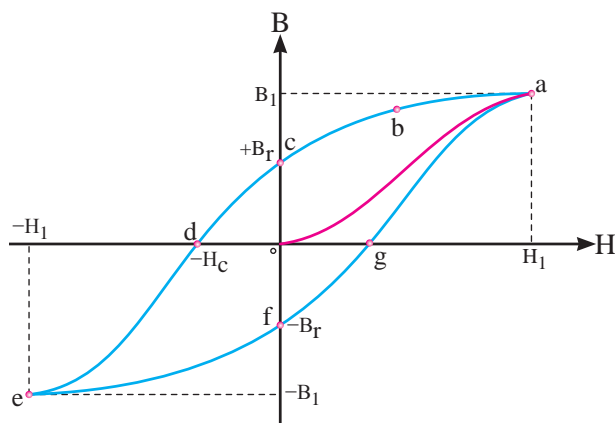
بعد از زمان t_p جریان الکتریکی $i(t)$ رو به کاهش می گذارد و متناظر با آن شدت میدان مغناطیسی H نیز کاهش می یابد و منحنی مغناطیسی مسیر abc را مطابق شکل (۱-۴۵) دنبال خواهد کرد.



شکل ۱-۴۵

با صفر شدن جریان در t_p ، شدت میدان مغناطیسی H صفر می شود اما چگالی فوران مغناطیسی هسته به B_r می رسد. چگالی فوران مغناطیسی B_r «پس ماند» هسته نامیده می شود.

بعد از زمان t_p جهت جریان الکتریکی $i(t)$ سیم پیچ معکوس می شود؛ لذا شدت میدان مغناطیسی H وارونه می گردد. چگالی فوران مغناطیسی B_r در هسته کاهش می یابد و در مقداری از H مثلاً $-H_c$ از میان خواهد رفت و صفر می شود. شدت میدان مغناطیسی $-H_c$ که پس ماند هسته B_r را از بین می برد، «شدت میدان مغناطیسی خنثی کننده» نامیده می شود. شکل (۱-۴۶)

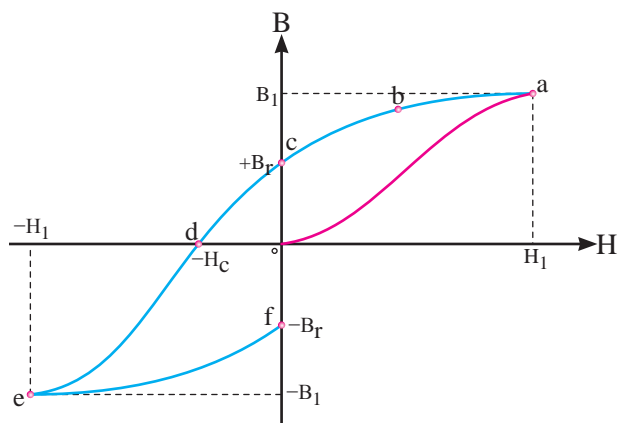


شکل ۵۰- ۱

حلقه پس ماند یا هیستریزیس نشان می‌دهد:
 - رابطه بین چگالی فوران مغناطیسی B و شدت مغناطیسی H غیر خطی و چند مقداری است.
 - اگرچه جریان الکتریکی سیم‌پیچ در نقاط C و F صفر است، اما هسته مغناطیس می‌باشد و دارای پس ماند مغناطیسی است.

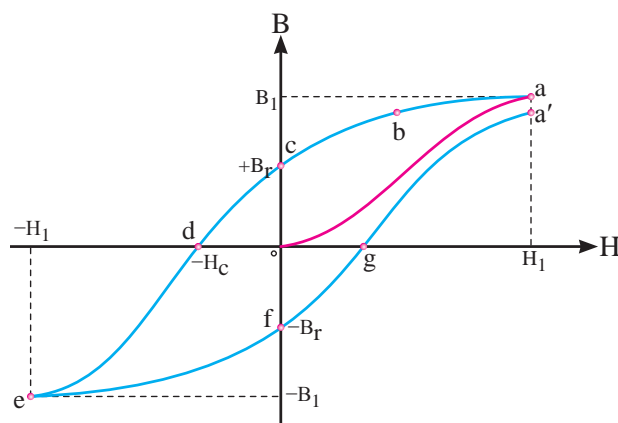
- به ازای یک حلقه هیستریزیس، جهت شدت میدان مغناطیسی هسته عوض می‌شود؛ لذا مولکول‌های مغناطیسی هسته می‌گردند و جهت میدان مغناطیسی در هسته تغییر می‌کند.

به ازای هر سیکل جریان الکتریکی سیم‌پیچ، یک بار حلقه هیستریزیس تکرار می‌شود. بنابراین در هر ثانیه تعداد حلقه‌های هیستریزیس 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 «تلفات هیستریزیس» تعریف می‌کنند. تلفات هیستریزیس به صورت حرارت در هسته ظاهر می‌شود و تابع فرکانس



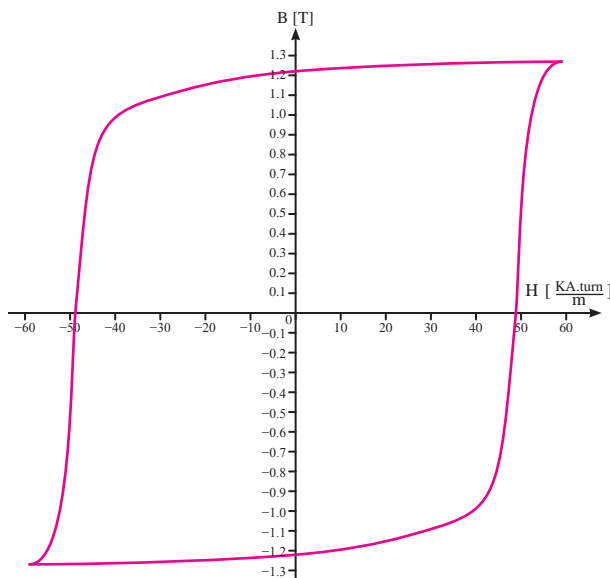
شکل ۴۸- ۱

بعد از زمان t_f 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- ۱).



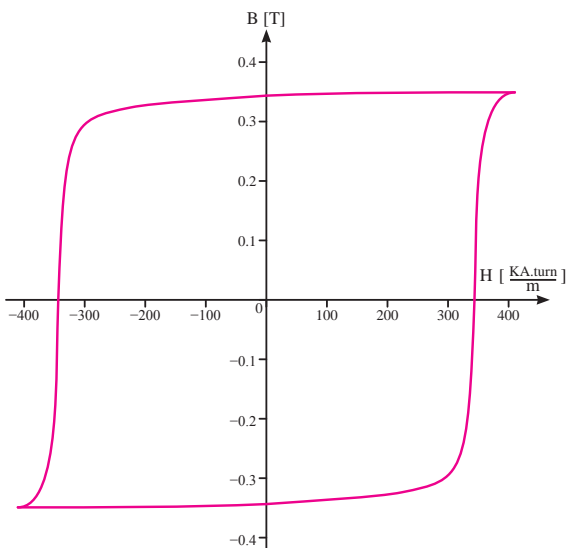
شکل ۴۹- ۱

باید دانست حلقه منحنی مغناطیسی بسته نمی‌شود و پس از چند سیکل مغناطیس شدن هسته حلقه تقریباً بسته می‌شود. این شکل به «حلقه پس ماند» یا «حلقه هیستریزیس» معروف است (شکل ۵۰- ۱).



شکل ۵۲ - ۱

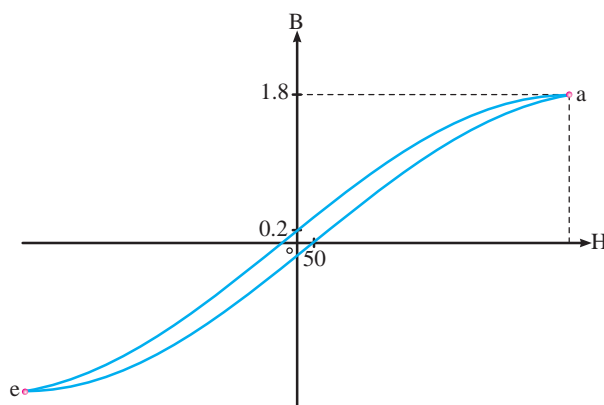
در مدارهای مغناطیسی که در فرکانس‌های رادیویی و مخابراتی کار می‌کنند، جنس هسته از مواد فرومغناطیس سرامیکی موسوم به «فریت»^۵ انتخاب می‌شود. فریت از ترکیب اکسید آهن و پودرهای کربنات باریم یا استرونیوم ساخته می‌شود. چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند B_r در فریت کمتر از النیکو است، اما شدت میدان خنثی‌کننده H_c در فریت بیشتر از النیکو می‌باشد. حلقه هیستریزیس فریت استرونیوم در شکل (۵۳ - ۱) نشان داده شده است.



شکل ۵۳ - ۱

جریان الکتریکی سیم‌پیچ است و متناسب با مساحت حلقه هیستریزیس می‌باشد. بدیهی است در جریان الکتریکی مستقیم هسته تلفات هیستریزیس ندارد. چرا؟ در ماشین‌های الکتریکی، ترانسفورمرها و آهن‌رباهای موقتی جنس هسته از مواد فرومغناطیسی موسوم به «آهن نرم»^۱ انتخاب می‌شود.

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



شکل ۵۱ - ۱

در آهن‌رباهای دائم^۲ جنس هسته غالباً آلیاژی از آهن، نیکل و کبالت موسوم به «آهن سخت»^۳ انتخاب می‌شود. یک دسته از این آلیاژها «النیکو»^۴ است که چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند B_r آنها بسیار زیاد می‌باشد. حلقه هیستریزیس آهن سخت وسیع است و شدت میدان خنثی‌کننده H_c نسبتاً بزرگی دارند. هیستریزیس النیکو^۵ در شکل (۵۲ - ۱) نشان داده شده است.

پرسش ۵ - ۱

پرسش‌های کامل کردنی

- ۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی مواد فرومغناطیسی بین تا است.
- ۲ - در ماشین‌های الکتریکی جنس هسته از موسوم به انتخاب می‌شود.
- ۳ - در آهن‌رباهای جنس هسته از انتخاب می‌شود.
- ۴ - در مدارهای مغناطیسی مخابراتی جنس هسته از موسوم به انتخاب می‌شود.
- ۵ - ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی مواد دیامغناطیس است.
- ۶ - ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی مواد پارامغناطیس است.
- ۷ - تلفات هیستریزیس تابع و سیم‌پیچ است.

پرسش‌های صحیح، غلط

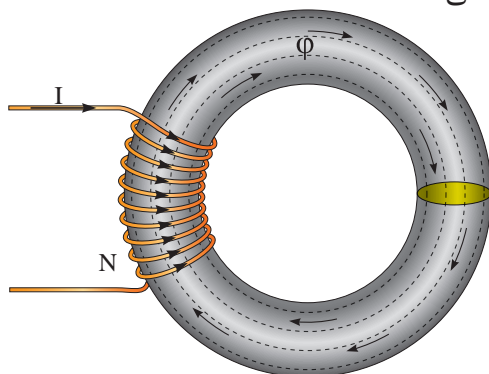
- ۱ - در مواد دیامغناطیس مولکول‌های مغناطیسی به‌وجود نمی‌آیند.
☐ غلط ☐ صحیح
- ۲ - مواد پارامغناطیس، مولکول‌های مغناطیسی ضعیفی ندارند.
☐ غلط ☐ صحیح
- ۳ - تلفات هیستریزیس به‌صورت حرارت در هسته ظاهر می‌شود.
☐ غلط ☐ صحیح

پرسش‌های تشریحی

- ۱ - رفتار مواد پارامغناطیس در میدان مغناطیسی را شرح دهید.
- ۲ - رفتار مواد فرومغناطیس در میدان مغناطیسی را شرح دهید.
- ۳ - چند نمونه از مواد دیا، پارا و فرومغناطیس را نام ببرید.
- ۴ - دمای کوری را تعریف کنید.
- ۵ - شدت میدان خنثی‌کننده را تعریف کنید.
- ۶ - چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند را تعریف کنید.
- ۷ - تلفات هیستریزیس را تعریف کنید.
- ۸ - ویژگی‌های مغناطیسی آهن سخت را بنویسید.
- ۹ - حلقه هیستریزیس در مواد مغناطیسی را با یکدیگر مقایسه کنید.

۱۸ - ۱ - مدارهای مغناطیسی

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



شکل ۵۴ - ۱ مدار مغناطیسی

- این پدیده از بعضی جهات مشابه جریان الکتریکی است که یک باتری در هادی جاری می‌کند (شکل ۵۵ - ۱).

φ مدار مغناطیسی \longleftrightarrow 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 \longleftrightarrow مشابه R مدار الکتریکی

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

$$R = \frac{E}{I} \quad (1 - 14)$$

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

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} \quad (1 - 15)$$

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



شکل ۵۵ - 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.

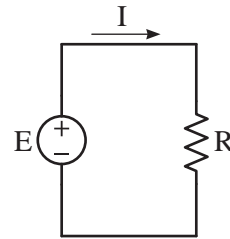
وجه تشابه مدار مغناطیسی شکل (۵۴ - ۱) با مدار الکتریکی شکل (۵۵ - ۱) عبارت است از:

● «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 \longleftrightarrow مشابه E مدار الکتریکی

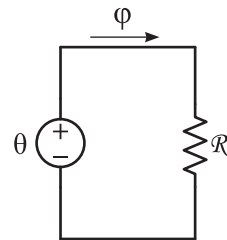
● جریان الکتریکی I ، در هادی مدار الکتریکی جاری می‌شود و فوران مغناطیسی φ در هسته مدار مغناطیسی جاری می‌شود. بنابراین رفتار فوران مغناطیسی و جریان الکتریکی نیز شبیه به یکدیگر است؛ یعنی:

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



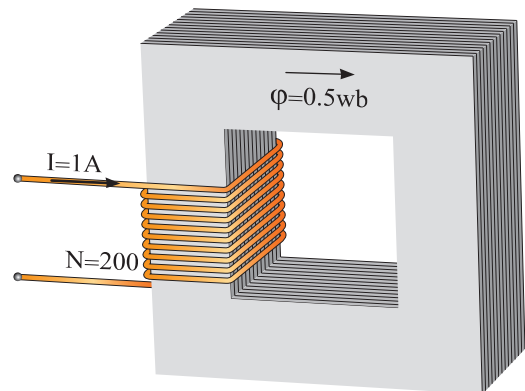
شکل ۵۶ - ۱

با توجه به وجه تشابه میان مدارهای مغناطیسی با مدارهای الکتریکی می توان مدار الکتریکی معادل شکل (۵۷ - ۱) را با تقریب مناسبی برای مدار مغناطیسی شکل (۵۴ - ۱) در نظر گرفت.



شکل ۵۷ - ۱

مثال ۱۵ - ۱ - فوران مغناطیسی در هسته شکل (۵۸ - ۱) برابر 0.5 wb است. مقاومت مغناطیسی هسته چقدر می باشد؟



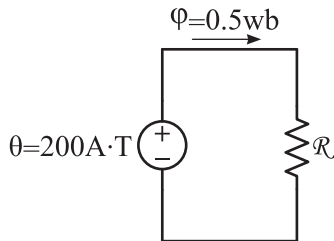
شکل ۵۸ - ۱

حل:

- نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۶ - ۱) برابر است با:

$$\theta = NI = 200 \times 1 = 200 \text{ [A.turn]}$$

- مدار الکتریکی معادل با درج مقادیر مغناطیسی بر روی آن به صورت شکل زیر است.



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

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\phi} = \frac{200}{0.5} = 400 \left[\frac{\text{A.turn}}{\text{wb}} \right]$$

برای تعیین رابطه مقاومت مغناطیسی \mathcal{R} به روش زیر عمل می شود:

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

$$B = \frac{\phi}{A} \Rightarrow \phi = B.A \quad (16 - 1)$$

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

$$\mu = \frac{B}{H} \Rightarrow B = \mu H \quad (17 - 1)$$

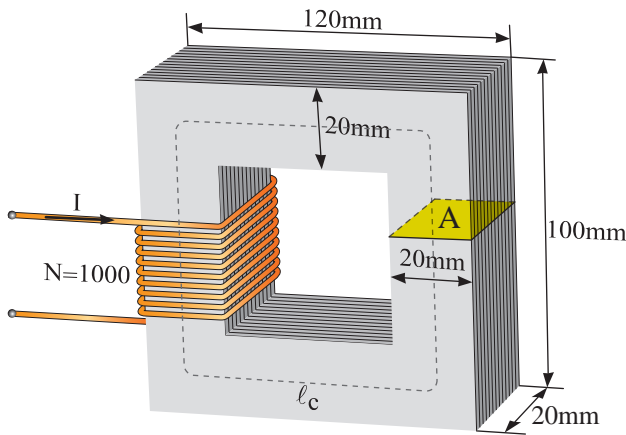
- با جایگزینی مقدار μ از رابطه (۱۳ - ۱) در رابطه (۱۷ - ۱) به دست می آید:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (18 - 1)$$

فعالیت

وجه تشابه رابطه مقاومت مغناطیسی $\mathcal{R} = \frac{\ell_c}{\mu \cdot A}$ با
رابطه مقاومت الکتریکی $R = \frac{\ell}{\sigma \cdot A}$ چیست؟

مثال ۱۶-۱ - اگر فوران مغناطیسی در مدار
مغناطیسی شکل (۵۹-۱) برابر با ۴ mwb باشد
جریان سیم‌پیچ چند آمپر است؟ در صورتی که $\pi = 3$
و $\mu_r = 6000$ باشد.



شکل ۵۹-۱

حل:

- محیط بیرونی هسته برابر است با:

$$\ell_1 = (120 + 100) \times 2 = 440 \text{ mm}$$

- محیط درونی هسته برابر با:

$$\ell_2 = (80 + 60) \times 2 = 280 \text{ mm}$$

- محیط متوسط برابر است با:

$$\ell_c = \frac{\ell_1 + \ell_2}{2} = \frac{440 + 280}{2} = 360 \text{ mm}$$

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

$$A_c = 20 \times 20 = 400 \text{ mm}^2$$

- با جایگزینی رابطه (۱۸-۱) در (۱۶-۱) به دست
می‌آید:

$$\phi = \mu_o \mu_r \cdot H \cdot A \quad (19-1)$$

- با جایگزینی رابطه (۱۹-۱) و (۶-۱) در رابطه
(۱۵-۱) به دست می‌آید:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\phi} \Rightarrow \mathcal{R} = \frac{NI}{\mu_o \mu_r \cdot H \cdot A} \quad (20-1)$$

- از رابطه رابطه (۷-۱) به دست می‌آید:

$$H = \frac{NI}{\ell_c} \Rightarrow \ell_c = \frac{NI}{H} \quad (21-1)$$

- با جایگزینی رابطه (۲۱-۱) در رابطه (۲۰-۱)
به دست می‌آید:

$$\mathcal{R}_c = \frac{\ell_c}{\mu_o \mu_r A} \quad (22-1)$$

در این رابطه:

ℓ_c طول متوسط هسته بر حسب [m]

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

μ_r ضریب نفوذ نسبی هسته بدون واحد

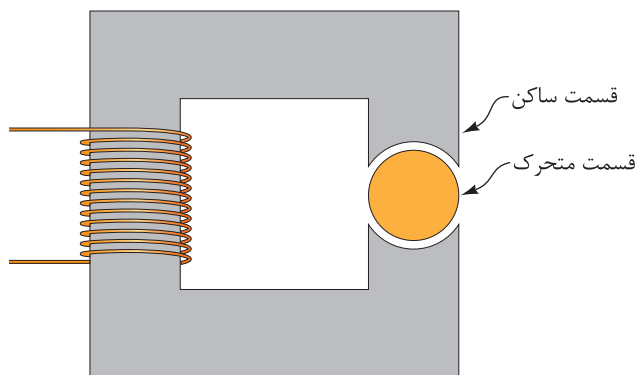
A سطح مقطع هسته بر حسب [m²]

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

اگر حاصل $\mu_o \mu_r$ از رابطه (۱۳-۱) با μ نشان داده
شود رابطه (۲۲-۱) به صورت رابطه (۲۳-۱) در
می‌آید.

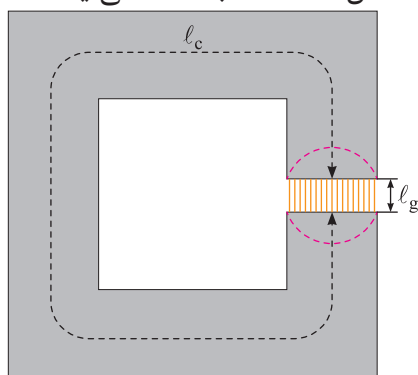
$$\mathcal{R} = \frac{\ell_c}{\mu \cdot A}$$

متحرک می‌باشند، بین قسمت متحرک و ساکن در هسته فرومغناطیس «شکاف هوایی» ایجاد می‌شود.



شکل ۶۰-۱

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



شکل ۶۱-۱

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

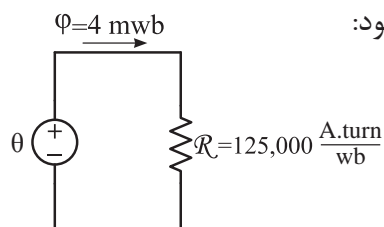
اگر در مدار مغناطیسی طول شکاف هوایی l_g از ابعاد سطح مقطع هسته مغناطیسی بسیار کوچک‌تر باشد، می‌توان با روش مدار الکتریکی معادل آن را تحلیل کرد. در صورتی که طول شکاف هوایی l_g از ابعاد سطح مقطع هسته مغناطیسی بزرگ‌تر باشد، فوران مغناطیسی مطابق شکل (۶۲-۱) به بیرون «نشت»

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

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A} = \frac{360 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 6000 \times 400 \times 10^{-6}} = 125000 \left[\frac{A \cdot \text{turn}}{\text{wb}} \right]$$

- مدار الکتریکی معادل رسم و مقادیر بر روی آن

درج می‌شود:



- نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۱۵-۱) برابر

است با:

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

$$\theta = \mathcal{R}_c \cdot \phi = 125000 \times 4 \times 10^{-3} = 500 [A]$$

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

$$\theta = NI$$

$$I = \frac{\theta}{N} = \frac{500}{1000} = 0.5 [A]$$

۱۹-۱- 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 (۶۰-۱) دارند. وسایل تبدیل انرژی مانند ژنراتورها و موتورهای الکتریکی که دارای اجزای

رابطه (۲۳ - ۱) به دست می آید:

$$\mathcal{R}_c = \frac{\ell_c}{\mu_o \mu_r A} \quad (1 - 23)$$

و مقاومت مغناطیسی شکاف هوایی \mathcal{R}_g از رابطه (۲۴ - ۱) به دست می آید:

$$\mathcal{R}_g = \frac{\ell_g}{\mu_o \mu_r A} \quad (1 - 24)$$

در این رابطه:

ℓ_g طول شکاف هوایی بر حسب [m]

$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ بر حسب $\left[\frac{wb}{A.turn.m} \right]$ ضریب نفوذ نسبی هوا^۱

A سطح مقطع هسته بر حسب [m^۲]

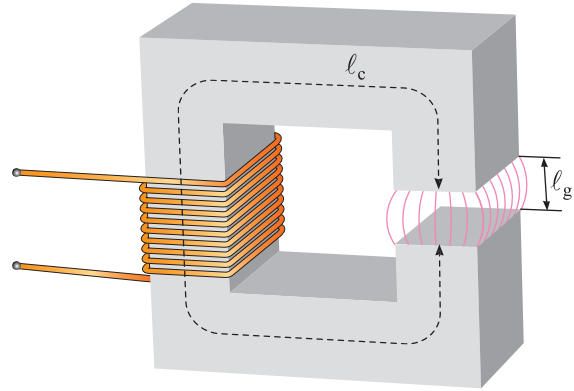
\mathcal{R}_g مقاومت مغناطیسی بر حسب $\left[\frac{A.turn}{wb} \right]$

قوانین سری و موازی شدن مقاومت های مغناطیسی همانند مقاومت های الکتریکی است. به طوری که مقاومت مغناطیسی معادل^۲، n مقاومت مغناطیسی سری از رابطه (۲۵ - ۱) به دست می آید^۳:

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \dots + \mathcal{R}_n \quad (1 - 25)$$

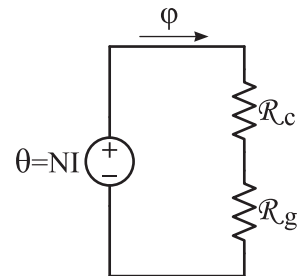
مثال ۱۷ - ۱ - در مدار مغناطیسی شکل (۵۹ - ۱) شکاف هوایی به طول ۰/۴۸ mm مطابق شکل (۶۴ - ۱) ایجاد شده است. با فرض این که طول

می کند و سطح مقطع موثر شکاف هوایی بزرگ تر از سطح مقطع هسته مغناطیسی دو طرف آن می شود، لذا نمی توان با روش مدار الکتریکی معادل آن را تحلیل کرد.



شکل ۶۲ - ۱

اکنون با فرض این که طول شکاف هوایی ℓ_g در شکل (۶۱ - ۱) به حد کافی کوچک است و چگالی فوران مغناطیسی B هسته نیز یکنواخت می باشد، می توان مدار الکتریکی معادل شکل (۶۳ - ۱) را برای تحلیل آن در نظر گرفت. از آنجایی که فوران مغناطیسی، مسیر هسته و شکاف هوایی را طی می کند، لذا مقاومت مغناطیسی آنها در مدار الکتریکی معادل با هم سری می شوند.



شکل ۶۳ - ۱

در شکل (۶۳ - ۱) مقاومت مغناطیسی هسته \mathcal{R}_c از

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

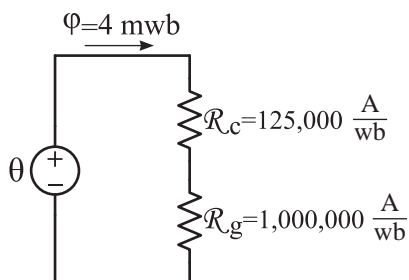
۲. Equal Reluctance

۳. مقاومت مغناطیسی معادل، n مقاومت مغناطیسی موازی از رابطه مقابل به دست می آید:

$$\mathcal{R}_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{\mathcal{R}_1} + \frac{1}{\mathcal{R}_2} + \dots + \frac{1}{\mathcal{R}_n}}$$

$$= 100000 \left[\frac{A \cdot \text{turn}}{wb} \right]$$

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



- مقاومت مغناطیسی معادل از رابطه (۲۵ - ۱) برابر

است با:

$$R_{eq} = R_c + R_g = 125000 + 1000000$$

$$= 1125000 \left[\frac{A \cdot \text{turn}}{wb} \right]$$

- نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۱۵ - ۱) برابر

است با:

$$R = \frac{\theta}{\phi} \Rightarrow \theta = R \cdot \phi$$

$$\theta = 1125000 \times 4 \times 10^{-3} = 4500 \left[A \cdot \text{turn} \right]$$

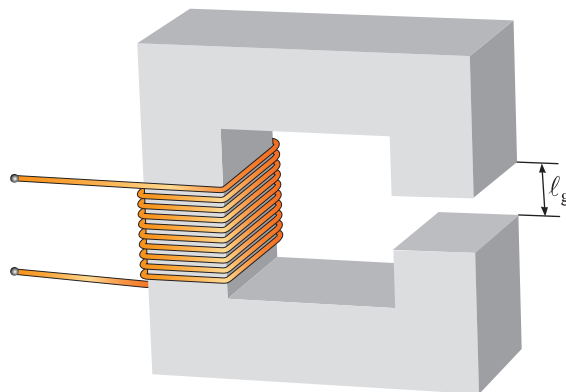
- جریان سیم‌پیچ از رابطه (۶ - ۱) برابر است با:

$$\theta = NI \Rightarrow I = \frac{\theta}{N} = \frac{4500}{1000} = 4.5 \left[A \right]$$

فعالیت

چرا با ایجاد شکاف هوایی جریان سیم‌پیچ افزایش یافته است؟

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



شکل ۶۴ - ۱

حل:

- مقاومت مغناطیسی هسته تغییر نمی‌کند و برابر

است با:

$$R_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A} = 125000 \left[\frac{A \cdot \text{turn}}{wb} \right]$$

- طول شکاف هوایی بر حسب متر برابر است با:

$$l_g = 0.48 \times 10^{-3} \left[m \right]$$

- طول شکاف هوایی بسیار کوچک‌تر از ابعاد سطح

مقطع هسته می‌باشد؛ لذا سطح مقطع شکاف هوایی با

هسته برابر است؛ یعنی:

$$A_g = A_c = 400 \times 10^{-6} \left[m^2 \right]$$

- برای سهولت در محاسبات ضریب نفوذ نسبی هوا

برابر با: $\mu_r = 1$

- مقاومت مغناطیسی هوا از رابطه (۲۴ - ۱) برابر

است با:

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 \mu_r A} = \frac{0.48 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 1 \times 400 \times 10^{-6}}$$

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 - در مدار مغناطیسی فرض می شود تمام فوران مغناطیسی در هسته محبوس است. اما جزء کوچکی از فوران مغناطیسی هسته به هوای اطراف می گریزد. این فوران در بیرون هسته «شار نشی^۱» نام دارد.

۲ - در محاسبه مقاومت مغناطیسی، برای هسته یک طول مسیر متوسط و یک سطح مقطع مشخص فرض می شود. این فرض ها، مخصوصاً در مورد گوشه ها فرض های خیلی خوبی نیستند.

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

۴ - اگر در مسیر فوران مغناطیسی هسته، شکاف هوایی وجود داشته باشد، سطح مقطع موثر فاصله هوایی بزرگ تر از سطح مقطع هسته دو طرف آن است که در مدار معادل مغناطیسی سطح مقطع شکاف هوایی برابر سطح مقطع هسته فرض می شود.

روش های دیگری در تحلیل مدارهای مغناطیسی وجود دارد که به نتایج دقیق تری می انجامد. تحلیل مدارهای مغناطیسی به کمک « قانون نیروی محرکه مغناطیسی » یکی از این روش ها است.

پرسش ۶-۱

پرسش های کامل کردنی

۱ - مسیر بسته ای که فوران مغناطیسی در آن برقرار

می شود نامیده می شود.

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

۳ - مقاومت مغناطیسی مشابه در مدار الکتریکی است.

پرسش های صحیح، غلط

۱ - هسته از خود در مقابل فوران مغناطیسی «مقاومت مغناطیسی» نشان می دهد.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ - جریان الکتریکی مشابه نیروی محرکه مغناطیسی است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش های تشریحی

۱ - مدار الکتریکی و مدار مغناطیسی را تعریف کنید.

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

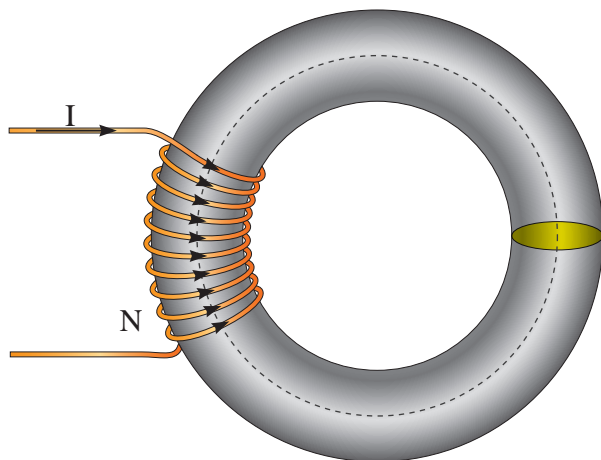
تمرین ۶-۱

۱ - مقاومت و فوران مغناطیسی در هسته یک مدار مغناطیسی به ترتیب $500 \frac{A \cdot turn}{wb}$ و $10 mwb$ می باشد. اگر جریان سیم پیچ روی هسته $20 mA$ باشد تعداد حلقه های سیم پیچ را به دست آورید.

۲ - بر روی یک هسته فرومغناطیسی مشابه شکل (۲۳ - ۱)، ۲۰۰ دور سیم پیچیده شده است. اگر جریان ۲ آمپر از سیم پیچ عبور کند. فوران مغناطیسی هسته را محاسبه نمایید. در صورتی که $r_1 = 30 cm$ ، $r_2 = 40 cm$ و $\mu_r = 1000$ باشد.

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

قانون نیروی محرکه مغناطیسی برای مدار مغناطیسی شکل (۱-۶۵) به صورت رابطه (۱-۲۸) در می‌آید.



شکل ۱-۶۵

$$\theta = H_C \cdot \ell_C \quad (1-28)$$

در این رابطه:

$$H_C \text{ شدت میدان مغناطیسی هسته بر حسب } \left[\frac{A \cdot \text{turn}}{m} \right]$$

ℓ_C طول متوسط هسته بر حسب m

$$\theta \text{ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ بر حسب } [A \cdot \text{turn}]$$

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 (۱-۶۶) باشد رابطه قانون نیروی محرکه مغناطیسی به صورت رابطه (۱-۲۹) نوشته می‌شود.

۳- اگر در مدار مغناطیسی تمرین ۲ شکاف هوایی به طول 5 mm ایجاد شود با فرض این که طول متوسط هسته تغییر نکرده باشد، فوران مغناطیسی هسته را محاسبه کنید.

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

۲۰-۱- 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 (۱-۲۶) نشان داده می‌شود:

$$\theta = \sum_{i=1}^n H_i \cdot \ell_i \quad (1-26)$$

در این رابطه:

$$\theta \text{ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ بر حسب } [A \cdot \text{turn}]$$

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

$$\ell_i \text{ طول متوسط قسمت } i \text{ ام مدار مغناطیسی بر حسب } [m]$$

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

$$\theta = H_1 \ell_1 + H_2 \ell_2 + \dots + H_n \ell_n \quad (1-27)$$

$$\varphi = \varphi_C = \varphi_g = \lambda [mwb]$$

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 - ۱) برابر است با:

$$A = A_C = A_g = 64 [cm^2]$$

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

$$B = \frac{9/28 \times 10^{-3}}{64 \times 10^{-4}} = 1/45 [T]$$

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

$$B = 1/45 \xrightarrow[\text{شکل (۲۷ - ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} H_C = 800 \left[\frac{A.turn}{m} \right]$$

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

$$H_g = \frac{B}{\mu_0} = \frac{1/45}{4\pi \times 10^{-7}} = 1154458 \left[\frac{A.turn}{m} \right]$$

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

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

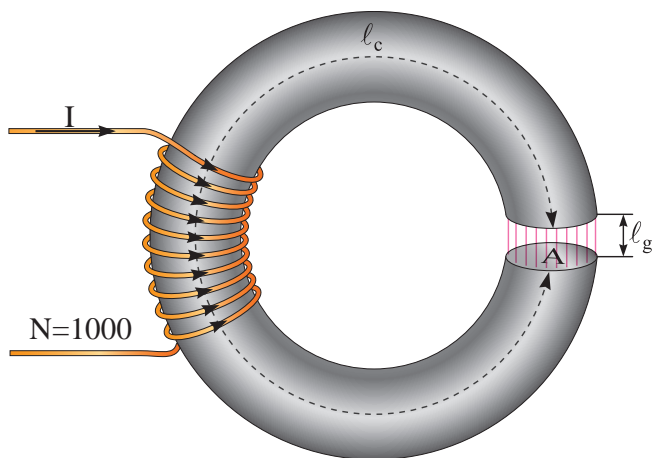
$$\theta = 1154458 \times 1/1 \times 10^{-3} + 800 \times 50 \times 10^{-2}$$

$$= 1670 [A]$$

از رابطه (۶ - ۱) شدت جریان به دست می‌آید.

$$\theta = NI$$

$$I = \frac{\theta}{N} = \frac{1670}{1000} = 1/6 [A.turn]$$



شکل ۶۶ - ۱

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

شدت میدان مغناطیسی هسته فرومغناطیسی H_C از منحنی مغناطیسی شکل‌های (۲۷ - ۱) و (۲۹ - ۱) با توجه به جنس هسته و شدت میدان مغناطیسی شکاف هوایی H_g از رابطه (۱۰ - ۱) به صورت $H_g = \frac{B}{\mu_0}$ پس از تعیین B به دست می‌آیند. مقادیر ℓ_g و ℓ_C با توجه به شکل هندسی مدار مغناطیسی محاسبه می‌شوند.

مثال ۱۸ - ۱ - مدار مغناطیسی مطابق شکل

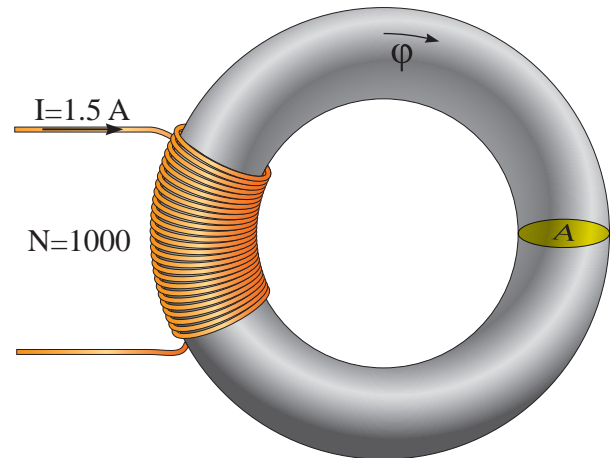
(۶۶ - ۱) دارای هسته فرومغناطیسی از جنس فولاد ورق به طول متوسط $\ell_C = 50 \text{ cm}$ و سطح مقطع $A_C = 64 \text{ cm}^2$ دارای یک شکاف هوایی به طول $\ell_g = 1/1 \text{ mm}$ و فوران مغناطیسی هسته $\varphi_C = 9/28 \text{ mwb}$ می‌باشد. جریان سیم‌پیچ را به کمک قانون نیروی محرکه مغناطیسی تعیین کنید.

حل:

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

مثال ۱۹-۱ - اگر در مثال ۱۸ - ۱ شکاف هوایی

مدار مغناطیسی با به هم رساندن هسته مغناطیسی مطابق شکل (۶۷ - ۱) از بین برود و جریان سیم پیچ ثابت بماند، فوران مغناطیسی هسته چند میلی وبر می شود؟



شکل ۶۷-۱

حل:

- نیروی محرکه مغناطیسی سیم پیچ از رابطه

(۶ - ۱) به دست می آید:

$$\theta = NI = 1000 \times 1 = 1000 [A.turn]$$

- شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ - ۱) به دست

می آید:

$$H_C = \frac{\theta}{\ell_C} = \frac{1000}{50 \times 10^{-2}} = 2000 \left[\frac{A.turn}{m} \right]$$

- با توجه به مقدار H_C از منحنی مغناطیس شکل

(۲۷ - ۱) مقدار B برای فولاد ورق به دست می آید:

$$H_C = 2000 \xrightarrow[\text{شکل (۲۷-۱)}]{\text{منحنی مغناطیس}} B = 1/6 [T]$$

- فوران مغناطیسی از رابطه (۳ - ۱) محاسبه می شود:

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

$$\varphi = B.A = 1/6 \times 64 \times 10^{-4} = 0.01 wb$$

- واحد فوران مغناطیسی به میلی وبر تبدیل می شود:

$$\frac{1 wb}{0.01} = \frac{1000 mwb}{\varphi} \Rightarrow \varphi = \frac{0.01 \times 1000}{1}$$

$$= 10 [mwb]$$

- با از بین رفتن شکاف هوایی، مقاومت مغناطیسی کمتر می شود و فوران مغناطیسی هسته افزایش می یابد. مدارهای مغناطیسی به گونه ای طراحی می شوند 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 ۷-۱

۱ - هسته مغناطیسی از جنس فولاد الکتریکی $M-5$

بدون فاصله هوایی به طول متوسط 40 cm و سطح

مقطع 50 cm^2 دارای فوران مغناطیسی $10 mwb$

می باشد. به روی این هسته یک سیم پیچ با 4000

حلقه قرار دارد. مطلوب است:

الف - شدت جریان سیم پیچ

ب - اگر یک فاصله هوایی 1 mm در هسته ایجاد

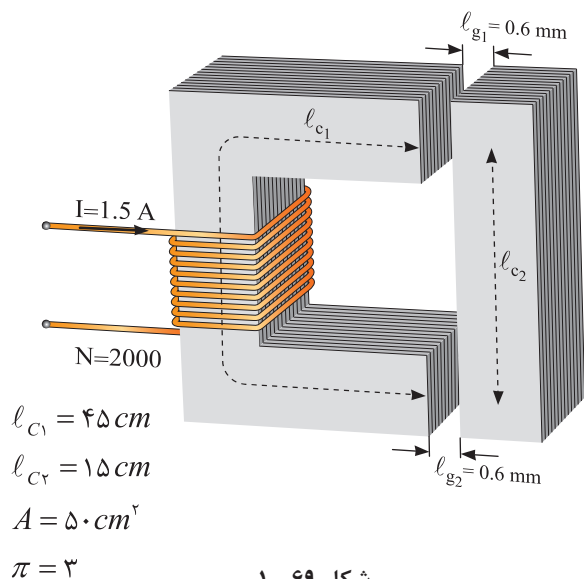
شود شدت جریان سیم پیچ چند آمپر خواهد شد؟

در صورتی که بخواهیم فوران هسته ثابت بماند.

۲ - یک مدار مغناطیسی با مقاومت مغناطیسی

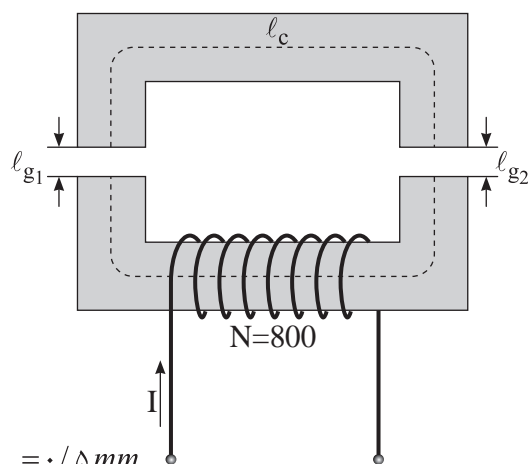
$$45000 \left[\frac{A.turn}{wb} \right] \text{ دارای فوران مغناطیسی } 10 mwb$$

می باشد. اگر تعداد دور سیم پیچ 1000 و طول متوسط



شکل ۱-۶۹

۵- یک هسته مغناطیسی از جنس فولاد الکتریکی $M-5$ مطابق شکل (۱-۷۰) مفروض است. در صورتی که بخواهیم فوران مغناطیسی 0.4 mwb در هسته برقرار شود شدت جریان سیم‌پیچ باید چند آمپر باشد؟



شکل ۱-۷۰

هسته 90 cm باشد مطلوب است:

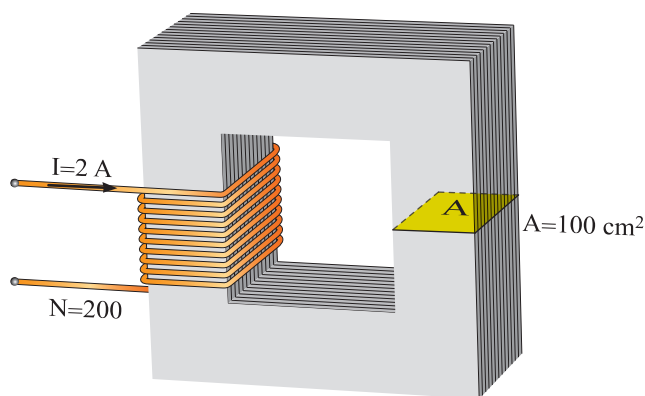
الف - جریان سیم‌پیچ

ب - شدت میدان هسته

۳- در مدار مغناطیسی شکل (۱-۶۸) فوران مغناطیسی هسته 10 mwb است؛ مطلوب است:

الف - مقاومت مغناطیسی هسته

ب - اگر یک فاصله هوایی $1/2 \text{ mm}$ در هسته ایجاد شود و بخواهیم فوران هسته همان مقدار قبلی بماند، جریان سیم‌پیچ را چند آمپر باید افزایش دهیم. ($\pi = 3$)



شکل ۱-۶۸

۴- در مدار مغناطیسی شکل (۱-۶۹) مطلوب است محاسبه:

الف - مقاومت مغناطیسی در صورتی که فوران مغناطیسی هسته 12 mwb باشد.

ب - ضریب نفوذ نسبی هسته